

Dedico este trabalho àqueles que estudam estruturas em rochas.

AGRADECIMENTOS

Provavelmente nenhum trabalho pode ser desenvolvido sem a ajuda e cooperação de pessoas ou instituições, principalmente nas Geociências. Aqui expresso meus sinceros agradecimentos a todos que ajudaram de qualquer maneira o seu desenvolvimento:

- Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências e ao Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica pela valiosa oportunidade de realizar um curso de mestrado e pelo apoio e suporte ao longo do mesmo.
- Companhia Vale do Rio Doce pela permissão de desenvolvimento do trabalho nas suas minas e pelo apoio financeiro, logístico e de infraestrutura durante os trabalhos de campo.
- Ministério da Educação / CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão de bolsa de mestrado durante os 24 meses deste trabalho.
- Funcionário da CVRD que ajudaram direta ou indiretamente neste trabalho, em especial: Henrile, Paulo Matias, Flávio, Aroni Monteiro, Gilberto, Sérgio Guedes, João Maria Bezerra, Jorginho, Ana Rogéria, Carlos Jestissom, João Queiroz, Juscelino, Manoel, Joãozinho, estagiários Marcílio e Agnaldo. A ajuda, disposição e companheirismo de vocês foi muito importante.
- Minha família pelo amor, incentivo constante (desde criancinha) e pelo porto seguro que sempre foi para mim.
- Meus colegas do CPGG: Alessandra, Aderson (Tachi), Débora, Ericona, Fabiola, Fhabio (Slot), Firmino (Aguilha), Francisco (Tatu), Márcia e Valéria que dividiram os momentos de cobrança (“e ai rapaziada, cadê a tese?”) e de felicidade (“Espocação cara....”).
- Aos amigos do Grupo de Geologia Estrutural (GES) pela divertida convivência diária e companheirismo: Wayne (Bradock), Charles (Miolo), Robertinho (Spoken) e Milena.

- O ultimo agradecimento é para o Professor, amigo e orientador Roberto Vizeu. Após esses dois anos cresci profissionalmente e pessoalmente com a sua contribuição. Você idealizou o trabalho e me convidou para executar. Muito obrigado chefe pela: confiança depositada em mim; paciência e dedicação durante os trabalhos de campo; atenção dispensada durante a elaboração e correção dos textos e figuras; discussão de idéias e soluções para os problemas; disponibilização de material bibliográfico e técnico e por um cantinho na sua sala (Desculpa a bagunça!). Sem o seu apoio e estímulo teria sido mais difícil realizar este trabalho. Muito obrigado. Um dia o GES vai ficar “ginásio”, espere!

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	v
LISTA DE TABELAS	XIII
RESUMO	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO I	
INTRODUÇÃO	3
1.1- APRESENTAÇÃO	3
1.2- OBJETIVOS	7
1.3 ATIVIDADES E MÉTODOS	8
1.4 CONCEITOS E TERMOS APLICADOS	11
1.4.1 Cisalhamento Puro e Simples	11
1.4.2 Reativação Tectônica e Retrabalhamento Tectônico	12
1.4.3 Transpressão e Transtensão	13
1.4.4 Falhas Direcionais	14
1.4.5 Dobras	16
CAPÍTULO II	
GEOLOGIA REGIONAL E GEOMORFOLOGIA DA SERRA DOS CARAJÁS	20
2.1 CONTEXTO GEOTECTÔNICO	20
2.2 ESTRATIGRAFIA	22
2.3 GEOCRONOLOGIA	25
2.4 MODELOS TECTÔNICOS PREVIAMENTE PROPOSTOS	28
2.5 GEOLOGIA DAS MINAS DOS PLATÔS A NORTE	32
2.5.1 Histórico	32
2.5.2 Geologia	33
2.5.3 Geologia Estrutural	37
2.6 GEOMORFOLOGIA	39

CAPÍTULO III	
LINEAMENTOS E TRAÇOS TECTÔNICOS REGIONAIS	42
3.1 INTRODUÇÃO	42
3.2 DADOS OBTIDOS ATRAVÉS DO SENSOR REMOTO	43
3.3 DISCUSSÕES SOBRE OS DADOS DE SENSORES REMOTOS	46
CAPÍTULO IV	
DADOS DE MAPEAMENTO GEOLÓGICO	49
4.1 – CONTATOS LITOLÓGICOS	49
4.2 – DOBRAS	63
4.3 – FRATURAS E FALHAS	82
4.4 – ZONAS DE CISALHAMENTO	90
4.5 – DIQUES	92
4.6 – ANÁLISE GEOMÉTRICA	93
4.6.1 Contatos Litológicos	94
4.6.2 Dobras	97
4.6.3 Fraturas	99
4.7 – ANÁLISE CINEMÁTICA	100
CAPÍTULO V	
INTERPRETAÇÃO TECTÔNICA PARA A REGIÃO	104
CAPÍTULO VI	
CONCLUSÕES	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111

ANEXOS

ANEXO 1 – SEÇÕES ESTRUTURAIS DA CAVA NORTE DA MINA N4E E MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS SEÇÕES ESTRUTURAIS NA CAVA NORTE DA MINA N4E

ANEXO 2 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS SEÇÕES ESTRUTURAIS NA ABA LESTE DA MINA N4E

ANEXO 3 – SEÇÕES ESTRUTURAIS DA ABA LESTE DA MINA N4E

ANEXO 4 – MAPA ESTRUTURAL DA CAVA NORTE DA MINA N4E

ANEXO 5 – MAPA ESTRUTURAL DA ABA LESTE DA MINA N4E

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1.1** - Mapa de localização da região de Carajás no contexto geológico do norte do Brasil..... 4
- Figura 1.2** – Localização dos platôs de rochas ferríferas e vulcânicas da Serra Norte na região de Carajás. Composição colorida das bandas 3R,4G e 5B Landsat TM, 1991 (CVRD/GAJAN)..... 5
- Figura 1.3** – Diagrama para classificação do estilo de dobras através de projeção estereográfica (modificado de Leyshon e Lisle, 1996)..... 10
- Figura 1.4** – Tipos de fluxo identificados pelo padrão de velocidades angulares (ω) e taxas de estiramento (ϵ) de linhas materiais mostradas. As taxas de estiramento observadas são as mesmas para cisalhamento puro (a) e simples (b), sendo a diferença entre eles caracterizada pela velocidade angular (modificada de Passchier et al., 1990)..... 12
- Figura 1.5** - Diagrama mostrando as relações entre rochas/fabrics, distribuição de deformação, estilo de rejuvenescimento tectônico e controles reológicos em diferentes profundidades. Notar que o limite entre reativação e retrabalhamento é transicional (modificado Holdsworth et al., 2001)..... 13
- Figura 1.6** - Estruturas associadas às falhas transcorrentes e suas orientações relativas ao sentido do cisalhamento na falha. A – Fraturas Riedel; B – Dobras; C – Falhas Inversas; D – Falhas Normais (modificado de Twiss & Moores, 1992)..... 15
- Figura 1.7** - Terminações de falhas e a formação de leques imbricados. A – geometria de leque imbricado extensional na terminação de uma falha dextral; B – falhamento normal extensional na terminação de uma falha transcorrente dextral; C – geometria de leques imbricados compressivos na terminação de uma falha dextral; D – dobramento compressivo e falhas inversas na terminação de uma falha transcorrente dextral; E – geometria de uma terminação rabo-de-cavalo (horsetail splay) em uma falha transcorrente dextral (modificado de Twiss & Moores, 1992)..... 16
- Figura 1.8** – Elementos geométricos de uma dobra simples (modificado de Hatcher 1995)..... 17
- Figura 1.9** – Alguns tipos de dobras de acordo com a classificação quanto à disposição dos eixos e planos axiais (modificado de Twiss & Moore, 1992)..... 19

Figura 2.1 – Mapa Simplificado do Cinturão Itacaiúnas, composto pelos Sistemas Transcorrentes Carajás e Cinzento com os principais lineamentos estruturais (modificado de Oliveira, 2002).....	21
Figura 2.2 – Propostas estratigráficas para a região de Carajás apresentadas por DOCEGEO (1988), Araújo & Maia (1991) e Pinheiro (1997).....	23
Figura 2.3 - Quadro Evolutivo esquemático para a região de Carajás, no período de 2.8 Ga a 1.9 Ga (Pinheiro & Holdsworth, 2000).....	30
Figura 2.4 - Platôs sustentados por rochas ferríferas e vulcânicas do Grupo Grão-Pará na Serra Norte (foto CVRD/GAJAN).....	40
Figura 3.1 – Mapa de lineamentos fotoestruturais indicando os principais conjuntos de lineamentos observados na região da Serra Norte (veja texto para comentários).....	45
Figura 3.2 – Traços secundários que partem da Falha Carajás e balizam os platôs N4 e N5. A movimentação sinistral da Falha Carajás provoca rotação no sentido horário.....	47
Figura 4.1 – Seções esquemáticas em corte aparente de bancadas da Mina N4E, mostrando a geometria dos contatos normais entre rochas vulcânicas e ferríferas. Os estereogramas mostram a posição das estruturas presentes nas bancadas. As bancadas têm 15 metros de altura e sua localização pode ser observada no mapa de localização de seções (anexos).....	50
Figura 4.2 – Contato concordante, sub-horizontal, entre rocha vulcânica (superior) e rocha ferrífera inferior na Mina N5W (Foto CVRD-GAJAN).....	51
Figura 4.3 - Contato concordante sub-horizontal entre rocha vulcânica (parte superior) e rocha ferrífera (parte inferior) na Mina N5Sul (altura da bancada=15m), em corte aparente. (Foto CVRD-GAJAN).....	51
Figura 4.4 – Blocos diagramas sem escala, representando: (A) contato concordante entre rocha ferrífera não deformada e rocha vulcânica; (B) contato concordante dobrado entre rocha ferrífera dobrada e rocha vulcânica. Na figura A o contato não está deformado, enquanto que na figura B o mesmo está dobrado, juntamente com o minério (topo) e a rocha vulcânica (base).....	53
Figura 4.5 – Contato por falha na cava norte da Mina N4E. As falhas (linhas laranja) N-S (esquerda) e NE-SW (direita) limitam um bloco de rocha vulcânica. Localização: seção 22.....	53

- Figura 4.6** – Mapa geológico da parte norte da mina N4E mostrando a posição das principais falhas associadas aos contatos entre rochas vulcânicas e minério de ferro. A localização da área do mapa no contexto regional está indicada na figura abaixo, junto com a legenda.....56
- Figura 4.7** – Mapa geológico da aba leste da mina N4E mostrando a posição das principais falhas associadas aos contatos entre rochas vulcânicas e minério de ferro. A localização da área do mapa no contexto regional está indicada na figura abaixo, junto com a legenda.....57
- Figura 4.8** – (a) Mapa estrutural das falhas 1 e 2 com respectivas seções; (b) seções esquemáticas em corte aparente dos contatos por falha na Mina N4E. Os estereogramas na figura mostram as atitudes dos planos de falha individualmente. A seta laranja representa a orientação das seções em mapa.....58
- Figura 4.9** – (a) Mapa estrutural da área de afloramento das falhas 3 e 4; (b) seções esquemáticas em corte aparente mostrando os contatos por falha na mina N4E. Os estereogramas associados representam as atitudes dos planos de falha mostrados nas seções. A linha laranja representa a orientação das seções em mapa.....59
- Figura 4.10** – (a) falha 5 representada em mapa estrutural, a NW um bloco de minério e a SE, um bloco de vulcânica; (b) seções esquemáticas em corte aparente de bancada mostrando os contatos por falha na mina N4E. Os estereogramas representam a atitude do plano de falha em cada seção. A linha laranja corresponde à orientação das seções em mapa.....60
- Figura 4.11** – (a) mapa estrutural representando a falha 6, a NW bloco de minério e a SE bloco de rocha vulcânica; (b) seções esquemáticas em corte aparente das bancadas onde foram mapeados os contatos da falha 6 na mina N4E. Os estereogramas mostram a atitude dos planos de falha. A linha laranja indica a posição das seções no mapa.....61
- Figura 4.12** - (a) mapa estrutural das falhas 7 e 8; e (b) seções esquemáticas em corte aparente de bancada na Mina N4E. Os estereogramas mostram as atitudes dos planos de falha. A linha laranja representa a orientação das seções no mapa.....62
- Figura 4.13** – Dobra centimétrica, aberta, em jaspelitos pouco deformados. Os estereogramas associados à foto mostram as atitudes do acamamento dobrado, os eixos de dobra (E.D) e atitudes dos planos axiais (P.A). O afloramento está localizado na cava norte da mina N4E e faz parte da Seção 23 (ver mapa de localização de seções).....65

Figura 4.14 – Fotografia mostrando dobras centimétricas na Seção 26, localizada na cava norte da Mina N4E (ver mapa de localização de seções). São dobras parasíticas de zona de deformação, observadas no minério de ferro, abertas ou fechadas, isoclinais e assimétricas. Os estereogramas mostram os eixos dessas dobras com baixos ângulos, caindo para NW.....66

Figura 4.15 – Exemplos de dobras em kink bands presentes no minério de ferro. A: seção W-E no nível 520 da mina N4E; os estereogramas representam os planos de kink que cortam o acamamento; B: seção N-S no nível 580 da mina N4E; os estereogramas representam os planos de kink que perturbam o acamamento. As bancadas têm 15 metros de altura. A localização das seções pode ser observada no mapa de localização de seções (anexo).....67

Figura 4.16 – Seção estrutural na mina N5E, exibindo as zonas de deformação presentes no minério de ferro, bem como as dobras centimétricas associadas a elas. O acamamento fora das zonas de deformação se mostra com direção NW-SE. Nas zonas de deformação se encontram dobras centimétricas abertas a fechadas com eixos caindo para NW. Notar os planos de kink associados às zonas de deformação.....68

Figura 4.17 – Seção 05 no nível 550m da mina N4E mostrando dobras métricas abertas em um pacote de minério de ferro pouco deformado. A seção tem 185m de comprimento e os estereogramas representam a posição do acamamento dobrado. A localização da seção pode ser observada no mapa em anexo (Anexo 2). Altura da seção: 15m.....69

Figura 4.18 – Desenho esquemático mostrando perfil de dobras assimétricas. As dobras métricas presentes nas zonas de deformação que cortam a mina N4E ocorrem com essa geometria.....70

Figura 4.19 – Mapa geológico da mina N4E com seus diversos litotipos desenhando um “J” (a); estereograma dos pólos de planos de acamamento do minério de ferro com seu respectivo diagrama de contorno estatístico (b); estereograma com as atitudes de eixos de dobras na mina N4E e seu respectivo diagrama de contorno estatístico (c).....71

Figura 4.20 – Na parte central da figura estão mostrados os platôs de rochas ferríferas e vulcânicas do Grupo Grão-Pará na Serra Norte. As caixas mostram os diagramas de projeção estereográfica com as medidas de acamamento do minério de ferro de para cada platô. Os diagramas de contorno de pólos foram confeccionados apenas nas áreas com mais de 50 medidas de atitudes de acamamento. O símbolo em estrela representa o eixo beta do plano de guirlanda.....75

Figura 4.21 – Mapa da região estudada mostrando atitudes de eixos de dobras métricas e centimétricas presentes no minério de ferro, com a localização indicada dos pontos amostrados nos diferentes platôs. Observar a concentração preferencial dessa estrutura no quadrante NW-SE, apesar da dispersão relativa de suas medidas.....78

Figura 4.22 – Mapa das áreas estudadas (Serra Norte) com estereogramas para planos axiais de dobras métricas a centimétricas, além de pólos de planos axiais e diagrama de roseta mostrando a direção preferencial desses planos. Os diagramas de roseta foram confeccionados apenas para áreas com mais de 20 atitudes de plano axial.....81

Figura 4.23 - Estereograma de pólos de planos de fraturas (A) com respectivo estereograma de contorno (B) para 417 medidas, efetuadas na Mina N4E.....82

Figura 4.24 - Mapa da aba leste da mina N4E, com cinco setores escolhidos para estudar as fraturas e falhas presentes nas rochas dessa mina. As linhas em magenta no mapa correspondem aos cortes da bancadas e os estereogramas representam as diferentes concentrações de pólos de fraturas por setor.....83

Figura 4.25 – Mapa detalhado das atitudes das fraturas do Setor 1 com; (a) estereograma de planos de fraturas; (b) estereograma de pólos de planos de fraturas; (c) principais planos de fraturas selecionados a partir do estereograma b. Ver localização do Setor 1 na Fig. 4.8. Linhas magenta representam bordas das bancadas da mina.....85

Figura 4.26 – Mapa detalhado das fraturas do Setor 2 com: (a) estereograma de planos de fraturas; (b) estereograma de pólos de planos de fraturas; (c) diagrama de contornos com concentrações principais dos pólos de planos de fraturas; e (d) estereograma com planos principais obtidos através do diagrama (c). Linhas magenta representam bordas de bancada da mina.....86

Figura 4.27 – Mapa detalhado das fraturas do Setor 3 com: (a) estereograma de planos de fraturas; (b) estereograma de pólos de planos de fraturas; (c) diagrama de contornos com concentrações principais dos pólos de planos de fraturas; e (d) estereograma com planos principais obtidos através do diagrama c. Linhas magenta representam bordas das bancadas da mina.....87

Figura 4.28 – Mapa de detalhe de fraturas no Setor 4 com: (a) estereograma de planos de fraturas; (b) estereograma de pólos de planos de fraturas; (c) diagrama de contornos com concentrações principais dos pólos de planos de fraturas; e (d) estereograma com planos principais obtidos através do diagrama (c). Linhas magenta representam bordas de bancada da mina.....88

Figura 4.29 – Mapa de detalhe de fraturas observadas no Setor 5, com: (a) estereograma de planos de fraturas; (b) estereograma de pólos de planos de fraturas; (c) de contornos com concentrações principais dos pólos de planos de fraturas; (d) estereograma com planos principais obtidos através do diagrama (c). Linhas magenta representam as bordas das bancadas da mina.....89

Figura 4.30 – Zona de cisalhamento em rocha vulcânica localizada na parte leste da cava norte da Mina N4E. A estrutura tem aproximadamente 6 m de largura. No detalhe: desenho esquemático do arranjo da clivagem disjuntiva anastomosada, presente no interior na zona.....91

Figura 4.31 – Zonas de cisalhamento; (A) estereograma (diagrama de igual área) com a representação dos planos de zonas de cisalhamento; (B) estereograma de pólos de foliação em zonas de cisalhamento. Observa-se a presença de 03 áreas principais de concentração de pólos, indicando planos NE-SE e NW-SE.....92

Figura 4.32- Dique tabular de diabásio (vermelho) com 4m de largura, truncando o acamamento do minério de ferro. Essa estrutura está orientada segundo a direção NE-SW e localiza-se na seção 14.....93

Figura 4.33 - a – Estereograma de pólos de planos de contato; b – Diagrama de contorno dos pólos de contato com a linha da guirlanda formada pelos pólos de concentração e seu respectivo eixo β (estrela)- $62^\circ / 296^\circ$95

Fig 4.34 - Comparação entre os tipos de dobras e seus respectivos estereogramas, proposto por Leyshon e Lisle (1996) (1); e o padrão de disposição dos pólos de acamamento das rochas dobradas do platô N4 (2).....98

Figura 4.35 – Desenho esquemático (sem escala) de uma camada dobrada com geometria em leque, onde os planos axiais mostram disposição radial.....100

Figura 4.36 – Vergências principais e secundárias das rochas ferríferas da Serra Norte, indicando a direção e sentido do transporte tectônico associado à deformação das rochas nessa região.....101

Figura 4.37 – representação esquemática da taxa de encurtamento para o Platô N4. Essa taxa é obtida pela razão entre o comprimento final do corpo deformado e o comprimento inicial do corpo, antes da deformação.....102

Figura 6.1 – perfil esquemático explicando o arcaço dobrado e a falta de estabilidade na porção oeste da mina N4E pelo modo como a mina vem sendo rebaixada.....109

Figura 6.2 – Desenho esquemático do minério de ferro dobrado, mostrando o possível deslocamento total projetado acompanhando um mesmo nível de prospecção da mina.....110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Resumo de alguns dados geocronológicos das rochas da Província Carajás; ZR – zircão; RT – rocha total (modificado de Villas & Santos, 2001)....27

Tabela 02 – Resumo dos dados de acamamento obtidos no minério de ferro da área de estudo.....74

Tabela 03 – Resumo dos dados de eixos de dobra obtidos na área de estudo..77

Tabela 04 – Resumo dos dados de planos axiais obtidos nas dobras da área de estudo.....80

RESUMO

A região estudada compreende a parte NE do Sistema Transcorrente Carajás, correspondendo aos relevos em platôs da chamada Serra Norte, local de interesse da CVRD na exploração de ferro. Na região afloram rochas sedimentares químicas ferríferas e rochas vulcânicas pertencentes às formações Carajás e Parauapebas (Grupo Grão Pará), de idade U/Pb em zircão de 2.759 ± 2 Ma (Machado *et al.*, 1991). Estudos estruturais realizados previamente nas rochas da região têm mostrado a presença de dobras reclinadas com eixos caindo com ângulos fracos para NW. Essas dobras têm sido apontadas como principais elementos responsáveis pela estruturação das rochas da região.

Estudos realizados nesta pesquisa apontam para a presença de dobras mutuamente ajustadas em diferentes escalas. As menores, em escala centimétrica, correspondem a dobras parasíticas presentes nos flancos de dobras assimétricas de tamanho métrico. Essas correspondem a dobras do acamamento, variando de abertas a isoclinais, com planos axiais NW-SE mergulhando com ângulos suaves para SW e NE. Tais dobras se concentram em faixas que variam de poucas dezenas a centenas de metros com direções preferenciais NW-SE e incorporam diferentes taxas de encurtamento. As dobras maiores, quilométricas, são desenhadas pelo acamamento e têm o comprimento de onda proporcional ao "J" observado pelo traçado dos platôs, em imagens de sensores remotos. Essa dobra se mostra reclinada, com orientação sub-paralela às demais dobras observadas nas diferentes escalas estudadas.

O contato entre as rochas ferríferas e as rochas vulcânicas se apresentam de duas maneiras distintas: (1) em contatos concordantes dobrados e (2) em contatos por falha.

Observa-se que as rochas da região foram deformadas por transpressão com componente de deformação simples do tipo sinistral e componente pura com encurtamento de NE para SW. Essa conclusão se baseia na direção de vergência e assimetria das dobras, e ainda na orientação dessas estruturas em relação à direção geral E-W do Sistema Transcorrente Carajás. A deformação dessas rochas se concentra em faixas com direção NW-SE coincidindo com traços maiores de descontinuidades que convergem de forma côncava a partir da Falha Carajás. Assume-se que a deformação dessas rochas ocorreu durante a reativação transpressiva sinistral que teve lugar no Sistema Transcorrente Carajás, entre cerca de 2.6 e 2.0 Ga.

ABSTRACT

The studied area is located on northeast portion of the Carajás Strike-Slip System, it corresponds to plateaus of Serra Norte, where the CVRD acts in iron ore mining. On this region there are chemical sedimentary rocks (banded iron formation) and volcanic rocks of the Carajás and Parauapebas formations (Grão Pará Group) respectively, with age of 2.759 ± 2 Ma U/Pb in zircon (Machado *et al.*, 1991). Previous structural geology studies done in the region indicated recumbent folds with fold axis dipping at low angles to NW. These folds are pointed to be the main structures controlling the arrangement of rocks in the area.

The present work indicates mutually adjusted folds in different scales. Centimetric folds are parasitic being present in limbs of asymmetric folds with metric size. That corresponds to layering folded, varying from open to isoclinal with axial plane striking NW-SE and dipping with low angles to SW-NE. The folds are concentrated in zones ranging from dozen to hundred meters wide striking NW-SE with different shortening measure. Kilometer scale folds are featured by layering drawing a J shape fold in map view. This fold is recumbent with direction parallel to the minor scale folds observed in the region.

There are two types of contacts between iron ore and volcanic rocks: (1) normal concordant folded contacts and (2) fault contacts.

The rocks studied in the area were regionally deformed by transpression with simple shear dextral component and pure shear component, dominated by shortening from NE to SW. This is based on vergence sense, fold asymmetries and general trend of the mapped structures compared to the E-W regional trending of the Carajás Strike-Slip System. The deformation is particularly concentrated in NW-SE zones trending that follow the trace of major discontinuities, converging from the Carajás Fault. The deformation responsible for the geometric and kinematic history of the rocks takes place during transpressional sinistral deformation affecting all Carajás Strike Slip System, between 2.6 and 2.0 Ga.

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

Este trabalho é resultado da parceria entre a Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) e o Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica da UFPA. Sua principal finalidade foi estudar os aspectos geométricos e estruturais dos corpos de minério de ferro presentes na Serra Norte, que faz parte da Província Mineral de Carajás.

Apesar de existirem trabalhos anteriormente desenvolvidos nessa região enfocando esse tema, havia a necessidade de se detalhar e melhorar o entendimento a respeito desse assunto. A necessidade se fez presente pelo avanço nas atividades de lavra das jazidas de ferro, exploradas pela CVRD. Esses depósitos representam as maiores reservas de ferro do Brasil, tendo atingido no ano de 2000 a produção de 119 milhões de toneladas.

A região norte da Serra dos Carajás é marcada pela presença de expressivos platôs dispostos em um arranjo alinhado curvo, onde afloram os depósitos de ferro em que estão instaladas as minas da CVRD.

As minas expõem excelentes afloramentos de rochas ricas em ferro (jaspilitos e outras formas alteradas) e rochas vulcânicas arqueanas, todas relacionadas estratigraficamente ao Grupo Grão-Pará. Essas rochas estão dobradas, em diferentes intensidades e graus de penetratividade (p.e. Ladeira & Cordeiro, 1988).

Estudos mais detalhados foram realizados apenas na mina N4E, revelando em linhas gerais arranjos complexos de dobras cônicas parasíticas (Pinheiro & Holdsworth, 1997b).

1.1- APRESENTAÇÃO

A região de Carajás se localiza no interior do Cráton Amazônico (Fig. 1.1) fazendo parte do Escudo Brasileiro Central, sendo limitada à leste pelo Cinturão Araguaia e a oeste pelo rio Xingu. É uma das mais importantes províncias minerais brasileiras, pertencendo ao Estado do Pará.



Figura 1.1 - Mapa de localização da região de Carajás no contexto geológico do norte do Brasil.

A área de estudo compreende a chamada Serra Norte e engloba seus platôs de rochas ferríferas tais como N1, N4 e N5 (Fig. 1.2). Encontra-se a norte do Granito Central de Carajás e pertence ao contexto tectônico do Sistema Transcorrente Carajás (Pinheiro, 1997).

O Sistema Transcorrente Carajás exibe feixes anastomóticos de lineamentos orientados predominantemente na direção E-W que mostram evidências de terem passado por pelo menos cinco episódios consecutivos de reativação tectônica rúptil a rúptil-dúctil. Há indicação de controle dessas

reativações pela presença da trama planar dúctil (ca. 2.8 Ga) existente nas rochas do embasamento (Pinheiro & Holdsworth, 1997a).

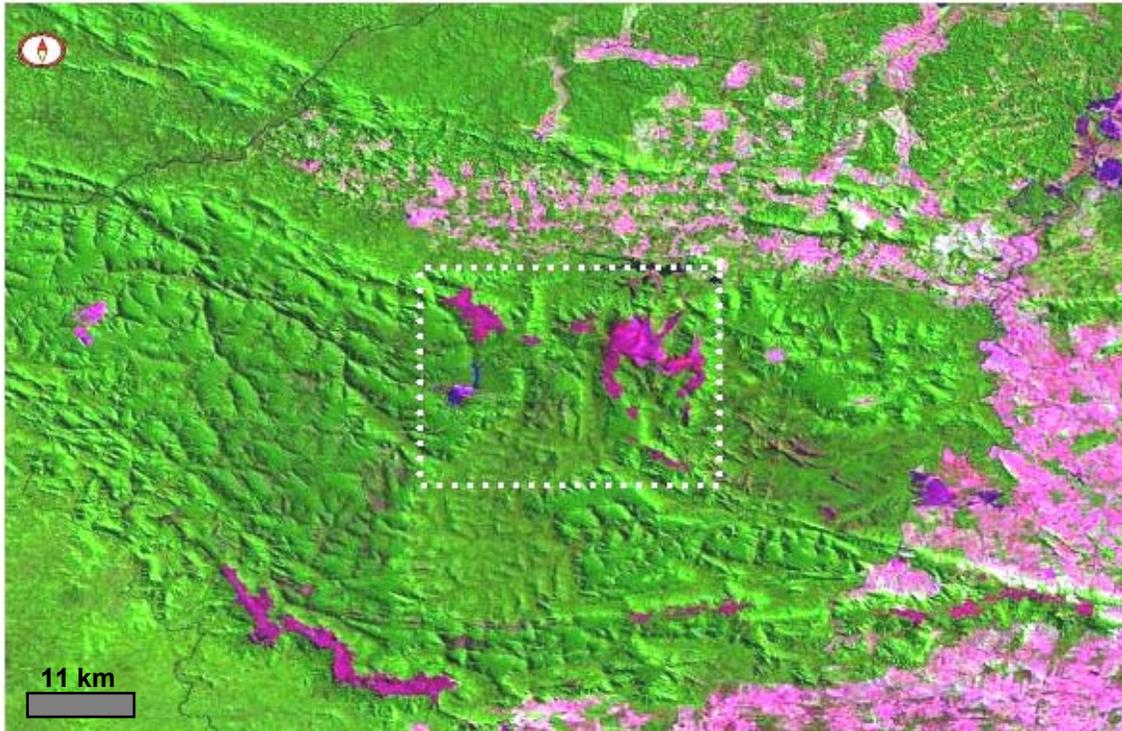


Figura 1.2 – Localização dos platôs de rochas ferríferas e vulcânicas da Serra Norte na região de Carajás. Composição colorida das bandas 3R, 4G e 5B Landsat TM, 1991 (CVRD/GAJAN).

A Falha Carajás, como destaque no interior do Sistema Transcorrente Carajás, foi originalmente descrita por Silva *et al.* (1974) e representa uma das mais intrigantes e expressivas feições tectônicas presentes na região da Serra dos Carajás. Atravessa obliquamente, no sentido WNW-ESE, os lineamentos maiores que definem o Sistema Transcorrente Carajás e deforma as rochas aflorantes no interior da *Estrutura de Carajás* e supracrustais arqueanas pertencentes ao Cinturão Itacaiúnas (e.g. DOCEGEO, 1988; Araújo & Maia, 1991; Gouvêa, 1990; Pinheiro, 1997; Pinheiro & Holdsworth, 1997a; Pinheiro & Holdsworth, 1997b).

A Falha Carajás, em particular, se formou após 2.65 Ga (Machado *et al.*, 1991; Dias *et al.*, 1996), durante reativação regional por transtensão destal,

posteriormente reativada sob transpressão sinistral, antes de 1.88 Ga (Pinheiro & Holdsworth, 1997a).

Dentre as rochas mais intensamente deformadas pela Falha Carajás estão (1) aquelas que compõem as seqüências vulcânicas e sedimentares do Grupo Grão Pará (ca.2.76 Ga; Wirth *et al.*, 1986; Machado *et al.*,1991); (2) as rochas graníticas gnáissicas do embasamento arqueano, tectonicamente organizadas em leques imbricados de cavalgamentos (Araújo & Maia, 1991) e, (3) plútons graníticos arqueanos (2.7 Ga; *p.e.* Barros *et al*, 2001), a maioria ainda pouco conhecida, que intrudiram tanto as rochas do embasamento quanto as de natureza vulcano-sedimentar.

As rochas do Grupo Grão Pará, de idade arqueana, ocorrem na área como lentes intercaladas de rochas vulcânicas (Formação Parauapebas) e rochas ferríferas bandadas (Formação Carajás) dobradas. Diversos feixes de lineamentos NW-SE, identificados em sensores remotos e fotografias aéreas, atravessam essas rochas.

As rochas ferríferas atualmente explotadas na área, estão organizadas espacialmente em pacotes dobrados, com geometria reclinada e eixos caindo suavemente (<20°) para N-NW (Pinheiro & Holdsworth, 1997b). Esses arranjos dobrados se mostram complexos e não mantêm formas holomórficas ou cilíndricas. Uma fina caracterização das variações geométricas e espaciais das rochas ferríferas fornece um indicativo espacial seguro e detalhado para a sua exploração.

1.2- OBJETIVOS

Este trabalho se desenvolveu em busca de dois objetivos principais:

(1) Estudar em detalhe os elementos estruturais das rochas ferríferas que desenham os platôs da Serra Norte. Com base nesses elementos, estabelecer a *análise cinemática e geométrica*, em busca da caracterização da posição espacial dos corpos de minério, bem como dos processos tectônicos responsáveis por sua deformação.

(2) Fornecer subsídios para auxiliar as atividades de lavra.

Como objetivos subordinados têm-se:

- Caracterização do possível papel da Falha Carajás na organização espacial das rochas expostas nos referidos platôs.
- Mapeamento estrutural integrado das minas ora em serviço, em escala de detalhe.
- Avanço no entendimento, sob o ponto de vista tectonoestratigráfico, das relações entre os principais episódios de deformação associados à estruturação regional e à distribuição e idades das rochas aflorantes na região enfocada.

1.3 ATIVIDADES E MÉTODOS

Para atingir os objetivos propostos foram adotados os seguintes procedimentos:

- Levantamento do acervo bibliográfico e cartográfico a respeito da região. A bibliografia referente à geologia regional foi analisada visando elaborar uma síntese crítica sobre os dados geológicos existentes, enfocando seu estado de arte e problemas.
- Interpretação visual de imagem de satélite na escala de 1:100.000 para identificação de lineamentos fotoestruturais. Essa interpretação se seguiu utilizando a rotina metodológica proposta por Veneziani & Anjos (1982).
- Interpretação digital de imagens LANDSAT (SPRING e ARCVIEW) usando os recursos de informática disponíveis no LAGEOS (DGL/UFPA), para a preparação de mapas temáticos integrados digitalizados em escala final de 1:50.000.
- Trabalhos de campo na região das minas envolvendo: (a) mapeamento litoestratigráfico, com ênfase na individualização das rochas ferríferas em relação às rochas vulcânicas encontradas de modo subordinado; (b) estudo detalhado dos elementos tectônicos associados às rochas expostas nas minas.
- A metodologia usada em campo envolveu a descrição detalhada de todos os cortes em bancadas de minas, coleta de amostras e de dados relativos à geometria e cinemática das estruturas tectônicas encontradas conforme os procedimentos rotineiros de campo apresentados, por exemplo, por Passchier & Trouw, (1996) e Snoke *et al.* (1998). Os mapas e as seções estruturais foram confeccionados seguindo os procedimentos descritos a seguir.
- Para elaborar o mapa estrutural, os dados coletados em campo foram inseridos em uma unidade móvel (*rover*) de GPS modelo *GeoExplorer III* da Trimble com precisão centimétrica e ajustada para as coordenadas locais das minas. Os dados estruturais foram registrados após 10 medições

estáticas com intervalos de 3 segundos entre cada leitura. As atitudes foram inseridas na notação *mergulho/direção do mergulho*; tipo de estrutura; nome da mina e nível topográfico da mina. No escritório os dados foram transferidos para o computador e através do utilitário *GPS Pathfinder Office*, onde foram feitas as correções diferenciais pós-processadas dos pontos coletados pelo *rover*, para melhorar as posições GPS. Após a correção diferencial, os dados foram exportados como formato ASCII e carregados no *software* GENCON 3.3 juntamente com as bases de dados cartográfica e geológica.

- As seções estruturais foram elaboradas em campo simultaneamente à coleta dos dados estruturais com o sistema GPS. Por esse motivo, todas as feições presentes nas seções estão cartograficamente amarradas aos pontos de atitudes de estruturas presentes nos mapas. Em campo foram feitos os desenhos esquemáticos das seções. No escritório as seções foram redesenhadas obedecendo às distâncias entre os pontos onde as atitudes eram coletadas. As seções foram desenhadas seguindo aproximadamente a mesma orientação das bancadas das minas e as estruturas foram representadas em cortes aparentes nas seções. Todas as seções foram vetorizadas para facilitar a integração. Para integrar e empilhar as seções foram feitos pequenos ajustes entre as distâncias, que não comprometem a precisão do seu posicionamento.
- Dados relativos à geologia estrutural foram estudados seguindo as técnicas rotineiras, envolvendo, preparação de diagramas 3D e interpretação integrada com os dados estratigráficos e regionais através da representação dos dados em estereogramas de rede de Igual-Área ou de Schmidt-Lambert (hemisfério inferior), com tratamento estatístico utilizando o aplicativo “Stereonet 3.06 for Windows” (Ivar Steinsund, 1995).
- Os dados de fraturas foram tratados utilizando o método de tomada seletiva de medidas, sendo agrupados em diferentes setores de modo a minimizar a dispersão.

- A determinação do encurtamento provocado pela deformação nas rochas do platô N4 foi obtida através da equação: $\text{Encurtamento} = \left[\frac{\text{Comprimento final}}{\text{Comprimento inicial}} \times 100 \right] - 100$.
- A análise do estilo das dobras foi feito de acordo a proposta de Leyshon e Lisle (1996) que utiliza projeção estereográfica para determinar: (1) ângulo entre flancos; (2) curvatura; e (3) assimetria de dobras (Fig. 1.3).
- Elaboração de relatório e mapas finais com o auxílio de computadores e periféricos, seguindo-se de divulgação dos resultados.

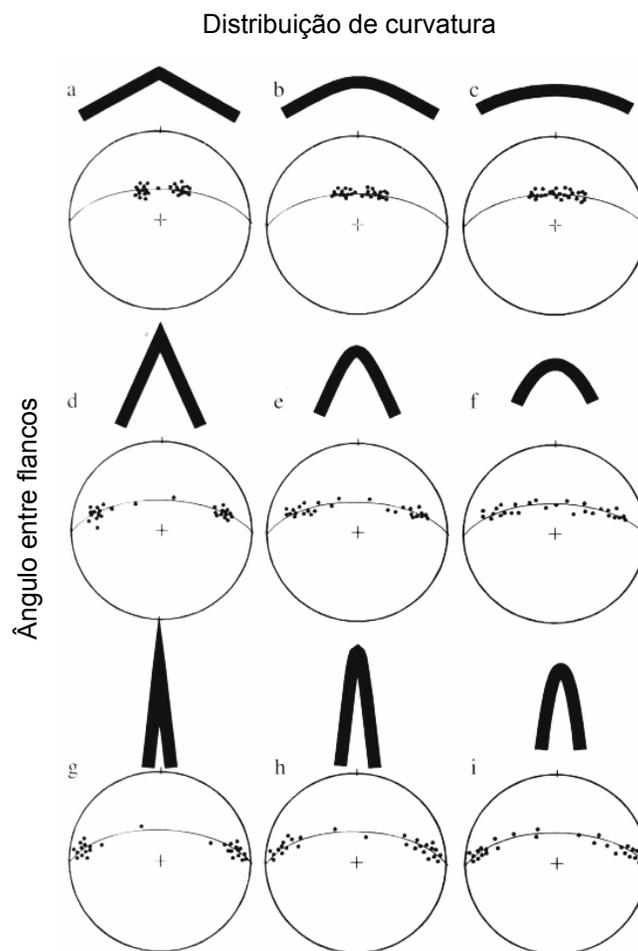


Figura 1.3 – Diagrama para classificação do estilo de dobras através de projeção estereográfica (modificado de Leyshon e Lisle, 1996).

1.4 CONCEITOS E TERMOS APLICADOS

Aqui são apresentados de maneira breve as principais definições e conceitos de termos no âmbito da Geologia Estrutural e Tectônica, utilizadas nessa pesquisa, com o objetivo de auxiliar o leitor no entendimento do texto.

1.4.1 Cisalhamento Puro e Simples

Cisalhamento Puro é um tipo de deformação homogênea que envolve deformação plana e deformação geral, na qual, linhas paralelas aos eixos principais do elipsóide de deformação permanecem paralelas antes e depois da deformação acontecer (Hobbs *et al.*, 1976). Se a orientação dos principais eixos de deformação X, Y e Z não mudam durante a deformação, o esforço pode ser descrito como *irrotacional* ou *coaxial*, ou cisalhamento puro (Park 1989).

O termo *Cisalhamento Simples* pode ser definido como um tipo de deformação homogênea, com volume constante, envolvendo deformação plana onde uma família de planos materiais se mantém paralelos após a deformação (Hobbs *et al.*, 1976). Quando há uma mudança na orientação dos eixos principais de deformação X, Y e Z a deformação é descrita como rotacional (não-coaxial) e esse processo é conhecido como cisalhamento simples (Park, 1989). O cisalhamento simples pode ainda ser definido como um tipo de deformação homogênea rotacional, relacionada à deformação não-coaxial (Hatcher, 1995). Em uma situação de cisalhamento simples progressivo, as relações entre os eixos de esforço e deformação mudam continuamente, pois o eixo da deformação rotaciona em relação aos eixos externos de referência.

Passchier *et al.* (1990), define *cisalhamento puro* como uma deformação onde linhas materiais que coincidem com os eixos de estiramento principal (EEP) de fluxo homogêneo não rotacionam (vorticidade do fluxo zero) e o fluxo é coaxial (Fig. 1.4 a). No caso das linhas materiais que coincidem com os EEP de fluxo homogêneo rotacionarem em um fluxo não coaxial, a vorticidade do fluxo é um número finito e caracteriza uma deformação por cisalhamento simples (Fig. 1.4 b).

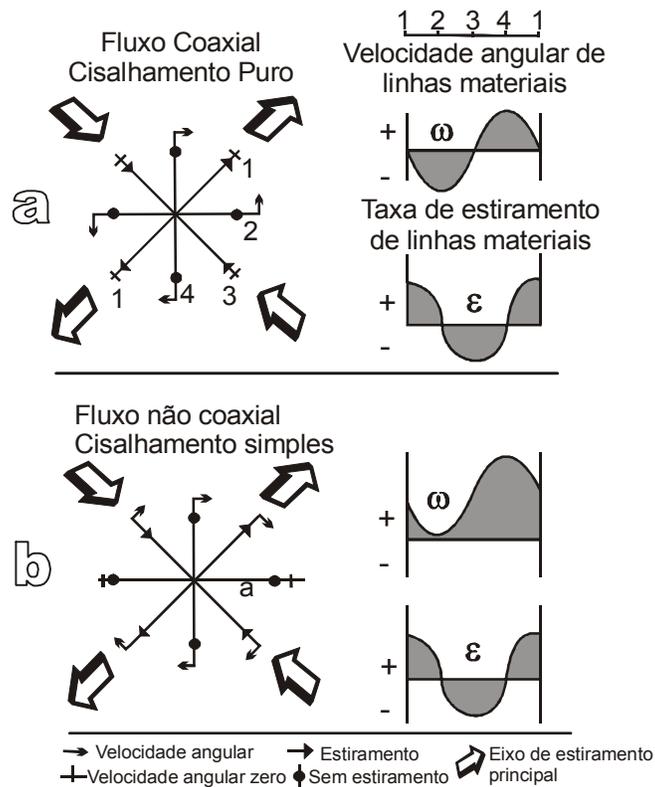


Figura 1.4 – Tipos de fluxo identificados pelo padrão de velocidades angulares (ω) e taxas de estiramento (ϵ) de linhas materiais mostradas. As taxas de estiramento observadas são as mesmas para cisalhamento puro (a) e simples (b), sendo a diferença entre eles caracterizada pela velocidade angular (modificada de Passchier et al., 1990).

1.4.2 Reativação Tectônica e Retrabalamento Tectônico

O termo *reativação* tem sido utilizado para designar situações de modificações estruturais de uma feição pré-existente, sem alterações significantes de volume e orientação, com rejuvenescimento de estruturas discretas (Holdsworth et al., 2001). No caso de terrenos ou ambientes antigos, a reativação deve estar relacionada a eventos de deformação que estejam separados por mais de 01 Ma.

O termo *retrabalhamento* tem sido freqüentemente utilizado e pode ser confundido com o termo reativação. Este termo diz respeito a processos metamórficos, estruturais e magmáticos (Fig. 1.5) que modificam a litosfera continental em escala orogênica (Holdsworth *et al.*, 2001).

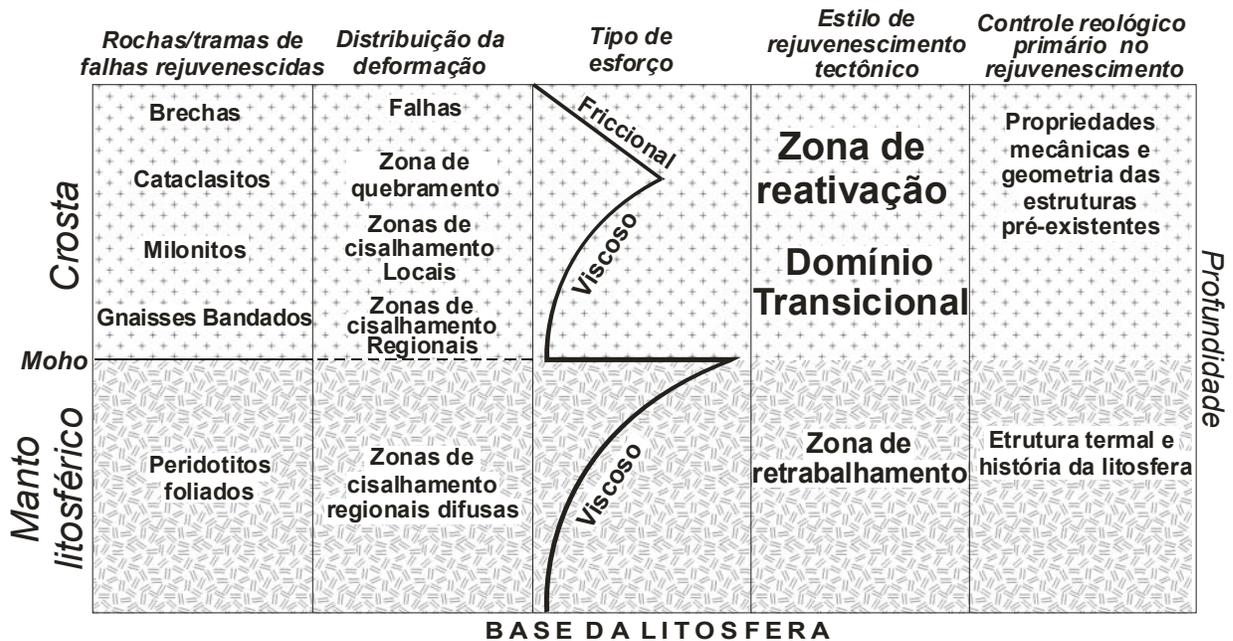


Figura 1.5 - Diagrama mostrando as relações entre rochas/fabrics, distribuição de deformação, estilo de rejuvenescimento tectônico e controles reológicos em diferentes profundidades. Notar que o limite entre reativação e retrabalhamento é transicional (modificado Holdsworth *et al.*, 2001).

1.4.3 Transpressão e Transtensão

Os termos se referem a estados particulares de deformação tridimensional oblíqua compostos por cisalhamento puro compressional (*transpressão*) ou extensional (*transtensão*) e cisalhamento simples transcorrente, dextral ou sinistral (Sanderson & Marchini, 1984).

A deformação por transpressão pode ser definida como sendo de dois tipos: (1) dominada por cisalhamento puro e; (2) dominada por transcorrência ou cisalhamento simples (Tykoff & Teyssier, 1994).

Alguns autores (p.e. Teyssier *et al.*, 1995) sugerem a presença importante de partição de deformação em regimes dominados por transpressão ou transtensão. O grau de partição influencia diretamente na distribuição e natureza da deformação.

A mudança de posição dos eixos de deformação finita, juntamente com partição de deformação, pode causar rápidas mudanças na orientação da lineação e no sentido do cisalhamento dentro das zonas de transpressão (Goodwin & Williams, 1996).

1.4.4 Falhas Direcionais

São falhas de alto ângulo de mergulho que acomodam cisalhamento horizontal em blocos crustais (cisalhamento simples). Seus traços, na superfície da Terra, podem variar desde retilíneos a suavemente curvados com deslocamentos relativos para a direita ou para a esquerda.

As falhas transcorrentes podem estar presentes em: (1) limites de placas tectônicas onde grandes blocos da crosta se movimentam lateralmente e não provocam adição ou subtração da crosta (Twiss & Moores, 1992); (2) terrenos onde ocorre acresção, formando o limite entre esses terrenos; (3) atrás de margens convergentes oblíquas no interior de cadeias de montanhas; (4) em cinturões de cavalgamento como falhas de rasgamento (*tear fault*) (Hatcher, 1995).

Várias estruturas estão relacionadas às falhas transcorrentes como: fraturas cisalhantes, dobras, falhas normais, falhas de cavalgamento e fraturas Riedel (Fig. 1.6).

As *fraturas Riedel* se desenvolvem com ângulos baixos (10° a 20°) em relação à falha principal, em arranjo *en echelon* (Fig. 1.6 A). As fraturas R são sintéticas à falha principal; são subparalelas e têm o mesmo sentido de cisalhamento das bordas do sistema. Fraturas P são sintéticas à falha principal e são orientadas simetricamente às fraturas R na falha. As fraturas tipo R' são

fraturas cisalhantes antitéticas orientadas sob altos ângulos em relação à falha principal (70° a 80°) e possuem sentido de cisalhamento oposto ao da falha principal (Twiss & Moores, 1992).

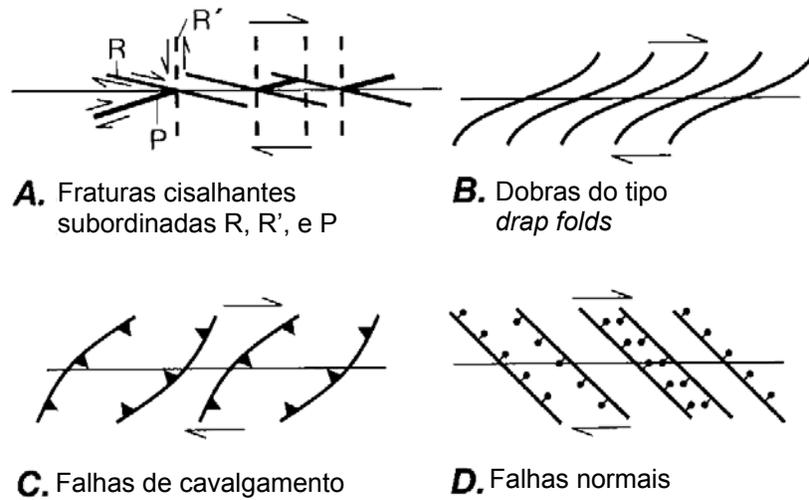


Figura 1.6 - Estruturas associadas às falhas transcorrentes e suas orientações relativas ao sentido do cisalhamento na falha. A – Fraturas Riedel; B – Dobras; C – Falhas Inversas; D – Falhas Normais (modificado de Twiss & Moores, 1992).

Dobras e falhas inversas se formam em arranjos *en echelon*, acima ou abaixo da falha principal (Fig. 1.6 B e C). A orientação da charneira das dobras e a direção dos planos de falhas inversas formam, em circunstâncias ideais, cerca de 45° (ou menos) em relação à direção da falha transcorrente (Twiss & Moores, 1992).

Falhas normais com arranjo *en echelon* podem se formar associadas a falhas transcorrentes com orientação teórica próxima de 45° em relação à falha principal, e quase perpendiculares à orientação característica das dobras e das falhas inversas (Fig. 1.6 D).

Falhas transcorrentes podem apresentar em suas terminações, zonas de deformação extensional ou compressional. A extensão pode ser acomodada onde a falha termina, formando um leque de falhas imbricadas (Fig. 1.7 A e B).

Similarmente, a compressão pode ser acomodada por um leque imbricado de cavalgamentos e/ou dobras (Fig. 1.7 C e D). No interior de tais zonas, o deslocamento ao longo da direção diminui progressivamente, até atingir valor zero (Twiss & Moores, 1992).

Em alguns casos, a falha pode se ramificar em um leque de falhas transcorrentes denominado *splay* rabo de cavalo ou *horsetail splay* (Fig. 1.7 E) (Twiss & Moores, 1992).

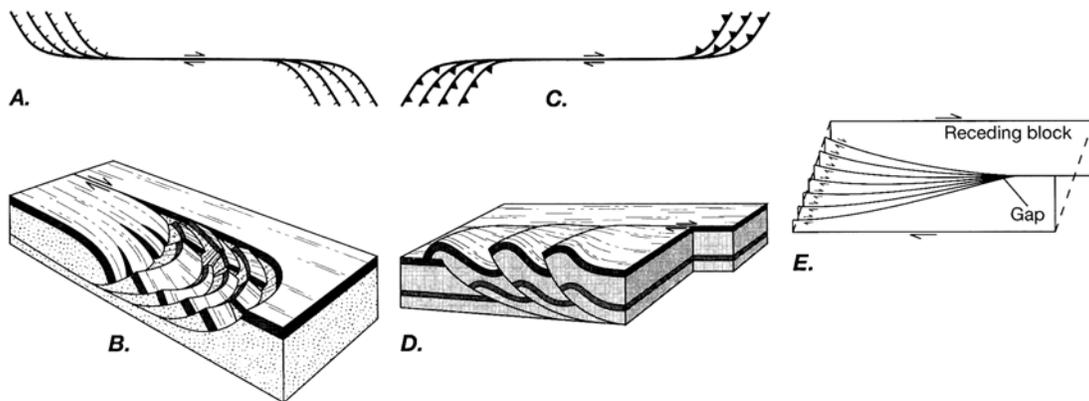


Figura 1.7 - Terminações de falhas e a formação de leques imbricados. A – geometria de leque imbricado extensional na terminação de uma falha destal; B – falhamento normal extensional na terminação de uma falha transcorrente destal; C – geometria de leques imbricados compressivos na terminação de uma falha destal; D – dobramento compressivo e falhas inversas na terminação de uma falha transcorrente destal; E – geometria de uma terminação rabo-de-cavalo (*horsetail splay*) em uma falha transcorrente destal (modificado de Twiss & Moores, 1992).

1.4.5 Dobras

Dobras são ondulações de planos materiais que se desenvolvem durante a deformação das rochas (Twiss & Moores, 1992).

ELEMENTOS GEOMÉTRICOS DA DOBRA

Considerando-se um simples par de dobras como na Fig. 1.8, têm-se como elementos principais:

- Crista e calha de uma dobra são as linhas de elevação mais alta e mais baixa, respectivamente, em uma superfície dobrada.
- Flancos: são as partes da superfície dobrada com menor curvatura, incluindo as linhas de inflexão.
- Charneira ou linha de charneira é a linha dentro da superfície dobrada ao longo da qual a curvatura é máxima.
- Eixo de dobra: é a linha de orientação fixa que forma um ângulo de 0° com qualquer elemento geométrico dentro da superfície dobrada.
- Linha de charneira é a linha formada pela união dos pontos de maior curvatura em uma superfície dobrada.
- Plano ou superfície axial é resultado da união entre várias linhas de charneira em sucessivas superfícies dobradas de uma mesma dobra.
- Comprimento de onda é a distância entre duas cristas consecutivas entre sinclinais ou anticlinais adjacentes.
- Amplitude corresponde à metade da distância entre duas cristas consecutivas, medida paralelamente ao plano axial. Juntamente com o comprimento de onda, fornecem as relações de escala das dobras.
- Vergência corresponde à direção para onde se inclina a superfície axial de uma dobra, não aparecendo, portanto em dobras simétricas.

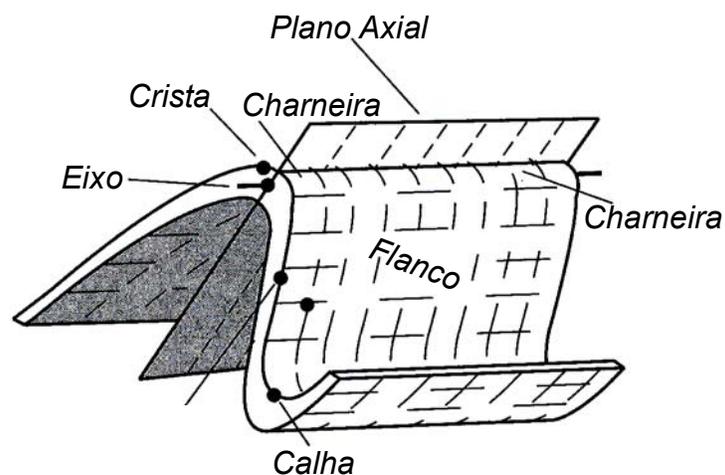
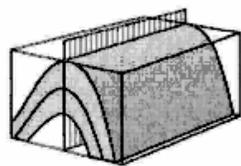


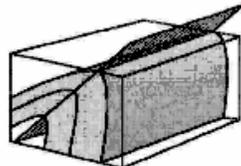
Figura 1.8 – Elementos geométricos de uma dobra simples (modificado de Hatcher 1995).

TIPOS DE DOBRAS

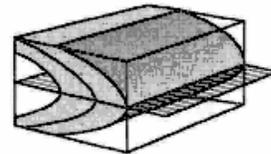
- Anticlinal é uma dobra que mostra fechamento para cima, apresentando as rochas mais antigas em seu núcleo.
- Antiforme é a dobra cuja concavidade está voltada para baixo, sendo desconhecidas as relações estratigráficas de suas rochas (1.9b).
- Sinclinal é uma dobra que se fecha para baixo, mostrando as rochas mais novas em seu núcleo.
- Sinforme é uma dobra onde o acamamento apresenta concavidade para cima, porém, as relações estratigráficas entre suas rochas são desconhecidas (1.9b).
- Dobra cilíndrica (Fig. 1.9a1) é uma dobra em que uma linha com orientação constante chamada eixo de dobra pode ser movida ao longo da superfície dobrada sem perda de contato com a mesma em qualquer ponto. Dobras que não possuem essa propriedade são chamadas de dobras não cilíndricas (Fig. 14.9a2).
- Dobra aberta: os flancos mergulham suavemente em direções opostas e possuem valores de ângulo θ entre os flancos $120 \geq \theta > 70$.
- Dobra apertada: os flancos mergulham para uma mesma direção ou para direções opostas, o ângulo θ entre os flancos é de $30 \geq \theta > 0$.
- Dobra isoclinal: são dobras apertadas em que há paralelismo entre os flancos e a superfície axial e o ângulo entre os flancos é igual a zero. São comuns em rochas deformadas sob regime dúctil.
- Dobras paralelas: mostram espessura constante das camadas ao longo da superfície dobrada.
- Dobras concêntricas: são dobras paralelas em que as superfícies dobradas definem arcos circulares e mantêm o mesmo centro de curvatura.
- Dobras chevron ou kink folds: são dobras com flancos retos e charneiras agudas, se simétricas são dobras chevron, se assimétricas são dobras *kink*. Essas dobras se desenvolvem em seqüências francamente laminadas que apresentam forte anisotropia mecânica planar e acomodam um componente de encurtamento paralelo ao acamamento. São formadas em condições de temperatura e pressão baixas.



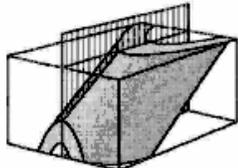
Upright horizontal



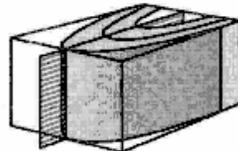
Moderadamente inclinada horizontal



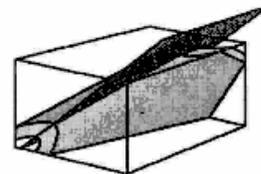
Recumbente



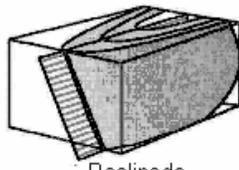
Upright com mergulho moderado



Vertical



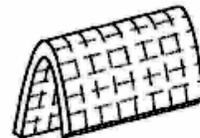
Moderadamente inclinada



Reclinada



Dobra aberta



Dobra apertada



Dobra chevron



Dobra kink



Flancos paralelos
Dobra isoclinal

Figura 1.9 – Alguns tipos de dobras de acordo com a classificação quanto à disposição dos eixos e planos axiais (modificado de Twiss & Moore, 1992).

CAPÍTULO II – GEOLOGIA REGIONAL E GEOMORFOLOGIA DA SERRA DOS CARAJÁS

2.1 CONTEXTO GEOTECTÔNICO

A Plataforma Sul Americana é formada por vários crátons de idade Arqueana, separados e interrompidos internamente por grandes zonas ou cinturões de cisalhamento (Cordani *et al.*, 1982, Hasui *et al.*, 1992), que apresentam longa história de movimentação desde o Arqueano Superior até o Fanerozóico (Hasui *et al.*, 1984; Costa *et al.*, 1993). As estruturas de caráter dúctil-rúptil ou apenas rúptil se mostram associadas geralmente como produtos de reativação de tramas dúcteis de alto grau das rochas do embasamento.

A região de Carajás encontra-se inserida na parte leste do Escudo Brasil Central, adjacente ao Cinturão Araguaia a leste (Almeida *et al.*, 1981). Corresponde ao limite entre os blocos geotectônicos Araguacema e Belém (Hasui *et al.*, 1984).

Dois domínios tectônicos maiores compõem a região de Carajás (1) o Cinturão Itacaiúnas (Araújo *et al.*, 1988) e o Terreno Granito-*Greenstone* de Rio Maria (Dall’Agnol *et al.*, 1986, 1997; Althoff, 1996; Althoff *et al.*, 2000).

O *Cinturão Itacaiúnas*, localizado na borda leste do Escudo Brasil Central, é limitado a norte por rochas sedimentares Paleozóicas e Cenozóicas da Bacia do Amazonas; a leste pelo Cinturão Araguaia do Neoproterozóico (Alvarenga *et al.*, 2000); a oeste por rochas do Proterozóico Médio (Costa *et al.*, 1994) e a sul pelo Terreno Granito-*Greenstone* de Rio Maria (Dall’Agnol *et al.*, 1996).

A porção norte do Cinturão Itacaiúnas é desenhada pelo *Sistema Transcorrente Cinzento* e pelo *Sistema Transcorrente Carajás* (Fig. 2.1).

O Sistema Transcorrente Cinzento é formado por um conjunto de traços de falhas curvos e anastomóticos com orientação principal WNW-ESSE. As suas principais feições são o *sidewall ripout* do Salobo, o romboédrio do Cururú e o *splay* de Serra Pelada (Pinheiro, 1997).

A sul do Sistema Transcorrente Cinzento encontra-se o Sistema Transcorrente Carajás caracterizado pela estrutura sigmoidal de Carajás cortada longitudinalmente pela Falha Carajás (Pinheiro, 1997).

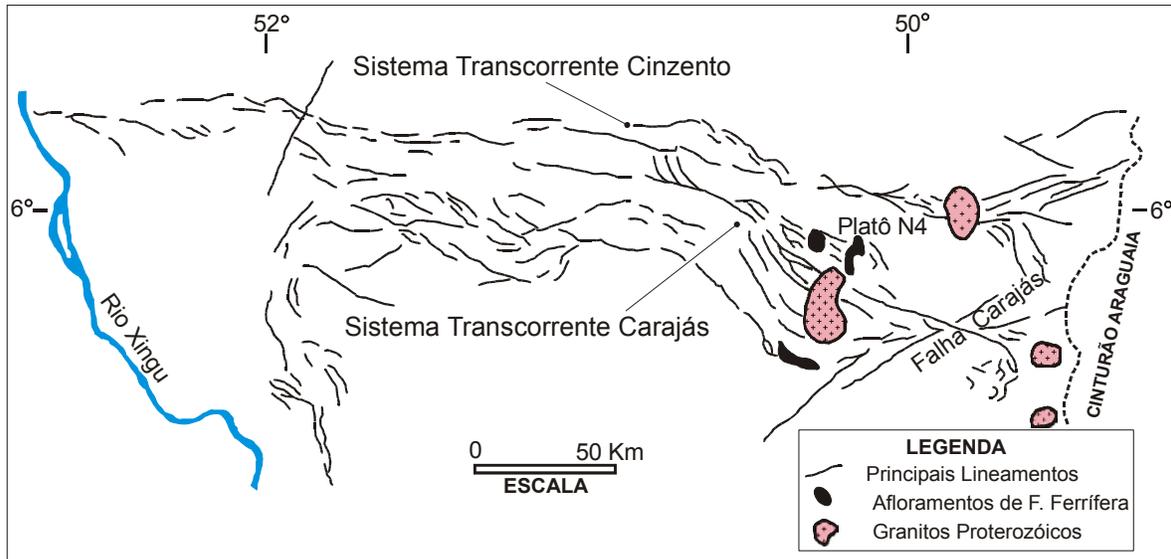


Figura 2.1 – Mapa Simplificado do Cinturão Itacaiúnas, composto pelos Sistemas Transcorrentes Carajás e Cinzento com os principais lineamentos estruturais (modificado de Oliveira, 2002).

A Falha Carajás possui direção geral WNW-ESSE, com aproximadamente 200km de comprimento. É composta por feixes de traços descontínuos, curvos e anastomóticos, desenhando um padrão sigmoidal em “Z” aberto na escala regional. Essa falha tem suas terminações em *splay*, sendo que a terminação WNW mostra inflexão para NW e a terminação ESE curva-se para sul formando um *splay* em “rabo de cavalo” (Lima, 2002)

2.2 ESTRATIGRAFIA

Desde o início dos trabalhos de pesquisa e exploração mineral na região de Carajás foram feitas inúmeras tentativas de organização das unidades rochosas tectônica e estratigráficas.

Atualmente, três propostas com características bem distintas aparecem em destaque nos trabalhos que vem se realizando na região, são elas as de: DOCEGEO, 1988; Araújo & Maia, 1991 e Pinheiro, 1997 (Fig. 2.2).

A proposta litoestratigráfica da DOCEGEO (1988) reflete uma tentativa de organizar um grande volume de informações obtidas pela companhia por mais de 20 anos de trabalho, sendo bastante citada em trabalhos sobre a região de Carajás. Esta proposta baseia-se em princípios litoestratigráficos e geocronológicos, enfatizando as rochas arqueanas e proterozóicas.

A falta de dados estruturais mais substanciais e a sugestão de uma terminologia estratigráfica vasta e complexa, baseada em mapeamentos litológicos em várias áreas particulares onde a empresa opera suas minas, torna essa proposta de difícil aplicação no dia-a-dia de quem não conhece detalhadamente a região.

Araújo & Maia (1991) lançaram uma proposta fruto do Projeto de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Folha Serra dos Carajás. Onde se realizou um mapeamento geológico regional da área com ênfase nos aspectos tectônicos. Essa proposta representou a primeira tentativa de estabelecer uma organização tectonoestratigráfica para as rochas de Carajás.

Apesar de arrojada, sob o ponto de vista tectônico, a proposta carece de detalhes. Muitas unidades anteriormente sugeridas foram simplificadas de modo questionável. Há necessidade de uma discussão mais detalhada para respaldar as modificações propostas.

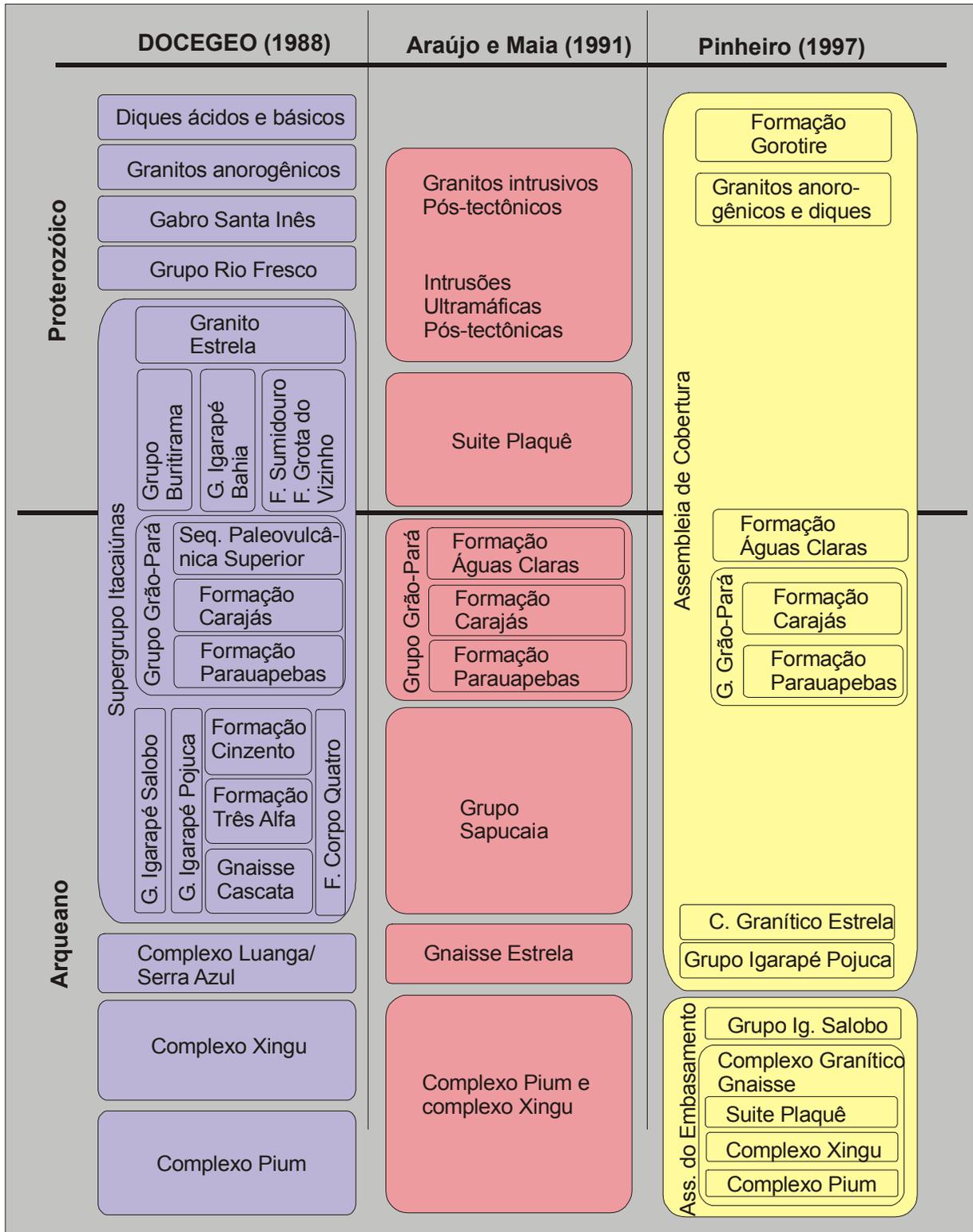


Figura 2.2 – Propostas estratigráficas para a região de Carajás apresentadas por DOCEGEO (1988), Araújo & Maia (1991) e Pinheiro (1997).

A proposta de Pinheiro (1997) é baseada na evolução tectono-estrutural para a região da Serra dos Carajás, que diferentemente das anteriores, se apóia em estudos tectônicos de detalhe desenvolvidos na região. As unidades tectonoestratigráficas foram agrupadas em:

- *Assembléia do Embasamento* que inclui terrenos Granito-Gnáissico de Alto Grau compostos por rochas mais antigas de fácies granulito (Complexo Pium; 3050 ± 114 Ma; Rodrigues *et al.*, 1992), uma seqüência mais jovem de ortognaisses incluindo migmatitos de fácies anfibolito superior (Complexo Xingu; 2856 ± 3 Ma, Machado *et al.*, 1991) e por granitóides sintectônicos (Suíte Plaqué; Araújo & Maia, 1991). Essas rochas são referidas como Complexo Granito-Gnaiss. No entanto, há ocorrências isoladas de rochas supracrustais de alto grau, sendo a seqüência vulcano-sedimentar conhecida como Igarapé Salobo (2851 ± 4 Ma, Machado *et al.*, 1991) a mais importante.
- *Assembléia de Cobertura* representada por rochas vulcânicas e sedimentares de baixo a muito baixo grau que estão discordantes sobre as rochas da *Assembléia do Embasamento*. Uma seqüência de rochas clásticas, vulcânicas e ferríferas mais antigas (Grupos Igarapé Pojuca e Grão-Pará; 2758 ± 39 Ma; Wirth *et al.*, 1986; Machado *et al.*, 1991) é sobreposta por uma seqüência de depósitos clásticos marinhos rasos a fluviais (Formação Águas Claras; Nogueira *et al.*, 1995) e cortadas por *sills* metagabróicos de 2645 ± 12 Ma. (Dias *et al.*, 1996).
- As assembléias de cobertura e do embasamento são cortadas por plútons graníticos do tipo A e por diques básicos do Proterozóico Inferior a Médio (Wirth *et al.*, 1986; Machado *et al.*, 1991). Todas as unidades são recobertas por rochas sedimentares localizadas do Proterozóico Médio ao Fanerozóico.

Essa proposta carece de estudos petrológicos e geocronológicos mais detalhados. Nota-se a dificuldade de organização das rochas dos grupos Igarapé Salobo, Igarapé Pojuca e Grão Pará, considerando suas afinidades petrológicas. O Complexo Xingu é ainda uma unidade de caráter estratigráfico questionável neste contexto. O mesmo ocorre com a Formação Gorotire, que ainda não foi perfeitamente caracterizada sob ponto de vista estratigráfico.

Nota-se, no entanto, que nas três principais propostas estratigráficas para a Região de Carajás há, de certa forma, correspondência e concordância quanto ao posicionamento do Grupo Grão-Pará dentro das colunas estratigráficas.

Este trabalho utilizará como referência a proposta de Pinheiro (1997), já que a mesma apóia-se na tectonoestratigrafia, ferramenta útil para trabalhos em áreas deformadas. A reconstituição da estratigrafia original utilizando-se os princípios da estratigrafia clássica pode se tornar uma tarefa difícil e não alcançar resultados satisfatórios.

2.3 GEOCRONOLOGIA

Existe hoje uma quantidade relativamente grande de dados geocronológicos disponíveis para as rochas da região de Carajás (Fig. 2.3). Inicialmente, os métodos usando os isótopos Rb-Sr e K-Ar nortearam temporariamente o entendimento geocronológico regional. Algumas idades radiométricas obtidas pelo método Rb-Sr em rocha total se apresentaram sistematicamente mais jovens quando comparadas a idades obtidas posteriormente por métodos mais consistentes (Villas & Santos 2001). Posteriormente datações mais seguras foram obtidas através de método U-Pb em zircão e complementarmente, através do método Pb-Pb em rocha total ou zircão.

A Tabela 1 apresenta os principais dados geocronológicos obtidos em diferentes tipos de rochas. Ao se observar esses resultados nota-se a possibilidade de agrupamento dos mesmos em distintos intervalos de idades. Com base nesses dados pode-se fazer os seguintes comentários:

- As rochas do embasamento têm idades maiores que 2.8 Ga. O Complexo Xingu com 2.85 Ga. e o Complexo Pium com 3.00 Ga., representam as rochas mais antigas da região.
- Seqüências de rochas metavulcano-sedimentares com idades entre 2.76 e 2.73 Ga. compõem o Supergrupo Itacaiúnas. Este reúne os Grupos Igarapé Salobo (2.76 Ga.), Grão Pará (2.75 Ga.), Igarapé Bahia (2.74 Ga.) e Igarapé Pojuca (2.73 Ga.). A concordância de idades e a afinidade litológica dessas unidades indicam que possivelmente essas rochas se formaram sob um mesmo contexto geológico, podendo ser diferentes expressões de um mesmo evento.
- O Grupo Grão Pará, objeto central desse trabalho, está subdividido nas Formações Parauapebas (2758 ± 2 Ma.) e Carajás (2751 ± 4 Ma.). As idades para essas rochas podem ser interpretadas como sendo respectivamente a idade do vulcanismo que formou os basaltos toleíticos e a idade da deposição das BIFs (Machado *et al*, 1991 e Krymisky *et al.*, 2000).
- Um *sill* gabrótico que corta a seqüência sedimentar clástica da Formação Águas Claras, datado em 2645 ± 12 Ma, representa a idade mínima aproximada para essa unidade.
- As rochas graníticas são representadas basicamente por Granitos Arqueanos e Proterozóicos.
- Entre os Granitos Arqueanos se distinguem dois grupos: (1) relacionados à granitogênese de 2.7 Ga. (*p.e.* Granito Estrela, Planalto, Dioritos Cristalino e Suíte Plaquê); e (2) relacionados à granitogênese de 2.5 Ga. (Granito Itacaiúnas e Old Salobo). Além dos Granitos Xinguará e Mata Surrão com idade de 2.8 Ga.
- Os Granitos Proterozóicos com idades entre 1.7 a 1.8 Ga mostram relação com evento de granitogênese regional entre 1.8 e 2.0 Ga.

	Unidades Geológicas	Idades (Ma)	Métodos	Fonte
Granitos Proterozóicos	Granito Jamon	1601±42	Rb-Sr (RT)	Dall'Agnol <i>et al.</i> (1984)
	Granito Seringa	1730±58	Rb-Sr (RT)	Lafon <i>et al.</i> (1988)
	Granito Velho Guilherme	1873±13	Pb-Pb (RT)	Rodrigues <i>et al.</i> (1992)
	Granito Pojuca	1874±2	U-Pb (ZR)	Machado <i>et al.</i> (1991)
	Granito Musa	1883±5	U-Pb (ZR)	Machado <i>et al.</i> (1991)
	Granito Serra dos Carajás	1880±2	U-Pb (ZR)	Machado <i>et al.</i> (1991)
	Granito Cigano	1883±2	U-Pb (ZR)	Machado <i>et al.</i> (1991)
Granitos Arqueanos	Granito Xinguara	~ 2.880	U-Pb (ZR)	Macambira (1992)
	Granito Mata Surrão	2872±10	Pb-Pb (RT)	Rodrigues <i>et al.</i> (1992)
	Granito Itacaiúnas deformado	2560±37	Pb-Pb (ZR)	Souza <i>et al.</i> (1996)
	Granito Old Salobo	2573±2	U-Pb (ZR)	Machado <i>et al.</i> (1991)
	Suite Plaquê	2736±24	Pb-Pb (ZR)	Avelar <i>et al.</i> (1999)
	Dioritos Cristalino	2738±6	Pb-Pb (ZR)	Huhn <i>et al.</i> (1999)
	Granito Planalto	2747±2	Pb-Pb (ZR)	Huhn <i>et al.</i> (1999)
Supergrupo Itacaiúnas	Granito Estrela	2763±7	Pb-Pb (ZR)	Barros <i>et al.</i> (2001)
	Sills gabróicos Águas Claras	2645±12	Pb-Pb (ZR)	Dias <i>et al.</i> (1996)
	Grupo Igarapé Pojuca	2732±3	U-Pb (ZR)	Machado <i>et al.</i> (1991)
	Grupo Igarapé Bahia	2747±2	Pb-Pb (ZR)	Galarza (2002)
	Formação Parauapebas	2758±2	U-Pb (ZR)	Machado <i>et al.</i> (1991)
	Formação Carajás	2751±4	U-Pb (ZR)	Krymsky <i>et al.</i> (2002)
Rochas do Embasamento	Grupo Igarapé Salobo	2761±3	U-Pb (ZR)	Machado <i>et al.</i> (1991)
	Complexo Xingu	2859±2	U-Pb (ZR)	Machado <i>et al.</i> (1991)
	Complexo Pim	3002±14	U-Pb (SHRIMP)	Pidgeon <i>et al.</i> (1998)

Tabela 1- Resumo de alguns dados geocronológicos das rochas da Província Carajás; ZR – zircão; RT – rocha total (modificado de Villas & Santos, 2001).

2.4 MODELOS TECTÔNICOS PREVIAMENTE PROPOSTOS

São dois os principais modelos tectônicos existentes para a região de Carajás e que têm sido utilizados como referência para os trabalhos desenvolvidos na região.

Costa *et al.* (1995) propõem que os arranjos estruturais e as unidades litológicas que compõem a Província Mineral de Carajás são resultados de três eventos termo-tectônicos de idade pré-cambriana:

(1) No *primeiro evento* houve instalação e propagação de zonas de cisalhamento tangenciais oblíquas E-W inclinadas para sul. Acompanhadas de metamorfismo de fácies anfíbolito e de soerguimento de rochas granulíticas da crosta inferior, juntamente com retrabalhamento de unidades mais antigas.

Seqüências vulcano-sedimentares do tipo *greenstones* se abrigaram em bacias transtensivas.

Os sistemas transcorrentes Carajás e Cinzento se estabeleceram juntamente com várias bacias que se formaram ao longo dos lineamentos direcionais, onde então se depositaram rochas vulcânicas e sedimentares (Grupo Grão-Pará).

Posteriormente um importante evento transpressivo foi responsável pela inversão das bacias transcorrentes previamente formadas, acompanhada por metamorfismo de fácies anfíbolito e xisto-verde e intensa atividade hidrotermal.

Por último se formaram falhas transcorrentes discretas com direção WNW-ESSE, N-S e NE-SW. Essas etapas estariam relacionadas a uma colisão oblíqua entre dois blocos crustais maiores: os blocos Araguacema e Belém.

(2) O *segundo evento* formou vários segmentos extensionais de idade proterozóica com a componente distensiva orientada segundo a direção NE-SW.

(3) O *terceiro evento* foi responsável pelo estabelecimento do Cinturão Araguaia.

Pinheiro (1997) apresenta um modelo tectônico baseado em reativações tectônicas subseqüentes, de caráter rúptil a rúptil-dúctil controladas geometricamente pela presença da trama planar dúctil do embasamento arqueano. Nesse quadro se intercalam reativações transtensivas e transpressivas conforme exposto na Fig. 2.3. Esse modelo propõe as seguintes etapas:

(1) Inicialmente ocorreu a formação de uma trama milonítica penetrativa dúctil E-W de alta temperatura, sob transpressão sinistral, que afetou as rochas da Assembléia do Embasamento (Complexo Xingu, Complexo Pium, Suíte Plaqué e Grupo Igarapé Salobo), no intervalo de 3.0 a 2.8 Ga;

(2) Após a deposição do Grupo Igarapé Pojuca, ocorreu transpressão sinistral entre 2.8 e 2.7 Ga. com a formação de zonas de cisalhamento sinistrais e dobramento das rochas da Assembléia do Embasamento, sob condições dúcteis acompanhada de metamorfismo de temperatura média a baixa. Posteriormente, um evento extensional possibilitou a formação de bacias intracratônicas regionais onde se depositaram as rochas vulcânicas e sedimentares do Grupo Grão-Pará, em torno de 2.76 Ga. Foram posteriormente submetidas a metamorfismo e/ou hidrotermalismo em grau muito baixo, com a deposição da Formação Águas Claras logo em seguida;

(3) Sob transtensão destal, a Falha Carajás juntamente com os sistemas transcorrentes Carajás e Cinzento iniciaram o seu desenvolvimento entre 2.6 Ga e 2.0-1.8 Ga. As seqüências vulcano-sedimentares foram preservadas ao longo de zonas de subsidência que se desenvolveram pelas falhas transcorrentes E-W e NW-SE juntamente com falhas normais contornando blocos losangulares;

(4) Sob cinemática transpressiva sinistral ocorreu inversão fraca das seqüências vulcano-sedimentares por reativação de falhas, sendo a deformação moderada a forte, concentrada nas rochas adjacentes à Falha Carajás.

(5) Como ultimo notável episódio, extensão ou transtensão em 1.9 -1.8 Ga provoca a intrusão de plútons graníticos e diques.

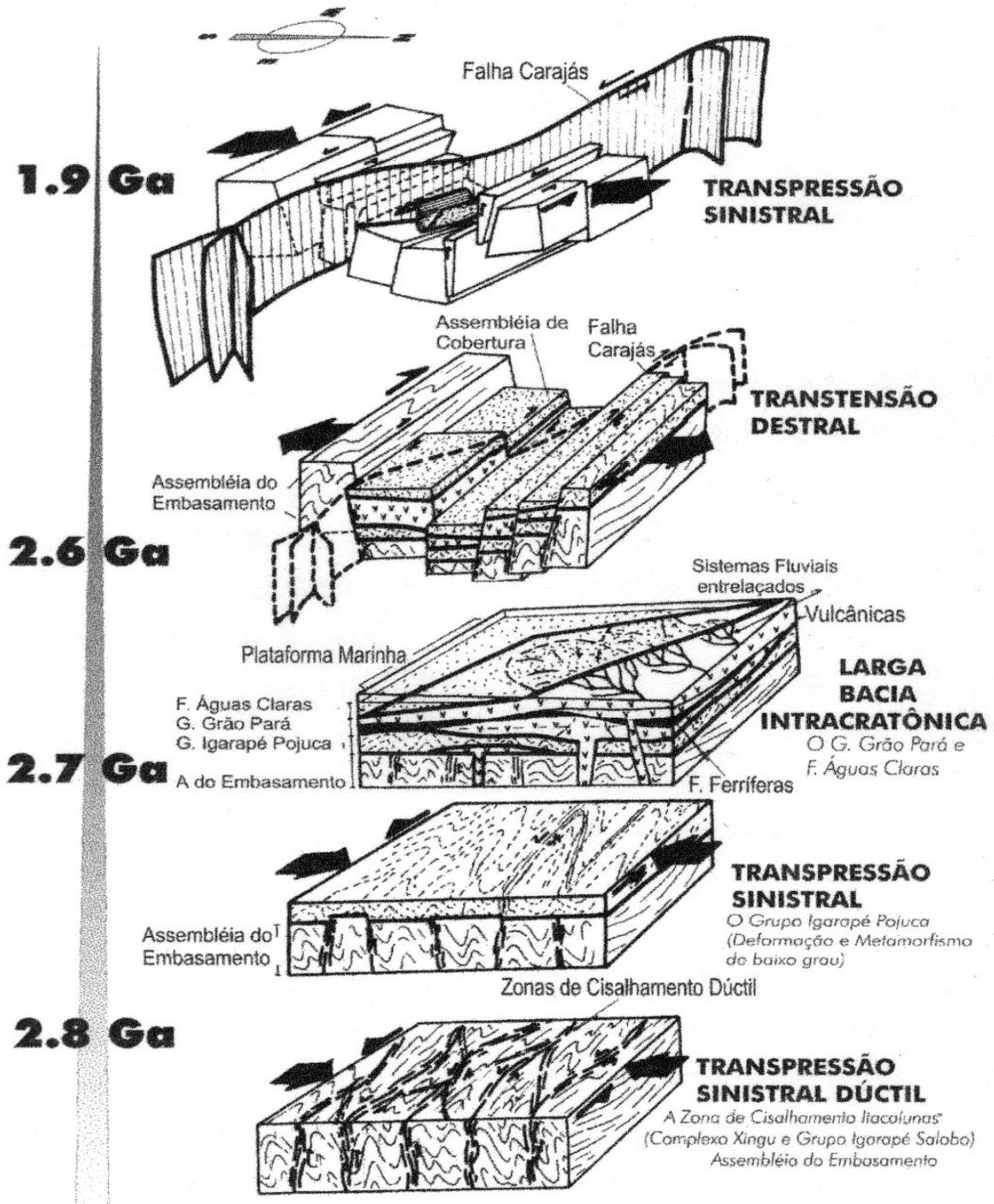


Figura 2.3 - Quadro Evolutivo esquemático para a região de Carajás, no período de 2.8 Ga a 1.9 Ga (Pinheiro & Holdsworth, 2000).

Apesar de semelhantes em vários aspectos, os dois modelos mais recentemente propostos são substancialmente distintos. Dentre os pontos mais controversos apresentados pelos autores, pode-se distinguir:

- Costa *et al.* (1995) propõem que o embasamento teria sido reativado por cavalgamentos resultantes da colisão de dois blocos tectônicos. Pinheiro (1997) sugere que as reativações estariam associadas à trama planar dúctil do embasamento, facilitando assim uma reativação transcorrente ao invés de reativações feitas ao longo de planos de mergulho.
- Costa *et al.* (1995) sugerem que as seqüências vulcano-sedimentares se depositaram em bacias do tipo *pull-apart*, que se formaram sob cinemática destal ao longo dos sistemas transcorrentes. Estudos sedimentológicos realizados por Nogueira (1995) e por Pinheiro & Holdsworth (1997a e b) mostram que esse modelo de bacia *pull apart* é inconsistente com os dados estratigráficos e sedimentológicos observados nas rochas do Grupo Grão-Pará e da Formação Águas Claras. As mesmas indicam deposição em amplas bacias intracratônicas e teriam seus depocentros colocados fora da região onde hoje existe a estrutura sigmoidal de Carajás.
- A inversão tectônica reconhecida anteriormente por Costa *et al.* (1995), segundo Pinheiro (1997), seria um evento de caráter restrito às adjacências das grandes falhas e não de abrangência regional.

2.5 GEOLOGIA DAS MINAS DOS PLATÔS A NORTE

2.5.1 Histórico

O primeiro reconhecimento geológico na região da Serra dos Carajás foi feito por Avelino Ignácio de Oliveira, no início da década de vinte, revelando ocorrências de galena em São Félix do Xingu e material carbonoso no rio Fresco.

Em 1933 o engenheiro Luiz Flores de Moraes Rego descreveu no alto do Itacaiúnas “morros de topos planos onde se encontram campos gerais”. O geógrafo Luiz Castro Soares em 1951/1952 ao fazer um reconhecimento aéreo fitofisionômico na região observou a existência de formações não florestais correspondentes às clareiras que hoje são reconhecidas como indicativas de ocorrências ferríferas.

Octávio Barbosa e colaboradores, através do Projeto Araguaia, coordenado pelo DNPM, tiveram a primeira grande iniciativa de avaliação do potencial de recursos minerais da região, em 1966.

Através de um amplo programa de prospecção mineral para a região, em 1967, foi identificada a ocorrência de minério de ferro por geólogos da Companhia Meridional de Mineração.

Através de um acordo firmado entre a Companhia Vale do Rio Doce e a Companhia Meridional de Mineração em 1969, foram requeridas 18 áreas de pesquisa na região totalizando 160.000 hectares.

Em 1970/1972 através de um intenso programa de pesquisa foi reconhecida a existência de grandes reservas de hematita de alto teor, acarretando em estudos destinados à viabilidade econômica dessas reservas, quando foi feita a opção pelo corpo de N4E. Em 1977 a Companhia Vale do Rio Doce adquiriu as ações pertencentes a *United States Steel* ficando como única responsável pela condução do projeto.

Em junho de 1978 se iniciaram as obras do Projeto Carajás acompanhada posteriormente pela construção da estrada de ferro Carajás - São Luiz. Em 1986 a jazida N4E entrou em ritmo de operação de lavra para produção de 15 milhões

de toneladas de minério de ferro/ano. A produção vem, progressivamente crescendo, tendo atingido em 2003, 186 milhões de toneladas.

2.5.2 Geologia

Os maiores depósitos de ferro no mundo estão associados a formações ferríferas de idade pré-cambrianas. As formações ferríferas bandadas no Brasil ocorrem em dois contextos geológicos distintos: (1) como pequenos corpos intercalados com gnaisses arqueanos de alto grau (i.e. Guanhães no estado de Minas Gerais; Borges *et al.*, 1979, Hoppe *et al.*, 1987) ou (2) como grandes formações dentro de seqüências sedimentares ou vulcano-sedimentares de baixo grau, do Arqueano Superior ao Paleo-Proterozóico (i.e. Quadrilátero Ferrífero no estado de Minas Gerais; Dorr, 1973; Serra dos Carajás; CVRD/CMM, 1972; Gibbs *et al.*, 1986). Há muitos trabalhos publicados que examinaram características estratigráficas, petrológicas e geoquímicas dessas formações ferríferas bandadas (i.e. Suszezynski, 1972; Beisiegel *et al.*, 1973; Beisiegel, 1982, DOCEGEO, 1988) e seus aspectos estruturais.

O depósito de ferro N-4, de idade arqueana superior, da Serra dos Carajás é o maior depósito atualmente minerado na América do Sul. Tendo em comum com muitos outros depósitos de ferro do Brasil, a presença de rochas com complexos padrões de dobramentos e falhamentos (Pinheiro & Holdsworth, 1997b).

Na região da Serra dos Carajás os platôs N1, N4 e N5, dentre outros, mostram como rochas predominantes as formações ferríferas arqueanas associadas ao Grupo Grão Pará (Gibbs *et al.*, 1986). O termo Grupo Grão Pará foi primeiramente usado por Rêgo (1933). Esse grupo foi subdividido por Beiseigel *et al.* (1973) em três unidades (Seqüência Paleovulcânica Inferior, Formação Carajás e Sequência Paleovulcânica Superior).

Existem duas propostas estratigráficas clássicas para as rochas do Grupo Grão Pará: (1) a da DOCEGEO (1988) e (2) a de Araújo & Maia (1991). A primeira considera o Grupo Grão Pará como uma seqüência vulcano-sedimentar

composta por três unidades; (1) Paleovulcânica Inferior (basaltos); (2) Formação Carajás (minério de ferro); e (3) Paleovulcânica Superior (basaltos de topo).

A proposta de Araújo & Maia (1991) define o Grupo Grão Pará como formado pelas formações Carajás (rochas ferríferas), Parauapebas (metavulcânicas) e Águas Claras (metassedimentos), todas com idade arqueana.

Pinheiro (1997), utilizando a tectonoestratigrafia, divide o Grupo Grão Pará em duas unidades principais: as rochas vulcânicas da Formação Parauapebas (Meireles *et al.*, 1984) e as rochas ferríferas da Formação Carajás (Beisiegel *et al.*, 1973).

Com base em dados petrográficos, geoquímicos, isotópicos e geocronológicos, Macambira (2003) caracterizou a bacia onde se depositaram as rochas do Grupo Grão-Pará como tendo se desenvolvido sobre crosta continental intraplaca, em um contexto de movimentação divergente. A abertura desta bacia teria sido interrompida, estacionando em um estágio semelhante a um *rift* abortado.

Na região do platô N-4, unidades da Formação Parauapebas são tectonicamente encontradas acima e abaixo das rochas da Formação Carajás (CVRD-CMM, 1972; Beisiegel *et al.*, 1973; Anderson *et al.*, 1974; Araújo *et al.*, 1988).

Formação Parauapebas

Essa unidade reúne rochas vulcânicas de seqüências bimodais de basaltos, doleritos e riolitos com 4 a 6 km de espessura (Pinheiro & Holdsworth, 1997b). As rochas vulcânicas apresentam idade de 2758 ± 39 Ma, obtidas através de U-Pb em zircão, interpretadas como sendo a idade principal do derrame (Gibbs *et al.*, 1986).

Estudos geoquímicos classificaram os *vulcanitos* da Formação Parauapebas como toleitos continentais (Gibbs *et al.*, 1986; Gibbs & Wirth, 1990; Lindenmayer & Fyfe, 1992).

Essas rochas exibem efeitos de transformações mineralógicas e recristalização metamórfica, possivelmente inerente ao fácies xisto-verde baixo a alto. Mostram, de uma maneira geral, vários graus de cloritização, silicificação, carbonatização e epidotização. Ocasionalmente se observa a presença de vesículas preenchidas por esses minerais secundários (Araújo & Maia, 1991).

Teixeira *et al.*, (1997) com base em estudos petrográficos, geoquímicos e de isótopos de oxigênio, propõem que aproximadamente 70% das rochas vulcânicas máficas do Grupo Grão Pará foram submetidas a transformações causadas por atividade hidrotermal relacionada a dois principais eventos. O primeiro, de idade arqueana, com água do mar aquecida por vulcanismo e; o segundo, do Paleoproterozóico, causado por águas meteóricas aquecidas pela colocação do Granito Central de Carajás e outros da mesma suíte.

Macambira (2003) separou as rochas vulcânicas máficas do Grupo Grão Pará em três grandes grupos: 1) basaltos com mineralogia e texturas ígneas preservadas e pouco ou nada hidrotermalizados; 2) basaltos fortemente hidrotermalizados e 3) meta-basaltos. Em todos os casos foram encontradas evidências de texturas ígneas preservadas.

Formação Carajás

A Formação Carajás é representada pelas rochas ferríferas que formam os vários tipos de minério de ferro, todos associados à fácies óxido (Tolbert *et al.*, 1971; Beisiegel, 1982), com idade de deposição de 2.751 ± 4 (Krymsky *et al.*, 2002).

Para auxiliar os trabalhos de lavra, os diferentes tipos de minério relacionados às rochas ferríferas da Formação Carajás são classificados de acordo com parâmetros físicos e químicos em:

- *Jaspilito (JP)*: composto de camadas (2-20 mm de espessura) alternadas de material muito fino e cristalino de quartzo e/ou bandas de chert, com hematita, martita, magnetita e pirita (Araújo & Maia, 1991; Marçal, 1991). Essas rochas são cortadas por veios de quartzo centimétricos a milimétricos, algumas vezes com distribuição irregular, aparentemente associados às dobras que deformam essas rochas (ver detalhes mais a frente). As rochas onde predomina a hematita são compostas de bandas intercamadas (1-5 mm de espessura) de hematita de granulação fina e quartzo cristalino friável.
- *Hematita mole (HM)*: é o tipo predominante de minério e ocorre ao longo de toda mina. É composto de placas milimétricas de hematita friável. Esse minério pode apresentar variações químicas, ocorrendo como *hematita mole limonitizada (HML)*, *hematita mole limonitizada aluminosa (HMLA)* e *hematita mole aluminosa (HMA)*.
- *Hematita dura (HD)*: á composto de placas de hematita compacta de até 5 cm de espessura, intercaladas com hematita friável. Pode ainda ser classificado em *hematita semi-branda (HSB)*, composta por bandas brilhosas e compactas alternadas com bandas foscas e porosas, e *hematita semi-semidura (HSD)*, finamente bandada com alternância de bandas cinza azuladas compactas e bandas vermelhas porosas.

Originalmente o bandamento primário das rochas ferríferas (minério de ferro) pode ter sido similar ao dos jaspilitos, mas após o Cretáceo as rochas foram submetidas a intenso e profundo intemperismo tropical que formou os demais tipos de minérios encontrados na mina (Beisiegel, 1982). As rochas intemperizadas são predominantes (aproximadamente 80 % do volume) e apresentam vários graus de alteração que são responsáveis pelas diferenças de parâmetros físicos e químicos.

Volumes significantes de rocha básica estão encaixados nas rochas ferríferas, destacando-se diques e outros corpos intrusivos (5-10% da área da mina). É difícil acessar a mineralogia original dessas rochas, pois seus afloramentos se mostram intensamente alterados por intemperismo e possivelmente também por atividade hidrotermal.

Dois conjuntos de intrusões com diferentes idades relativas foram separados. O primeiro grupo (1) está dobrado e deformado, acompanhando igualmente às outras rochas, enquanto que o segundo grupo (2) se encontra sem deformação.

As intrusões mais antigas foram colocadas originalmente como corpos em forma de *sills* (0,5-3m de espessura). As intrusões mais novas têm em geral > 20m de espessura, com forma irregular, embora elas tendam a seguir uma direção N a NE, com um grupo subordinado mostrando *trend* para SE. Nenhuma dessas intrusões foi datada na mina, mas algumas, provavelmente pertencem à suíte do Proterozóico Médio reconhecida no Cráton Amazônico (Sial *et al.*, 1987; Teixeira 1990; Costa *et al.* 1991) ou são intrusões relacionadas às vulcânicas da Formação Parauapebas, adjacentes às formações ferríferas.

A mina de ferro está localizada na aba nordeste do platô N-4 com uma área de aproximadamente 5km², sendo uma mina a céu aberto com 100m de profundidade. O minério de ferro na mina tem sido descrito como um corpo irregular, medindo 4.2km de extensão, 300m de largura e 200m de espessura dando uma reserva estimada de 12 milhões de toneladas, com aproximadamente 66% de ferro (Araújo & Maia, 1991).

2.5.3 Geologia Estrutural

Ladeira & Cordeiro (1988) foram os primeiros a realizar estudos específicos sobre a geologia estrutural na Mina N-4. O trabalho se concentrou na atual aba leste mina N4E, onde foram identificados três tipos distintos de dobras com mergulho para W SW, juntamente com estruturas rúpteis. Esses três estilos de dobras estariam relacionados a três fases distintas de deformação.

Conjuntos de juntas e fraturas, juntamente com falhas normais e zonas de brechação afetando as rochas ferríferas, foram formados em associação com um episódio rúptil regional.

As dobras caracterizadas foram assim descritas:

- *Dobramento B1*: dobras similares, anisópacas, apertadas, com tendência a isoclinais e a recumbência, mostrando eixo com caimento de 10-20°/310°. Paralela aos flancos das dobras há uma foliação S1 formada pela orientação de hematita e especularita.
- *Dobramento B2*: dobras abertas, com forte assimetria, anisópacas, ocorrendo mais comumente nos flancos das dobras B1. Apresentam-se orientadas segundo 310° a 320°Az, caindo cerca de 40°. Está associada a uma foliação de crenulação S2 que corta S1.
- *Dobramento B3*: dobras amplas, orientadas segundo 270°Az, com caimento de 40° a 50°. Mostram superfícies de clivagem de fratura em posição plano axial, sem recristalização de minerais.

Esses autores sugerem ainda que as rochas vulcânicas abaixo e acima das rochas ferríferas (“Seqüência Paleovulcânica Inferior” e “Seqüência Paleovulcânica Superior” respectivamente; CVRD-CMM 1972) poderiam ser uma única unidade repetida por dobramentos ou cavalgamentos.

Os trabalhos de Marçal (1991) e Marçal *et al.* (1992) sugeriram que o bandamento composicional das rochas ferríferas corresponde a uma foliação milonítica transposta formada durante deformação dúctil. Propuseram ainda que tramas dúcteis seriam associadas principalmente a movimentos destrais baseado nos padrões de vergência das dobras. As dobras, em escala quilométrica, estariam relacionadas ao *trend* N-S das falhas e zonas de cisalhamento destrais que foram ativas como estruturas antitéticas durante

transpressão regional sinistral, ao longo dos sistemas de falhas Carajás e Cinzento (Araújo & Maia, 1991; Marçal, 1991; Marçal *et al.*, 1992).

Pinheiro & Holdsworth (1997b) propõe que a distribuição e os padrões de deformação das rochas da Assembléia de Cobertura (incluindo as rochas do Grupo Grão Pará) estariam relacionados direta ou indiretamente à Falha Carajás.

Segundo Pinheiro & Holdsworth (1997b), as rochas vulcânicas e ferríferas do platô N4 foram submetidas a uma única fase de dobramento rúptil-dúctil formando um par de dobras quilométricas antiforme-siniforme com caimento suave para WNW e com superfície axial mergulhando com ângulo alto para SW. Em decorrência disso, os contatos entre as diferentes rochas presentes na região estariam deformados por dobramento, respaldando parcialmente a concepção de Ladeira & Cordeiro (1988). O autor mostra evidências de partição de deformação durante transpressão sinistral, causada em parte pelas diferenças reológicas entre os litotipos.

Essa deformação envolveria convergência oblíqua com deslocamento de massa proveniente de N NW, gerando transpressão sinistral inversa, com soerguimento pronunciado do bloco deformado.

A possibilidade da existência de um anteparo tectônico disposto ao longo da Falha Carajás, a sul-sudeste, poderia explicar a inversão da vergência das dobras durante esse episódio de deformação regional.

2.6 GEOMORFOLOGIA

No Distrito Ferrífero da Serra dos Carajás, os aspectos mais salientes da conformação do terreno são:

- Vales longos, retilíneos a sinuosos cobertos pela mata primária.
- Serras alongadas e de bordas íngremes.

- Chapadas ou mesas em situação dominante, de vegetação rala e assentada sobre materiais superficiais associados a minério de ferro.

No geral, as áreas de ocorrência de minério de ferro da Serra dos Carajás se erguem acima da mata, constituindo platôs (Fig. 2.4).



Figura 2.4 - Platôs sustentados por rochas ferríferas e vulcânicas do Grupo Grão-Pará na Serra Norte (foto CVRD/GAJAN).

As clareiras nos topos dos platôs são caracterizadas pelas seguintes feições gerais:

- São áreas predominantemente planas, alongadas e situadas entre as cotas de 600 a 700m.
- Acima da superfície plana, eventualmente se erguem espigões alongados de perfil convexos, orientados longitudinalmente.
- Nas áreas planas são comuns depressões fechadas, ocupadas por lagoas e brejos, temporários e perenes.
- Os espigões alongados situados em relevo sobre as clareiras, têm topos concordantes, em sua maioria situados em torno de 800m.

- Grande parte das depressões são alongadas, retilíneas ou curvas. Suas disposições sugerem controle estrutural.
- Os topos planos apresentam dois níveis predominantes, com diferença de cota da ordem de 40m.

Todas as superfícies geomorfológicas observadas no Distrito Ferrífero de Carajás são revestidas por canga ferruginosa, resistente à erosão.

As linhas de drenagem observadas sobre as superfícies plano-onduladas das clareiras limitam-se a uns poucos sulcos não ramificados. O escoamento das águas pluviais é realizado com uma lâmina quase contínua. Nas áreas mais altas e de maior declive o escoamento é relativamente rápido. Nas áreas planas, as clareiras ficam alagadas após cada chuva devido à superfície irregular da canga.

O arranjo linear do relevo é decorrente de controle estrutural, ou seja, da distribuição dos materiais resistentes à erosão ao longo de faixas definidas por rochas ferríferas.

Na Serra Norte os platôs estão alinhados segundo a direção NW-SE. Esse arranjo de relevo é desenhado por bordas erosivas, com formas convexas. O platô N4 mostra forma em “N” assimétrico; o N5 exhibe forma curvada com um braço orientado na direção NE-SW e outro N-S; o N7 tem forma alongada, ligeiramente curva, com direção NW-SE. Essas formas indicam possível controle estrutural refletido no modelamento do relevo.

Nas áreas planas, cobertas pela couraça limonítica pobre em fragmentos detríticos, ou canga química, predomina a vegetação rasteira, de gramíneas, com arbustos esparsos.

Nas áreas de laterita ocorre vegetação de mata alta, perenifólia, com árvores lenhosas do porte de 30m. Nas áreas de canga e minério, predomina a vegetação de cerrado constituído por herbáceas e lenhosas de pequeno porte. Nos locais onde o solo se espessa podem aparecer moitas com árvores maiores.

CAPÍTULO III – LINEAMENTOS E TRAÇOS TECTÔNICOS REGIONAIS

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os dados obtidos a partir da interpretação visual de imagem de satélite da área de trabalho.

Esse procedimento tem como objetivo identificar e caracterizar os principais elementos de fotoleitura observados a olho nu nas imagens de sensores disponíveis. Esses traços foram interpretados como lineamentos e lineações fotoestruturais, representativas de estruturas geológicas rúpteis de diferentes escalas presentes na área de estudo. Esses dados foram posteriormente integrados aos dados do mapeamento de campo e incorporados á história deformacional das rochas expostas.

O estudo dos sensores remotos foi feito com base em imagem LANDSAT TM5-RGB 457, analisada na escala 1:100.000, seguindo-se a rotina metodológica descrita no Capítulo I. Foi priorizada a retirada dos seguintes elementos de fotoleitura: (1) lineamentos fotoestruturais incluindo elementos de relevo (traços de quebras positivas e negativas, linhas de cristas, etc.) e elementos de drenagem (2) contornos do Granito Central de Carajás e demais litologias eventualmente contrastantes (capazes de formar zonas homólogas); (3) elementos geográficos de drenagens, cidades, etc.

Cabe ressaltar que os resultados alcançados apresentam como principais limitações: (1) em algumas situações, não é possível a diferenciação de traços distintos que apresentem as mesmas direções; (2) nem sempre se pode obter com segurança dados cinemáticos; e (3) a organização temporal entre os diferentes conjuntos de traços geralmente é crítica visto que as reais relações de truncamentos entre eles nem sempre podem ser estabelecidas a partir desse tipo de investigação.

3.2 DADOS OBTIDOS ATRAVÉS DO SENSOR REMOTO

Com base na interpretação de imagem de satélite, foi elaborado o mapa de lineamentos fotoestruturais apresentado na Fig. 3.1. Nesse mapa têm-se como feições marcantes os contornos dos platôs de rochas ferríferas e vulcânicas, cortados por feixes de lineamentos estruturais. Essas feições estão representadas no mapa por linhas pretas curtas e finas (Conjunto 1), juntamente com traços pretos grossos (Conjunto 2 e 3) e ainda linhas vermelhas finas (Conjunto 4). Na área SW do mapa observa-se ainda parte do Granito Central.

A seguir são apresentadas as características de cada conjunto de traços marcados no mapa da Fig.3.1:

- **Conjunto 1**

Têm ampla distribuição no mapa e ocorrem com grande frequência nas porções central e sul e com menor frequência a norte, onde cortam os platôs de rochas ferríferas. Têm orientação seguindo a direção principal NW-SE e, localmente, direções NNE-SSW ou E-W. Esses traços se mostram como feixes de segmentos retilíneos e/ou curvos com comprimento variando de 0.3 km a 3.0 km.

- **Conjunto 2**

Ocupa principalmente a área S SW do mapa. É representado por segmentos anastomóticos, descontínuos, com comprimento variando de 1.0 km a 3.5 km, e orientação preferencial NW-SE. Este conjunto se destaca do Conjunto 1 por ter seus traços nitidamente mais contínuos e destacados.

- **Conjunto 3**

Está desenhado por traços maiores, grossos, contínuos e retilíneos. Correspondem a feições com comprimento variando de 2.5 km até 16.0 km e orientação NE-SW.

Os traços do Conjunto 3 se mostram com baixa densidade na área estudada. Destaca-se a presença de um importante segmento desse conjunto, cortando a Falha Carajás, notadamente a sul do Aeroporto. Outros representantes menores desse conjunto cortam diagonalmente os platôs.

- **Conjunto 4**

Está representado por traços vermelhos, finos e geralmente retilíneos, com direção geral N-S, correspondendo a traços com comprimento variando de 0.6 a 3.5km. Mostra-se distribuído homogêaneamente em toda a área do mapa, tendo frequência regular, em faixas espaçadas em aproximadamente 5 – 10 km. Esses traços cortam os demais lineamentos da área e são os únicos observados no Granito Central.

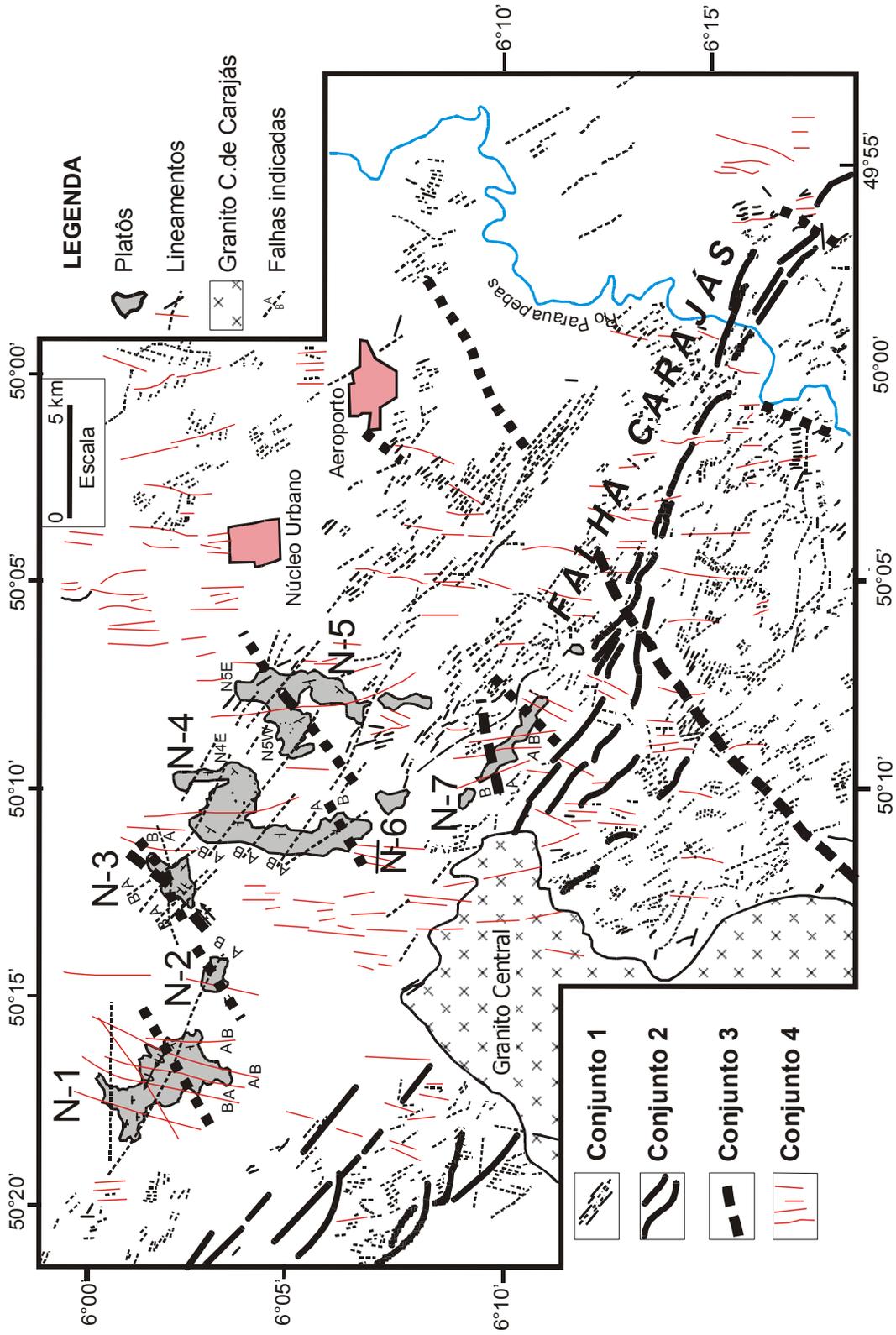


Figura 3.1 – Mapa de lineamentos fotoestruturais indicando os principais conjuntos de lineamentos observados na região da Serra Norte (veja texto para comentários).

3.3 DISCUSSÕES SOBRE OS DADOS DE SENSORES REMOTOS

Os platôs N4, N5 e N7, representados em mapa na Fig. 3.1, chamam atenção especial por desenharem formas indicativas de prováveis influências estruturais relativas à geometria das rochas neles presentes.

O Platô N4 desenha uma forma em “Z” aberto assimétrico, sugestiva da presença de rochas estruturas provavelmente sob rotação sinistral. Essas rochas podem ter sido deslocadas de sua posição inicial WNW-ESSE para a atual N-S, com expressivo encurtamento.

O Platô N5 mostra, em mapa, forma arqueada com direção geral NE-SW sugerindo associação com possível(is) dobra(s), controlando indiretamente a morfologia dessa serra.

Próximo ao traço da Falha Carajás, e seguindo sua direção NW-SE, o Platô N7 tem forma alongada e aparentemente encurvado com aproximadamente 7km de comprimento e 1km de largura em mapa.

Nos arredores do Platô N-7, a norte da Falha Carajás, os traços do Conjunto 1 desenharam uma inflexão com concavidade voltada para NE, contornando os platôs N-4 e N-5, sugerindo a presença de uma feição de arrasto, descolada ao longo do traço da Falha Carajás, com rotação destal do bloco (Fig. 3.2).

Relações temporais podem ser interpretadas, mesmo que de modo não muito confiável, devido à relação difusa entre os conjuntos:

- os traços do Conjunto 1 ocorrem em praticamente toda a área cortando os platôs.

- a Falha Carajás, subordinada ao *trend* do Conjunto 2, e com a mesma direção dos traços do Conjunto 1, possivelmente se formou aproveitando fraturas e falhas preexistentes. Esses dois conjuntos provavelmente correspondem aos traços mais antigos impressos nas rochas da área.

- os traços dos conjuntos 3 e 4, por sua vez, interceptam os traços mais antigos (conjuntos 1 e 2), bem como o Granito Central, sendo possivelmente as estruturas mais jovens.

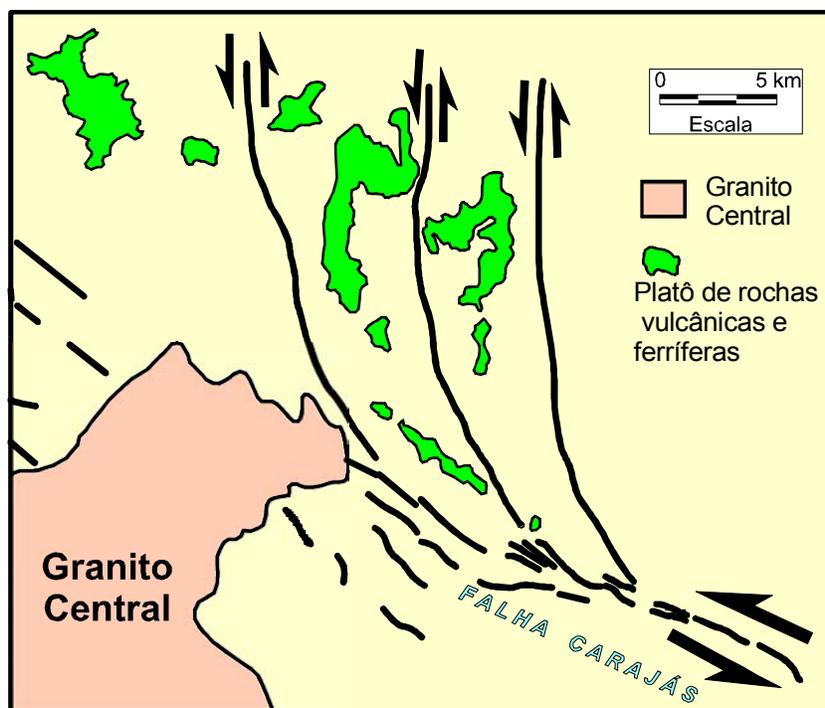


Figura 3.2 – Traços secundários que partem da Falha Carajás e balizam os platôs N4 e N5. A movimentação sinistral da Falha Carajás provoca rotação no sentido horário.

Pinheiro & Holdsworth (1997a) propõe que na região de Carajás, a trama dúctil das rochas do embasamento tem direção E-W e está relacionada à implantação do Cinturão Itacaiúnas no Arqueano. Um evento de transtensão dextral ocorrido entre 2.6 Ga. a 1.8 Ga. teria nucleado a Falha Carajás que corta diagonalmente a estrutura maior de Carajás. A falha, com orientação regional E-W, tem as terminações leste e oeste em *splay*, tipo “rabo-de-cavalo”, com inflexão para sul e norte respectivamente (Pinheiro 1997; Lima, 2002).

Os traços dos Conjuntos 1 e 2, interpretados como sendo mais antigos, possivelmente têm relação com as estruturas E-W arqueanas mencionadas por Pinheiro (1997). Uma vez que tanto as estruturas descritas por Pinheiro (1997), quanto as identificadas neste trabalho, coincidem em direção e em posição temporal relativa.

Entre o final do Paleoproterozóico e início do Mesoproterozóico houve na região de Carajás, assim como em todo o Cráton Amazônico um importante

evento extensional responsável pela colocação de vários corpos graníticos anorogênicos e diques (Dall'Agnol *et al.*, 1986; Costa & Hasui, 1992; Costa *et al.*, 1995). Essa extensão está relacionada ao desenvolvimento de conjuntos de falhas com *trend* NE-SW e NW-SE que afetam tanto o embasamento quanto as rochas supracrustais.

A Faixa Araguaia que limita a região de Carajás a leste sofreu encurtamento durante o Neoproterozóico. Esse cinturão se dispõe na direção N-S, com a foliação orientada em torno de NNW-SSE e NNE-SSW. A análise dos elementos planares e lineares associados com as rochas dessa faixa indicam transporte tectônico de SE para NW sugerindo colisão oblíqua com o Cráton Amazônico (Alvarenga *et al.*, 2000).

Com base nas informações acima descritas, os Conjuntos 3 e 4, correspondem provavelmente às estruturas mais jovens e podem ter relação com o evento extensional do Mesoproterozóico (Dall'Agnol *et al.*, 1986; Costa & Hasui, 1992; Costa *et al.*, 1995). Não se deve descartar a possibilidade de influência da instalação e evolução do Cinturão Araguaia sobre essas rochas. Parte desses traços podem ter sido formados durante a colisão oblíqua que afetou as rochas da Faixa Araguaia.

Não se deve esquecer que a região esteve sob tensão durante o Mesozóico, com o quebraamento do Gondwana, quando se instalaram vários grabens que preservam parte das rochas paleozóicas, notadamente na borda leste do Cráton Amazônico. Essas estruturas têm direção quase sempre em torno do eixo N-S, podendo ter sido geradas durante esse episódio.

Costa *et al.* (1994) mostram que pelo menos dois eventos tectônicos importantes afetaram o Cráton Amazônico no Terciário (Mioceno-Plioceno) e no Quaternário. Esses eventos provavelmente correspondem a reativações extensionais dos pretéritos lineamentos E-W. Além desses, outros conjuntos de lineamentos existentes na região podem ser atribuídos a eventos neotectônicos.

CAPÍTULO III – LINEAMENTOS E TRAÇOS TECTÔNICOS REGIONAIS

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os dados obtidos a partir da interpretação visual de imagem de satélite da área de trabalho.

Esse procedimento tem como objetivo identificar e caracterizar os principais elementos de fotoleitura observados a olho nu nas imagens de sensores disponíveis. Esses traços foram interpretados como lineamentos e lineações fotoestruturais, representativas de estruturas geológicas rúpteis de diferentes escalas presentes na área de estudo. Esses dados foram posteriormente integrados aos dados do mapeamento de campo e incorporados á história deformacional das rochas expostas.

O estudo dos sensores remotos foi feito com base em imagem LANDSAT TM5-RGB 457, analisada na escala 1:100.000, seguindo-se a rotina metodológica descrita no Capítulo I. Foi priorizada a retirada dos seguintes elementos de fotoleitura: (1) lineamentos fotoestruturais incluindo elementos de relevo (traços de quebras positivas e negativas, linhas de cristas, etc.) e elementos de drenagem (2) contornos do Granito Central de Carajás e demais litologias eventualmente contrastantes (capazes de formar zonas homólogas); (3) elementos geográficos de drenagens, cidades, etc.

Cabe ressaltar que os resultados alcançados apresentam como principais limitações: (1) em algumas situações, não é possível a diferenciação de traços distintos que apresentem as mesmas direções; (2) nem sempre se pode obter com segurança dados cinemáticos; e (3) a organização temporal entre os diferentes conjuntos de traços geralmente é crítica visto que as reais relações de truncamentos entre eles nem sempre podem ser estabelecidas a partir desse tipo de investigação.

3.2 DADOS OBTIDOS ATRAVÉS DO SENSOR REMOTO

Com base na interpretação de imagem de satélite, foi elaborado o mapa de lineamentos fotoestruturais apresentado na Fig. 3.1. Nesse mapa têm-se como feições marcantes os contornos dos platôs de rochas ferríferas e vulcânicas, cortados por feixes de lineamentos estruturais. Essas feições estão representadas no mapa por linhas pretas curtas e finas (Conjunto 1), juntamente com traços pretos grossos (Conjunto 2 e 3) e ainda linhas vermelhas finas (Conjunto 4). Na área SW do mapa observa-se ainda parte do Granito Central.

A seguir são apresentadas as características de cada conjunto de traços marcados no mapa da Fig.3.1:

- **Conjunto 1**

Têm ampla distribuição no mapa e ocorrem com grande frequência nas porções central e sul e com menor frequência a norte, onde cortam os platôs de rochas ferríferas. Têm orientação seguindo a direção principal NW-SE e, localmente, direções NNE-SSW ou E-W. Esses traços se mostram como feixes de segmentos retilíneos e/ou curvos com comprimento variando de 0.3 km a 3.0 km.

- **Conjunto 2**

Ocupa principalmente a área S SW do mapa. É representado por segmentos anastomóticos, descontínuos, com comprimento variando de 1.0 km a 3.5 km, e orientação preferencial NW-SE. Este conjunto se destaca do Conjunto 1 por ter seus traços nitidamente mais contínuos e destacados.

- **Conjunto 3**

Está desenhado por traços maiores, grossos, contínuos e retilíneos. Correspondem a feições com comprimento variando de 2.5 km até 16.0 km e orientação NE-SW.

Os traços do Conjunto 3 se mostram com baixa densidade na área estudada. Destaca-se a presença de um importante segmento desse conjunto, cortando a Falha Carajás, notadamente a sul do Aeroporto. Outros representantes menores desse conjunto cortam diagonalmente os platôs.

- **Conjunto 4**

Está representado por traços vermelhos, finos e geralmente retilíneos, com direção geral N-S, correspondendo a traços com comprimento variando de 0.6 a 3.5km. Mostra-se distribuído homogeneamente em toda a área do mapa, tendo frequência regular, em faixas espaçadas em aproximadamente 5 – 10 km. Esses traços cortam os demais lineamentos da área e são os únicos observados no Granito Central.

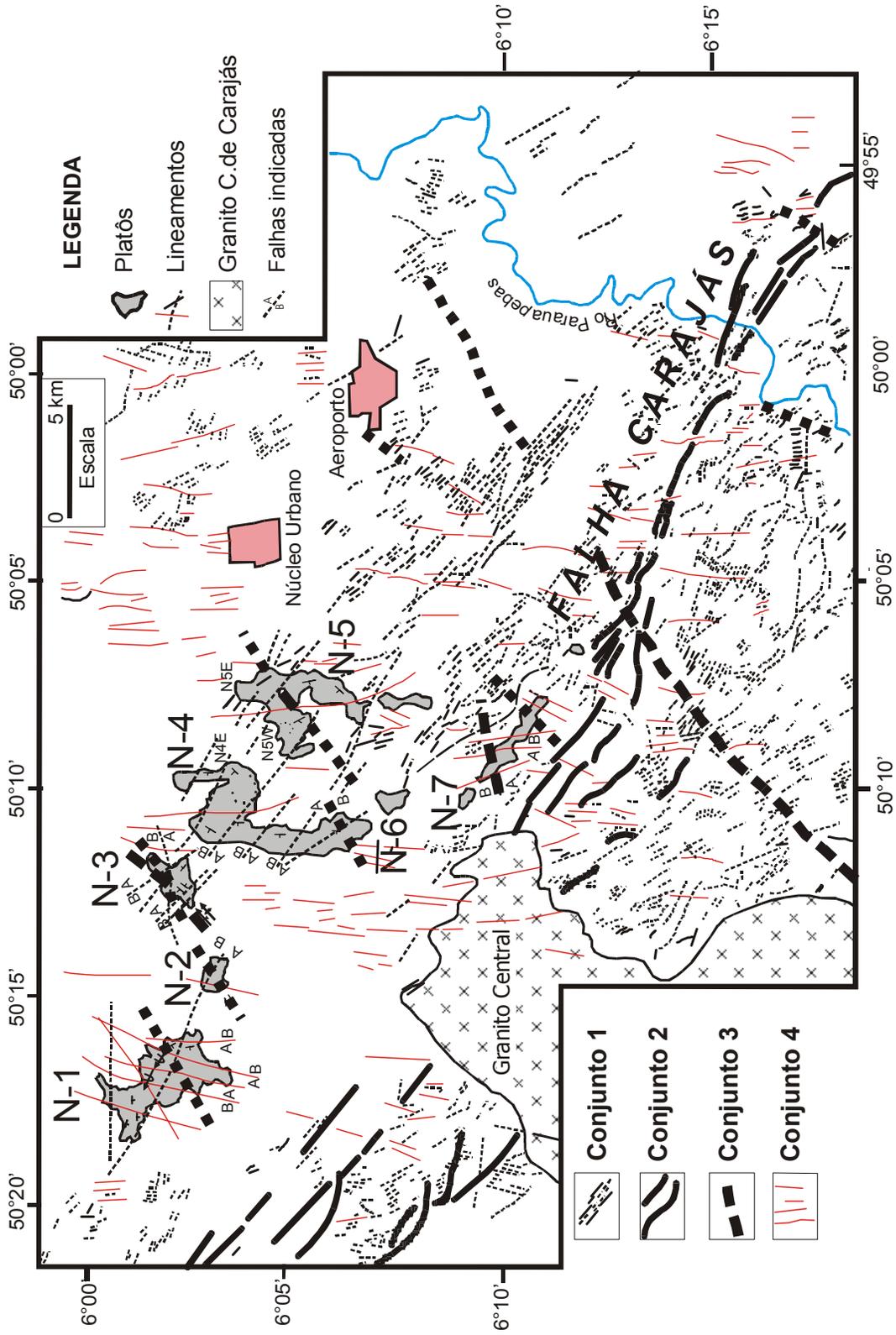


Figura 3.1 – Mapa de lineamentos fotoestruturais indicando os principais conjuntos de lineamentos observados na região da Serra Norte (veja texto para comentários).

3.3 DISCUSSÕES SOBRE OS DADOS DE SENSORES REMOTOS

Os platôs N4, N5 e N7, representados em mapa na Fig. 3.1, chamam atenção especial por desenharem formas indicativas de prováveis influências estruturais relativas à geometria das rochas neles presentes.

O Platô N4 desenha uma forma em “Z” aberto assimétrico, sugestiva da presença de rochas estruturas provavelmente sob rotação sinistral. Essas rochas podem ter sido deslocadas de sua posição inicial WNW-ESSE para a atual N-S, com expressivo encurtamento.

O Platô N5 mostra, em mapa, forma arqueada com direção geral NE-SW sugerindo associação com possível(is) dobra(s), controlando indiretamente a morfologia dessa serra.

Próximo ao traço da Falha Carajás, e seguindo sua direção NW-SE, o Platô N7 tem forma alongada e aparentemente encurvado com aproximadamente 7km de comprimento e 1km de largura em mapa.

Nos arredores do Platô N-7, a norte da Falha Carajás, os traços do Conjunto 1 desenharam uma inflexão com concavidade voltada para NE, contornando os platôs N-4 e N-5, sugerindo a presença de uma feição de arrasto, descolada ao longo do traço da Falha Carajás, com rotação destal do bloco (Fig. 3.2).

Relações temporais podem ser interpretadas, mesmo que de modo não muito confiável, devido à relação difusa entre os conjuntos:

- os traços do Conjunto 1 ocorrem em praticamente toda a área cortando os platôs.

- a Falha Carajás, subordinada ao *trend* do Conjunto 2, e com a mesma direção dos traços do Conjunto 1, possivelmente se formou aproveitando fraturas e falhas preexistentes. Esses dois conjuntos provavelmente correspondem aos traços mais antigos impressos nas rochas da área.

- os traços dos conjuntos 3 e 4, por sua vez, interceptam os traços mais antigos (conjuntos 1 e 2), bem como o Granito Central, sendo possivelmente as estruturas mais jovens.

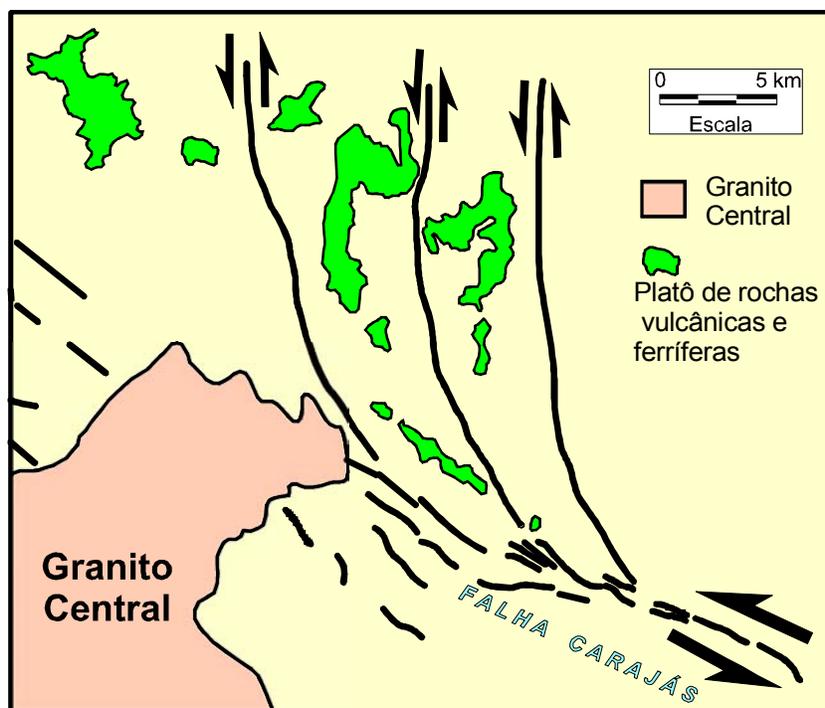


Figura 3.2 – Traços secundários que partem da Falha Carajás e balizam os platôs N4 e N5. A movimentação sinistral da Falha Carajás provoca rotação no sentido horário.

Pinheiro & Holdsworth (1997a) propõe que na região de Carajás, a trama dúctil das rochas do embasamento tem direção E-W e está relacionada à implantação do Cinturão Itacaiúnas no Arqueano. Um evento de transtensão dextral ocorrido entre 2.6 Ga. a 1.8 Ga. teria nucleado a Falha Carajás que corta diagonalmente a estrutura maior de Carajás. A falha, com orientação regional E-W, tem as terminações leste e oeste em *splay*, tipo “rabo-de-cavalo”, com inflexão para sul e norte respectivamente (Pinheiro 1997; Lima, 2002).

Os traços dos Conjuntos 1 e 2, interpretados como sendo mais antigos, possivelmente têm relação com as estruturas E-W arqueanas mencionadas por Pinheiro (1997). Uma vez que tanto as estruturas descritas por Pinheiro (1997), quanto as identificadas neste trabalho, coincidem em direção e em posição temporal relativa.

Entre o final do Paleoproterozóico e início do Mesoproterozóico houve na região de Carajás, assim como em todo o Cráton Amazônico um importante

evento extensional responsável pela colocação de vários corpos graníticos anorogênicos e diques (Dall'Agnol *et al.*, 1986; Costa & Hasui, 1992; Costa *et al.*, 1995). Essa extensão está relacionada ao desenvolvimento de conjuntos de falhas com *trend* NE-SW e NW-SE que afetam tanto o embasamento quanto as rochas supracrustais.

A Faixa Araguaia que limita a região de Carajás a leste sofreu encurtamento durante o Neoproterozóico. Esse cinturão se dispõe na direção N-S, com a foliação orientada em torno de NNW-SSE e NNE-SSW. A análise dos elementos planares e lineares associados com as rochas dessa faixa indicam transporte tectônico de SE para NW sugerindo colisão oblíqua com o Cráton Amazônico (Alvarenga *et al.*, 2000).

Com base nas informações acima descritas, os Conjuntos 3 e 4, correspondem provavelmente às estruturas mais jovens e podem ter relação com o evento extensional do Mesoproterozóico (Dall'Agnol *et al.*, 1986; Costa & Hasui, 1992; Costa *et al.*, 1995). Não se deve descartar a possibilidade de influência da instalação e evolução do Cinturão Araguaia sobre essas rochas. Parte desses traços podem ter sido formados durante a colisão oblíqua que afetou as rochas da Faixa Araguaia.

Não se deve esquecer que a região esteve sob tensão durante o Mesozóico, com o quebraamento do Gondwana, quando se instalaram vários grabens que preservam parte das rochas paleozóicas, notadamente na borda leste do Cráton Amazônico. Essas estruturas têm direção quase sempre em torno do eixo N-S, podendo ter sido geradas durante esse episódio.

Costa *et al.* (1994) mostram que pelo menos dois eventos tectônicos importantes afetaram o Cráton Amazônico no Terciário (Mioceno-Plioceno) e no Quaternário. Esses eventos provavelmente correspondem a reativações extensionais dos pretéritos lineamentos E-W. Além desses, outros conjuntos de lineamentos existentes na região podem ser atribuídos a eventos neotectônicos.

CAPÍTULO IV – DADOS DE MAPEAMENTO GEOLÓGICO

Análise geométrica das principais estruturas tectônicas

Neste capítulo são descritas as principais estruturas observadas em campo, nas escalas centimétricas, métricas e quilométricas, expostas nas minas de ferro atualmente em exploração.

Dentre estas estruturas se destacam: (1) os **contatos litológicos**; (2) as **dobras**; (3) os conjuntos de **fraturas** e **falhas** subordinadas; (4) as **zonas de cisalhamento** individualizadas; e (5) os **diques**.

4.1 – CONTATOS LITOLÓGICOS

Nas minas examinadas há três tipos de contatos litológicos, entre:

- (1) *minério de ferro e rocha vulcânica*
- (2) *jaspilito e rocha vulcânica*
- (3) *minério de ferro e jaspilito*

Esses contatos se distinguem, estruturalmente, por se apresentarem de dois modos distintos: (a) **concordantes**; e (b) em discordância **por falhas**, conforme serão descritos a seguir.

Contatos Concordantes:

- entre minério de ferro e rochas vulcânicas (1) e entre jaspilitos e rochas vulcânicas (2).

Os **contatos concordantes** (Fig. 4.1) se apresentam geometricamente ondulados e possuem mergulhos variando entre 20° e 30°, com direções variadas.

Na Mina N4E esse tipo de contato predomina e se mostra quase sempre em cortes paralelos a sub-paralelos às suas direções, mostrando, portanto exposições aparentes. Em outros casos está exposto em cortes francamente oblíquos (Fig. 4.2 e 4.3).

Em locais onde as rochas ferríferas estão dobradas, os contatos concordantes são ondulados, acompanhando as dobras do minério adjacente (Fig. 4.4b). As dobras do contato desaparecem em locais onde o minério adjacente se mostra sem deformação, se apresentando retilíneos (Fig. 4.4a).

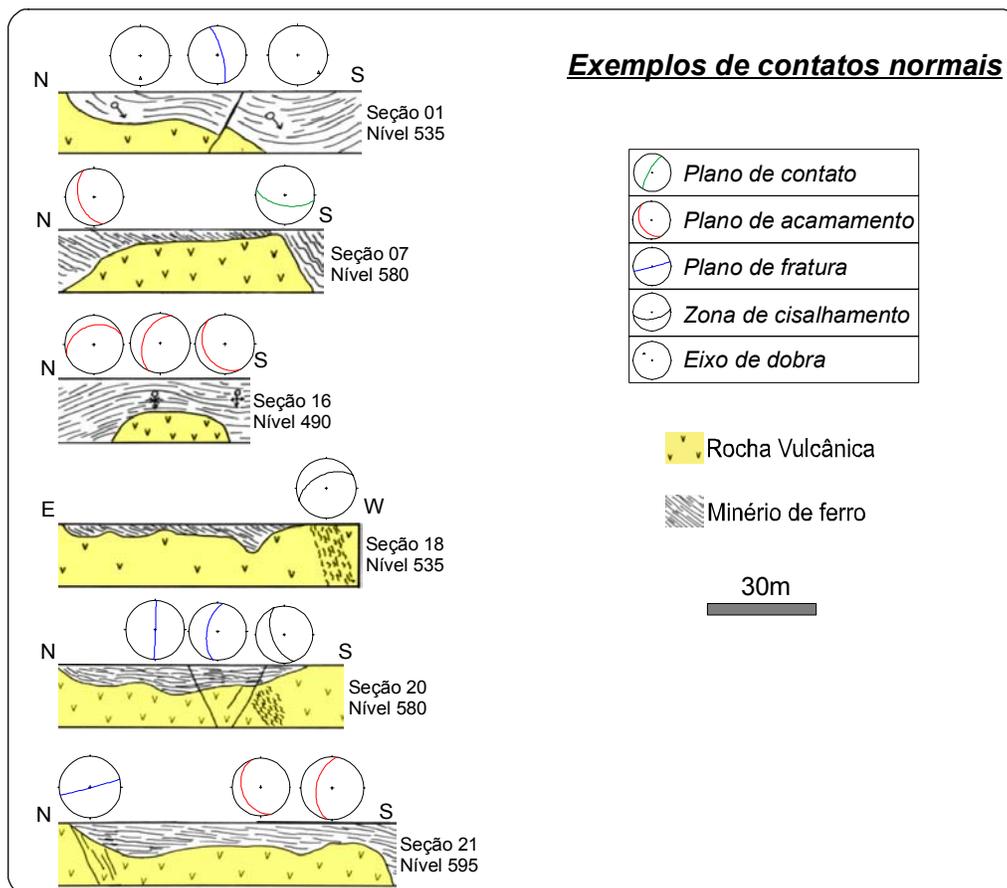


Figura 4.1 – Seções esquemáticas em corte aparente de bancadas da Mina N4E, mostrando a geometria dos contatos normais entre rochas vulcânicas e ferríferas. Os estereogramas mostram a posição das estruturas presentes nas bancadas. As bancadas têm 15 metros de altura e sua localização pode ser observada no mapa de localização de seções (anexos).



Figura 4.2 – Contato concordante, sub-horizontal, entre rocha vulcânica (superior) e rocha ferrífera inferior na Mina N5W (Foto CVRD-GAJAN).

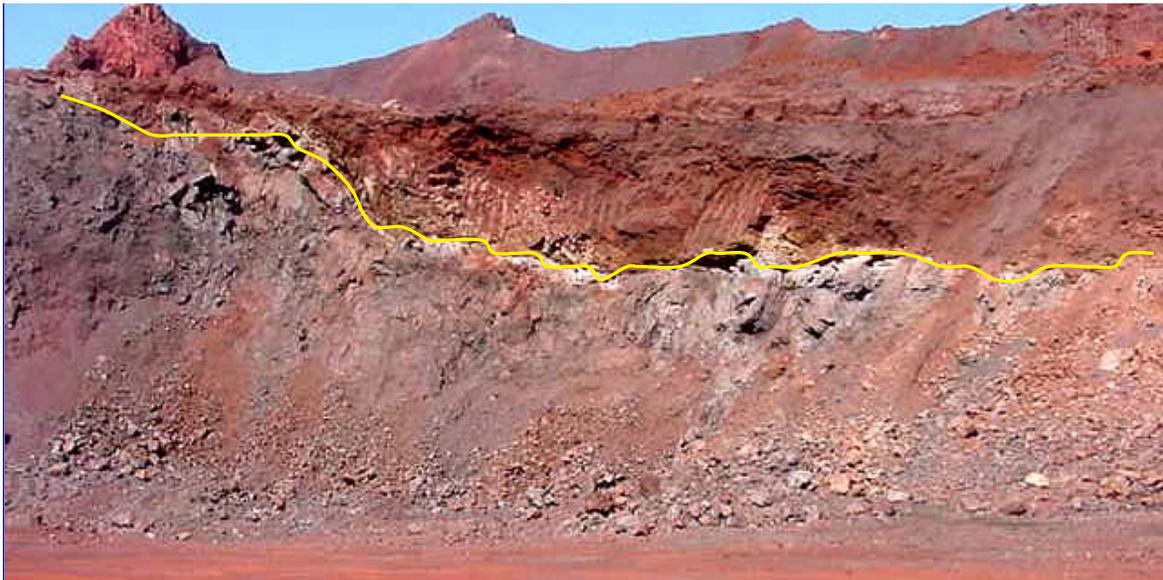


Figura 4.3 - Contato concordante sub-horizontal entre rocha vulcânica (parte superior) e rocha ferrífera (parte inferior) na Mina N5Sul (altura da bancada=15m), em corte aparente. (Foto CVRD-GAJAN).

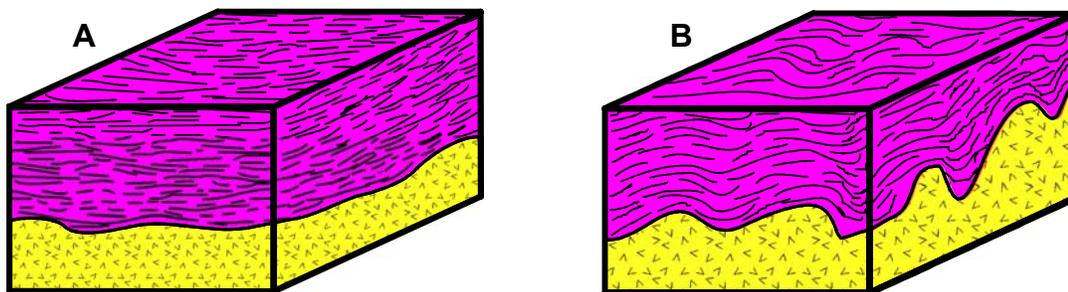


Figura 4.4 – Blocos diagramas sem escala, representando: (A) contato concordante entre rocha ferrífera não deformada e rocha vulcânica; (B) contato concordante dobrado entre rocha ferrífera dobrada e rocha vulcânica. Na figura A o contato não está deformado, enquanto que na figura B o mesmo está dobrado, juntamente com o minério (topo) e a rocha vulcânica (base).

- contatos entre minério e jaspilitos (3)

O contato entre o minério de ferro e jaspilitos ocorre de forma abrupta. Os afloramentos de jaspilitos encontrados nas minas correspondem a blocos dessas rochas individualizados nos domínios do minério de ferro, preservados da alteração que diferenciou esses dois tipos de rochas. O acamamento do minério está marcado por leitos contínuos, intercalados de ferro e sílica dos jaspilitos e a passagem de um para outro é continuado.

Contatos Discordantes

Os **contatos litológicos por falha** (discordantes) desenham traços retos nas paredes da mina, com ângulos de mergulho em torno de 70° a 80° (Fig. 4.5)

Nas rochas vulcânicas adjacentes aos contatos por falha, se nota a presença quase constante de foliação, dominando pacotes com 30 a 70 cm de largura, sempre paralelos aos planos de falha.



Figura 4.5 – Contato por falha na cava norte da Mina N4E. As falhas (linhas laranja) N-S (esquerda) e NE-SW (direita) limitam um bloco de rocha vulcânica. Localização: seção 22.

Nas rochas ferríferas, adjacentes a esses contatos, se observa a presença de dobras centimétricas, em estilo *kink* ou *chevron*. Essas estruturas mostram orientações paralelas às falhas que desenham os contatos.

As falhas que se associam aos contatos têm orientações NE-SW e NW-SE, conforme mostradas nos mapas das Figs. 4.6 (cava norte) e 4.7 (cava leste) elaborados com o auxílio de dados da CVRD/GAJAN, de junho de 2003.

Esses mapas mostram a presença e distribuição dos diferentes tipos litológicos presentes na mina e as principais falhas associadas aos contatos.

As falhas representadas nos mapas geológicos foram cartografadas através do mapeamento estrutural das bancadas da mina e identificadas pelos números de 1 a 4, para a cava norte, e de 5 a 8 para a aba leste (os números não têm conotação cronológica e nem de importância). Foram ainda confeccionados mapas estruturais de detalhe para a área de exposição de cada falha, conforme serão mostrados mais à frente, neste texto.

As falhas mencionadas acima e mostradas nas figuras 4.6 e 4.7 podem ser assim descritas:

- *Falha 1* – localizada a NE da cava norte da mina (Fig. 4.6). Foi observada entre os níveis topográficos de 595m e 610m. Está exposta por cerca de 230 metros, mantendo direção N50°E, com mergulho médio de 80° para NW. No bloco NW estão as rochas vulcânicas, enquanto que no bloco SE está o minério de ferro (Fig. 4.8).
- *Falha 2* – localizada a NE da cava norte da mina (Fig. 4.6). Foi mapeada nos níveis 580m, 610m e 625m. Está representada, em mapa, por um traço com aproximadamente 180m de comprimento aflorante, orientado segundo a direção N60° E com mergulho médio de 80° para NW. No bloco NW está o minério enquanto que a SE estão as rochas vulcânicas (Fig. 4.8).
- *Falha 3* – localizada a SE da cava norte da mina (Fig. 4.6). Tem aproximadamente 150 metros de comprimento aflorante e direção S25°E, com mergulho de aproximadamente 85° para NE. Esta estrutura foi mapeada entre os níveis 595m e 610m da mina. A NE está o bloco de minério e a SW o bloco de rochas vulcânica (Fig. 4.9).
- *Falha 4* – localizada a SE da cava norte da mina (Fig. 4.6), tem aproximadamente 170m de comprimento aflorante. Está orientada na direção N8°W, com mergulho médio de 50° para SW. Esta falha foi mapeada entre os níveis 595m e 610m. Mostra a E o bloco de rochas vulcânicas e a W o bloco de minério (Fig. 4.9).
- *Falha 5* – localizada a norte da aba leste da mina (Fig. 4.7). Foi mapeada entre os níveis 520m e 625m. Esta estrutura, com aproximadamente 340m de comprimento aflorante, está orientada segundo a direção N40°E,

com mergulho médio de 65° para NW. Apresenta a NW o bloco de minério e a SE o bloco de rochas vulcânicas (Fig. 4.10).

- *Falha 6* – localizada na porção sul da aba leste da mina (Fig. 4.7). Foi mapeada entre os níveis 490m e 640m. Esta estrutura se apresenta como um traço ligeiramente curvo com concavidade voltada para NW. Tem comprimento aflorante aproximado de 330m, com orientação $N60^\circ E$ e mergulho médio de 65° para NW. Exibe a NW o bloco de minério e a SE o bloco de rochas vulcânicas (Fig. 4.11).
- *Falha 7* – localizada na porção sul da aba leste da mina (Fig. 4.7). Foi mapeada entre os níveis 505m e 565m. Esta estrutura se apresenta com traço aparente ligeiramente anastomosado, com aproximadamente 420m de comprimento aflorante, orientado na direção $N55^\circ W$ e com mergulho médio de 77° para NE. Tem a NE o bloco de rochas vulcânicas e a SW o bloco de minério (Fig. 4.12).
- *Falha 8* – localizada no extremo sul da aba leste da mina (Fig. 4.7). Foi mapeada entre os níveis 520m e 565m. Esta estrutura tem traço retilíneo, com aproximadamente 450m de comprimento aflorante, orientado na direção $N50^\circ W$, com ângulo de mergulho médio de 84° para NE. Tem a NE o bloco de minério e a SW o bloco de vulcânica (Fig. 4.12).

Uma característica comum aos planos dessas falhas se refere a presença de preenchimentos de finas lâminas de argila. Nessas lâminas se observam *slickensides* com várias direções de caimento, sendo difícil a determinação de alguma direção predominante. Isso torna difícil a análise cinemática para essas estruturas.

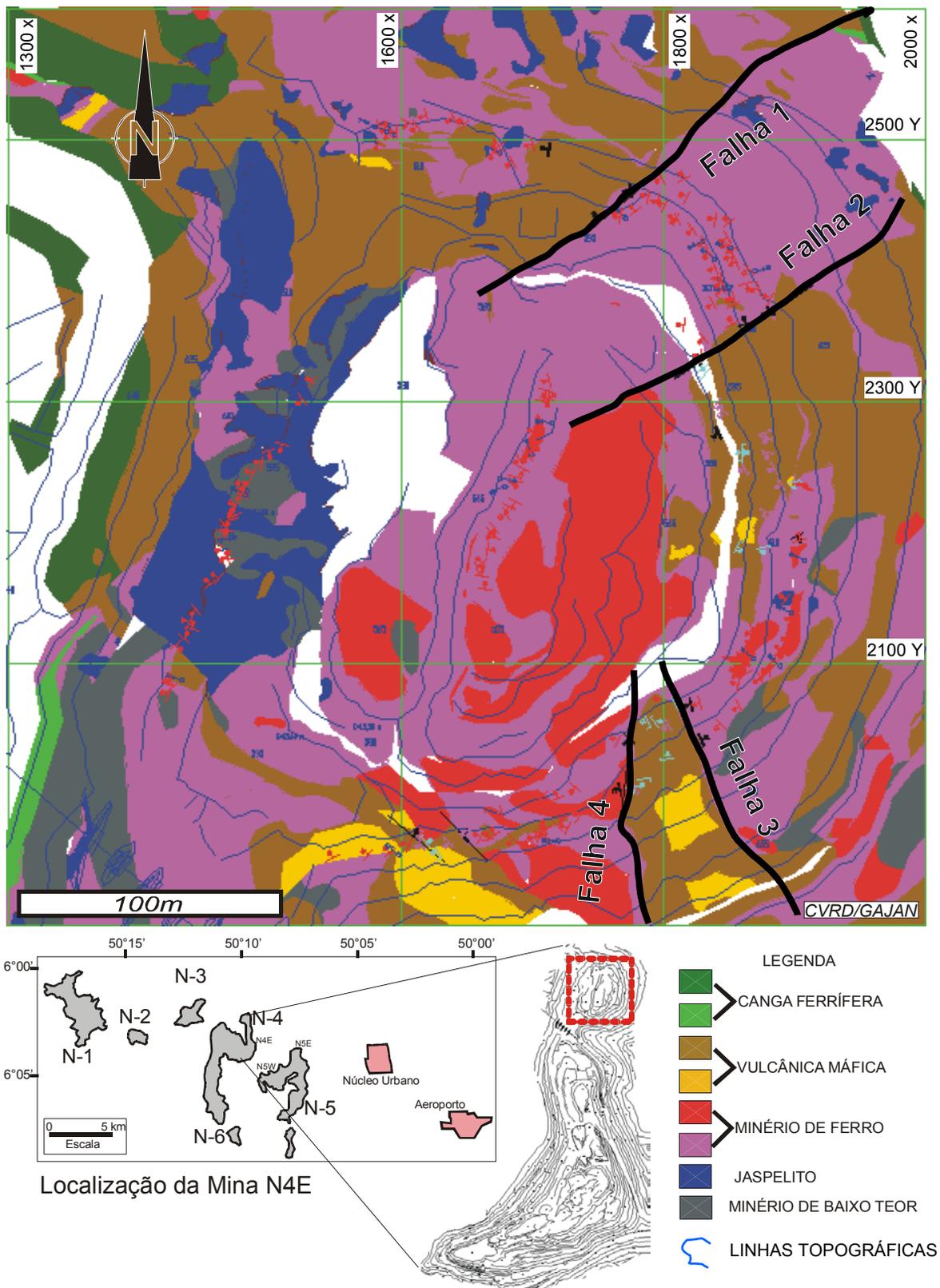
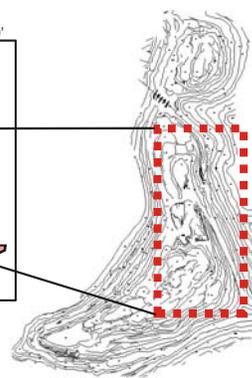
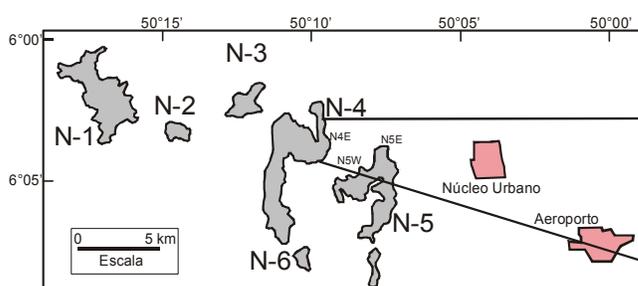
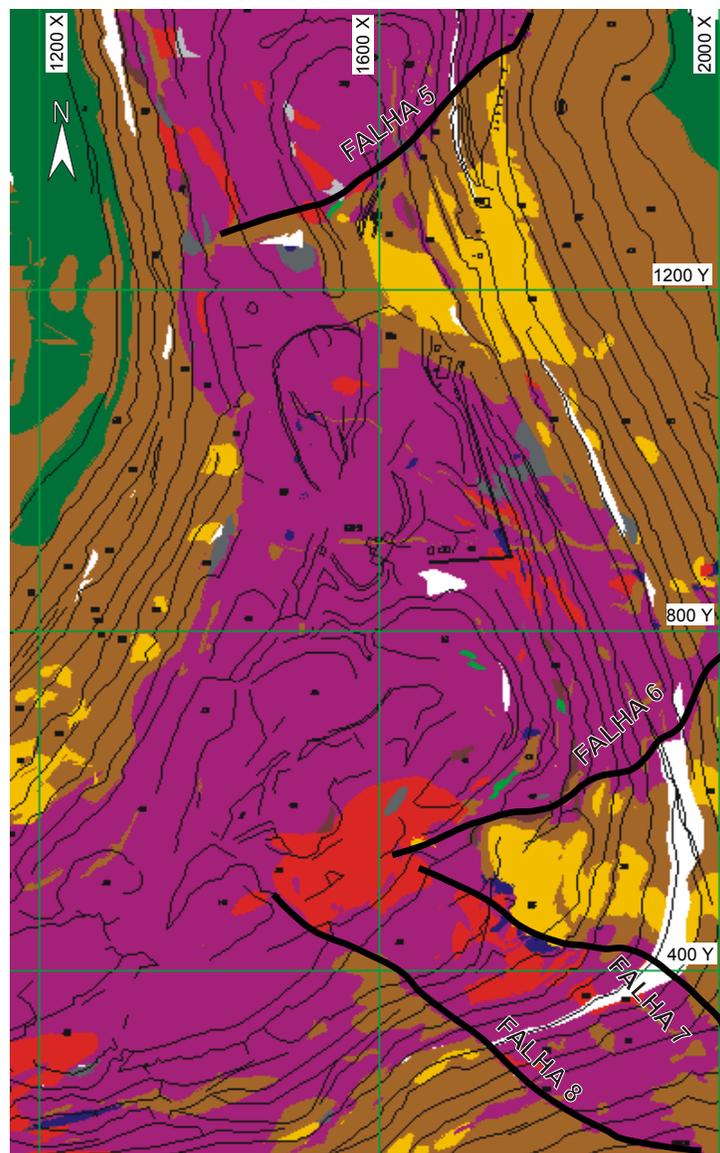


Figura 4.6 – Mapa geológico da parte norte da mina N4E mostrando a posição das principais falhas associadas aos contatos entre rochas vulcânicas e minério de ferro. A localização da área do mapa no contexto regional está indicada na figura abaixo, junto com a legenda.



LEGENDA

-  CANGA FERRÍFERA
-  VULCÂNICA MÁFICA
-  MINÉRIO DE FERRO
-  JASPELITO
-  MINÉRIO DE BAIXO TEOR
-  LINHA TOPOGRÁFICA

Figura 4.7 – Mapa geológico da aba leste da mina N4E mostrando a posição das principais falhas associadas aos contatos entre rochas vulcânicas e minério de ferro. A localização da área do mapa no contexto regional está indicada na figura abaixo, junto com a legenda.

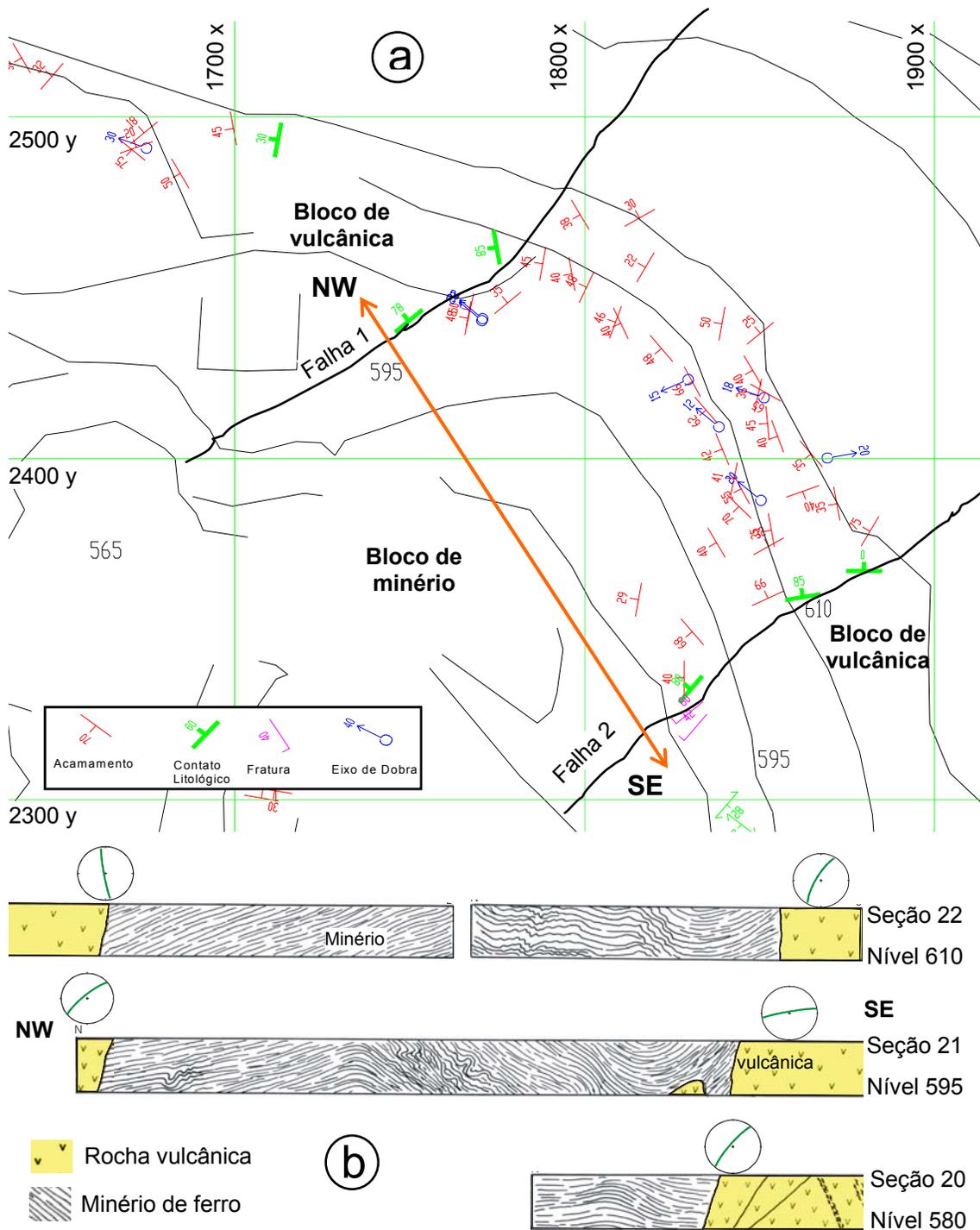


Figura 4.8 – (a) Mapa estrutural das falhas 1 e 2 com respectivas seções; (b) seções esquemáticas em corte aparente dos contatos por falha na Mina N4E. Os estereogramas na figura mostram as atitudes dos planos de falha individualmente. A seta laranja representa a orientação das seções em mapa.

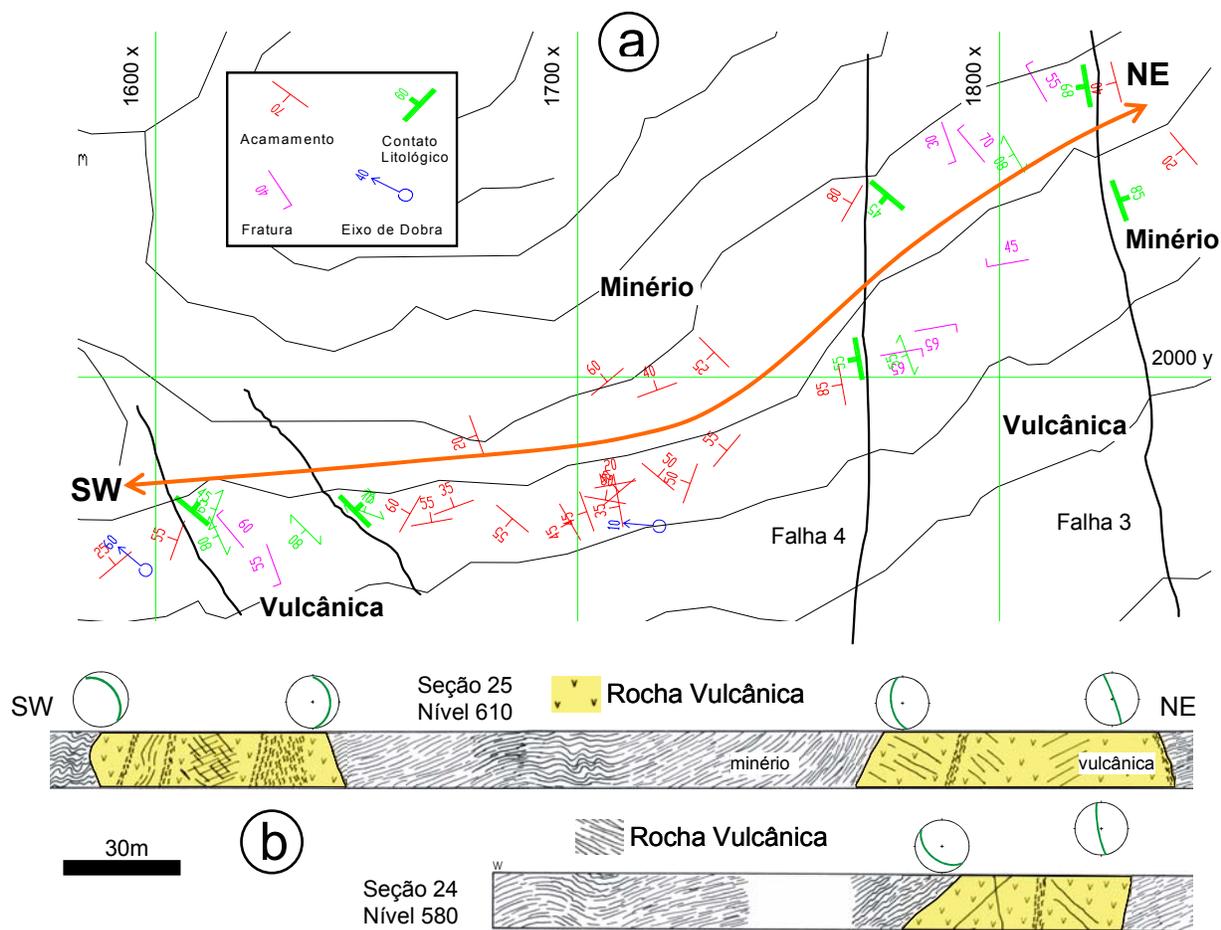


Figura 4.9 – (a) Mapa estrutural da área de afloramento das falhas 3 e 4; (b) seções esquemáticas em corte aparente mostrando os contatos por falha na mina N4E. Os estereogramas associados representam as atitudes dos planos de falha mostrados nas seções. A linha laranja representa a orientação das seções em mapa.

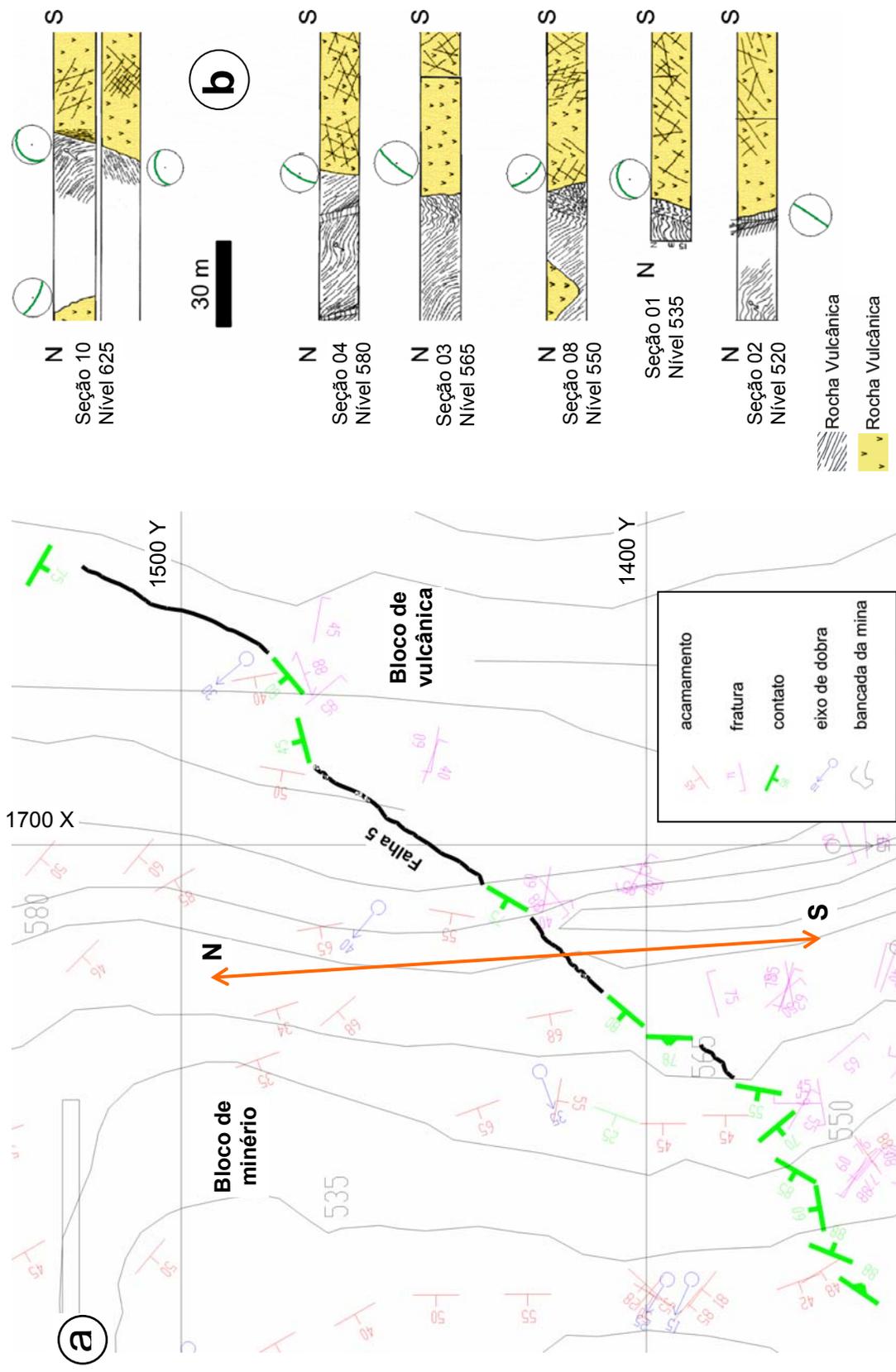


Figura 4.10 – (a) falha 5 representada em mapa estrutural, a NW um bloco de minério e a SE, um bloco de vulcânica; (b) seções esquemáticas em corte aparente de bancada mostrando os contatos por falha na mina N4E. Os estereogramas representam a atitude do plano de falha em cada seção. A linha laranja corresponde à orientação das seções em mapa.

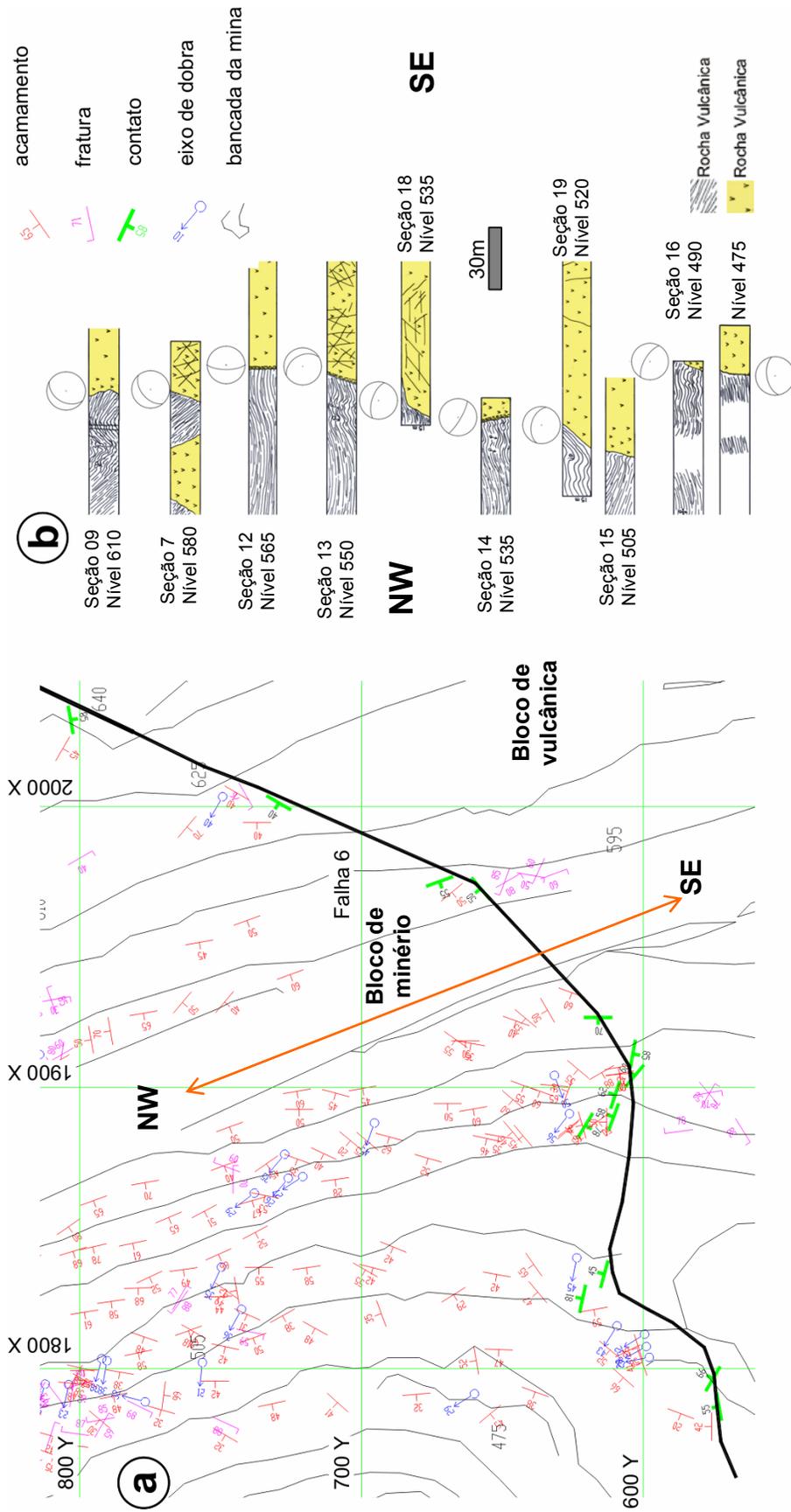


Figura 4.11 – (a) mapa estrutural representando a falha 6, a NW bloco de minério e a SE bloco de rocha vulcânica; (b) seções esquemáticas em corte aparente das bancadas onde foram mapeados os contatos da falha 6 na mina N4E. Os estereogramas mostram a atitude dos planos de falha. A linha laranja indica a posição das seções no mapa.

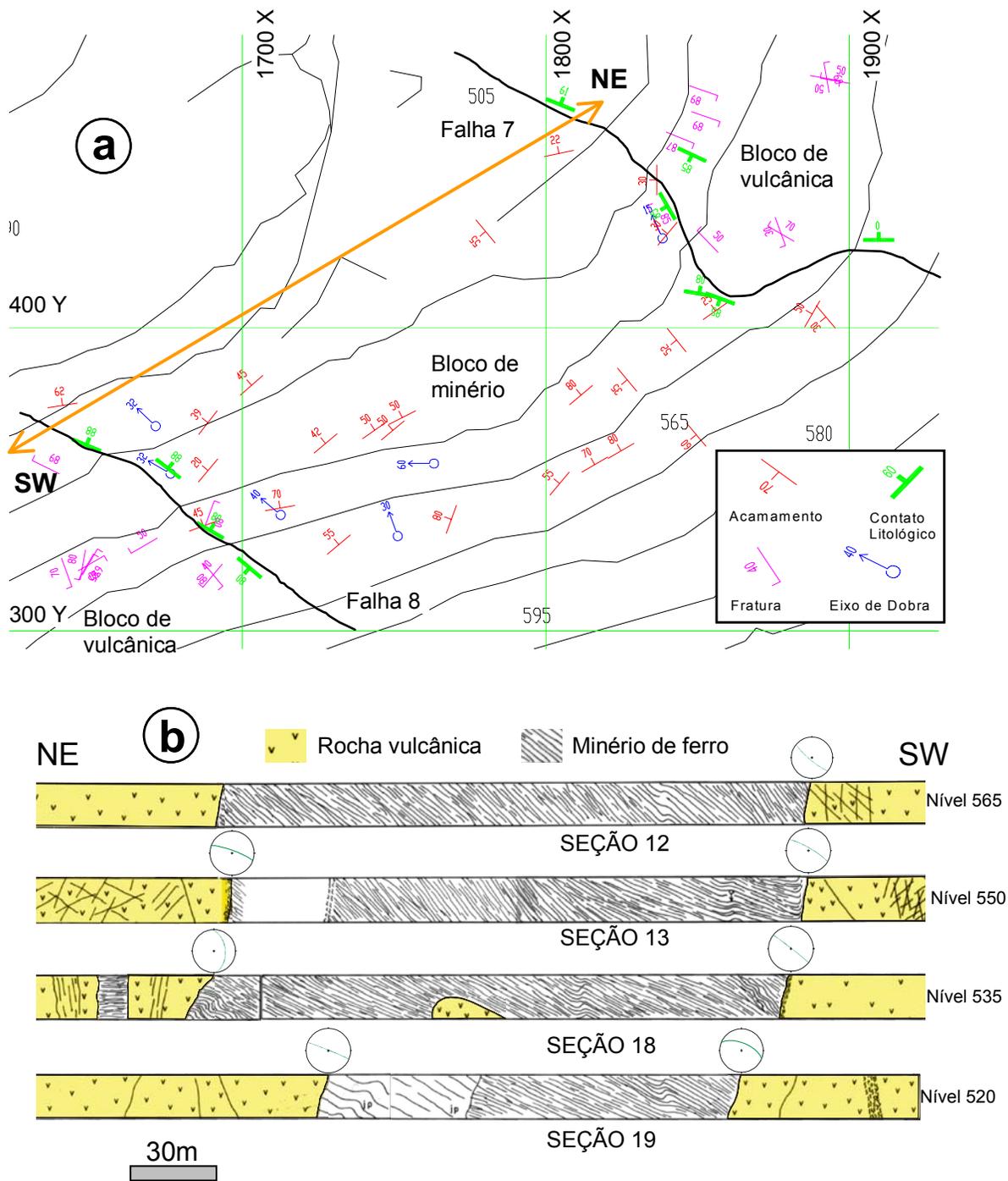


Figura 4.12 - (a) mapa estrutural das falhas 7 e 8; e (b) seções esquemáticas em corte aparente de bancada na Mina N4E. Os estereogramas mostram as atitudes dos planos de falha. A linha laranja representa a orientação das seções no mapa.

4.2 – DOBRAS

Os trabalhos de campo permitiram identificar diferentes tipos de dobras impressas predominantemente nas rochas ferríferas. Essas estruturas são aqui descritas seguindo o critério da escala, tendo sido separadas em (1) **dobras centimétricas**, (2) **métricas** e (3) **quilométricas**.

1) Dobras Centimétricas:

Essas dobras, as de menor tamanho observadas, foram estudadas diretamente nos afloramentos, apresentando-se bastante variadas quanto ao estilo e geometria. No geral variam desde abertas até fechadas, isoclinais, com eixos dispostos em posição variando de sub-horizontais a sub-verticais na direção NW.

Geralmente essas dobras podem ser observadas em duas situações distintas: (1) podem ocorrer isoladamente, quando associadas a pacotes rochosos menos deformados (Fig. 4.13), ou (2) aparecem em conjuntos, em zonas de maior concentração de deformação, aqui identificados como *corredores de deformação* (Fig. 4.14).

Um tipo particular de dobra presente são os *kinks bands* e *chevrons*, presentes tanto em regiões onde as rochas se encontram mais deformadas quanto em porções onde a deformação se mostra menos expressiva.

Nas zonas menos deformadas, as rochas ferríferas mostram dobras centimétricas representadas prioritariamente por estruturas do tipo *kink* e *chevron*, desenhadas pelo acamamento ou laminação (Fig. 4.15). Essas dobras, em geral, têm comprimento de onda variando de 10 cm a 1 m, com padrões monoclinicos ou triclinicos, podendo se apresentar de maneira isolada ou em arranjos compostos.

As estruturas do tipo *kink* ocorrem com caimentos moderados (45°) nas direções NNE ou SSW. As dobras do tipo *chevron* são comumente de escala centimétrica e possuem eixos caindo com baixos valores para NW. Os planos

axiais estão prioritariamente orientados na direção NW-SE, estando também dispostos na direção E-W, mergulhando com valores moderados a fortes para o quadrante NE ou para N.

Outro estilo particular de dobras em *kinks* e *chevrons* ocorre no interior dos *corredores de deformação*. Nessas porções mais deformadas do minério de ferro, as dobras centimétricas se apresentam em forma de Z, S, M, desenhando *chevrons* e *kink bands*, formando arranjos parasíticos, subordinadas às dobras maiores, métricas ou quilométricas.

Em geral, as dobras *kinks* estão espacialmente associadas aos *chevrons*.

Em zonas de deformação orientadas prioritariamente nas direções E-W e NW-SE, com largura de 10 a 20 metros, o minério se apresenta dobrado desenhando estruturas centimétricas, predominando aquelas reclinadas, sem orientação preferencial do plano axial, com mergulho moderado, entre 25° e 45° (Fig. 4.16). Essas dobras, quando se apresentam fechadas a isoclinais, mostram eixos caindo preferencialmente para NW, com mergulhos sub-horizontais a sub-verticais.

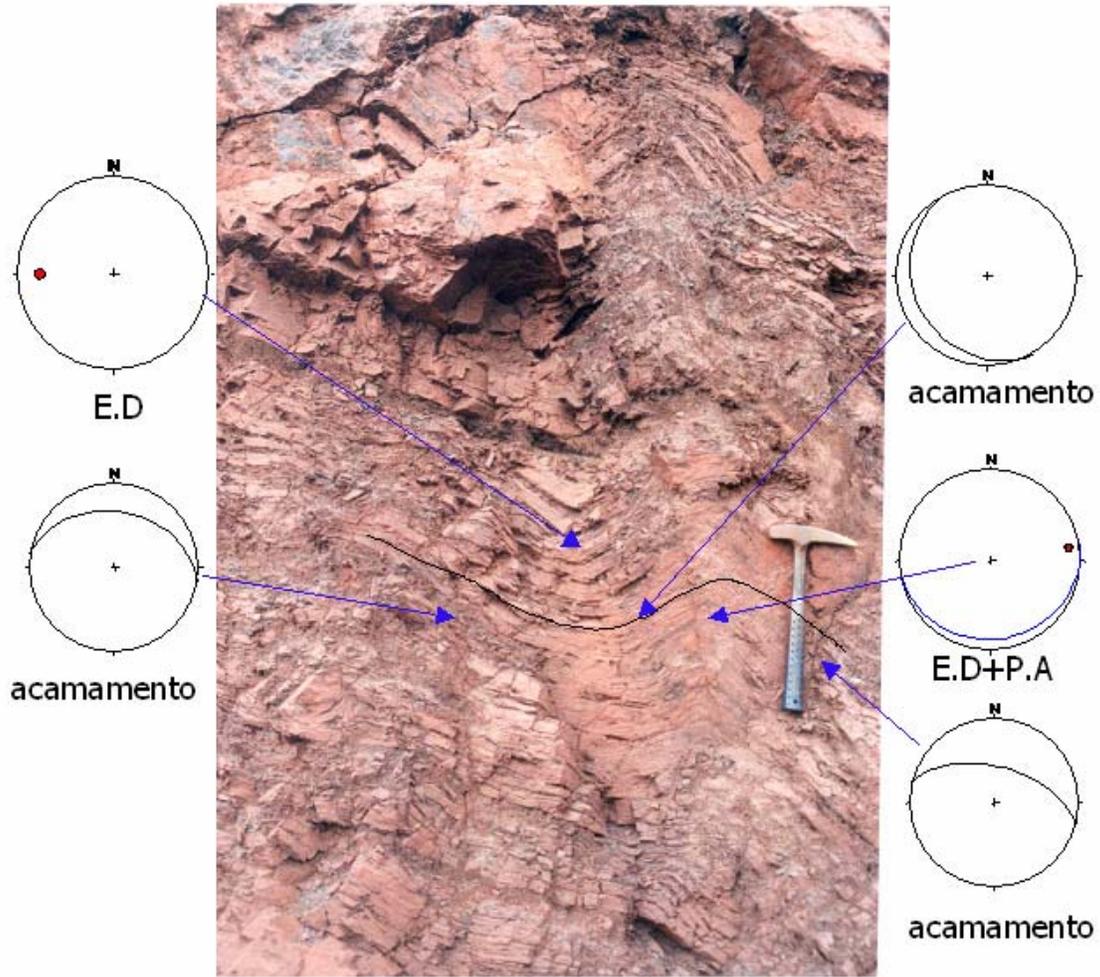


Figura 4.13 – Dobra centimétrica, aberta, em jaspelitos pouco deformados. Os esterogramas associados à foto mostram as atitudes do acamamento dobrado, os eixos de dobra (E.D) e atitudes dos planos axiais (P.A). O afloramento está localizado na cava norte da mina N4E e faz parte da Seção 23 (ver mapa de localização de seções).

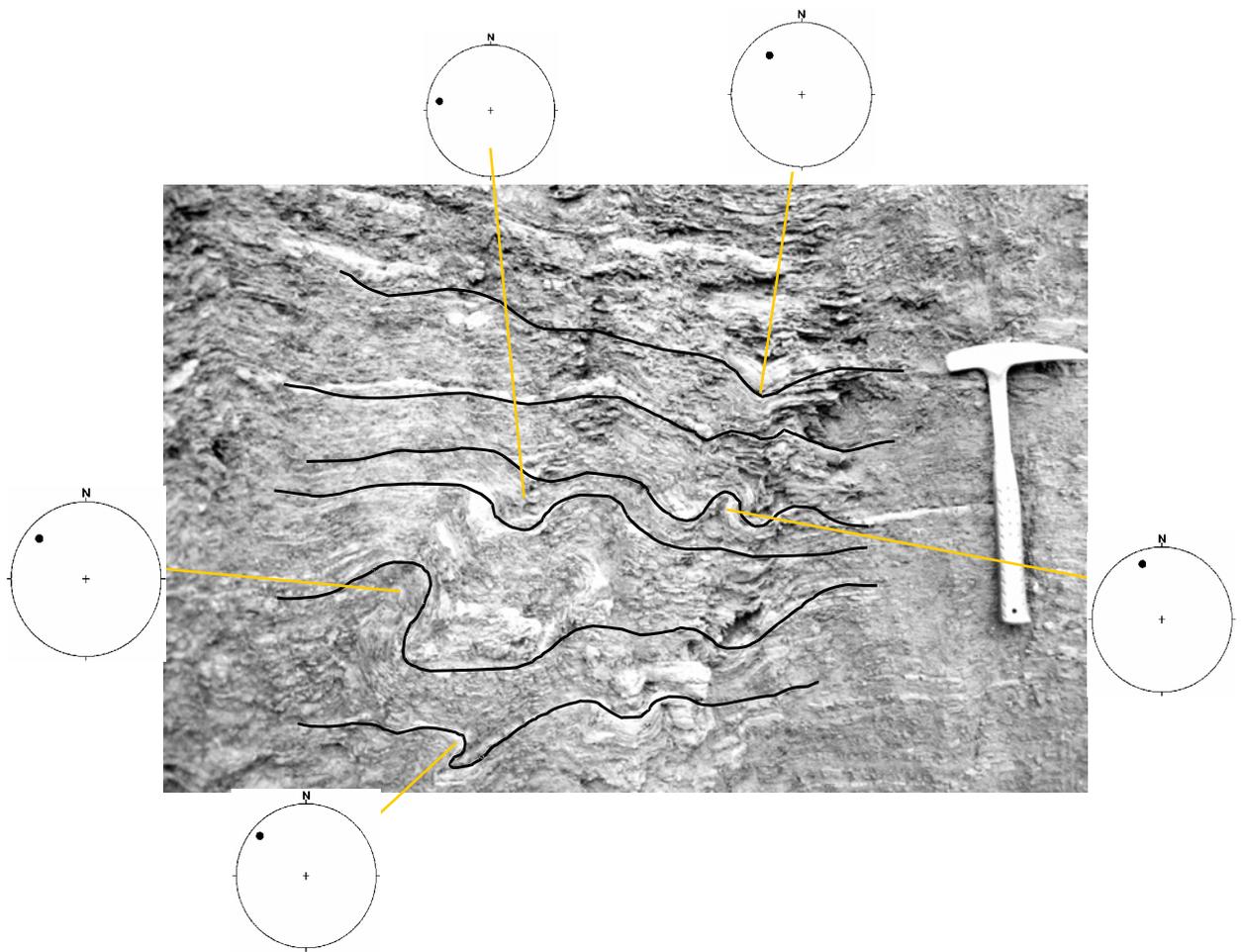


Figura 4.14 – Fotografia mostrando dobras centimétricas na Seção 26, localizada na cava norte da Mina N4E (ver mapa de localização de seções). São dobras parasíticas de zona de deformação, observadas no minério de ferro, abertas ou fechadas, isoclinais e assimétricas. Os estereogramas mostram os eixos dessas dobras com baixos ângulos, caindo para NW.

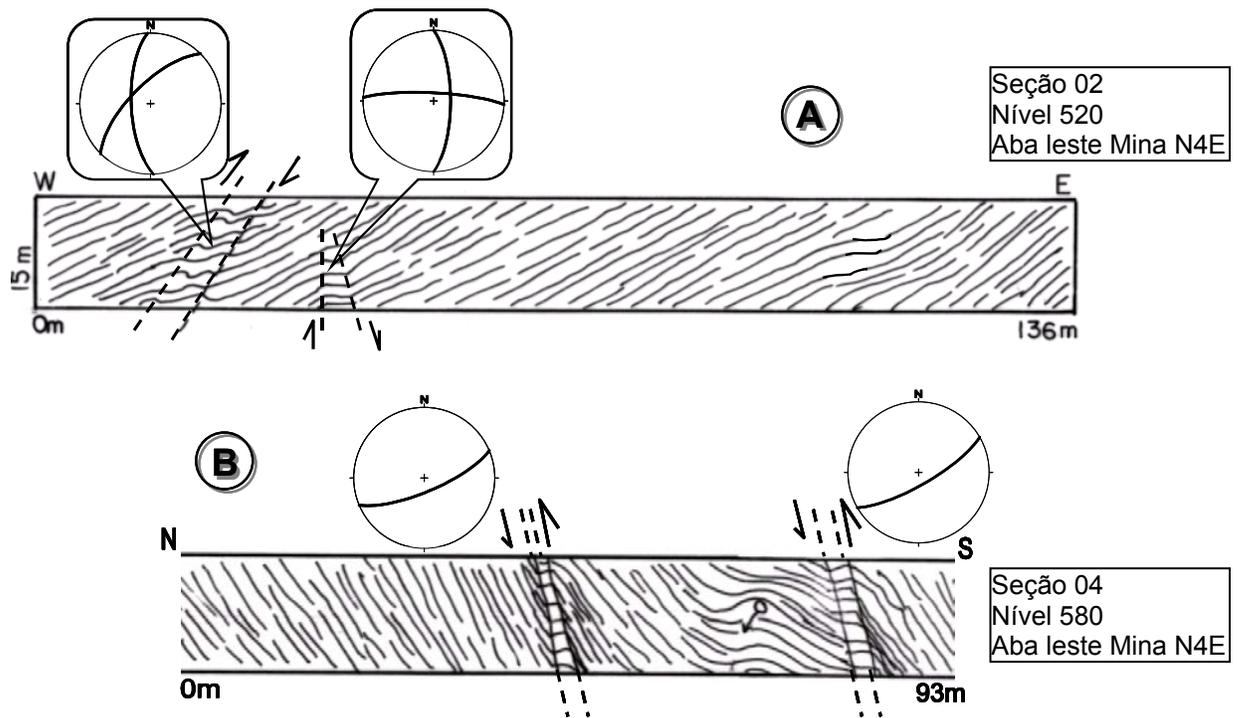


Figura 4.15 – Exemplos de dobras em kink bands presentes no minério de ferro. A: seção W-E no nível 520 da mina N4E; os estereogramas representam os planos de kink que cortam o acamamento; B: seção N-S no nível 580 da mina N4E; os estereogramas representam os planos de kink que perturbam o acamamento. As bancadas têm 15 metros de altura. A localização das seções pode ser observada no mapa de localização de seções (anexo).

SEÇÃO - N5E

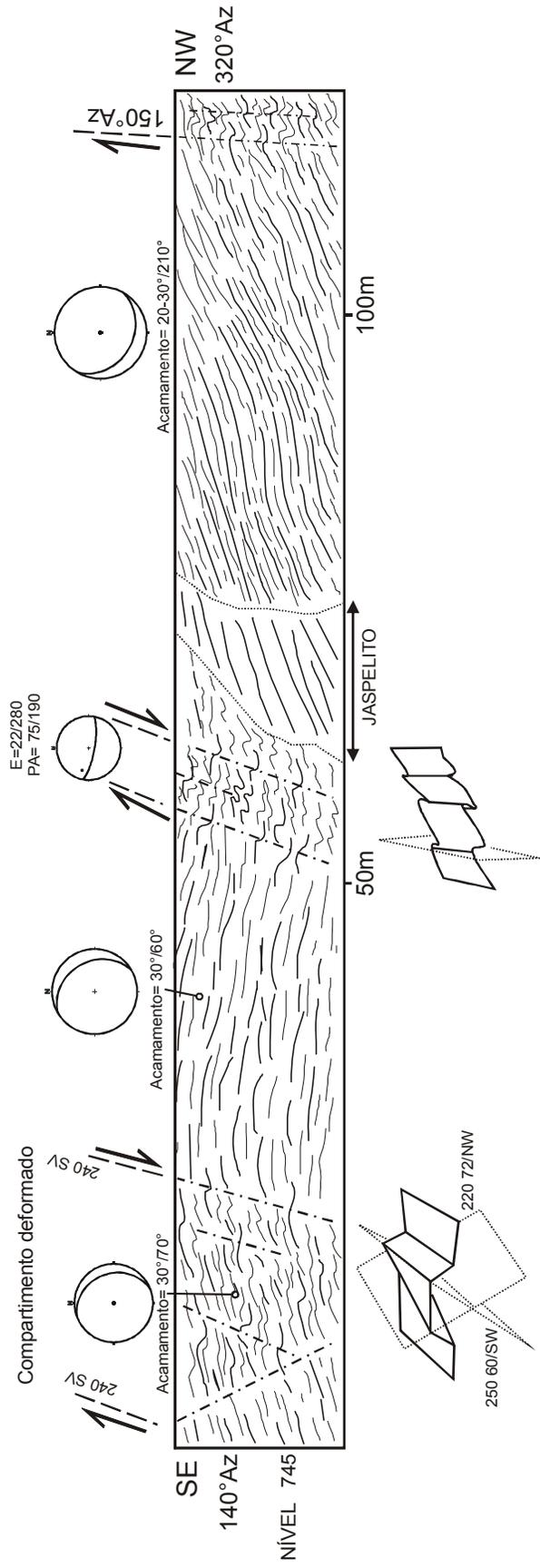


Figura 4.16 – Seção estrutural na mina N5E, exibindo as zonas de deformação presentes no minério de ferro, bem como as dobras centimétricas associadas a elas. O acamamento fora das zonas de deformação se mostra com direção NW-SE. Nas zonas de deformação se encontram dobras centimétricas abertas a fechadas com eixos caindo para NW. Notar os planos de kink associados às zonas de deformação.

2) Dobras Métricas a decamétricas:

As dobras métricas desenham ondulações (dobras suaves a abertas) no minério de ferro que se estendem por centenas de metros. Aparecem em regiões onde a deformação é aparentemente menos expressiva. Forma dobras geralmente do tipo paralelas (Fig. 4.17). Em algumas seções, planos de *kinks* (centimétricos) cortam isoladamente o acamamento ondulado.

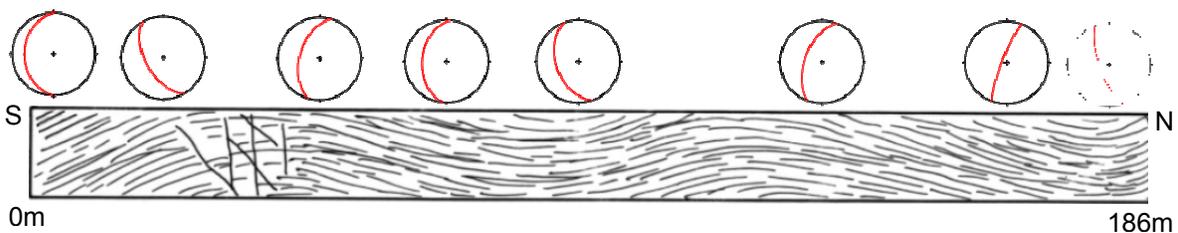


Figura 4.17 – Seção 05 no nível 550m da mina N4E mostrando dobras métricas abertas em um pacote de minério de ferro pouco deformado. A seção tem 185m de comprimento e os estereogramas representam a posição do acamamento dobrado. A localização da seção pode ser observada no mapa em anexo (Anexo 2). Altura da seção: 15m.

As dobras métricas presentes nas zonas mais deformadas, são encontradas em escala de afloramento com altura entre 10m e 20m. Como essas dobras geralmente têm perfil assimétrico (Fig. 4.18) é comum se observar nos cortes, flancos onde o acamamento varia de baixo ângulo de mergulho (15° a 30°) até sub-vertical. As dobras são predominantemente reclinadas, variando de fechadas a isoclinais e paralelas. Internamente exibem dobras menores, parasíticas.

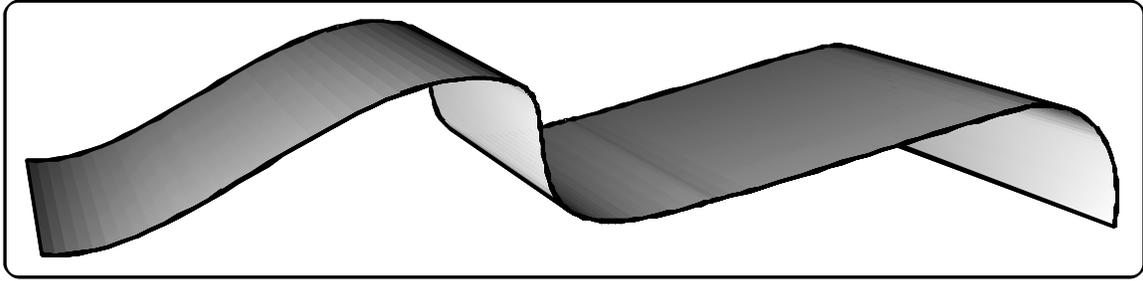


Figura 4.18 – Desenho esquemático mostrando perfil de dobras assimétricas. As dobras métricas presentes nas zonas de deformação que cortam a mina N4E ocorrem com essa geometria.

3) Dobras Quilométricas:

Essas dobras podem ser vistas através da análise de imagens de satélite e mapas estruturais. As formas desenhadas pelos platôs N4 e N5 em planta, configuram essas dobras maiores, quilométricas (vide Capítulo 03).

Na mina N4E as atitudes do acamamento compõem uma guirlanda que indica um eixo *beta* com orientação $48^\circ/300$ Az (Fig. 4.19 b). As atitudes dos eixos de dobras menores (centimétricas e métricas) indicam maior concentração no quadrante NW com atitude predominante em torno de $40^\circ/310$ Az (Fig. 4.19 c). Essa atitude coincide aproximadamente com aquelas obtidas em campo para outras dobras em diferentes escalas e estilos (Fig. 4.19 a).

A geometria em “J” do afloramento do minério de ferro na Mina N4E sugere a presença de um sinforme reclinado, quilométrico, com eixo caindo em torno de 45° para NW (Fig. 4.19 a). Essa dobra pode ainda ser confirmada pelo mapeamento das rochas no campo, tomando como base as atitudes do acamamento conforme será mostrado a seguir.

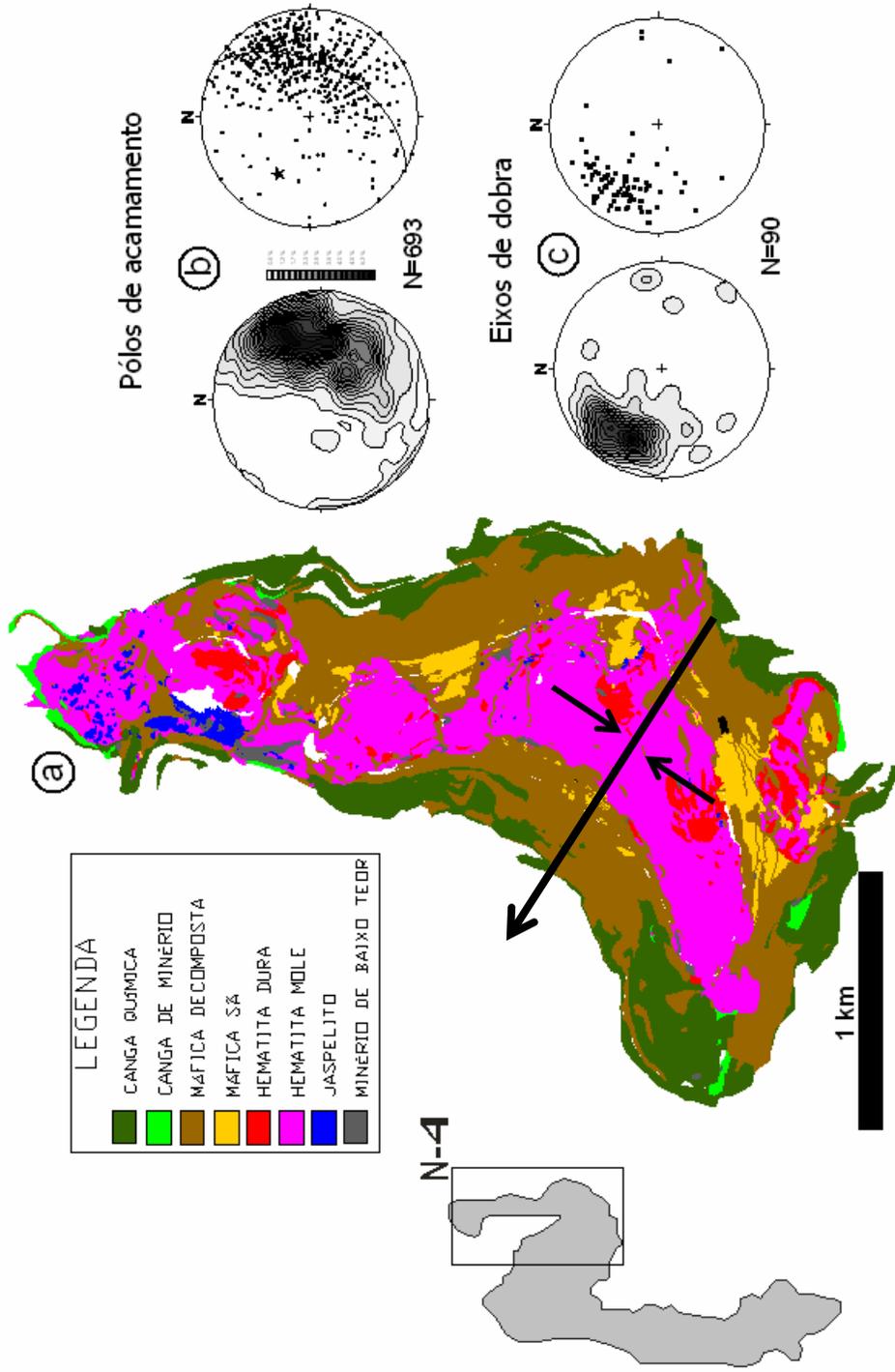


Figura 4.19 – Mapa geológico da mina N4E com seus diversos litotipos desenhando um “J” (a); estereograma dos pólos de planos de acamamento do minério de ferro com seu respectivo diagrama de contorno estatístico (b); estereograma com as atitudes de eixos de dobras na mina N4E e seu respectivo diagrama de contorno estatístico (c).

Na Fig. 4.20 estão representadas em diagramas de projeção estereográfica, as atitudes de acamamento coletadas nas rochas ferríferas dos platôs N1, N3, N4 e N5. A descrição do comportamento do acamamento em cada região estudada bem como a interpretação da posição espacial e da geometria que está associada ao acamamento é mostrada abaixo:

- **Platô N1** – os pólos das 53 medidas coletadas ocorrem espalhados pelas bordas do diagrama indicando altos valores dos mergulhos do acamamento que variam de 50° a 86° (Fig. 4.20A). No diagrama de contornos estatísticos de pólos há duas concentrações principais. A concentração do quadrante leste tem orientação $26^\circ/90$ Az e a concentração do quadrante sul/sudoeste $24^\circ/188$ Az, corresponde a planos médios de acamamento com direção $64^\circ/271$ Az e $67^\circ/08$ Az respectivamente. A guirlanda calculada para as medidas dos pólos tem orientação $26^\circ/141$ Az com eixo beta em torno de $64^\circ/321$ Az. Se as superfícies do acamamento correspondem a uma dobra, esta deve ser reclinada e tem eixo caindo para 309 Az, com mergulho de aproximadamente 63° .

- **Platô N3** – as 27 medidas de pólos de acamamento mostram concentrações importantes nos quadrantes norte e sul do estereograma. A concentração do quadrante norte corresponde a planos de acamamento com mergulhos variando de 40° a 87° . As do quadrante sul têm mergulhos de planos que variam de 30° a 86° . As concentrações correspondem a planos médios com orientação $85^\circ/177$ Az e $61^\circ/355$ Az para as concentrações norte e sul respectivamente. A guirlanda calculada de acordo com esses pólos tem orientação $78^\circ/095$ Az. Essas atitudes de acamamento possivelmente têm relação com uma dobra cujo eixo calculado cai com 12° para 275 Az (Fig. 4.20B).

- **Mina N4E** – os 275 pólos de acamamentos representados em estereograma têm concentração principal no quadrante NE e secundária na

porção ESE e possuem valores de mergulho que variam entre 20° e 89°. As concentrações estatísticas assinalam uma expressiva concentração de planos com direção aproximada 260° e com mergulhos médios de 50° para NW. Essas medidas geram uma guirlanda calculada com atitude 42°/120 Az e representam possivelmente uma dobra isoclinal com caimento de eixo em torno de 48° na direção 300 Az (Fig. 4.20 C).

- **Mina N4W norte** – os 26 pólos de planos de acamamento ocorrem nas porções NE, E e SE do estereograma com discreta concentração na porção E. Têm orientação 36°/92 Az e plano médio com atitude 54°/272 Az. Esses pólos geram uma guirlanda calculada com orientação 41°/059 Az. A partir dos planos de acamamento se pode deduzir um eixo beta com caimento de aproximadamente 49° para a direção 239 Az (Fig. 4.20H). Esse eixo possivelmente tem relação com uma dobra maior, isoclinal, cujos flancos acompanham a atitude geral do acamamento.

- **Mina N4W Central** – as 126 medidas de planos de acamamento representadas como pólos na Fig. 4.20 G, se distribuem em todos os quadrantes do diagrama de projeção estereográfica. Este fato possivelmente tem relação com a presença de dobras menores concentradas ao longo de zonas de deformação observadas na mina. O diagrama de contorno estatístico de pólos dessas estruturas fornece duas concentrações principais, uma na porção E com orientação média de 51°/112 Az que corresponde a um plano com mergulho médio de 39° para a direção 292 Az, e outra na porção W com orientação média de 63°/261 Az, correspondendo a um plano médio com direção 27°/81 Az. A guirlanda calculada para as medidas de acamamento tem orientação 81°/159 Az com eixo beta 9°/339 Az. As dobras presentes nas zonas de deformação são heterogêneas com estilos variando de suave a fechadas e isoclinais.

- **Mina N5E** – há duas concentrações principais dos 29 pólos dos planos de acamamento: uma no quadrante NE que representa um plano médio com direção N30°W, mergulhando 40° para SW; e outra no quadrante SW. Essas concentrações desenham uma guirlanda com atitude 61°/112 Az. Esses dados estão possivelmente relacionados a uma dobra cilíndrica, isoclinal, com eixo beta com caimento de 29° para a direção 292 Az (Fig. 4.20 D).

- **Mina N5S** – os 32 pólos de planos de acamamento estão concentrados nas partes ENE e ESSE do estereograma e correspondem a um plano médio de acamamento com direção N10°W com mergulho de 45° para W. Esses pólos geram uma guirlanda calculada com orientação 51°/071 Az que, pela disposição dos pólos no estereograma, sugere a presença de uma dobra maior isoclinal. Essa dobra maior apresenta um eixo calculado com caimento de 39° para a direção 251 Az (Fig. 4.20 E).

- **Mina N5W** – as 14 medidas de pólos de acamamento estão restritas às partes N e S do diagrama de projeção estereográfica. Esses pólos sugerem que os planos do acamamento estão orientados preferencialmente na direção E-W, com mergulhos tanto para N quanto para S e desenham uma guirlanda calculada com orientação 64°/082 Az. As medidas do acamamento provavelmente estão relacionadas a uma dobra maior com eixo calculado com caimento de 26° para a direção 262 Az (Fig. 4.20 F).

Os dados de acamamento para as áreas estudadas e descritos no texto acima estão sumarizados na Tabela 02.

LOCAL	Nº DE MEDIDAS	GUIRLANDA	EIXO β
Platô N1	53	26°/141 Az	64°/321 Az
Platô N3	27	78°/095 Az	12°/275 Az
Mina N4E	565	42°/120 Az	40°/300 Az
Mina N4Wnorte	26	41°/059 Az	49°/239 Az
Mina N4W central	126	81°/159 Az	09°/339 Az
Mina N5E	29	61°/112 Az	29°/292 Az
Mina N5S	32	51°/071 Az	39°/251 Az
Mina N5W	14	64°/082 Az	26°/262 Az

Tabela 02 – Resumo dos dados de acamamento obtidos no minério de ferro.

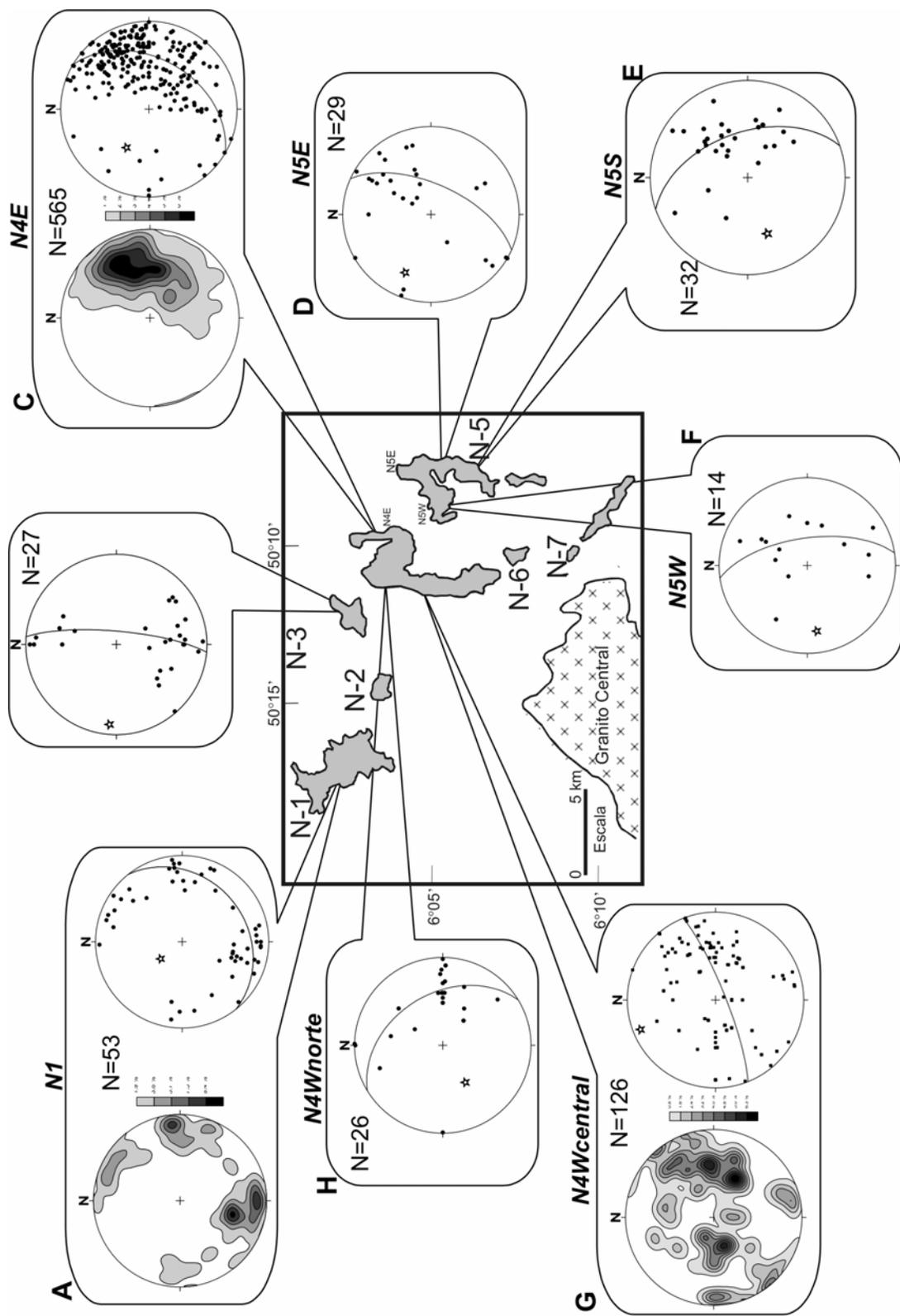


Figura 4.20 – Na parte central da figura estão mostrados os platôs de rochas ferríferas e vulcânicas do Grupo Grão-Pará na Serra Norte. As caixas mostram os diagramas de projeção estereográfica com as medidas de acamamento do minério de ferro para cada platô. Os diagramas de contorno de pólos foram confeccionados apenas nas áreas com mais de 50 medidas de atitudes de acamamento. O símbolo em estrela representa o eixo beta do plano de guirlandada.

EIXOS DE DOBRAS

Na Fig. 4.21 estão representadas as atitudes obtidas dos eixos de dobras centimétricas e métricas presentes nas rochas ferríferas dos platôs da Serra Norte, indicando a direção e o sentido do caimento da linha de charneira das dobras. A seguir estão descritas as características espaciais de cada conjunto de informações para seu referido local de coleta:

- **Platô N1** – os eixos de dobras observados diretamente nos afloramentos apresentam valores altos de mergulho, com média de 65° caindo preferencialmente para a direção W (Fig. 4.21 A).
- **Mina N4W Norte** – as dobras presentes nas rochas ferríferas dessa mina têm eixos com caimento de 20° a 30° para W variando entre as direções WSW e NE (Fig. 4.21 B).
- **Mina N4E** – as 117 medidas de eixo de dobra exibem concentração principal no quadrante NW com caimento variando de 10° a 80° . A significativa dispersão dos eixos de dobras provavelmente tem relação com dobras menores do tipo *kink folds* ou dobras *chevron* que em alguns pontos da mina mostram orientação distinta do padrão exibido pelas demais dobras (Fig. 4.21 C).
- **Mina N4W Central** – os eixos de dobra se encontram dispostos preferencialmente na direção NW-SE com ângulos de mergulho variando de 10° a 40° e têm caimento para NW e para SE, denotando mudança na orientação dos eixos das dobras que ora caem em direção NW ora para SE (Fig. 4.21 F).
- **Mina N5E** – mostra importante variação tanto de direção quanto de mergulho das atitudes de eixos de dobras. A partir do estereograma da Fig. 4.21D, se nota que as medidas de eixo de dobra se apresentam alinhadas em

três direções principais, variando o caimento de suave a alto nas direções 315 Az, 275 Az e 239 Az.

- **Mina N5W** – nesta mina os eixos de dobras apresentam disposição com orientação preferencial segundo a direção 125 Az com caimento variando de 08° a 35° (Fig. 4.21 E).

Os dados de eixos de dobra obtidos nas áreas estudadas e descritos no texto acima estão sumarizados na Tabela 03.

LOCAL	Nº de atitudes de eixos de dobra	Orientação média
Platô N1	15	65° / W
Mina N4E	117	20°-30° / WNW
Mina N4Wnorte	05	20°-30° / WSW
Mina N4W central	14	10°-40° / NW-SE
Mina N5E	25	10°-80° / NW-W-SW
Mina N5W	05	08°-35° / SE

Tabela 03 – Resumo dos dados de eixos de dobra obtidos na área de estudo.

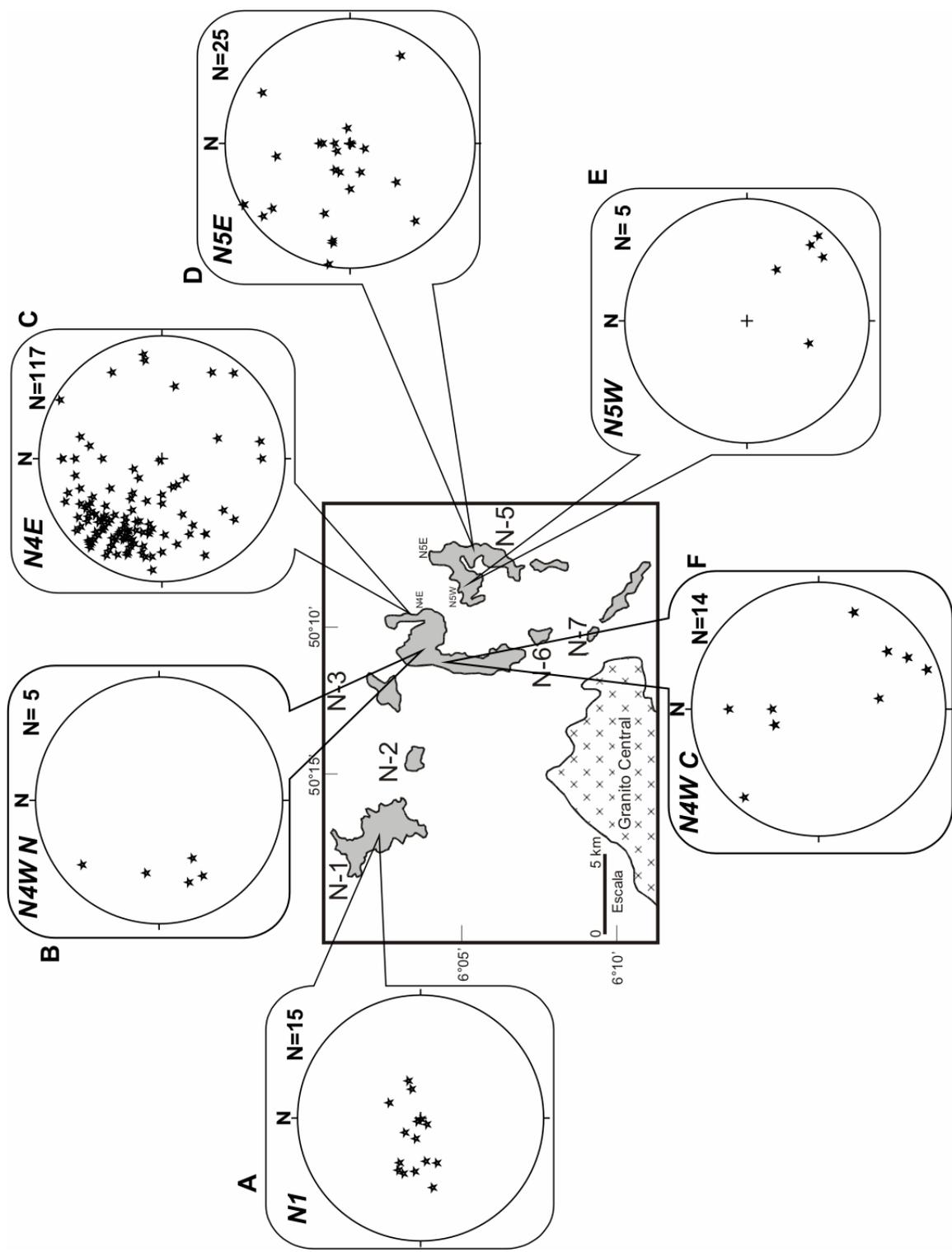


Figura 4.21 – Mapa da região estudada mostrando atitudes de eixos de dobras métricas e centimétricas presentes no minério de ferro, com a localização indicada dos pontos amostrados nos diferentes platôs. Observar a concentração preferencial dessa estrutura no quadrante NW-SE, apesar da dispersão relativa de suas medidas.

PLANOS AXIAIS

A Fig. 4.22 mostra a disposição espacial do plano axial relativo às dobras métricas e centimétricas observadas em campo, para os platôs N1, N4 e N5. Essa estrutura está representada por: estereogramas mostrando os planos axiais, pólos dos planos axiais e ainda, diagrama de roseta para essas estruturas. Para cada área onde o Grupo Grão-Pará aflora têm-se as seguintes características dos planos axiais e vergências de dobras:

- **N1** – os planos axiais se mostram orientados em duas direções principais: NE-SW mergulhando tanto para SE como para NW e na direção NW-SE com mergulhos para NE e para SW (Fig. 4.22 A). Os planos axiais exibem ângulos altos de mergulho, quase sempre sub-verticais.
- **N4E** – os pólos de planos axiais mostram concentrações principais nos quadrantes NE e SW, correspondendo a estruturas orientadas segundo a direção NW-SE com mergulhos tanto para NE quanto para SW. Além desses há também planos axiais concentrados na direção WSW-ENE, com mergulhos de 25° a 45° para NNW e SSE. A orientação desses planos axiais indica vergências principais para NE e para SW e secundárias para NNW e SSE (Fig. 4.22 C).
- **N4W Central** – há orientação principal dos planos axiais na direção NW-SE, com mergulhos tanto para NE como para SW. Planos axiais com direção ENE-WSW mergulhando 35° para NW ocorrem com menor frequência. Os planos axiais apontam vergências principais para NE e para SW, e secundariamente para SE (Fig. 4.22 F).
- **N4W Norte** – as direções dos planos axiais principais são NW-SE e NE-SW, mergulhando respectivamente para SW e para NW. Têm planos com vergências para SW e NW respectivamente (Fig. 4.22 B).

- **N5E** – os planos axiais estão dispostos principalmente na direção NW-SE, com mergulhos tanto para SW quanto para NE e na direção N-S com mergulhos para W. Planos axiais secundários estão na direção NE-SW, mergulhando para NW. Suas vergências principais são para SW, NE e para W e secundariamente para NW (Fig. 4.22 D).
- **N5W** – os planos axiais principais têm orientação NE-SW com mergulho para SE, indicando vergências para NW (Fig. 4.22 E).

Os dados de planos axiais das áreas estudadas e descritas no texto acima estão sumarizados na Tabela 04.

LOCAL	Nº de atitudes de planos axiais	Direções principais	Vergências principais
Platô N1	19	NE-SW NW-SE	SW
Mina N4E	52	NW-SE WSW-ENE	NE SW
Mina N4Wnorte	05	NW-SE NE-SW	SW NW
Mina N4W central	16	NW-SE ENE-WSW	NE SW
Mina N5E	25	NW-SE NE-SW	SW NE
Mina N5W	05	NE-SW	NW

Tabela 04 – Resumo dos dados de planos axiais de dobras observadas na área de estudo.

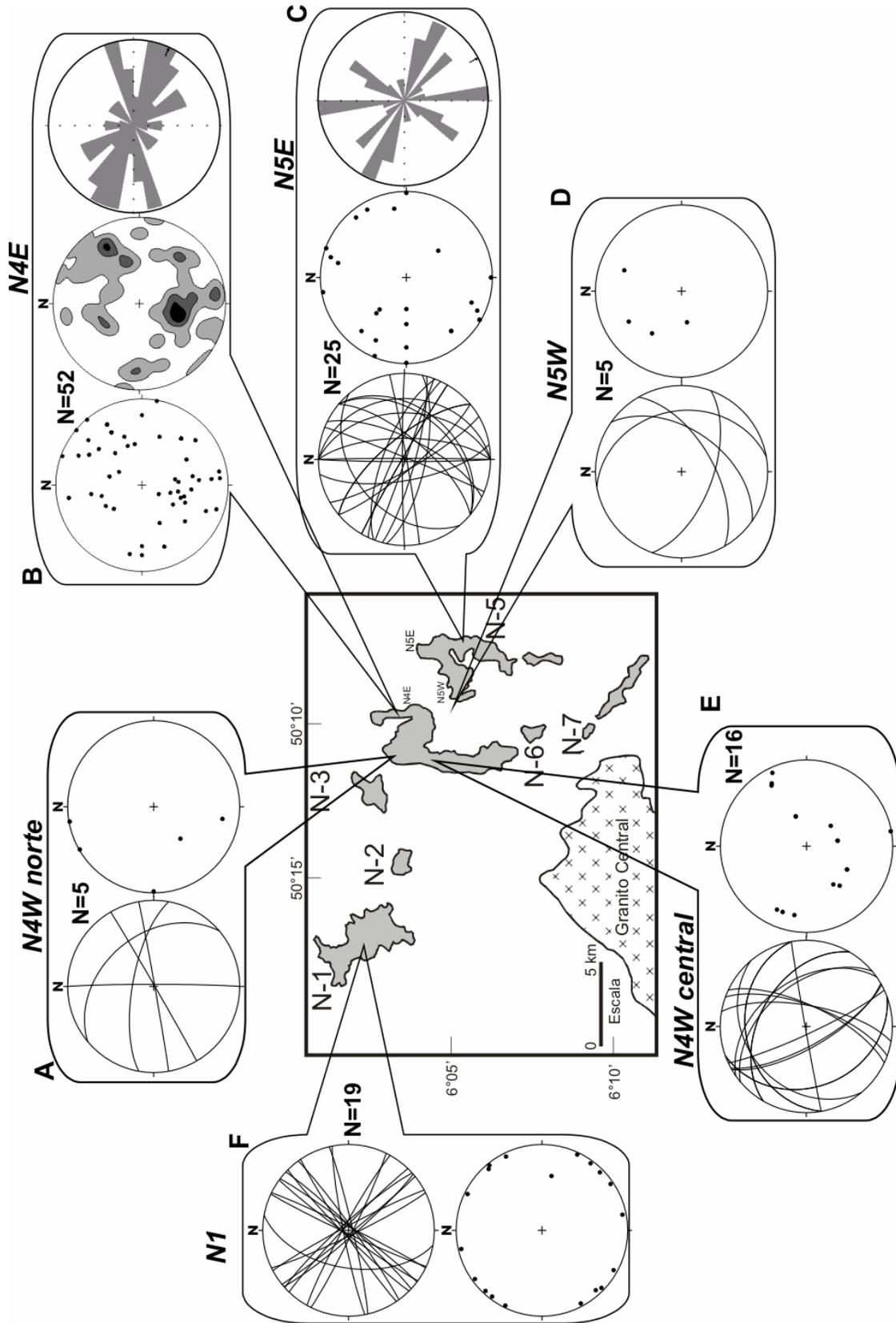


Figura 4.22 – Mapa das áreas estudadas (Serra Norte) com estereogramas para planos axiais de dobras métricas a centimétricas, além de pólos de planos axiais e diagrama de roseta mostrando a direção preferencial desses planos. Os diagramas de roseta foram confeccionados apenas para áreas com mais de 20 atitudes de plano axial.

4.3 – FRATURAS E FALHAS

Na área mapeada, as fraturas são mais freqüentes nas rochas vulcânicas frescas, apresentando diferentes escalas, desde conjuntos centimétricos até fraturas com dezenas de metros. Nas rochas ferríferas, as fraturas são menos comuns, ocorrendo isoladamente, em escala centimétrica.

Normalmente, explosões múltiplas e seqüenciadas, provocadas por dinamite, utilizadas em escavações para desmonte do minério em minas podem gerar diversos padrões de fraturas. Essas explosões podem produzir fraturas de extensão, em padrão radial, com comprimentos da ordem de 50m (Ameen, 1995). As fraturas estudadas nas minas de ferro foram devidamente selecionadas para evitar a coleta de dados falsos quanto à presença de fraturas.

As atitudes de fraturas medidas em campo representadas em estereograma através de seus pólos mostram uma forte dispersão (Fig. 4.23 A). Ao se aplicar o tratamento estatístico do programa *StereoNet for Windows 3.0* (Ivar Steinsund, 1995) se define, inicialmente, uma importante concentração de pólos nas partes N e S do estereograma, correspondendo a planos dispostos em torno da direção E-W, com mergulhos em torno de 80° (Fig. 4.23 B).

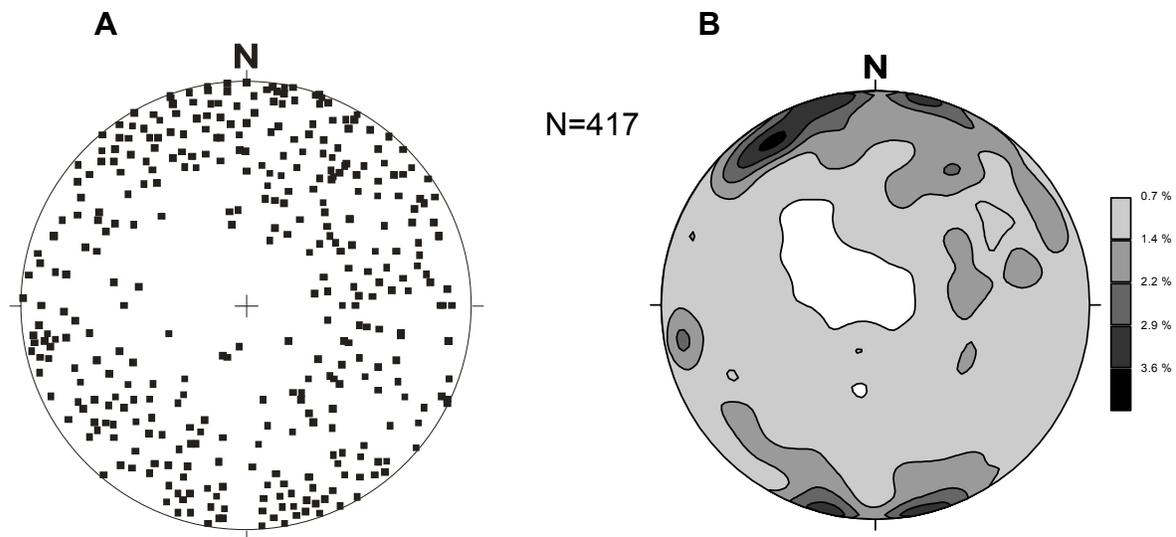


Figura 4.23 - Estereograma de pólos de planos de fraturas (A) com respectivo estereograma de contorno (B) para 417 medidas, efetuadas na Mina N4E.

No sentido de organizar a análise dos dados dessas fraturas, as medidas em campo foram previamente selecionadas, conforme descrito no Capítulo I.

Para melhor visualização e caracterização das fraturas e falhas presentes na mina N4E, foram escolhidos cinco setores onde estas estruturas foram analisadas de modo particular (Fig. 4.24). Para cada setor foram plotadas as atitudes de planos de fraturas, seus pólos e suas concentração estatísticas.

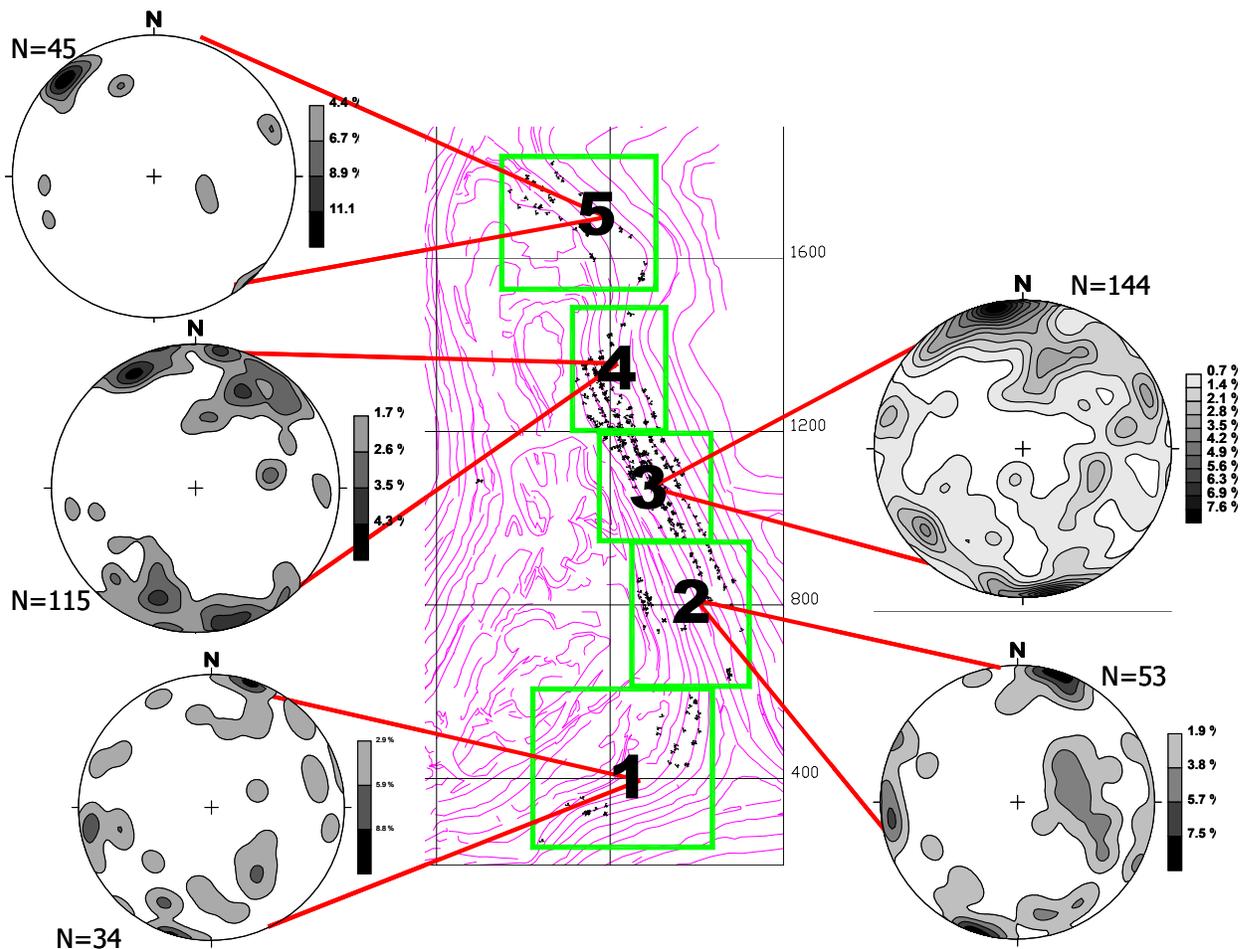


Figura 4.24 - Mapa da aba leste da mina N4E, com cinco setores escolhidos para estudar as fraturas e falhas presentes nas rochas dessa mina. As linhas em magenta no mapa correspondem aos cortes da bancadas e os estereogramas representam as diferentes concentrações de pólos de fraturas por setor.

SETOR 1

Este setor se localiza na porção sul da mina N4E (Fig. 4.24) onde predominam as rochas vulcânicas menos fraturadas. A partir do diagrama de contornos das medidas (total de 34 planos) se pode determinar quatro direções principais de planos de fraturas, sendo eles: $81^{\circ}/20$ Az, $86^{\circ}/198$ Az, $43^{\circ}/324$ Az e $81^{\circ}/80$ conforme mostrado em mapa de detalhe do setor (Fig. 4.25).

SETOR 2

Localiza-se na parte sul da aba leste da mina N4E (Fig. 4.24). Neste setor as rochas mostram baixa densidade relativa de fraturas. Suas atitudes, ao serem plotadas em estereograma, mostram duas concentrações principais de fraturas com direção $86^{\circ}/20$ Az e $83^{\circ}/199$ Az e duas concentrações mais baixas correspondendo a fraturas com direção $79^{\circ}/264$ Az e $33^{\circ}/75$ Az (Fig. 4.26).

SETOR 3

Localizado na porção central da aba leste da mina N4E (Fig. 4.24). Neste setor se encontram rochas vulcânicas bastante fraturadas. No diagrama de contorno se destacam duas concentrações principais de pólos correspondentes a planos com atitudes $80^{\circ}/162$ Az e $82^{\circ}/349$ Az. Como planos de fraturas menos importantes têm-se: $78^{\circ}/66$ Az, $76^{\circ}/230$ Az e $54^{\circ}/17$ Az (Fig. 4.27).

SETOR 4

As 115 medidas de pólos de planos de fraturas representadas em diagrama de contorno, relativas ao Setor 4, correspondem a planos com direção NW-SE e subordinadamente ENE-WSW. Há cinco concentrações importantes de pólos de planos de fraturas que correspondem aos planos: $81^{\circ}/337$ Az, $74^{\circ}/169$ Az, $61^{\circ}/200$ Az, $41^{\circ}/11$ Az, $79^{\circ}/22$ Az e $64^{\circ}/38$ Az (Fig. 4.28).

SETOR 5

Está localizado a norte da aba leste da mina N4E e apresenta rochas relativamente menos fraturadas que os outros setores. Observam-se

concentrações de pólos que correspondem aos seguintes planos: $80^{\circ}/180^{\circ}$, $35^{\circ}/280^{\circ}$, $55^{\circ}/134^{\circ}$ (Fig. 4.29).

SETOR 1

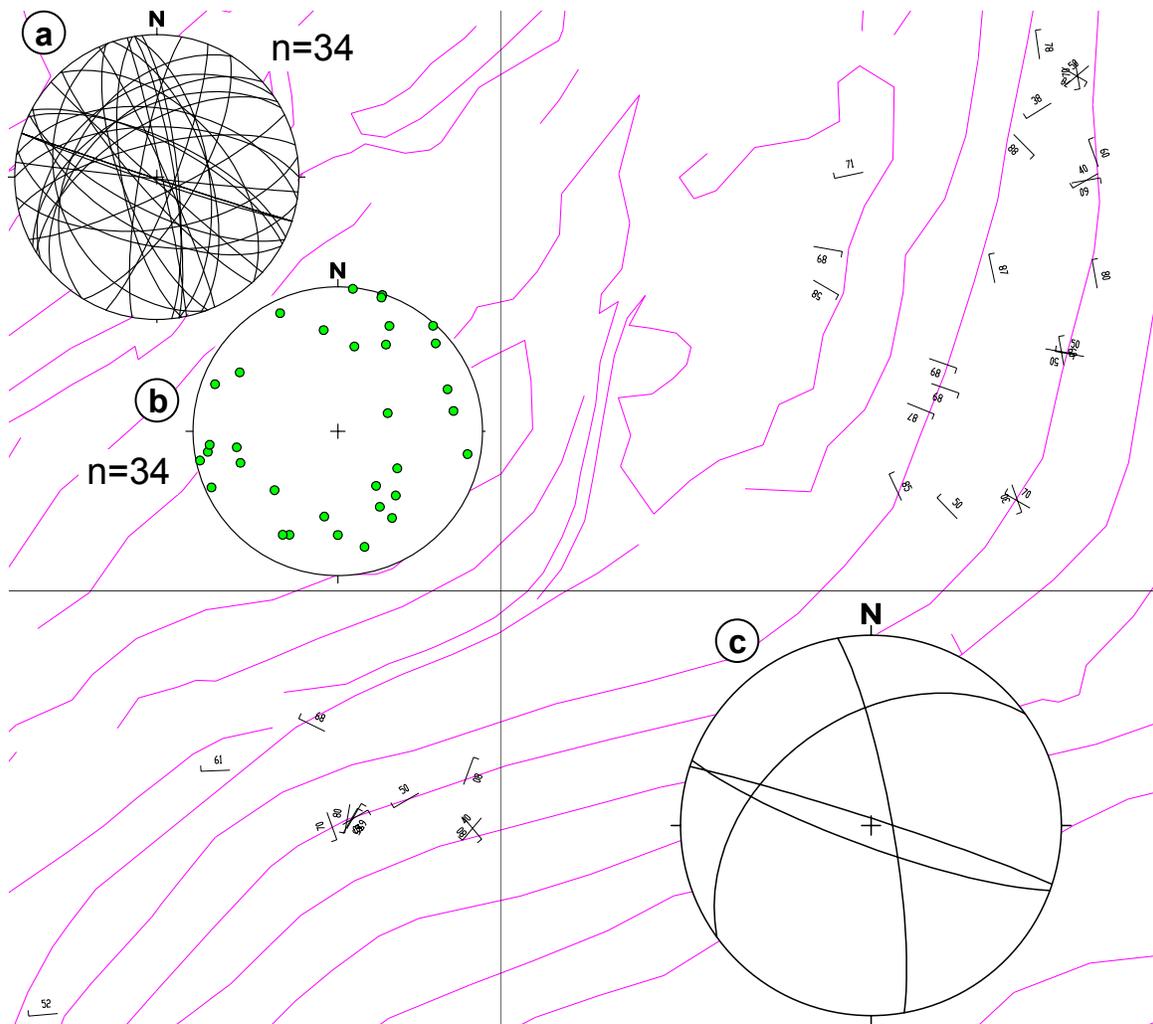


Figura 4.25 – Mapa detalhado das atitudes das fraturas do Setor 1 com; (a) estereograma de planos de fraturas; (b) estereograma de pólos de planos de fraturas; (c) principais planos de fraturas selecionados a partir do estereograma b. Ver localização do Setor 1 na Fig. 4.8. Linhas magenta representam bordas das bancadas da mina.

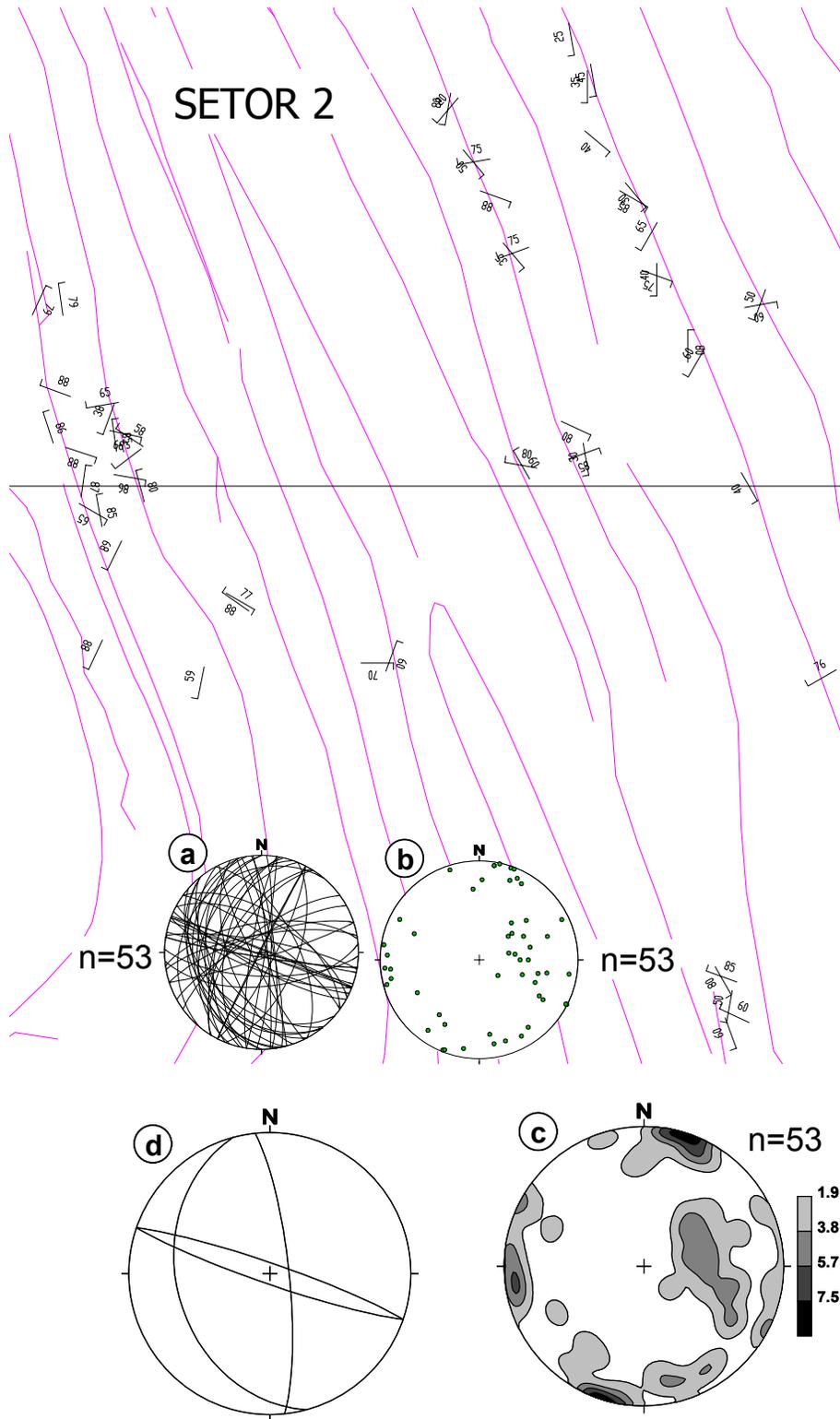


Figura 4.26 – Mapa detalhado das fraturas do Setor 2 com: (a) estereograma de planos de fraturas; (b) estereograma de pólos de planos de fraturas; (c) diagrama de contornos com concentrações principais dos pólos de planos de fraturas; e (d) estereograma com planos principais obtidos através do diagrama (c). Linhas magenta representam bordas de bancada da mina.

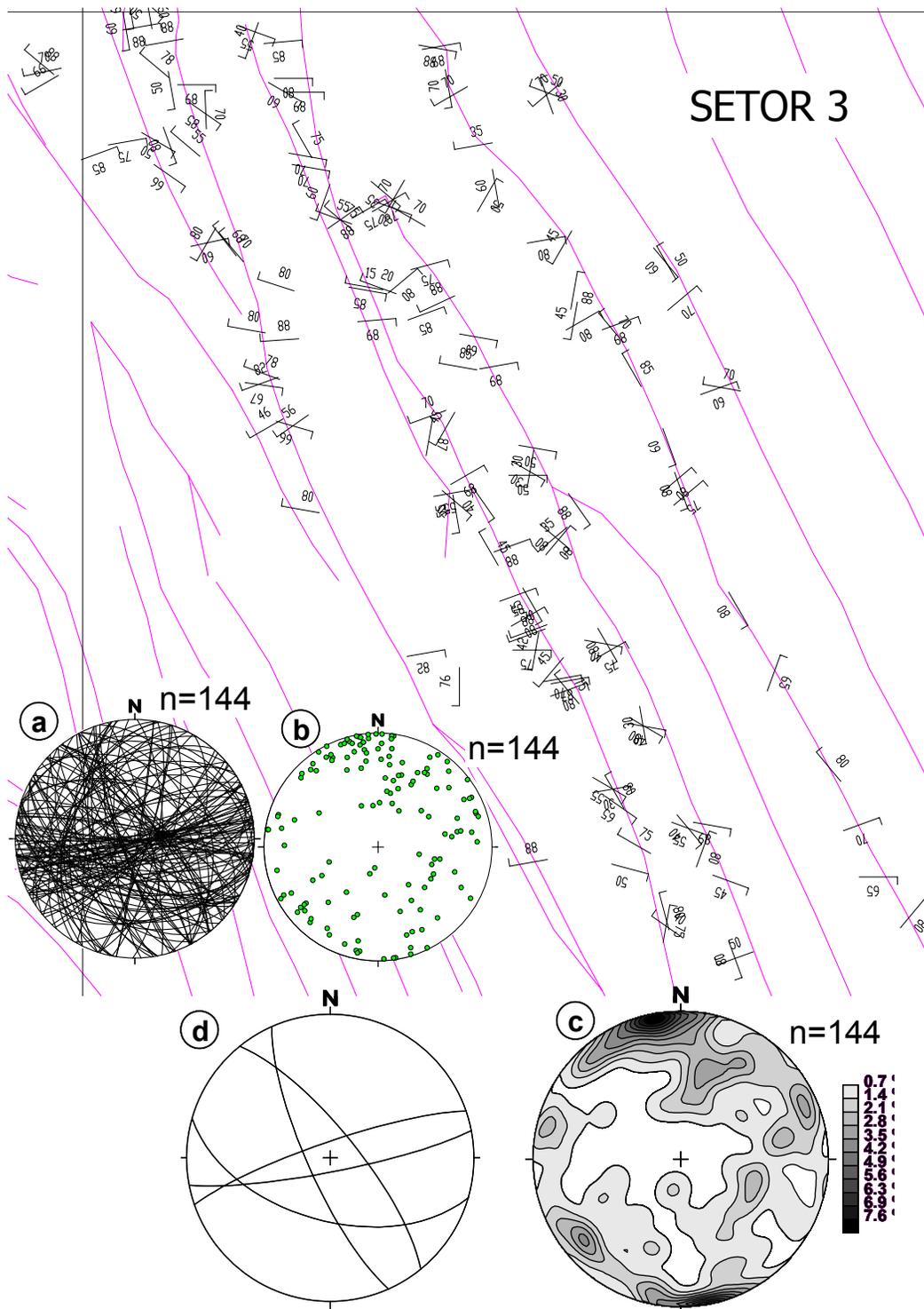


Figura 4.27 – Mapa detalhado das fraturas do Setor 3 com: (a) estereograma de planos de fraturas; (b) estereograma de pólos de planos de fraturas; (c) diagrama de contornos com concentrações principais dos pólos de planos de fraturas; e (d) estereograma com planos principais obtidos através do diagrama c. Linhas magenta representam bordas das bancadas da mina.

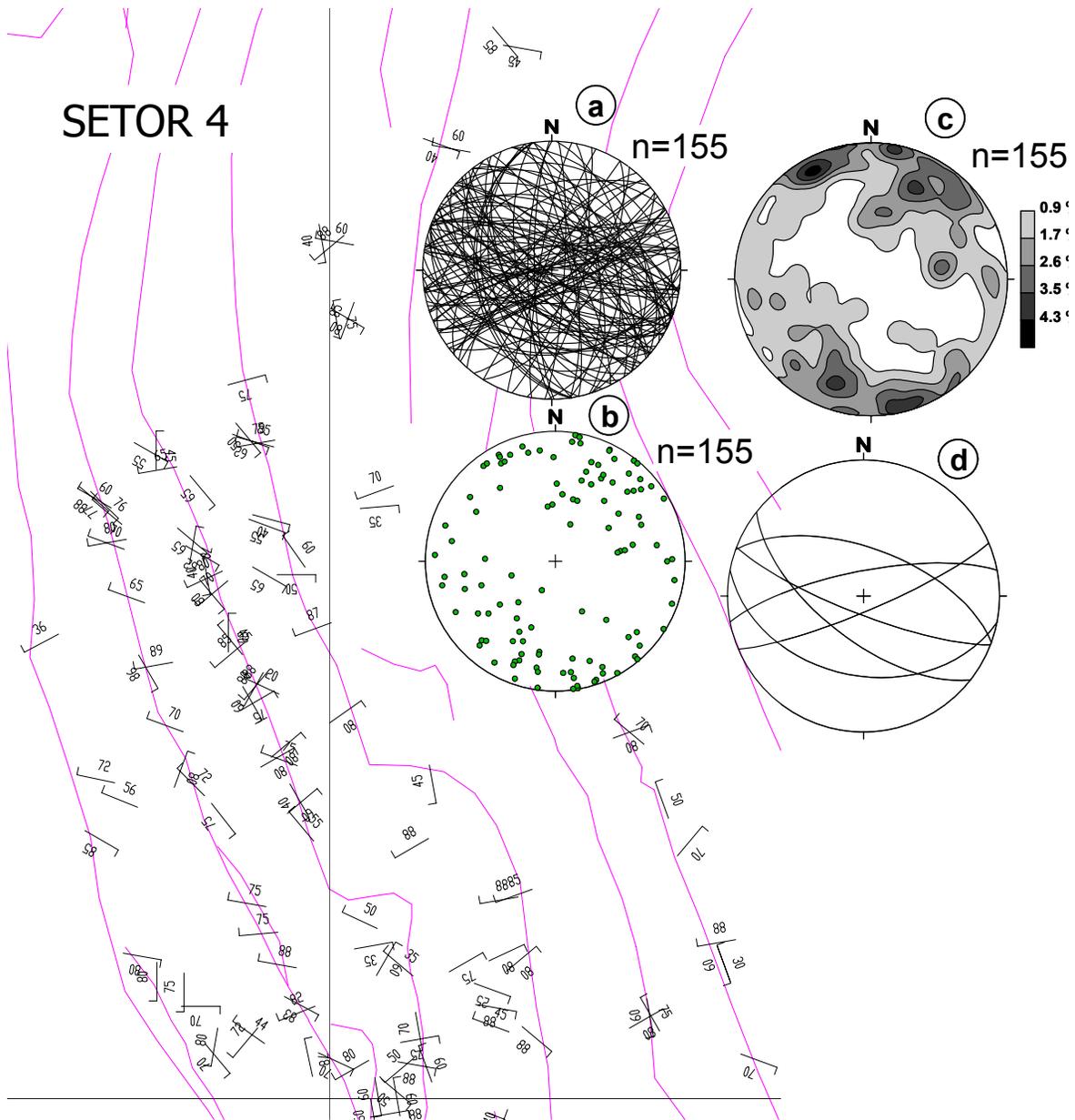


Figura 4.28 – Mapa de detalhe de fraturas no Setor 4 com: (a) estereograma de planos de fraturas; (b) estereograma de pólos de planos de fraturas; (c) diagrama de contornos com concentrações principais dos pólos de planos de fraturas; e (d) estereograma com planos principais obtidos através do diagrama (c). Linhas magenta representam bordas de bancada da mina.

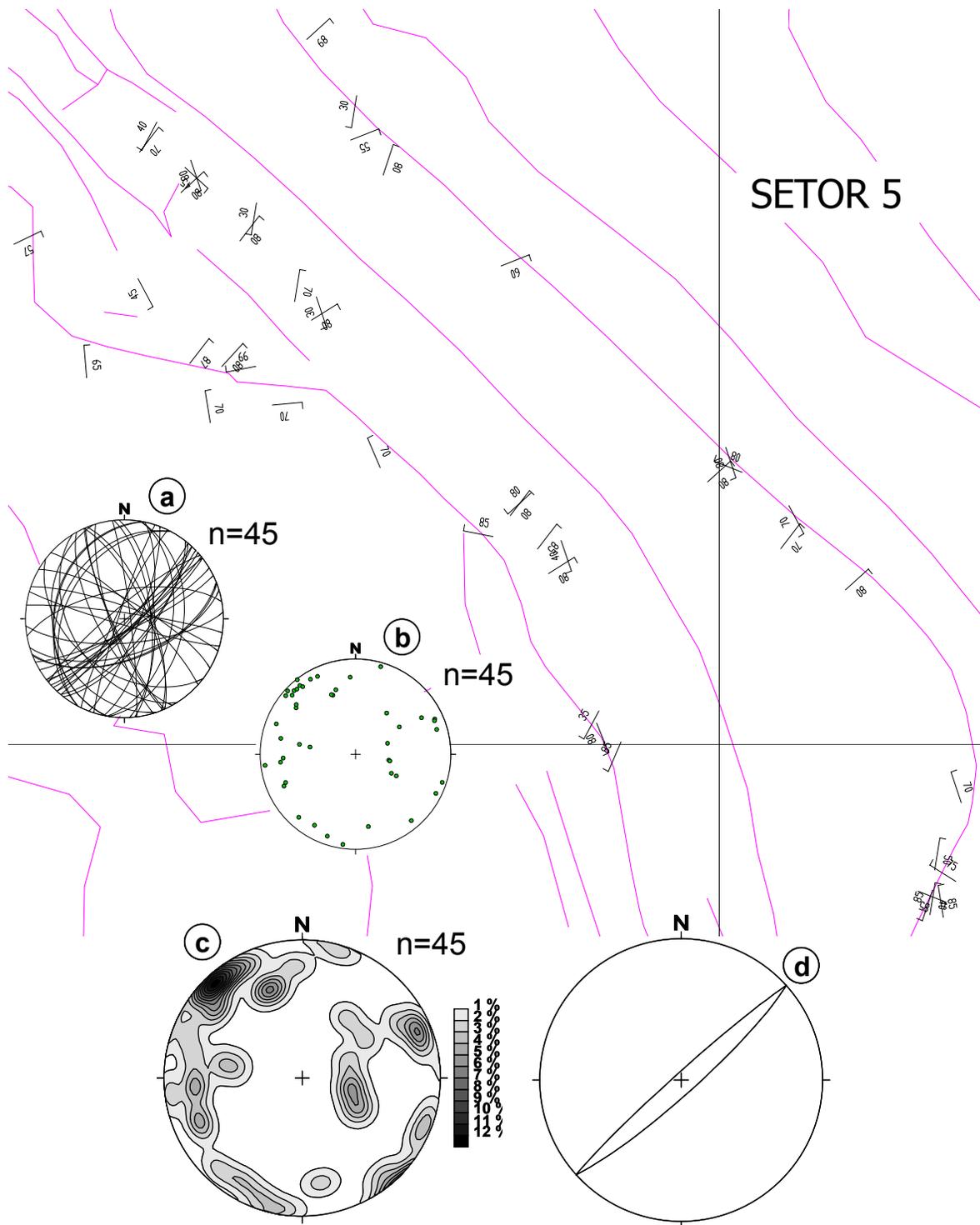


Figura 4.29 – Mapa de detalhe de fraturas observadas no Setor 5, com: (a) estereograma de planos de fraturas; (b) estereograma de pólos de planos de fraturas; (c) de contornos com concentrações principais dos pólos de planos de fraturas; (d) estereograma com planos principais obtidos através do diagrama (c). Linhas magenta representam as bordas das bancadas da mina.

PLATÔ N1

São observadas poucas fraturas na canga ferruginosa desse platô. As descontinuidades observadas mostram preferencialmente deslocamentos sinistrais rúptil-dúctil com direção em torno de 240-260 Az e 100 Az, deslocando planos de acamamento da rocha ferrífera. Nesse platô predominam, de maneira geral, fraturas sísmicas simples, isoladas ou em feixes.

MINA N5W

Há poucas fraturas, sendo estas também do tipo sísmicas, com direções variando de NE-SW a NW-SE, predominando aquelas com valores do ângulo de mergulho com média de 80°.

MINA N4W NORTE

Poucas fraturas importantes podem ser observadas nas rochas aflorantes nessa mina. Destacam-se as descontinuidades orientadas segundo a direção 120°-150° Az.

MINA N4W CENTRAL

As fraturas observadas estão dispostas nas direções NE-SW e NW-SE, predominando aquelas com direção 20° Az a N-S, com valores altos de mergulho (>80°). Essas fraturas são relativamente espaçadas e podem, eventualmente, estar acompanhadas por clivagem de crenulação.

4.4 – ZONAS DE CISALHAMENTO

Essas estruturas, mapeadas na Mina N4E, estão preferencialmente associadas às rochas vulcânicas da Formação Parauapebas. Variam de 1 a 5m de largura e com até mais de 15 m de continuidade vertical exposta.

Na mina, as zonas de cisalhamento são caracterizadas pela presença da *foliação ou clivagem disjuntiva anastomótica* (Fig 4.30).

Os *planos de foliação ou clivagem* são contínuos e ondulados, com espaçamento microlítico variando entre 0,5 a 2 cm. Nesses planos estão presentes concentrações de minerais placosos orientados.

As zonas de cisalhamento estão orientadas preferencialmente segundo as direções NE-SW e NW-SE com valores de ângulo de mergulho variando de 55° a 88° (Fig. 4.31).



Figura 4.30 – Zona de cisalhamento em rocha vulcânica localizada na parte leste da cava norte da Mina N4E. A estrutura tem aproximadamente 6 m de largura. No detalhe: desenho esquemático do arranjo da clivagem disjuntiva anastomosada, presente no interior na zona.

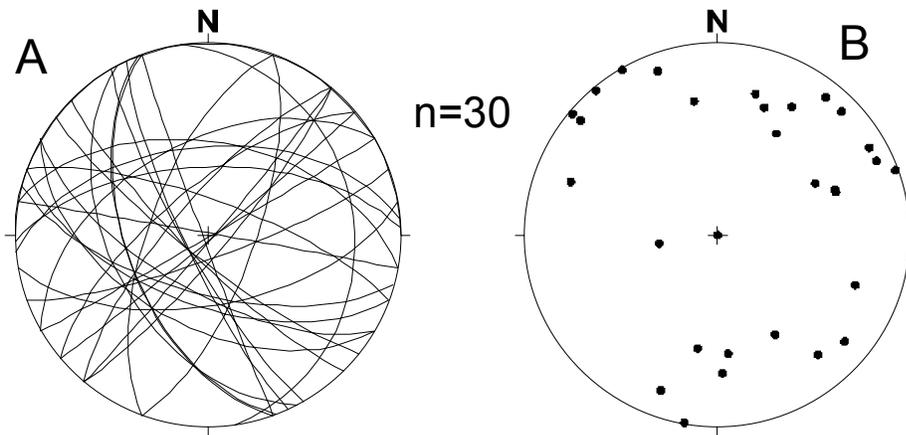


Figura 4.31 – Zonas de cisalhamento; (A) estereograma (diagrama de igual área) com a representação dos planos de zonas de cisalhamento; (B) estereograma de pólos de foliação em zonas de cisalhamento. Observa-se a presença de 03 áreas principais de concentração de pólos, indicando planos NE-SE e NW-SE.

4.5 – DIQUES

Os *corpos de rochas básicas* que cortam o minério de ferro se mostram sempre alterados por intemperismo e/ou hidrotermalismo.

Os diabásios, nos diques, têm cor vermelha amarelada exibindo aspecto maciço isotrópico. Há dois tipos de intrusões máficas presentes na mina N4E: (1) diques e/ou sills deformados juntamente com o minério de ferro e muitas vezes concordantes com o acamamento; (2) diques tabulares, irregulares, com largura média variando de 0,5m a 4m truncando o acamamento (Fig. 4.32).

Em alguns afloramentos se encontram xenólitos de jaspilito de até 30 cm dentro desses diques. Algumas vezes *sills* centimétricos a métricos são projetados a partir dos diques, penetrando entre o acamamento do minério de ferro.

Esses diques máficos estão dispostos seguindo o *trend* N-S com variações para NNE-SSW e NNW-SSE.

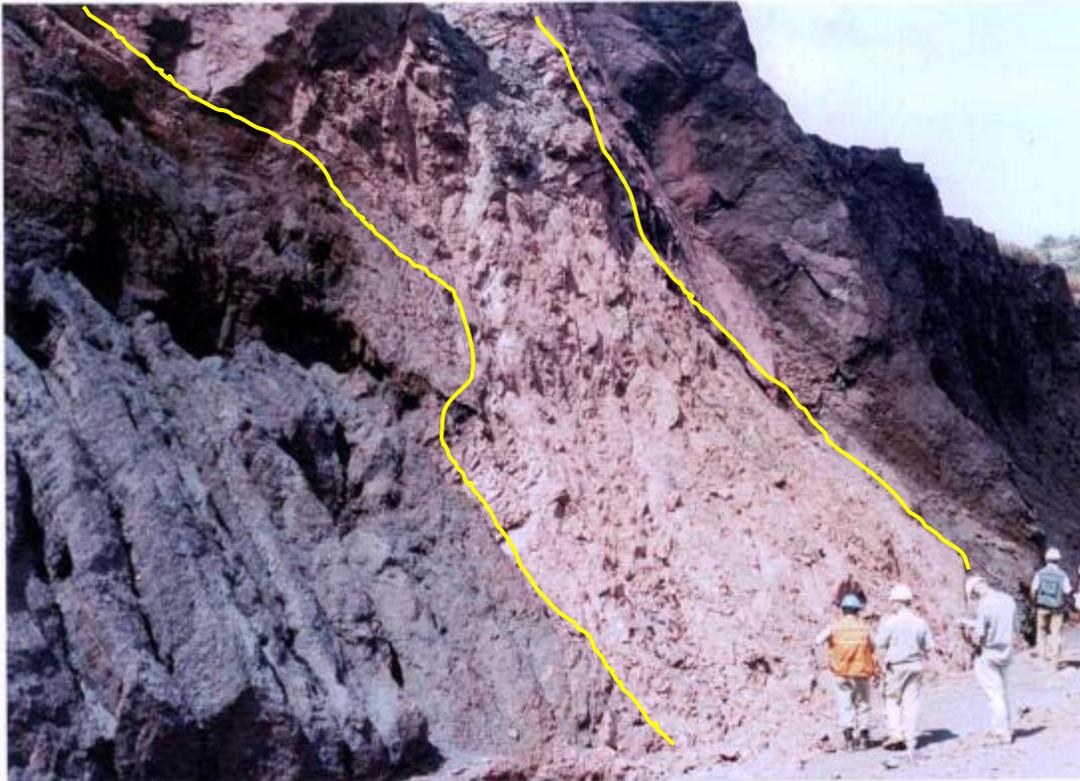


Figura 4.32- Dique tabular de diabásio (vermelho) com 4m de largura, truncando o acamamento do minério de ferro. Essa estrutura está orientada segundo a direção NE-SW e localiza-se na seção 14.

4.6 – ANÁLISE GEOMÉTRICA

A seguir serão apresentadas informações referentes ao quadro geométrico inerente às estruturas observadas, nas rochas expostas, nas minas estudadas.

4.6.1 Contatos Litológicos

a) Contatos Concordantes

Os contatos litológicos concordantes entre rochas vulcânicas e rochas ferríferas, com ângulos baixos de mergulho, tal como descritos no capítulo anterior, provavelmente representam feições não deformadas, preservadas, formadas no momento em que se depositaram as rochas vulcânicas e ferríferas do Grupo Grão-Pará.

Os contatos concordantes ondulados, por sua vez, podem ser vistos como feições dobradas, envolvendo a seqüência vulcano-sedimentar.

A Fig. 4.33 apresenta estereogramas de pólos de planos de contato e seu respectivo diagrama de contorno estatístico. No diagrama da Fig. 4.33 (a) a dispersão dos pólos observados causa limitações na caracterização e interpretação de sua geometria e posição espacial.

No diagrama da Fig. 4.33 (b), tratado com o auxílio do aplicativo *Stereonet 3.0*, se percebe concentrações mais importantes de pólos nas porções SSW, SE e NE do estereograma. Essas concentrações desenham uma guirlanda com orientação $28^{\circ}/116$ Az e eixo β caindo para NW, com atitude $62^{\circ}/296$ Az. Essa medida é compatível com a orientação da dobra maior (quilométrica) deduzida pelos pólos de acamamento, conforme será discutido a seguir.

A guirlanda desenhada pelos pólos de planos de contatos mostra também relação concordante com as dobras centimétricas e métricas observadas no acamamento.

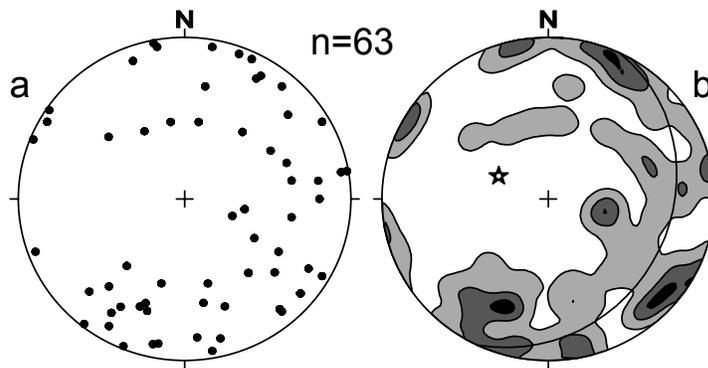


Figura 4.33 - a – Estereograma de pólos de planos de contato; b – Diagrama de contorno dos pólos de contato com a linha da guirlanda formada pelos pólos de concentração e seu respectivo eixo β (estrela)- $62^\circ / 296^\circ$.

Os contatos concordantes que afloram nos cortes aparentes na mina N4E podem ser eventualmente confundidos com contatos por falha, principalmente se o corte da bancada mostrar uma perspectiva em que o mesmo apareça alinhado em posição ligeiramente vertical. Uma das maneiras encontradas para se evitar possíveis dúvidas é a observação da presença de uma foliação nas rochas vulcânicas, nas proximidades do contato, ou quando aparecem dobras do tipo *kinks* nas rochas ferríferas (p.e. seção 25, 18, 13, 12, 11, 10, 08 e 01).

b) Contatos por Falha & Demais Estruturas Rúpteis.

A presença de contatos por falhas entre as rochas vulcânicas e as rochas ferríferas são evidências de reorganização tardia rúptil da geometria das rochas estudadas na Serra Norte.

Esses contatos estão orientados geralmente segundo as direções NE-SW, NW-SE, e ainda N-S subordinada (Figs. 4.6 e 4.7), devendo refletir as orientações de fraturas observadas no quadro regional.

A análise do mapa de lineamentos fotoestruturais, apresentada no Capítulo III, mostra a presença de três conjuntos de lineamentos que cortam as rochas dos platôs da Serra Norte. Esses lineamentos estão orientados nas direções NE-SW, NW-SE e N-S (Fig. 3.1).

Quando comparadas, as orientações dos contatos por falha e dos lineamentos que cortam os platôs mostram razoável concordância.

Os contatos por falha, na mina N4E, não se concentram aparentemente em nenhum local particular, espalhando-se de modo considerável na área exposta da mina.

Durante o mapeamento não se encontrou nenhuma evidencia direta de deslocamento relativo dos blocos separados pelas falhas nos contatos. As falhas não mostram facilmente os deslocamentos existentes entre os blocos. As descontinuidades foram caracterizadas como falhas por se destacarem como fraturas longas, contínuas com centenas de metros, atravessarem indiscriminadamente as bancadas da mina e colocarem lado a lado rochas vulcânicas e ferríferas.

A geometria dos contatos observados na Mina N4E pode ser assim resumida:

- a) Há dois tipos de contato entre rochas vulcânicas e ferríferas na mina: (1) contatos concordantes que podem ser dobrados ou não; e (2) contatos por falha.
- b) Os contatos concordantes correspondem aos contatos primários que se formaram durante a deposição das rochas do Grupo Grão Pará e que foram posteriormente dobrados. Os contatos por falha são posteriores e tardios, tendo deformado e reorganizado as rochas.

4.6.2 Dobras

Conforme descrito anteriormente, as dobras presentes nas rochas dos platôs norte da Serra dos Carajás, estão desenhadas em escalas desde centimétricas, métricas a quilométricas. As mesmas, de maneira geral, são reclinadas, assimétricas, com um flanco com mergulho suave e outro com mergulho alto. As dobras centimétricas, particularmente, se mostram fechadas a isoclinais, por vezes do tipo *kink* ou *chevron*. Têm eixos com caimento médio de 20°-30°, preferencialmente para NW. Seus planos axiais estão orientados na direção NW–SE com mergulhos tanto para NE quanto para SW.

Observa-se uma relação fractal para essas estruturas, a partir de suas similaridades geométricas. É provável que essa disposição geométrica represente um padrão de dobramento comum nas demais rochas dos platôs da Serra Norte.

A vergência das dobras observadas é relativamente bem definida pela assimetria das dobras e cavalgamentos associados. As dobras das rochas ferríferas da Serra Norte têm quatro sentidos de vergência definidos pelas informações de campo, e foram obtidas em dobras de escala centimétrica e métrica (ver Fig. 4.22).

As dobras indicam vergências preferenciais para NE e para SW e subordinadamente para NW e SE.

O sentido do transporte tectônico em regiões deformadas pode ser determinado pelas direções das vergências das dobras. Logo, na área mapeada, o transporte tectônico ocorreu principalmente para NE e SW e de maneira subordinada para NW e SE.

De acordo com o diagrama de classificação do estilo de dobras desenhadas em projeção estereográfica, proposto por Leyshon e Lisle (1996), as dobras presentes no platô N4 se enquadram entre aquelas dos modelos **e** e **f** (Fig. 4.34). Pode-se inferir ainda que: (1) os ângulos interflanco das dobras são medianos; (2) os ápices das dobras são curvos, considerando o fato de os esterogramas mostrarem um padrão de concentração difusa dos pólos; e (3) as

dobras são assimétricas, com conjunto mais suave e outros com mergulho mais forte.

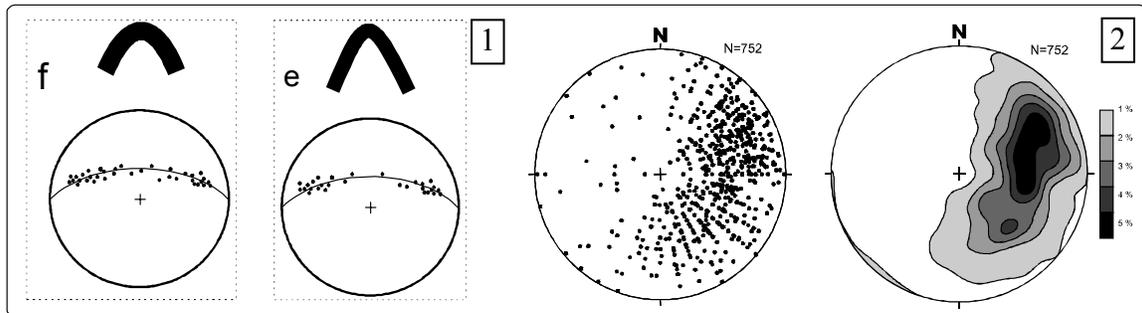


Fig 4.34 - Comparação entre os tipos de dobras e seus respectivos estereogramas, proposto por Leyshon e Lisle (1996) (1); e o padrão de disposição dos pólos de acamamento das rochas dobradas do platô N4 (2).

A síntese das características geométricas das dobras presentes nas rochas ferríferas da Serra Norte envolve:

- Se mostram em arranjos fractais, estando articuladas nesse arranjo em diferentes escalas (centimétrica, métrica e quilométrica).
- De maneira geral são reclinadas e assimétricas, e localmente podem ser do tipo *kink* ou *chevron*.
- Os eixos têm caimento médio de 20° - 30° para o quadrante NW, e os planos axiais exibem orientação principal nas direções NW-SE, sendo as direções NE-SW e N-S subordinadas.
- Vergências e transporte tectônico principal para NE e SW e subordinados para NW e SE.

4.6.3 Fraturas

As fraturas mapeadas na Mina N4E e descritas no item 4.3 mostram orientações principais nas direções NE-SW, ENE-WSW, ESE-WNW e N-S.

Esses conjuntos não mostram relações claras de truncamento entre si, sendo difícil o estabelecimento das relações temporais entre esses conjuntos. Essa afirmação pode ser verificada ao se observar o mapa de traços principais de lineamentos confeccionado a partir da imagem de radar (Fig. 3.1) onde os conjuntos mostram relações confusas de truncamento. De qualquer forma parece razoavelmente consistente a posição das linhas N-S, com tendências de truncamento em relação às demais feições.

Os dados de campo também não auxiliam muito no sentido de se resolver essa questão. Ao se observar a distribuição de fraturas medidas em campo, mostradas no estereograma da Fig. 4.23 evidenciando dispersão de pólos para essas estruturas, poucas informações quanto a essa relação podem ser coletadas. Poderia se dizer, a grosso modo, que o principal conjunto identificado tem direção geral E-W com mergulhos variados. Deve-se levar em consideração o fato de que as paredes onde os dados foram coletados têm direção N-S, expondo preferencialmente os conjuntos E-W tal como observados na análise mencionada.

Outra dificuldade se refere à definição da cinemática dos lineamentos e das estruturas observadas em campo. Há ausência ou falta de preservação dos elementos lineares mais comuns, indicadores de deslocamentos (estrias, *slickensides*, etc.). Cabe mencionar a aparente abundância de falsos *slickensides* observados nas rochas vulcânicas, notadamente naquelas “semi-alteradas”. Essa rocha, quase que em qualquer fratura gerada ao ser quebrada, dá origem a *slickensides* em diversas direções.

Essas estruturas têm, como um todo, caráter tardio em relação às dobras e demais feições dúcteis e, portanto, têm relação com o final da história deformacional das rochas expostas na área.

4.7 – ANÁLISE CINEMÁTICA

Para analisar a cinemática e o quadro dos movimentos decorrentes da deformação que as rochas do Grupo Grão-Pará foram submetidas, utilizou-se como principal elemento indicador cinemático, as vergências das dobras presentes no minério de ferro.

Essa vergência das dobras indica a direção e o sentido do transporte tectônico durante a deformação. As direções principais e secundárias das vergências presentes nas rochas ferríferas da Serra Norte estão representadas na Fig. 4.36.

As vergências principais são para os quadrantes NE e SW e as secundárias são para NW e SE, como foi descrito de forma detalhada no tópico de análise geométrica (ver item 4.6.2).

O caráter divergente das vergências pode ter relação com um modelo de dobras em leque (Fig. 4.35). Nesse modelo as dobras articuladas exibem planos axiais, e conseqüentemente vergências, com ampla variação quanto à posição espacial.

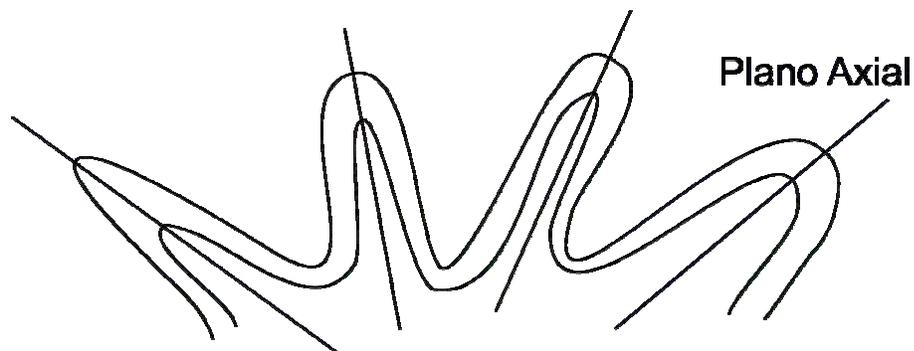


Figura 4.35 – Desenho esquemático (sem escala) de uma camada dobrada com geometria em leque, onde os planos axiais mostram disposição radial.

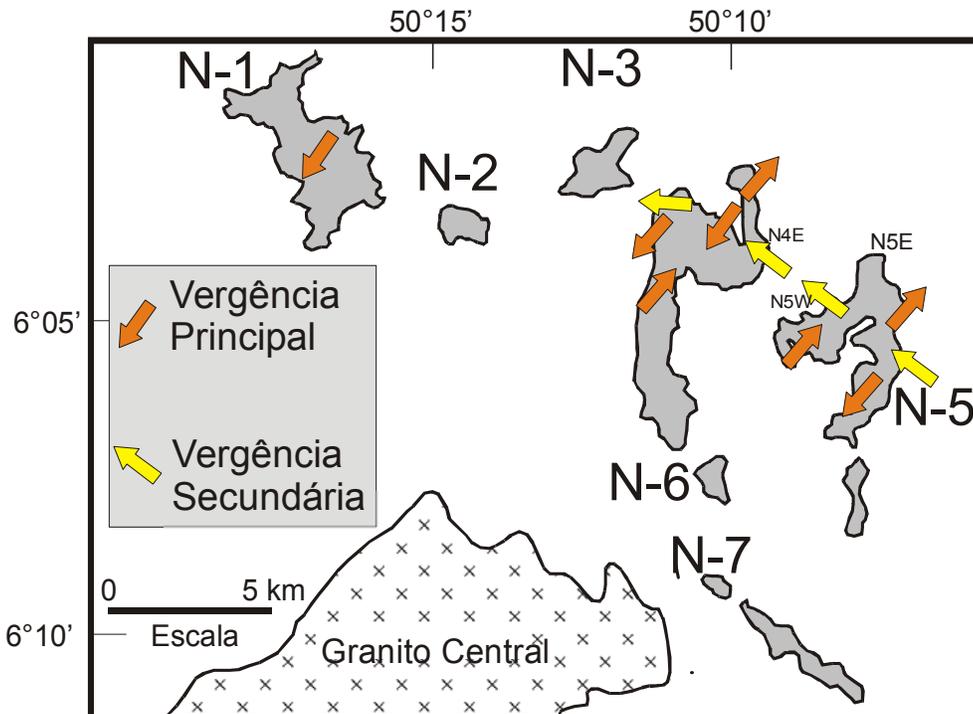


Figura 4.36 – Vergências principais e secundárias das rochas ferríferas da Serra Norte, indicando a direção e sentido do transporte tectônico associado à deformação das rochas nessa região.

As direções das vergências encontradas nas dobras estudadas parecem ter relação com a cinemática sinistral que teve lugar na Falha Carajás, em um dos seus eventos mais importantes, de natureza transpressiva (p.e. Pinheiro, 1997; Lima, 2002).

Nesse contexto a Falha Carajás pode ser apontada como responsável por grande parte da deformação que afetou as rochas aflorantes na região, tendo passado por pelo menos três eventos de reativação. O último evento de caráter sinistral provocou deformação concentrada preferencialmente nas rochas próximas aos traços da falha.

O bloco tectônico limitado a sul pela Falha Carajás e a norte pela borda norte do Sistema Transcorrente Carajás, mostra evidências de ter sofrido amplo

soerguimento, colocando o Grupo Grão Pará em contato com as rochas da Formação Águas Claras e do embasamento.

As dobras evidenciam encurtamento e rotação no bloco acima definido. A dobra maior, quilométrica, desenhada pelo platô N4E pode ser avaliada quanto ao encurtamento envolvido, tomando com o base a relação entre o seu comprimento estendido e dobrado. Esse valor pode chegar à cerca de 34% (Fig. 4.37; ver Atividades e Métodos no Capítulo I). Os diferentes estilos de dobras podem indicar deformação heterogênea com diferentes taxas de encurtamentos ao longo do bloco.

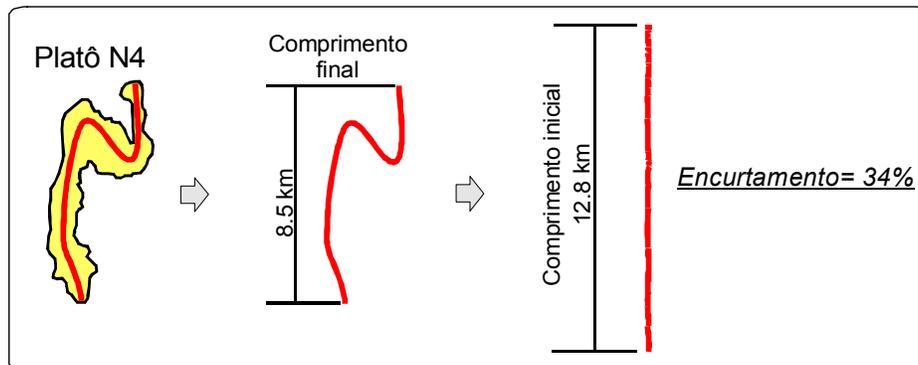


Figura 4.37 – representação esquemática da taxa de encurtamento para o Platô N4. Essa taxa é obtida pela razão entre o comprimento final do corpo deformado e o comprimento inicial do corpo, antes da deformação.

Durante o evento principal de deformação dúctil a dúctil rúptil do bloco, responsável pela presença das dobras, a cinemática interna do bloco respondeu de modo sintético, com deslocamentos sinistrais ao longo de planos NNW-SSE (Fig. 3.2). Este fato pode ser comprovado pela presença de dobras centimétricas e métricas, com arranjo preferencial em “Z”, conjugadas com a própria morfologia do platô, com essa mesma configuração.

Como feição particular, indicadora de transposição por dobramento e rotação, em escala regional, destaca-se a interrupção do minério de ferro entre

os platôs N4 e N7 e N8, com esses últimos desenhando um arco, sugestivo de deslocamento sinistral, partindo em *splay* do traço da Falha Carajás (Cap. III).

Apesar da escassez de indicadores cinemáticos, as falhas e zonas de cisalhamento mapeadas na mina N4E, possivelmente se estabeleceram sob movimentação sinistral. Esse fato se apóia na hipótese de que essas estruturas estariam relacionadas a traços secundários que se projetaram a partir do traço principal da Falha Carajás, interceptando as rochas dos platôs.

Os dados cinemáticos descritos indicam um quadro regional dominado por transpressão sinistral. Esse quadro é evidenciado por: (1) rochas deformadas por encurtamento, com a presença de dobras; e (2) transcorrência sinistral da Falha Carajás e dos traços secundários que dela se projetam em *splays*.

CAPÍTULO V – INTERPRETAÇÃO TECTÔNICA PARA A REGIÃO

Com base nas informações obtidas a partir da leitura e interpretação de sensores remotos e mapeamento de campo elaborado com base na análise geométrica e cinemática integrada dos dados estruturais, propõe-se neste capítulo a apresentação de um quadro evolutivo tectono-estrutural, abrangendo particularmente as rochas vulcânicas e ferríferas do Grupo Grão-Pará, aflorantes na Serra Norte.

Informações anteriormente publicadas sugerem que as rochas do Grupo Grão Pará se depositaram em uma bacia intraplaca instalada sobre crosta continental, sob regime distensivo (Pinheiro, 1997).

Duas correntes distintas de pensamento tomam lugar nessa discussão. De acordo com Lindemmayer (1990), Nogueira (1995) e Pinheiro (1997) a estrutura sigmoidal de Carajás compreende restos preservados de uma bacia tipo intracratônica. Segundo Macambira (2003) essa bacia teria seguido a evolução próxima a de um tipo “*rift* abortado” e, então, a estrutura sigmoidal corresponderia à bacia original, posteriormente deformada.

Como principais argumentos para a sugestão de que a bacia corresponderia a uma área maior que a atualmente exposta tem-se (Pinheiro & Nogueira, 2003): (1) dados de paleocorrentes preservados na Formação Águas Claras apontam área fonte a NE e depocentro a SW, ambos fora dos domínios físicos do sigmóide; (2) o preenchimento sedimentar mostra registros de processos envolvendo tempestade em ambiente *offshore* com marés, sugerindo a presença de uma bacia mais ampla; (3) dados estratigráficos discordam da possível associação paleoambiental entre as rochas do Grupo Grão Pará e da Formação Águas Claras.

A feição hoje exposta pode se tratar de restos dessa bacia maior preservada por subsidência em regime de transtensão dextral, dentro da estrutura atualmente exposta (Pinheiro, 1997; Pinheiro e Nogueira, 2003).

De acordo com Macambira (2003) a evolução e preenchimento do *rift* que abrigou o Grupo Grão Pará, se deu em quatro estágios consecutivos: (1) inicialmente (2.76 Ga, U-Pb em zircão) houve rifteamento intracontinental, com vulcanismo basáltico toleítico, envolvendo processos de contaminação crustal. As rochas formaram pacotes com aproximadamente 4 a 6 km de espessura, em toda a região; (2) a seguir, as *formações ferríferas bandadas* (BIFs) se depositaram sobre uma plataforma continental marinha ampla, calma, influenciada pela ressurgência de águas ricas em Fe e Si, em evento que teria durado cerca de 10 Ma; (3) um segundo episódio vulcânico importante seria acompanhado de derrames basálticos, tendo idade em torno de 2.74 Ga (U-Pb em zircão), recobrando as rochas ferríferas; novos locais de deposição receberam novos pacotes de BIFs e sedimentos clásticos; e (4) preenchimento da bacia marcado por sedimentação clástica fina e pelítica associada com carbonatos manganésíferos.

A partir das informações sintetizadas acima, pode-se observar que existem argumentos razoáveis para se aceitar a possibilidade de uma bacia do tipo intracratônica, para o ambiente tectônico das rochas do Grupo Grão Pará. A proposta de gênese do minério, ou rocha ferrífera, para a região, proposta por Macambira (2003) deve ser respaldada, entendendo-se a bacia como mais ampla, pelo menos bem maior que a área atualmente exposta.

Após a condição de extensão, onde se depositaram as rochas na “Bacia Grão Pará”, houve subsidência da estrutura de Carajás, atualmente conhecida. Como resposta mecânica a esse afundamento, surgiu a Falha Carajás, nucleada nos momentos finais do processo de extensão crustal que governou a subsidência da estrutura sigmoidal de Carajás, funcionando como estrutura de transferência (Lima, 2002). Essa estrutura teria se formado sob cinemática destal, conforme se pode deduzir a partir da inflexão dos *splays* de terminação dessa falha (Pinheiro, 1997; Lima 2002).

Um processo de convergência tectônica regional afetou posteriormente a estrutura sigmoidal de Carajás, com encurtamento proveniente de NE, para SW, provocando reativação sinistral compressiva da Falha Carajás. Essa

convergência seria responsável pela deformação do bloco onde se encontra a Serra Norte, e deve ter envolvido processos conjuntos de rotação e translação.

Desta forma, a progressão da convergência tectônica teria dobrado as rochas do Grupo Grão Pará, provocando a nucleação dos *splays* que se projetam a partir do centro da falha e que cortam os platôs de rochas vulcânicas e ferríferas. No interior dos blocos individualizados pelos traços do *splay* ocorreria compressão com direção aproximadamente perpendicular aos traços de falha, dobrando as rochas.

As dobras são as primeiras estruturas formadas no processo deformacional por transpressão sinistral dúctil a dúctil-rúptil. Elas mostram eixos caindo para NW com mergulhos suaves de 20° e planos axiais principais com direção NE e SW. A transpressão sinistral teria sido dominada por componentes de cisalhamento puro com eixo de encurtamento posicionado na direção NE-SW.

Zonas de cisalhamento com direção NE-SW e NW-SE se formaram por partição de deformação no final do processo dúctil-rúptil, responsável pelo dobramento das rochas.

Ao sair das condições de regime dúctil-rúptil, as rochas foram expostas à deformação em regime mais raso, sob tectônica rúptil. Sob esse regime se desenvolveram os diferentes conjuntos de fraturas e falhas, com *kink bands* & *chevron folds* subordinados. As observações das orientações espaciais dessas estruturas, não fornecem informações detalhadas sobre suas origens e mesmo posição cronológica relativa. Assim sendo, suas relações de truncamentos e hierarquização temporal não puderam ser vistas pelos métodos investigados. As idades dessas feições podem permear um amplo espectro, indo desde o final do Arqueano (rúptil-dúctil), passando pelo Proterozóico, Paleozóico, chegando ao Mesozóico e mesmo ao Cenozóico.

O nível crustal hoje exposto do bloco deformado de rochas do Grupo Grão Pará onde a mina está localizada, corresponde a um *horst* tectônico destacado na região, com relevo alto, sob forte erosão, sustentado pela capa de ferro que corresponde em grande parte ao minério prospectado.

CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES

A partir dos estudos realizados na área da Serra Norte na região de Carajás, pode-se resumir as seguintes conclusões:

- a) As dobras apresentam razão fractal em estilo parasítico, com pelo menos três ordens de grandeza: centimétricas, métricas e quilométricas. Os flancos das dobras quilométricas são cortados por zonas de deformação em que o acamamento das rochas ferríferas está dobrado com dobras em estilo caixa, por vezes isoclinais. Essas faixas têm largura média de 200 m e seguem o *trend* geral NW-SE.
- b) A concordância dos eixos β nas diferentes escalas das dobras observadas indica dobramento pervasivo de toda a seqüência de rochas do Grupo Grão Pará.
- c) Dobras em *kink* e *chevron* são comuns em escala menor, geralmente deformando os flancos das dobras quilométricas e métricas parasíticas. Essas estruturas estão relacionadas às demais feições rúpteis presente nas rochas, traduzidas a partir dos lineamentos interpretados dos sensores remotos, principalmente como falhas e fraturas.
- d) As dobras observadas nas minas da Serra Norte são respostas à deformação transpressional sinistral reconhecida na região, relacionada à Falha Carajás que gera *splays* divergentes NW-SE, a partir do seu traço principal. A intensidade da deformação aumenta próximo aos traços da Falha Carajás, sendo traduzido pelas zonas de deformação encontradas na área. Esse mesmo quadro geométrico pode ser observado em outras áreas onde essa falha aparece, por exemplo na região do vale do córrego Águas Claras (Nogueira, 1995; Pinheiro, 1997; Pinheiro & Holdsworth, 2000)

- e) Zonas de deformação, onde as dobras se concentram e/ou mostram padrões de máximo encurtamento, relacionam-se a episódios tardios de deformação dessas rochas. O encurtamento governado por deformação transpressiva sinistral, inicialmente trasladou o bloco de E para W e rotacionou com dobramento o pacote rochoso. Essa situação progrediu, para dobramentos holomórficos quilométricos, do tipo reclinado, com estruturas com vergências regionais de NE para SW e de SW para NE, devido a partição geométrica e cinemática da deformação. As zonas de deformação dúcteis-rúpteis tardias NE-SW e NW-SE, observadas na mina, se formaram por processo de *strain softening* cortando as dobras reclinadas e aumentando o encurtamento das estruturas.
- f) A ausência de dobras nas rochas vulcânicas deve-se ao fato da notável homogeneidade dessa litologia, não apresentando marcadores de deformação seguros que registrem alterações das formas original das rochas. Em resposta ao encurtamento NE-SW a deformação desenvolveu uma fraca clivagem ou foliação localizada nessas rochas.
- g) Há dois tipos de contato entre as rochas vulcânicas e ferríferas no interior das minas: (1) contatos normais, que representam os contatos primários da deposição das rochas do Grupo Grão Pará; e (2) contatos por falha tardios que se estabeleceram durante a deformação.
- h) A distribuição de diferentes tipos de minério nas minas pode ter relação com deslocamentos oblíquos associados às zonas de deformação. Apesar de envolver deslocamento da ordem de dezenas de metros, cabe ressaltar que a combinação conjugada de várias dessas zonas pode expor em superfície, pacotes de diferentes fácies (profundidades) da seqüência deposicional.
- i) A ordem de grandeza dos rejeitos das falhas e o sentido da cinemática dos falhamentos não foram determinados. A ausência de marcadores estratigráficos e de elementos indicadores cinemáticos, não permitiu obter

tal informação. Essa questão permanece em aberto para ser estudada em trabalhos futuros.

- j) Situações em que os flancos de dobras desenhadas pelo acamamento do minério de ferro têm mergulhos na mesma direção em que a cava da mina se aprofunda, ou seja, paralela à direção dos cortes de bancadas, podem provocar quebra de estabilidade de taludes causando ruptura de bancadas nas cavas de mina (Fig 6.1).

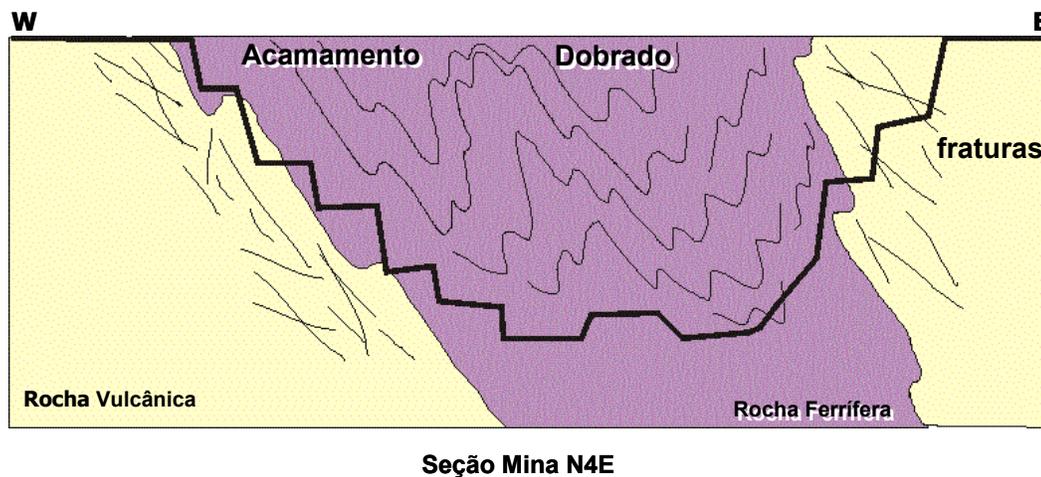


Figura 6.1 – perfil esquemático explicando o arcaço dobrado e a falta de estabilidade na porção oeste da mina N4E pelo modo como a mina vem sendo rebaixada.

- k) Para evitar o desmoronamento de bancadas, os cortes de cava de mina não devem ser feitos paralelos à direção do acamamento do minério de ferro. Sugere-se que esses cortes sejam executados formando ângulo de 15° a 20° com a direção do acamamento das rochas ferríferas.
- l) Os diferentes tipos de minérios expostos na mina e a qualidade dos mesmos, podem variar bastante ao longo de uma seção transversal à dobra, considerando seus flancos sempre deformados sucessivamente em padrões em S e Z, em função fractal (Fig. 6.2).

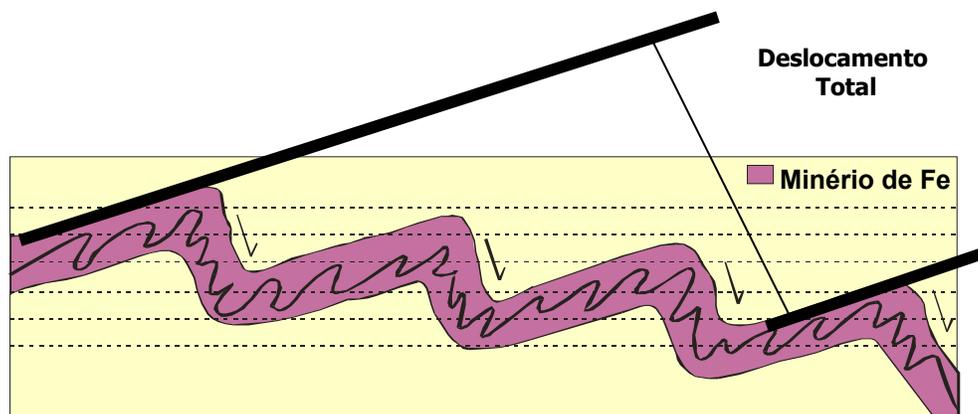


Figura 6.2 – Desenho esquemático do minério de ferro dobrado, mostrando o possível deslocamento total projetado acompanhando um mesmo nível de prospecção da mina.

m) A condição dobrada do pacote de BIF, tendo nos flancos as rochas vulcânicas, em posição reclinada, dificulta claramente o processo de lavra, exigindo a remoção de volumes relativamente grandes de material estéril (rochas vulcânicas da aba sobrejacente) para o avanço do processo de mineração, em profundidade. Adicionalmente, essa posição reclinada traz sempre riscos geotécnicos motivados pelo mergulho alternado suave e empinado dos flancos das dobras menores, conforme mencionado anteriormente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F.F.M. de; HASUI, Y.; NEVES, B.B. de B.; FUCK, R.A. 1981. Brazilian Structural Provinces: an introduction. *Earth-Sciences Reviews*. 17: 1-29.
- ALTHOFF, F.J. 1996. *Etude pétrologique et structurale de granitoids de Marajoara (Pará, Brésil): enu role dans l'évolution archeénne du craton amazonian (2.7 – 3.2 Ga)*. Nancy, França. Université Henri Poincaré. 296 p. (Tese de Doutorado).
- ALTHOFF, F.J.; BARBEY, P.; BOULLIER, A.M. 2000. 2.8 – 3.0 Ga plutonism and deformation in the SE Amazonian craton: the Archean granitoids of Marajoara (Carajás Mineral Province, Brazil). *Precambrian Research*. 104: 187–206.
- ALVARENGA, C. J. S.; MOURA, C. A. V.; GORAYEB, P. S. S.; ABREU, F. A. M. 2000. Paraguay and Araguaia Belts. In: CORDANI, U. G.; MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D. A.(eds). *Tectonic Evolution of South America*. p. 183-191.
- AMEEN, M.S., 1995. *Fractography: fracture topography as a tool in fracture mechanics and stress analysis*. Londres. p.240. (Geological Society Special Publication, 92)
- ANDERSON, W.L.; DYER, R.C.; TORRES, D.D., 1974. Ocorrências de manganês na bacia do Rio Itacaiunas, centro-leste do estado do Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28. Porto Alegre. *Anais...v. 6*, p. 149-164.
- ARAÚJO, O.J.B. de & MAIA, R.G.N., 1991. *Projeto especial mapas de recursos minerais, de solos e de vegetação para a área do Projeto Grande Carajás; sub-projeto Recursos Minerais; Folha SB.22-Z-A Serra dos Carajás - Estado do Pará, DNPM/CPRM; Brasília, 136pp.*
- ARAÚJO, O.J.B. de; MAIA, R.G.N.; JORGE JOÃO, X. da S; COSTA, J.B.S. 1988. A megaestruturação arqueana da Folha Serra dos Carajás. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE GEOLOGIA, 7. Belém. *Anais... SBG-NO, v.1*, p. 324-338.

- AVELAR, V.G.; LAFON, J.M.; CORREIA, Jr. F.C.; MACAMBIRA, E.M.B., 1999. O magmatismo arqueano da região de Tucumã, Província Mineral de Carajás, Amazônia Oriental, Brasil: novos dados geocronológicos. *Revista Brasileira de Geociências*, 29:453-460.
- BARROS, C. E. M.; MACAMBIRA, M.J.B.; BARBEY, P. 2001. Idade do zircão do Complexo Granítico Estrela: relações entre magmatismo, deformação e metamorfismo na Província Mineral de Carajás. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 7., Belém, SBG-NO, CD-ROM.
- BEISIEGEL, V. de R., 1982. Distrito Ferrífero da Serra dos Carajás. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 1. Belém, 21 – 46.
- BEISIEGEL, V. DE R.; BERNADELLI, A.L.; DRUMMOND, N.F.; RUFF, A.W.; TREMAINE, J.W., 1973. Geologia e recursos minerais da Serra dos Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*, 3:215-242.
- BORGES, N.R.A.; VIVEIROS, J.F.M.; MOREIRA, J.M.P.; GUIMARÃES. I.G., 1979. Contribuições à geologia da região de Guanhães. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 1. Diamantina. *Atas...* p.101-123.
- CORDANI, U.G. & NEVES, B.B.de B. 1982. Geologic evolution of South America during the Archean and Early Proterozoic. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, 12 (1-3): 78-88.
- COSTA, J.B.S. & HASUI, Y., 1992. Aspectos tectônicos fundamentais do Proterozóico Médio na Amazônia brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*, 22 (4), 487-492.
- COSTA, J.B.S.; ARAÚJO, O.J.B. de; JORGE JOÃO, X. da S.; MAIA, R.G.N.N.; MACAMBIRA, M.J.B.; VALE, A.G.; SANTOS, A. dos; PENA FILHO, J.I. de C. e NEVES, A.P. 1994. Panorama tectono-estrutural da região sudeste do Estado do Pará. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 6. Belém. *Boletim de Resumos Expandidos*. p.314 – 317.

- COSTA, J.B.S.; ARAÚJO, O.J.B.; SANTOS, A. dos; JORGE JOÃO, X.S.; MACAMBIRA, M.J.B.; LAFON, J.M. 1995. A Província Mineral de Carajás: Aspectos tectono-estruturais, estratigráficos e geocronológicos. *Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi, série Ciências da Terra*, 7, 199 – 235.
- COSTA, J.B.S.; MACAMBIRA, M.J.B.; VALE, A.G.; ARAÚJO, O.J.B.; PINHEIRO, R.V.L.; JOÃO, X.S.J. 1993. Geologia estrutural da folha São Félix do Xingu, Serra dos Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*, 23, 315-332.
- COSTA, J.B.S.; PINHEIRO, R.V.L.; JORGE JOÃO, X. da S.; ARAÚJO, O.J.B. de, 1991. Esboço estrutural do Proterozóico Médio da Amazônia Oriental. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências da Terra*, 3: 9-24.
- CVRD-CMM, 1972. Distrito Ferrífero da Serra dos Carajás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26. Belém. *Resumo das Comunicações*, v. 2. p.78-80.
- DALL'AGNOL, R.; SCHUCKMANN, W.K.; BASEI, M.A.S.; SCHELLER, T., 1984. Novos dados geocronológicos e estudos de elementos traços de maciços graníticos anorogênicos da Amazônia Oriental, Estado do Pará (Brasil). In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 2, Manaus. *Anais...MME-DNPM*, p. 59-74.
- DALL'AGNOL, R.; VIEIRA, E.A. de P.; SÁ, C.E.S.; MEDEIROS, H. de; GASTAL, M. do C.P.; TEIXEIRA, N.P. 1986. Estado atual do conhecimento sobre as rochas granitóides da porção sul da Amazônia Oriental. *Revista Brasileira de Geociências*. 16 (1). 11-23.
- DALL'AGNOL, R.; SOUZA, Z.S.; ALTHOFF, F.J.; MACAMBIRA, M.J.B.; LEITE, A.A.S. 1996. Geology and geochemistry of the Archean Rio Maria Granite-Greenstone Terrain, Carajás Province, Amazonian Craton. In: SYMP. ARCHEAN TERR. SOUTH AMER. PLATAFORM. Brasília, 1996, *Extended abstracts*. Brasília, SBG. p. 29-30.
- DIAS, G.S.; MACAMBIRA, M.J.B.; DALL'AGNOL, R.; SOARES, A.D.V.; BARROS, C.E. DE, 1996. Datação de zircões de sill de metagabro: comprovação da idade arqueana da Formação Águas Claras, Carajás - Pará. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 5. Belém. *Boletim de Resumos Expandidos...* SBG-NO, p.376-379.
- DOCEGEO, 1988. Revisão Litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35. Belém. *Anais...* p.10-54.

- DORR, J.V.N. II, 1973. Iron formation in South America. *Economic Geology*, 68, 1005-1022.
- GALARZA TORO, M.A., 2002. *Geocronologia e geoquímica isotópica dos depósitos de Cu-Au Igarapé Bahia e Gameleira, Província Mineral de Carajás (PA), Brasil*. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 214p. (Tese de doutorado).
- GIBBS, A.K., & WIRTH, K.R., 1990. Geologic setting of the Serra dos Carajás iron deposits, Brazil. In: CHAUVEL, J.J.; YUQI, C.; EI SHAZLY, E.M.; GROSS, G.A.; LAAJOKI, K.; MARKOV, M.S.; RAI, K.L.; STUCLCHIKOV, V.A.; AUGUSTITHIS, S.S. *Ancient Banded Iron Formation, Regional Presentations*. Greece, Theophrastus Publication, 342pp.
- GIBBS, A.K.; WIRTH, K.R.; HIRATA, W.K.; OLSZEWSKI Jr., W.J., 1986. Idade e composição das rochas vulcânicas do Grupo Grão Pará, Serra dos Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*, 16(2), 201-211.
- GOODWIN, L.B. & WILLIAMS, P.F., 1996. Deformation path partitioning within a transpressive shear zone, Marble Cove, Newfoundland. *Journal of Structural Geology*, 18(8), 975-990.
- GOUVÊA, J.L., 1990, *Técnicas de sensoriamento remoto aplicadas em pesquisas geológicas na Amazônia (Região de Carajás)*. Belém, Universidade Federal do Pará, Curso de Pós-Graduação em Geociências, 93pp. (Dissertação de Mestrado)
- HASUI, Y.; HARALYI, N.L.E.; COSTA, J.B.S., 1992. Megaestruturação Pré-Cambriana do território brasileiro baseada em dados geofísicos e geológicos. *Revista Brasileira de Geociências*, 07-13.
- HASUI, Y.; HARALYI, N.L.E.; SCHOBENHAUS, C., 1984. Elementos geofísicos e geológicos da região amazônica: subsídios para o modelo geotectônico. In SIMPOSIUM AMAZÔNICO, 2, Manaus. *Actas...* SBG-NO, p. 129-145.
- HATCHER, R.D.Jr. 1995. *Structural geology: principles, concept, and problems*. 2^a ed. Nova Jérsei, Prentice-Hall. 525 p.

- HOBBS, B.E.; MEANS, W.D.; WILLIAMS, P.F. 1976. *An outline of structural geology*. Nova Yorque, John Wiley & Sons. 571 p.
- HOLDSWORTH, R.E.; HAND, M.; MILLER, J.A.; BUICK, I.S. 2001. Continental reactivation and reworking: an introduction. In: MILLER J.A.; HOLDSWORTH, R.E.; BUICK, I.S; HAND M. (eds). *Continental reactivation and reworking*. Londres, Geological Society. V.184, p.1-12.
- HOPPE, A.; SCHOBENHAUS, C.; WALDE, D.H.G., 1987. Precambrian Iron Formation in Brazil. In: APPEL, P.W.W. & LABERGE, G. (Ed.). *Precambrian Iron Formation*. Greece, Theophrastus Publication. p.347-390.
- HUHN, S.R.B.; MACAMBIRA, M.J.B.; DALL'AGNOL, R., 1999. Geologia e geocronologia Pb-Pb do granito alcalino arqueano Planalto, região da Serra do Rabo, Carajás, PA. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 5, Manaus. *Boletim de Resumos Expandidos*, SBG, p. 463-466.
- KRYMSKY, R.Sh., MACAMBIRA, J.B., MACAMBIRA, M.B.J., 2002. Geocronologia U-Pb em zircão de rochas vulcânicas da Formação Carajás, Estado do Pará. In: SIMPÓSIO SOBRE VULCANISMO E AMBIENTES ASSOCIADOS, 2, Belém, *Anais...*, SBG-NO. p.41.
- LADEIRA, E.A. & CORDEIRO, J.R.C.A., 1988. Jazida N4E: Reavaliação dos corpos de hematita dura e jaspelitos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 25, Belém, *Anais...*, p. 655-691.
- LAFON, J.M.; MACAMBIRA, M.J.B.; SCHELLER, T.; GARCIA, R., 1988. *Relatório sobre o estudo geocronológico Rb-Sr do maciço granítico da Serra da Seringa e dos granulitos da Serra do Pium (PA)*. Convênio CPRM-Belém/FADESP. (Relatório não publicado).
- LEYSHON, P.R & LISLE, R.J. 1996. *Stereographic Projection Techniques in Structural Geology*. Oxford, Butterworth-Heinemann. 104 p.
- LIMA, F.D. 2002. *Evolução tectônica da terminação leste da Falha Carajás, sul do Estado do Pará*. Belém. Universidade Federal do Pará. Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, 96p. (Dissertação de Mestrado).

- LINDENMAYER, Z.G., 1990. *Salobo Sequence, Carajás, Brazil: geology, geochemistry and metamorphism*. Canadá. University of Western Ontário. 407p. (Tese de Doutorado).
- LINDENMAYER, Z.G. & FYFE, W.S., 1992. Comparação preliminar entre os metabasaltos dos grupos Parauapebas e Salobo da Bacia de Carajás, Estado do Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37. São Paulo. *Boletim de Resumos Expandidos*, v.2, p.33-34.
- MACAMBIRA, J.B., 2003. *O ambiente deposicional da Formação Carajás e uma proposta de modelo evolutivo para a Bacia Grão-Pará*. Campinas. Universidade Estadual de Campinas. 217p. (Tese de Doutorado).
- MACAMBIRA, M.J.B., 1992. *Chronologie U-Pb, Rb-Sr, K-Ar et croissance de la croûte continentale dans l'Amazonie du sud-est: exemple de la région de Rio Maria, Province de Carajás, Brésil*. França. Université de Montpellier II. (Tese de Doutorado).
- MACHADO, W.; LINDENMAYER, Z.; KROGH, T.E.; LINDENMAYER, D., 1991. U-Pb geochronology of Archaean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon shield, Brazil. *Precambrian Research*, 49: 329-354.
- MARÇAL, M. dos S., 1991. *Aspectos lito-estruturais das minas de Ferro N4E e Manganês do Azul, Serra dos Carajás (PA)*. Belém. Universidade Federal do Pará, Curso de Pós-Graduação em Geociências, 135p. (Dissertação de Mestrado).
- MARÇAL, M. dos S.; COSTA, J.B.S.; HASUI, Y.; ERBERT, H.D., 1992. A estruturação da Serra Norte, com ênfase na área da Mina N4E, Serra dos Carajás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37. São Paulo. *Boletim de Resumos Expandidos*, v.2, p.330-331.
- MEIRELES, E de M.; HIRATA, W.K.; AMARAL, A.F. do; MEDEIROS FILHO, C.A.; GATO, W. da C., 1984. Geologia das Folhas Carajás e Rio Verde, Província Mineral dos Carajás. Estado do Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31. Rio de Janeiro. *Anais... SBG*, v.5, p.2164-2174.

- NOGUEIRA, A.C.R., 1995. *Análise faciológica e aspectos estruturais da Formação Águas Claras, região central da Serra dos Carajás – PA*. Belém. Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências. 167p. (Dissertação de Mestrado).
- NOGUEIRA, A.C.R.; TRUCKENBRODT, W; PINHEIRO, R.V.L., 1995. Formação Águas Claras, Pré-Cambriano da Serra dos Carajás. Redescrição e redefinição. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências da Terra*, 7: 177-197.
- OLIVEIRA, J.K.M. de, 2002. *Caracterização estrutural da borda sudeste do Sistema Transcorrente Carajás com ênfase nas rochas do Terreno Granítico-Gnáissico*. Belém. Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências. 138p. (Dissertação de Mestrado).
- PARK, R.G. 1989. *Foundations of structural geology*. 2ª ed. Nova Iorque, Blackie & Son. 149 p.
- PASSCHIER, C.W. & TROUW, R.A.J., 1996. *Microtectonics*, Berlim. Springer-Verlag. 298p.
- PASSCHIER, C.W.; MYERS, L.S.; KRONER, A. 1990. *Field geology of high-grade gneiss terrains*. Berlin, Springer-Verlag. 150 p.
- PINHEIRO, R.V.L., 1997. *Reactivation history of the Carajás and Cinzento Strike-Slip Systems, Amazon, Brazil*. Durham. University of Durham. 408p. (Tese de Doutorado).
- PINHEIRO, R.V.L. & HOLDSWORTH, R.E., 1997a. Reactivation of Archaean strike-slip fault systems, Amazon region, Brazil. *Journal of the Geological Society*, London, 154, 99-103.
- PINHEIRO, R.V.L. & HOLDSWORTH, R.E., 1997b. The structure of the Carajás N-4 ironstone deposit and associated rocks: relationship to Archaean strike-slip tectonics and basement reactivation in the Amazon region, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 10 (3), no prelo.
- PINHEIRO, R.V.L. & HOLDSWORTH, R.E. 2000. Evolução tectonoestratigráfica dos sistemas transcorrentes Carajás e Cinzento, Cinturão Itacaiúnas, na borda leste do Cráton Amazônico, Pará. *Revista Brasileira de Geociências*. 30 (4): 597–606.

- PINHEIRO, R.V.L. & NOGUEIRA, A.C.R., 2003. Carajás: bacia transtensiva invertida em flor positiva ou segmento de bacia extensional localmente invertida por transpressão?. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 8, Manaus. *Resumos expandidos*. CD ROM.
- RÊGO, L.F. de M., 1933. Notas geográficas e geológicas sobre o Rio Tocantins. *Boletim do Museu Emílio Goeldi da História Natural e Etnografia*, Belém, 9: 272–288.
- RODRIGUES, E.S.; LAFON, J.M.; SCHELLER, T. 1992. Geocronologia Pb-Pb da Província Mineral de Carajás: primeiros resultados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37, São Paulo. *Boletim de Resumos Expandidos...SBG*, v.2, p.183-184.
- SANDERSON, D.J. & MARCHINI, W.R.D., 1984. Transpression. *Journal of Structural Geology*, 6(5), 444-458.
- SIAL, A.N., OLIVEIRA, E.P.; CHOUDHURI, A., 1987. *Mafic Dykes Swarms of Brazil*. Geological Association of Canada, p.467-481. (Special Paper, 34).
- SILVA, G.G.; LIMA, M.J.C.; ANDRADE, A.R.F.; ISSLER, R.S.; GUIMARÃES, G., 1974. Geologia das Folhas SB-22 Araguaia e parte SC-22 Tocantins. In: PROJETO RADAM BRASIL. *Geologia, geomorfologia, solos e uso potencial da terra*. Rio de Janeiro, 143p. (Levantamento de Recursos Naturais, 4)
- SNOKE, W.A.; TULLIS, J.; TODD, V.R., 1998. *Fault-related Rocks – A Photographic Atlas*. New Jersey, USA. Princeton University Press. 615p.
- SOUZA, S.R.B.; MACAMBIRA, M.J.B.; SCHELLER, T., 1996. Novos dados geocronológicos para os granitos deformados do rio Itacaiúnas (Serra dos Carajás, Pará): implicações estratigráficas. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 5, Belém. *Boletim de Resumos Expandidos...*, SBG, p. 380-383.
- SUSZCZYNSKI, E., 1972. A origem vulcânica do minério de ferro primário da Serra dos Carajás – Estado do Pará – Região Amazônica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26, Belém. *Anais...* v.1, p.103–120.

- TEIXEIRA, J.B.G., OHMOTO H., EGGLEER D.H., 1997. Elemental and oxygen isotope variations in Achaean mafic rocks associated with the banded iron-formation at the N4 iron deposit, Carajás, Brazil. In: COSTA, M.L. & ANGÉLICA, R.S. (eds) *Contribuições à Geologia da Amazônia*. p.161-203.
- TEIXEIRA, W., 1990. The Proterozoic mafic dyke swarms and alkaline intrusions in the Amazonian Craton, South America, and their tectonic evolution based on Rb-Sr, K-Ar and ⁴⁰Ar-³⁹Ar geochronology. In: PARKER, RICKWOOD AND TUCKER (eds) *Mafic Dyques and Emplacement Mechanisms*. Balkema, Rotterdam, p.285-293.
- TEYSSIER, C., TIKOFF, B.; MARKLEY, M., 1995. Oblique plate motion and continental tectonics. *Geology*, 23(5): 447-450.
- TOLBERT, G.E.; TREMAINE, J.W.; MELCHER, G.C.; GOMES, C.B., 1971. The recently discovered Serra dos Carajás Iron Deposits, Northern Brazil. *Economic Geology and The Bulletin of the Society of Economic Geology*, 66 (7): 985-994.
- TWISS, R.J. & MOORES, E.M. 1992. *Structural Geology*. New York, Freeman & Company, 532p.
- TYKOFF, B. & TEYSSIER, C., 1994. Strain modeling of displacement-field partitioning in transpressional orogens. *Journal of Structural Geology*, 16(11): 1575-1588.
- VENESIANI, P. & ANJOS, C. E. dos, 1982. *Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicação em geologia*. INPE-2227-MD/014, São José dos Campos-SP, p.14.
- VILLAS, R.N.N & SANTOS, M.D., 2001. Gold deposits of Carajás Mineral Province: deposits types and metallogenesis. *Mineralium Deposita*. 36: 300–331.
- WIRTH, K.R.; GIBBS, A.K.; OLSZEWSKI Jr., 1986. U-Pb ages of zircons from the Grão Pará Group and Serra dos Carajás Granite, Pará, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 16(2): 195-200.