

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**ANÁLISE DE PALEOTENSÕES DE ESTRUTURAS RÚPTEIS EM
SUCESSÕES DO GRUPO SANTA BÁRBARA (EDIACARANO, BACIA
DO CAMAQUÃ) NA MINA URUGUAI, MINAS CAMAQUÃ (RS).**

Maurício Guerreiro Martinho dos Santos

Orientador: Prof. Dr. Renato Paes de Almeida
Co-Orientador: Prof. Dr. Antonio Romalino Santos Fragoso Cesar

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF – 2007/29)**

TF
S237
MGM.a

SÃO PAULO
2007



ANÁLISE DE PALEOTENSÕES DE ESTRUTURAS RÚPTEIS EM SUCESSÕES DO
GRUPO SANTA BÁRBARA (EDIACARANO, BACIA DO CAMAQUÃ) NA MINA
URUGUAI, MINAS DO CAMAQUÃ (RS).

Maurício Guerreiro Martinho dos Santos

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Mauricio Guerreiro Martinho dos Santos".

DEDALUS - Acervo - IGC



30900024410

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Renato Paes de Almeida".

Orientador: Dr. Renato Paes de Almeida

Co-orientador: Dr. Antonio Romalino Santos Fragoso Cesar

ERRATA
TF -2007-29

Página 35, Prancha 9: a figura do canto esquerdo superior é a figura A. A do canto superior direito, figura B. Figura inferior, C.

Página 36, Prancha 10: a figura superior é a figura A. A inferior, B.

Página 51, Prancha 17: A figura superior é a figura B, referente aos dados de estruturas mineralizadas. A inferior, A, referente aos dados da Zona Uruguai.

ÍNDICE

	página
1. Resumo	3
2. Abstract	4
3. Introdução	5
4. Metas e Objetivos	9
5. Trabalhos prévios	10
6. Materiais e métodos	13
7. Desenvolvimento do trabalho	19
8. Resultados obtidos	19
9. Interpretação e discussão dos resultados	52
10. Conclusões	55
Referências bibliográficas	58

Resumo:

As estruturas encontradas na Mina Uruguai, município de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul foram analisadas através de métodos gráficos e softwares de geologia estrutural para a determinação das orientações de esforços em diferentes eventos, obtendo-se os paleocampos de tensões envolvidos. A reconstituição desses paleocampos foi integrada a determinações da cronologia relativa dos eventos através de análise estratigráfica e relações de corte entre estrias. Levantamentos estratigráficos e análises de fácies sedimentares levaram à caracterização de associações de fácies na área investigada e à interpretação de seus ambientes deposicionais. Os dados de campo foram plotados em plataforma de sistema de informações geográficas para correlação e separação de dados segundo critérios espaciais e para confrontação com dados regionais obtidos através de dados de sensoriamento remoto.

As estruturas mineralizadas em sulfetos foram relacionadas à compressão WNW a NW, em direções paralelas ao esforço horizontal máximo obtido para o evento de deformação principal, configurando um contexto de mineralização em sistema transcorrente, relacionado à abertura de fraturas paralelas à direção de esforço máximo, assemelhando-se a estruturas do tipo T. Foram reconhecidos três eventos deformacionais. Suas idades relativas determinadas por relações de corte entre estrias, que levaram ao estabelecimento de um quadro cronológico dos eventos tectônicos responsáveis pela história de deformação da região: uma compressão NW (Eocambriano), uma compressão NE (Triássico) e uma distensão NE (Cretáceo).

Abstract

The brittle structures found in the Uruguai Mine, Caçapava do Sul municipality, Rio Grande do Sul State, Southern Brazil, were analyzed through graphical methods and structural geology softwares in order to determine the stress orientation fields involved in different events. The reconstruction of these fields was integrated to the relative chronology of the events by means of stratigraphical analysis and cross-cutting relations between striae. Stratigraphical columns and sedimentary facies analysis lead to the characterization of facies associations in the investigated area and to the interpretation of the sedimentary environment.

Field data were plotted on geographical information system for correlation and sorting by means of spacial criteria. Association with regional data was obtained through remote sensing analysis and imagery processing. The sulfide-mineralized structures were correlated to a WNW to NW compression, developed on directions parallel to the maximum horizontal stress field, in a context of strike-slip mineralization related to the opening of fractures, in a T-fracture-like style. Three deformational events were recognized. Their relative ages were determined by striae cross-cutting relations, leading to the establishment of a chronology for the tectonic events that affected the region: a NW compression (Eocambrian), a NE compression (Triassic) and a NE extension (Cretaceous).

1. Introdução

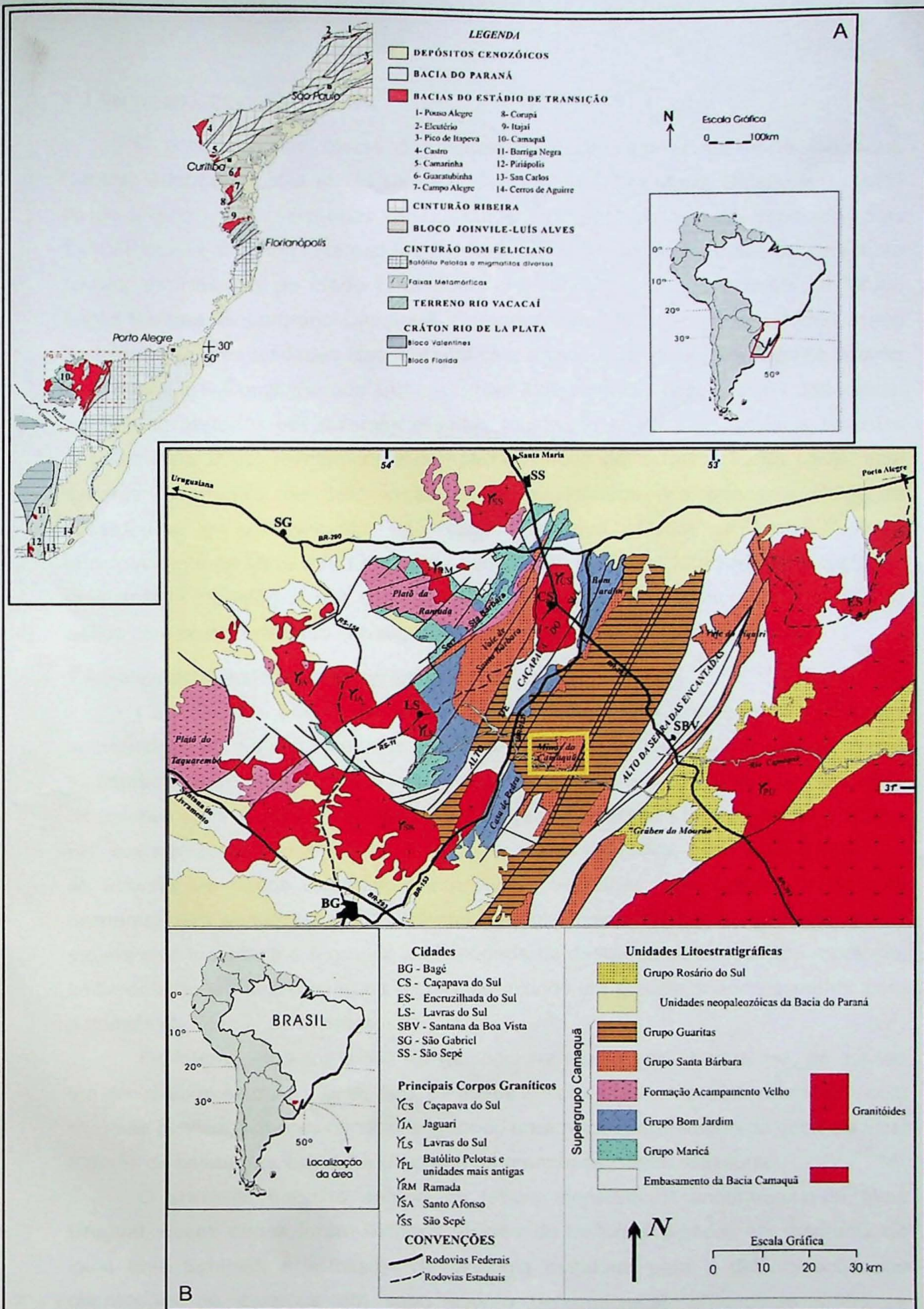
Situada no município de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul, Região Sul do Brasil, as Minas do Camaquã foram alvo das primeiras explorações de cobre no Brasil, tendo suas ocorrências cupríferas documentadas já no Século XIX por Gorceix (1875). A exploração ocorreu em ciclos alternados de intensa atividade com períodos de inatividade. Inúmeras pesquisas e explorações minerais foram desenvolvidas na região em função das ocorrências de chumbo, zinco, prata e ouro, além do próprio cobre, presentes nas rochas do Grupo Santa Bárbara. Atualmente encontra-se desativada, porém é alvo de diversas pesquisas por parte de empresas mineradoras. Pertence no momento à Companhia Brasileira de Cobre, C.B.C., que encerrou suas atividades de mineração em 1996.

1.1 Contexto Geotectônico

A Bacia Sedimentar do Camaquã, região centro-sul do Rio Grande do Sul, está relacionada às etapas de estabilização do Gondwana, no que Almeida (1969) definiu como Bacias do Estádio de Transição (prancha 1A). Suas rochas sedimentares siliciclásticas de idade Neoproterozóica a Eopaleozóica foram consideradas como depósitos molássicos da Orogenia Brasileira (Fragoso-Cesar *et al.* 1985 e Fragoso-Cesar 1991), posteriormente interpretadas como bacias transcorrentes de fases tardias do evento colisional (Oliveira & Fernandes 1991, 1992, Machado & Sayeg 1992) e finalmente como bacias distensionais tipo *rift* sem vínculo com a orogênese (Fragoso-Cesar *et al.* 2000a, 2000b e 2001 e Almeida 2005).

1.2 Estratigrafia

A estratigrafia da Bacia é composta pelo Supergrupo Camaquã (Ediacarano-Eocambriano), que abrange os Grupos Maricá e Bom Jardim, a Formação Acampamento Velho, os Grupos Santa Bárbara e Guaritas, além da suíte intrusiva sub-vulcânica Rodeio Velho, totalizando mais de 10.000 metros de espessura. Suas ocorrências são controladas por falhas de direção NNE, sendo subdividida em três sub-bacias separadas pelos altos de Caçapava do Sul e da Serra das Encantadas: as sub-bacias Camaquã Ocidental, Central e Oriental (prancha 1B). Segundo Almeida (2005), o Grupo Santa Bárbara aflora nas três sub-bacias, com ocorrências contínuas nas sub-bacias Camaquã Ocidental e Oriental, e em janelas estruturais sob o Grupo Guaritas na Sub-Bacia Camaquã Central. Na Sub-Bacia Camaquã Central, onde se encontra a ocorrência ora estudada, aparecem depósitos conglomeráticos de leques aluviais e deltaicos, arenitos e conglomerados fluviais de rios entrelaçados e arenitos e ritmitos de sistemas fluviais efêmeros distais e de sistemas lacustres.



Prancha 1: A) Esboço geológico da porção sul da Província Mantiqueira, mostrando a distribuição das bacias do Estádio de Transição (Ediacarano a Cambriano). Modificado de Almeida 2005; B) Mapa Geológico do Supergrupo Camaquã e áreas adjacentes. Almeida (2005) A região das Minas do Camaquã aparece destacada pelo retângulo amarelo.

1.3 Minas do Camaquã

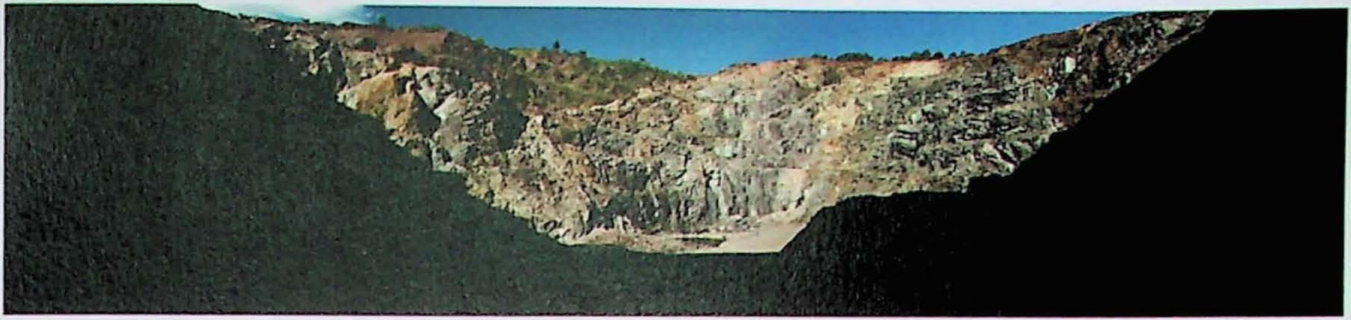
O complexo das Minas do Camaquã, localizado na sub-bacia Camaquã Central, é formado pelas minas Uruguai, São Luís e Santa Maria. Bettencourt (1972) divide a Mina Uruguai em duas zonas: Piritas e Uruguai (prancha 2), separadas pela Falha Piritas. Esta mina teve sua lavra desenvolvida em cava a céu aberto. Apresenta rochas siliciclásticas de idade Ediacarana (Fambrini, 2003) pertencentes ao Grupo Santa Bárbara, Supergrupo Camaquã. Compreendem, de acordo com o termo usado na mineração, três unidades litoestratigráficas, a saber: Conglomerado Inferior, Arenito Intermediário e Conglomerado Superior. São intensamente basculados e fraturados, tendo sido afetados por diversos eventos tectônicos regionais. Trabalhos recentes (e.g. Almeida 2005) revelam uma complexa história de deformação da bacia, com eventos recorrentes de deformação rúptil relacionados aos principais ciclos de subsidência e soerguimento da Bacia Camaquã. Dados anteriores obtidos principalmente na Mina São Luís (Silva-Filho 1997, Fambrini 1998) não apresentaram uma análise cronológica dos eventos, por não haver um arcabouço pré-existente de dados com posicionamento estratigráfico para as demais unidades da bacia.

1.4 Relevância deste trabalho no contexto regional

Os trabalhos envolvidos na realização deste projeto representam uma boa oportunidade para o aluno ser instruído na análise estrutural de bacias sedimentares e no estabelecimento de relações cronológicas de eventos tectônicos através da análise de paleotensões. A área escolhida para o projeto é ideal para tal tipo de estudo, uma vez que apresenta afloramentos contínuos e pouco alterados, permitindo a aquisição de abundantes dados cinemáticos em planos de falhas com estrias. A Bacia do Camaquã vem sendo estudada sistematicamente desde 1995 pelo grupo no qual o projeto está vinculado e é grande a quantidade de dados de tectônica, geocronologia, sedimentação e magmatismo na região, permitindo um grande suporte científico para a correta correlação de eventos.

Os interesses e trabalhos de geologia na região são abundantes, permitindo um rico diálogo científico. E, de fato, os dados encontrados em campo conflitaram com algumas publicações encontradas, sugerindo uma nova interpretação da geologia local através de novas técnicas de aquisição e tratamento de dados estruturais.

O presente trabalho analisa as falhas mensuráveis encontradas na Mina Uruguai. Esses dados foram tratados através de métodos gráficos em diagrama de igual área Schimidt e softwares de geologia estrutural para a determinação das orientações de esforços em cada evento deformacional, obtendo-se então os paleocampos de tensões envolvidos. A reconstituição desses paleocampos foi



A



B



C

Prancha 2, Minas do Camaquã: A) Zona Piritas; B) Zona Uruguai; C) Exemplo de mineralização no local: veio de calcopirita em brecha tectônica.

integrada a determinações da cronologia relativa dos eventos, realizadas através de análise estratigráfica e relações de corte entre estrias. Dessa forma, obtivemos um quadro cronológico dos eventos tectônicos responsáveis pela história de deformação da região. Os dados de campo foram plotados em plataforma de Sistema de Informações Geográficas (SIG) para correlação e separação de dados segundo critérios espaciais e para confrontação com dados de lineamentos regionais obtidos através da análise via sensoriamento remoto.

A grande quantidade de estruturas expostas na Mina Uruguai permitiu uma análise mais completa das estruturas, interpretadas com base no conhecimento regional já existente. Essa abordagem deve trazer resultados relevantes para a evolução dos conhecimentos sobre os eventos tectônicos formadores e deformadores da Bacia Camaquã e sobre as relações entre tectonismo e a formação dos depósitos de cobre na região.

2. Metas e Objetivos

Este trabalho busca analisar e discriminar cronologicamente os diferentes eventos deformadores da Bacia do Camaquã através da análise de estruturas rúpteis com indicadores cinemáticos por meio de softwares de geologia estrutural. A cronologia dos eventos foi baseada nos diversos estudos realizados na bacia pelo grupo de estudos ao qual o trabalho está vinculado, bem como na relação de corte entre estrias em espelhos de falhas.

O principal objetivo do presente projeto é familiarizar o aluno com as técnicas de aquisição e tratamento de dados de Geologia Estrutural rúptil em sucessões sedimentares e contextualização tectônica regional. Dentro desse contexto, foi dada ênfase à obtenção de dados em planos de falhas com estrias para posterior análise de paleocampos de tensões e interpretação de sua relação com a ocorrência de mineralizações de cobre na região.

Desta forma, os principais objetivos científicos do projeto são:

1- Obter um conjunto de dados de falhas com estrias e indicação de movimento nas cavas da Mina Uruguai (Grupo Santa Bárbara, Ediacarano da Bacia Camaquã, RS).

2- Realizar interpretação dos paleocampos de tensão geradores das estruturas analisadas, através da utilização de programas de inversão.

3- Estabelecer a cronologia dos eventos de deformação através da observação de relações de corte entre estrias em um mesmo plano e comparação com o quadro regional determinado por integração entre dados estruturais e estratigráficos.

4- Correlacionar as famílias de fraturas e eventos de deformação reconhecidos com as ocorrências minerais observadas.

3. Trabalhos Prévios

A revisão bibliográfica baseou-se principalmente nos trabalhos de Bettencourt (1972), Silva Filho (1997) e Fambrini (1998) que trataram especificamente das rochas das Minas do Camaquã .

Carvalho (1932) *apud* Fambrini (1998) nomeou as rochas da região das minas como "Série Camaquã", embora sem denominar a localidade-tipo. Posteriormente Leinz (1939) *apud* Fambrini (1998) adicionou uma nova unidade à série, que descreveu como fortemente inclinada. Em 1961, uma equipe mista de um convênio USGS/DNPM redefiniu a "Série Camaquã" de Carvalho (1932) como Grupo Camaquã, subdividido em Formações Santa Bárbara e Guaritas.

Estudando os arenitos e conglomerados relacionados por Robertson (1966) como parte da Formação Santa Bárbara, Ribeiro *et al.* (1966) agruparam-nos na Formação Arroio dos Nobres, composta pelos membros Mangueirão e Vargas. Ribeiro (1978) incluiu nesse membro Vargas as rochas agrupadas no Grupo Santa Bárbara por Ribeiro *et al.* (1966). Dividiu ainda os litotipos em 5 níveis, mapeáveis em escala 1: 25.000: Arenito Inferior, Conglomerado Inferior, Arenito Intermediário, Conglomerado Superior e Arenito Superior.

Segundo Bettencourt (1972), a Mina Uruguai é dividida pela chamada Falha Piritas em duas zonas: Piritas e Uruguai. Verificou, graças aos trabalhos de lavra na época, a existência de um sistema de veios que ocorrem numa área de 650m de largura. O autor localizou estratigraficamente as rochas da região como pertencentes ao Grupo Bom Jardim e interpretou que estas emergiriam no núcleo de uma anticlinal formada por rochas do Grupo Camaquã e determinariam uma homoclinal cujas camadas possuem direção NE e mergulho médio de cerca de 35°. Interpretou as feições estruturais dominantes como representadas por grandes falhas transcorrentes com direção NE além de falhas associadas normais, tracionais e subsidárias com direção NW. Descreve que tais estruturas estariam associadas às mineralizações e seriam oblíquas ou transversais à direção média das camadas e à estrutura homoclinal. Também observou falhas pós-mineralização cortando as estruturas acima. Os depósitos filonais teriam se formado, na opinião do autor, por preenchimento e substituição de planos de fraturas e estariam restritos a arenitos, ritimitos e conglomerados dos Membros Vargas e Mangueirão, ressaltando a importância econômica dos depósitos localizados nos conglomerados e arenitos conglomeráticos.

Observou ainda a ocorrência de mineralização disseminada nas paredes e nos espaços entre as falhas. A atitude de tais estruturas mineralizadas teria mergulho para SW na Mina Uruguai e NE na mina São Luís.

O autor observou ainda que a jazida do Camaquã apresenta todas as características de depósitos hidrotermais mesotermiais e, com base nos estudos geoquímicos realizados, interpretou que as soluções hidrotermais sulfetadas seriam provenientes de fonte magmática profunda. Os condutos primários seriam as grandes falhas NE que atingiram o embasamento cristalino. Afirma que as soluções teriam sido canalizadas secundariamente para as falhas NW que apresentariam espaços abertos adequados à deposição de sulfetos, óxidos e minerais de ganga.

Sobre a geologia estrutural da área, salientou as grandes falhas de direção NE, as falhas menores subsidiárias (de grande importância econômica) assim como as falhas mais recentes. Especificamente sobre a Mina Uruguai, afirmou que os padrões de falhas principais seriam representados por estruturas N50W-70SW acompanhadas por falhas menores satélites de mesma atitude e mergulho. Observou a presença de juntas oblíquas e paralelas às falhas principais com ângulo de mergulho baixo com valor médio em torno de 37°. Caracterizou as falhas pré-mineralização de atitudes NW-SW e NW-NE, como oblíquas entre si, com ângulos que variam de 30 a 48°. Destacou que os planos de fricção apresentam intensa milonitização e brechamento, com espessuras variando de decímetros a metros. O mergulho das falhas pode variar de 40 a 90°, predominando os planos com mergulhos entre 60 e 80°. Os rejeitos podem atingir algumas dezenas de metros.

Bettencourt (1972) interpretou a maioria das falhas como normais, admitindo a presença de algumas falhas reversas associadas de menor amplitude. De forma que admitiu um esforço principal vertical e componente tracional com direção NE/SW com componente compressional médio NW/SE. Relacionou as falhas com direção NE e componente transcorrente dextral que ocorrem na região da Mina com o Sistema de Falhas Irapuá, que seria resultante de um esforço regional de primeira ordem. Admitiu que as falhas que interpretou como normais seriam devidas a esforços de segunda ordem com direção predominante NW/SE e sentido SE/NW.

As fraturas de atitude geral NW sinistral, com mergulhos para SW e NE teriam concentrado, segundo Bettencourt & Damasceno (1974), o minério filoniano sob regime transtrativo ou transpressivo. Descreveram ainda falhas compressivas N a NW interpretadas como secundárias e antitéticas a esse grupo.

Fragoso-Cesar *et al.* (1985) separaram as rochas da região, baseados na discordância regional apontada por Robertson (1966), em dois Grupos, a saber: Santa

Bárbara e Guaritas, separados entre si por discordância angular e colocados lado a lado regionalmente por falhas. Nesse trabalho, o conceito de Grupo Santa Bárbara proposto é distinto daquele utilizado por Robertson e autores posteriores, pois inclui sucessões sotopostas aos sedimentos do Vale do Arroio Santa Bárbara, sendo que estes foram posicionados no Grupo Guaritas.

Aplicando na região o conceito de aloestratigrafia, Paim *et al.* (1992), Paim (1994) e Paim *et al.* (1995) interpretaram as sucessões do Grupo Santa Bárbara como relativas a ambientes aluviais e deltas lacustres. Posteriormente, Paim *et al.* (2002) separaram tais sucessões em dois alogrupos distintos, incluindo os conglomerados inferiores da unidade no topo do Alogrupo Cerro do Bugio (Aloformação Santa Fé) e as demais unidades (aloformações Serra dos Lanceiros e Pedra do Segredo) no Alogrupo Santa Bárbara.

A Formação Santa Bárbara *sensu* Robertson (1996) foi elevada à categoria de Grupo por Fambrini (1998) com base em estudos de exposições na Sub-Bacia Camaquã Central (região das Minas do Camaquã), posteriormente expandidos para todas as sub-bacias (Fambrini 2003).

Silva Filho (1997) relatou os lineamentos de direções W-NW, NW, NE e N na região e constatou que as superfícies de acamamento apresentavam na região um basculamento de cerca de 30° para N-NW e N-NE. Descreveu um padrão anastomosado das fraturas em *trends* W-NW a NW que interpretando como um sinal de que a região sofreu eventos transcorrentes posteriores aos fraturamentos responsáveis pela formação da bacia. Essa afirmação é sustentada pela observação de que as fraturas das Minas do Camaquã, mais precisamente na Zona Piritas, apresentam estrutura ramificada, com mergulhos tanto para SW quanto para NE com altos mergulhos em maior quantidade do que os de médio mergulho, assemelhando-se muito a uma estrutura em flor negativa. Muitas dessas fraturas são pré-mineralização, sendo preenchidas por fluidos em sua maioria carbonáticos, alguns de quartzo e alguns ricos em sulfetos como calcopirita e bornita.

Separou cinco grupos de falhas na região: 1. *trend* NW sinistral; 2. *trend* NW normal; 3. *trend* W-NW dextral; 4. *trend* W-NW normal; 5. *trend* N-NE dextral, normal e reverso. Apontou para um campo de esforços com compressão E a E-SE e distensão N a N-NE. Descreve ainda sistemas de falhas de *trend* NW sinistral compatíveis com conjunto de fraturas sintéticas de Riedell que, segundo ele, dariam origem aos duplexes transcorrentes. Também as fraturas de *trend* N-NE seriam fraturas secundárias, desta vez sintéticas.

Almeida (2005) afirma que o principal evento pós-deformacional que afetou o

Supergrupo Camaquã é caracterizado por intenso falhamento transcorrente, com principalmente falhas sinistrais NE-SW a NNW-SSE e falhas destrais ENE-WSW a WNW-ESE, incluindo falhas maiores que justapõem diferentes unidades do Supergrupo Camaquã e seu embasamento. A mineralização em cobre que se encontra no Grupo Santa Bárbara na região das Minas do Camaquã deveria estar relacionada a este evento tectônico, uma vez que a mineralização associada às falhas de *trend* WNW-ESE se comportaram como estruturas distensionais durante este evento, compatível com as fraturas-T do sistema conjugado.

4. Materiais e Métodos

4.1 Análise de Estruturas Rúpteis e Determinação de Paleocampos de Tensões

A busca por sistemas conjugados de falhas é uma eficiente ferramenta na análise regional de estruturas rúpteis. Bott (1959), definiu que o deslocamento em um plano ocorre na direção de tensão cisalhante máxima. Conhecendo-se a direção e o sentido de deslocamento em diversas estruturas podemos reconstruir o estado de tensões responsável por tais fraturas. Tal procedimento configura o processo de inversão de dados para análise estrutural de estruturas rúpteis.

O estudo de paleocampos de tensão surgiu na década de 1970, quando pesquisadores perceberam ser possível, através da análise de dados de famílias de falhas com planos estriados e indicadores cinemáticos, a reconstituição dos campos de tensão responsáveis por sua formação. Foram desenvolvidos então métodos gráficos capazes de determinar as orientações dos esforços envolvidos. Dentre esses, destacam-se os de Arthaud (1969) (tensões uniaxiais), Angelier & Mechler (1977), “*slip-linear*”, “tentativa e erro” (Ramsay e Lisle 2000) e inversão, estes dois últimos numéricos. Todos os métodos partem do princípio que o conjunto de planos pré-existent tem orientação ao acaso, que as estrias coincidem com a direção de tensão máxima cisalhante no plano, que o deslocamento sofrido foi pequeno e que a tensão foi homogênea sobre a área de estudo.

Angelier & Mechler (1977) elaboraram o método dos diedros retos (fig.1), capaz de reconstituir paleocampos de tensão através da análise gráfica de dados de falhas com estrias em projeção estereográfica, determinando diedros compressivos e distensivos.

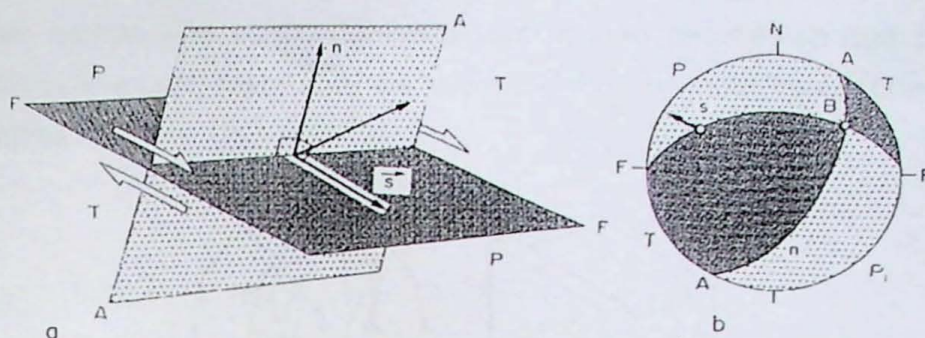


Figura 1: Diedros retos e o mecanismo de movimento de falha. (a) Visão perspectiva. (b) Plotagem estereoscópica, hemisfério inferior. F, plano de falha; A, plano auxiliar; n, normal ao plano de falha (vetor unitário); s, vetor unitário de movimento em (a), estria reversa dextral em (b); B, intersecção dos planos A e F; P, diedro compressivo, T diedro distensivo (Angelier 1994).

A projeção sobreposta de dados de diversas falhas estriadas em diagramas de Schmidt (fig. 2) proporciona a obtenção gráfica das direções dos campos de esforços nas intersecções dos diedros determinadas por um plano auxiliar ortogonal à estria e ao plano de falha. O sentido do movimento de falha irá indicar a natureza compressiva ou distensiva de cada campo.

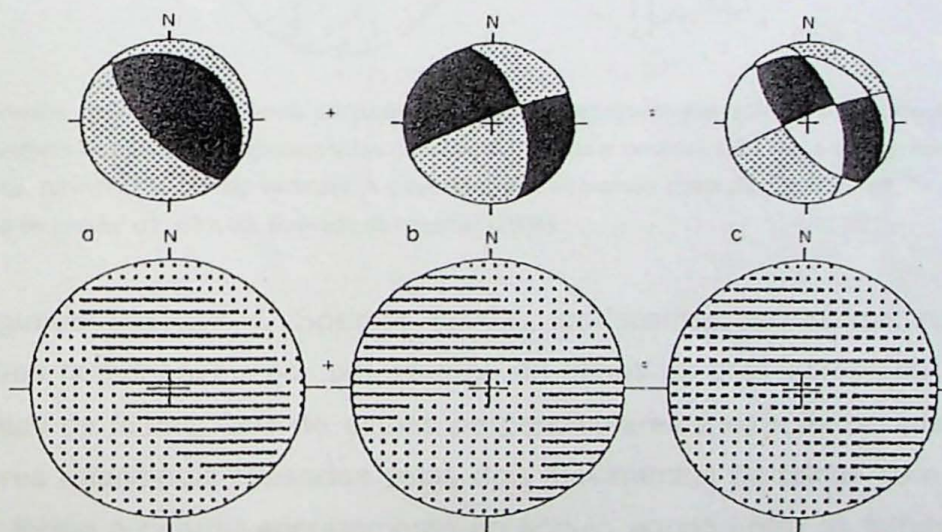


Figura 2: Princípio do método dos diedros retos. Projeção em rede estereográfica de Schmidt, hemisfério inferior. (a) e (b) Caso simples de duas falhas com o resultado mostrado em (c). Linha superior: Aplicação gráfica, com mecanismos de falha ou terremotos (pontilhado – diedro compressivo, preto – diedro distensivo); domínios de incompatibilidade deixados em branco em (c). Linha inferior: aplicação numérica, com porcentagens (total compatibilidade para compressão = 0, total compatibilidade para distensão = 100, incompatibilidade máxima = 50).

Angelier (1994) afirma que podemos chamar um determinado grupo de dados estruturais de um sistema de falhas apenas quando as estruturas são representadas por descontinuidades resultantes de deslizamento numa zona estreita e que se

movimentaram sob um mesmo regime tectônico, de forma que seus mecanismos sejam consistentes (fig.3). Esses sistemas devem apresentar ainda atitude e orientação de estrias não contrastantes. A um arranjo geométrico que pode incluir diversos sistemas e ser resultante de diversos eventos tectônicos chama de um padrão de falhas.

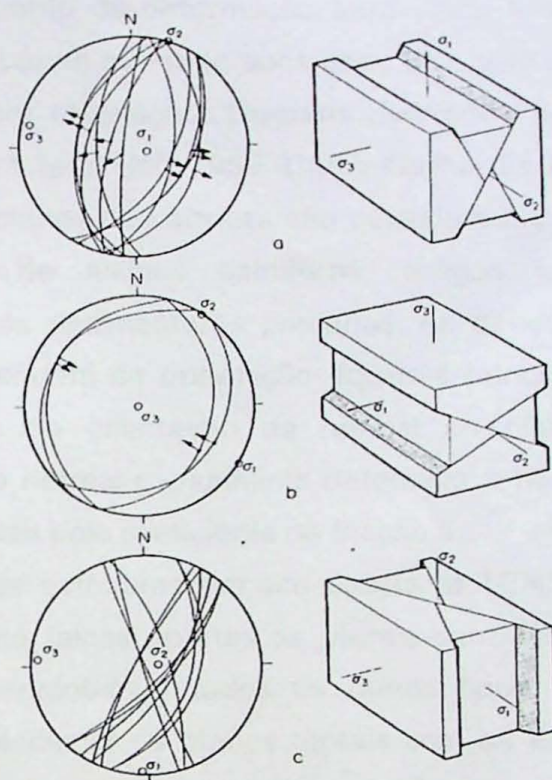


Figura 3: Exemplos comuns de sistemas conjugados de falhas, representados como traços ciclográficos (grandes círculos) com vetores de movimento representados como pólos (pontos e flechas). (a) Falhas *dip-slip* normais. (b) Falhas reversas *dip-slip*. (c) Falhas *strike-slip* verticais. À esquerda: estereogramas (projeção de Schmidt, hemisfério inferior). Principais eixos de tensão: σ_1 , σ_2 e σ_3 . Retirado de Angelier (1994).

Segundo Delvaux & Sperner (2003), poderemos reconstruir os eixos de paleotensões responsáveis por um sistema de falhas se este apresentar no mínimo duas famílias de falhas, *sets* de estrias perpendiculares à direção de intersecção da falha e pares rotacionais causados pelos dois movimentos de falhas com movimento oposto de forma a ocorrer encurtamento no ângulo agudo entre as falhas. O ângulo entre as falhas deve ser consistente com as propriedades mecânicas da rocha na época do falhamento. Para os autores, a análise de esforços deve considerar certo volume de rocha grande o suficiente para abrigar um conjunto de dados estruturais com diferentes superfícies de cisalhamento. Para tal análise, o volume rochoso analisado deve ser muito maior que a dimensão das estruturas rúpteis individuais. Afirmam também que o sentido e direção de deslocamento são deduzidos através da análise de estrias tipo *slickenlines*. Reúne-se assim um conjunto de dados contendo *strike* e *dip* da falha, a orientação da estria e a cinemática dos blocos. A inversão de

tais dados fornecerá as relações entre os campos de tensão principais: σ_1 (tensão máxima), σ_2 (tensão intermediária), σ_3 (tensão mínima) bem como a Razão de Tensão $R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$. Através de tais dados, podemos inferir os campos de tensão responsáveis por determinadas estruturas através da modelagem dos possíveis deslocamentos em cada plano de falha. O campo de tensão responsável durante determinado evento de deformação será único e será ativo apenas nesse determinado momento, sendo que logo após esse uma vasta gama de tensores pode induzir movimentação por reativação. Diversas definições da razão de esforços são encontradas na literatura (e.g. Bott 1959, Carey-Gailhardis & Mercier 1987, Angelier 1994). A reativação de planos de fraqueza são consideradas como falhas. Tais planos podem ser herdados de antigas estruturas, antigas juntas ou ainda planos relacionados a estruturas sedimentares primárias. As direções do deslocamento no plano de fraqueza dependem da orientação dos três principais eixos de tensão, da razão de tensão R e da orientação da normal ao plano. A relação entre os componentes de tensão normal e cisalhante determina a habilidade de um plano em ser reativado e é expressa pelo coeficiente de fricção θ .

Para a análise de estruturas em seu programa TENSOR, Delvaux & Sperner (2003) consideram como falhas apenas os planos com estrias mensuráveis e com indicação cinemática, englobando todos os outros tipos de planos rúpteis como fraturas. De forma a relacionar os planos rúpteis com os eixos de tensão, classifica geneticamente aqueles como fraturas de tensão (juntas de tensão) ou fraturas de cisalhamento, afirmando que ambas podem aparecer como pares conjugados. Fraturas de compressão formam um conjunto particular que também pode ser analisado pelo programa. Se houver a certeza de que nenhuma deformação ocorreu ao longo de um plano de clivagem por dissolução, podemos considerar este como uma fratura de compressão. Indicações de relações temporais entre estrias e falhas são muito importantes para qualidade dos dados, bem como uma avaliação da confiabilidade de cada dado.

4.2 Métodos de Campo

Neste trabalho, para a determinação do sentido do movimento das falhas em campo, observamos: se havia ou não separação estratigráfica, se eram reconhecíveis estrias nos planos de falhas, se estes apresentavam ou não preenchimento mineral e se havia alguma relação entre este preenchimento e as estrias em curvaturas e inflexões no plano de falha. Os critérios de Petit (1987), Angelier (1994) e Doblas (1998) determinam o sentido do movimento das falhas. A cinemática das estrias foi interpretada segundo os métodos expostos por Angelier (1994) (figura 4).

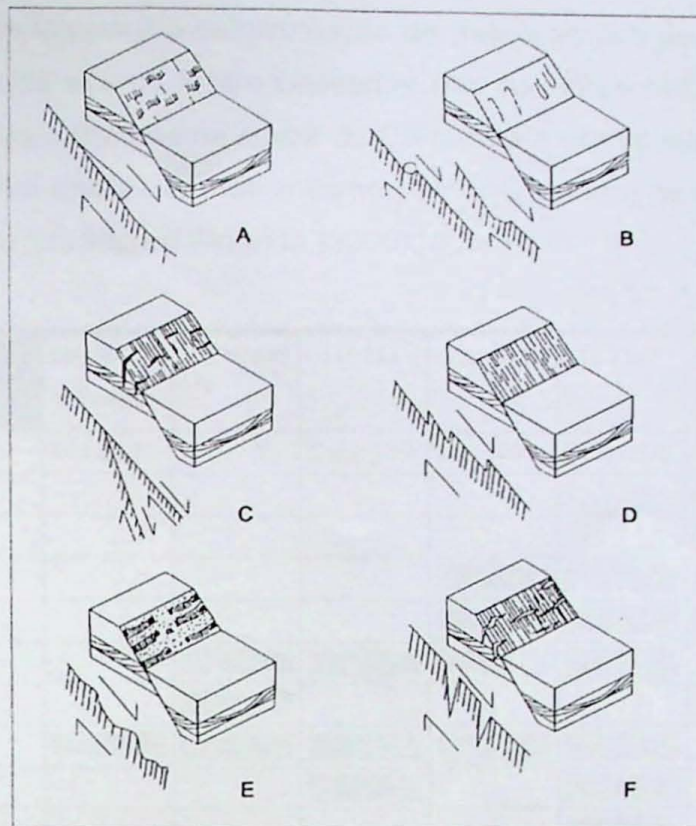


Figura 4 : Critérios usados no trabalho de campo para determinação de movimento em superfície de falha, mostrados no exemplo como falhas normais dip-slip. O critério pode ser aplicado em qualquer tipo de movimento. (A) Degraus minerais. (B) Marcas tectônicas de objeto. (C) Cisalhamento de Riedell. (D) Picos estilolíticos. (E) Facetas alternadas polidas e ásperas. (F) Fendas tensionais. Modificado de Angelier (1994).

4.3 Métodos de análise estrutural e correlação cronológica

Aplicamos a metodologia de inversão de dados estruturais rúpteis para a distinção de diferentes campos de tensão bem como sua inter-relação cronológica. Utilizando o programa de tratamento de dados estruturais e análise de paleotensão TENSOR (Delvaux & Sperner 2003), este trabalho busca contribuir com a correta correlação cronológica dos eventos tectônicos que estiveram ativos e deformaram a Bacia do Camaquã. Para correlação regional foram utilizados dados de sensoriamento remoto.

A análise seguiu uma metodologia segundo a qual os dados foram primeiramente plotados em estereogramas, analisados quanto aos possíveis campos geradores de tais estruturas que foram então inseridos no aplicativo de otimização rotacional, no qual se separou então as estruturas conjugadas, ativadas, não ativadas e incompatíveis. Foram descartados todos os dados cujo ângulo entre a estria real e a estria esperada para cada plano apresentava desvio de mais de 30°. Numa segunda etapa, apenas as estruturas conjugadas e ativadas foram submetidas a nova rotação para uma melhor adaptação do campo hipotético de tensão. Foram então gerados diagramas em projeção estereográfica com as falhas, estrias e campo de tensão obtido para cada família. Apenas famílias com um mínimo de quatro dados de falhas

com estrias foram aceitas para a determinação de paleocampos de tensão. As idades interpretadas para cada evento foram baseadas nas datações obtidas por diferentes métodos em diferentes trabalhos na Bacia do Camaquã e em considerações sobre as relações de corte entre estrias em um mesmo plano. O quadro geral cronológico dos eventos tectônicos foi retirado de Almeida (2005), figura 5.

	600 to 580 Ma	575 to 545 Ma	~545 Ma	~535 Ma	530 Ma ?	Post- Early Triassic	Cretaceous
	Dist ENE	Dist NW	Comp NE1	Dist NW	Comp NW	Comp NE2	Dist NE
Rosário do Sul Group							
Tubarão Group							
Rodeio Velho Intrusive Suite							
Guaritas Group							
Santa Bárbara Group							
Acanpamento Velho Formation							
Bom Jardim Group							
Ediacaran Granites							
Maricá Group							

Figura 5: Cronologia dos eventos tectônicos formadores e deformadores do Supergrupo Camaquã e unidades adjacentes. Cinza claro: unidades afetadas por cada evento. Cinza escuro: dados estruturais obtidos. Retirado de Almeida (2005)

4.4 Análise de fácies sedimentares

O procedimento adotado na interpretação dos sistemas deposicionais foi a análise de fácies e elementos arquiteturais, aplicados de forma semelhante à descrita por Reading (1986), Miall (2000) e Walker (1992). Segundo Miall (2000), a análise de fácies compreende o estudo e a interpretação de texturas, estruturas sedimentares, fósseis e associações litológicas de rochas sedimentares em escala de afloramentos e testemunhos de sondagem. A análise de fácies consiste no agrupamento das litologias portadoras de estruturas sedimentares, ou outras feições características, representativas de processos particulares de transporte e deposição, de forma a permitir, através do estabelecimento de uma classificação, a organização da complexidade natural dos depósitos sedimentares, tornando possível reconstituir características dos ambientes deposicionais e comparar depósitos antigos a sistemas deposicionais ativos.

A interpretação dos processos de sedimentação a partir da descrição das fácies e associações de fácies é realizada através da comparação com depósitos atuais, naturais ou gerados em laboratório, com causas conhecidas ou, na ausência desses, pela comparação com fácies semelhantes descritas em ambientes antigos

interpretados com elementos seguros.

A partir do reconhecimento das fácies de cada unidade sedimentar estudada foram caracterizadas as associações de fácies recorrentes, representativas de processos geneticamente ou cronologicamente associados e, com o auxílio da análise de elementos arquiteturais, estabelecidos modelos de fácies (*sensu* Walker 1992).

5. Desenvolvimento do trabalho

No primeiro estágio do trabalho foi realizada a pesquisa bibliográfica. Durante uma semana do mês de maio ficamos hospedados na cidade de Caçapava do Sul, Distrito de Minas do Camaquã, Rio Grande do Sul. Visitamos duas minas que fazem parte do complexo das Minas do Camaquã: Mina São Luís e Mina Uruguai. Foram medidos um total de 94 dados pareados de falhas com estrias e indicação de movimento, sendo a maioria desses na cava da Mina Uruguai, Zona Piritas. Com os dados em mãos, começaram os processamentos computacionais que indicaram a orientação de esforços relativos a diferentes eventos.

Dados de sensoriamento remoto e sistema de informação geográfica foram integrados para correlação regional. Figuras explicativas foram confeccionadas a partir de fotografia de campo. Foram testados diferentes métodos de análise. As estruturas portadoras de mineralizações foram tratadas separadamente para uma investigação sobre o evento de mineralização. Dados de corte entre estrias foram utilizados para correlação entre diferentes regimes de esforços. Os resultados foram discutidos e comparados com a bibliografia consultada para o estabelecimento das conclusões.

6. Resultados obtidos

6.1 Análise de fácies sedimentares

Levantamentos estratigráficos e análises de fácies sedimentares levaram à caracterização de três associações de fácies na área investigada e à interpretação de seus ambientes deposicionais.

Associação de fácies 1

A primeira associação de fácies (AF1) é a de maior frequência na sucessão estudada, perfazendo aproximadamente 65 % das seções medidas. Essa associação de fácies é composta por 4 fácies, sendo que duas delas dominam a associação (Ce e Agi), uma ocorre de maneira restrita (Afl) e outra de forma muito rara (SI).

Fácies Ce – Conglomerados estratificados

Descrição: Conglomerados e arenitos conglomeráticos estratificados dispostos em séries de 20 a 60 cm de espessura, tabulares a lenticulares de base plana e topo levemente convexo, com seixos e matacões isolados ou imbricados segundo o plano A-B. A estratificação é dada por níveis de concentração de seixos. A proveniência é dominada por granitos, aplitos e riolitos, além de intraclastos de argila. Ocorre cimentação carbonática, mais evidente em níveis grossos.

Interpretação: A estratificação e a imbricação de seixos e matacões indicam uma origem em correntes trativas para esta fácies. A disposição em sucessões espessas de camadas tabulares ou lenticulares de base plana sugere fluxos desconfinados, não restritos a canais. A alternância cíclica desta fácies com a fácies Agi confere aspecto muito semelhante aos depósitos descritos por Blair (1999) como camadas pareadas resultantes da desestabilização de antidunas formadas por fluxos desconfinados em regime de fluxo superior sobre leques aluviais. Nesse contexto, os conglomerados estratificados representariam o acúmulo das partículas maiores no fundo após o evento turbulento de desmonte das antidunas (Blair 1999).

Fácies Agi – Arenitos grossos conglomeráticos, com laminação incipiente

Descrição: Arenitos grossos com grânulos e pequenos seixos e com laminação incipiente, em níveis com espessuras de até 40 cm, intercalados à fácies Ce por passagem gradacional, em sucessões rítmicas.

Interpretação: A passagem gradacional a partir da fácies Ce sotoposta é indicativa de relação genética entre as duas fácies. A caracterização dos conjuntos rítmicos de Ce e Agi como camadas pareadas *sensu* Blair (1999) sugere que esta fácies formou-se como a porção superior de depósitos de desestabilização de antidunas em correntes trativas em regime de fluxo superior. Assim, cada par Ce – Agi é interpretado como resultado de um evento de enchente de grande vazão e caráter desconfinado (enchente-em-lençol).

Fácies Afl Arenitos médios e finos laminados

Descrição: Arenitos médios e finos laminados, com até 30 cm de espessura, dispostos em lentes isoladas em meio às fácies Ce e Agi. Ocorrem raros grânulos isolados, e localmente observa-se lineação primária de corrente.

Interpretação: A presença de lineação primária de corrente nestes arenitos laminados é indicativa de tração em regime de fluxo superior. Sua ocorrência de lentês isoladas em meio às fácies conglomeráticas interpretadas como depósitos de enchentes-em-lençol em leques aluviais implica em eventos de menor energia do que os processos dominantes. Possivelmente esta fácies formou-se durante estágios finais de enchentes desconfinadas de grande vazão, durante os estágios de atenuação do fluxo, causando correntes rasas que retrabalham a fração fina de depósitos anteriores.

Fácies SI – Siltitos laminados

Descrição: Raros níveis descontínuos de siltitos esverdeados, com poucos centímetros de espessura, intercalados às fácies arenosas e conglomeráticas.

Interpretação: Os níveis de siltitos intercalados às fácies de tração em regime de fluxo superior são interpretados como resultado de decantação em pequenos corpos d'água formados em depressões sobre o leque aluvial após cada evento de enchente-em-lençol. A pequena espessura desses níveis pelíticos, que não ultrapassa 5 cm, indica limitada disponibilidade de material em suspensão, interpretada como resultado de pequenos corpos d'água sem aporte adicional de sedimento por correntes tributárias.

Interpretação da Associação de Fácies 1: A associação de fácies de fluxo desconfinado em regime de fluxo superior (Ce e Agi) com raras intercalações de arenitos finos (Afl), também de regime de fluxo superior, e níveis de decantação de pelitos (SI), sugere um contexto de sedimentação episódica por enchentes-em-lençol, com posterior estagnação. As fácies identificadas sugerem um sistema de leques aluviais dominados por enchentes-em-lençol, semelhante ao descrito por Blair (1999).

Associação de fácies 2

Uma segunda associação de fácies, também dominada por conglomerados e arenitos grossos, ocorre na sucessão investigada em posição estratigráfica superior à primeira. Essa associação é marcada pela recorrência de fácies com estratificação cruzada, sendo assim distinta da primeira.

Fácies Agl: Arenitos grossos laminados

Descrição: Nesta associação de fácies, ocorrem arenitos grossos laminados semelhantes aos encontrados na AF1, porém com laminação evidente e sem associação com a fácies Ce. Estes arenitos apresentam grânulos e seixos esparsos e encontram-se em camadas decimétricas tabulares ou lenticulares de base plana e topo levemente convexo, intercaladas a fácies com estratificação cruzada (Aga e Agt) por contatos bruscos.

Interpretação: Apesar da aparente semelhança com a fácies Agi da AF1, estes depósitos provavelmente possuem origem diversa. Sua ocorrência isolada, distinta da associação rítmica com a fácies Ce observada em Agi, com contatos bruscos com fácies de regime de fluxo inferior (ver abaixo) não corrobora a interpretação de origem por desestabilização de antidunas como a proposta para os pares Ce – Agi. Desta forma, interpreta-se estes arenitos grossos laminados como resultado de deposição, em leito plano, por correntes trativas em regime de fluxo inferior, de acordo com o observado estudos laboratoriais (e.g. Ashley 1990).

Fácies Agt: Arenitos grossos com estratificação cruzada tabular.

Ocorrem em séries isoladas ou amalgamadas, com até 40 cm de espessura, intercaladas pelas fácies Agl e Aga, em corpos tabulares ou lenticulares de base côncava e topo convexo. A estrutura sedimentar característica desta fácies é a estratificação cruzada tabular, com ângulos inferiores a 15°. Ocorrem seixos isolados, ou concentrados nos estratos frontais.

Interpretação: Estes depósitos são interpretados como produto da migração de dunas subaquáticas de cristas retas formadas por correntes trativas em regime de fluxo inferior.

Fácies Aga: Arenitos grossos com estratificação cruzada acanalada

Descrição: Arenitos grossos a médios, com seixos esparsos, em séries isoladas ou amalgamadas, dispostos em camadas decimétricas lenticulares de base côncava ou plana e topo convexo. A estrutura sedimentar predominante é a estratificação cruzada acanalada de médio porte.

Interpretação: Esta fácies é interpretada como produto de migração de dunas subaquáticas de cristas sinuosas formadas por correntes trativas em regime de fluxo inferior.

Interpretação da Associação de Fácies 2:

Interpretação da Associação de Fácies 2: O predomínio de fácies de regime de fluxo inferior contrasta com o observado na AF1, e a presença de séries de estratificação cruzada com alguns decímetros de espessura indica profundidades de fluxo maiores que aquelas interpretadas para as fácies de arenitos da AF1. Desta forma, interpreta-se um ambiente com predomínio de correntes trativas, possivelmente confinadas a canais rasos e amplos, em sistemas fluviais entrelaçados com predomínio de carga de fundo.

Associação de fácies 3:

Esta associação aparece em nível estratigráfico acima da seção superior, porém acima das zona de falhas, sendo difícil estimar os rejeitos e conseqüentemente a exata posição deste pacote sedimentar. Observamos uma passagem transicional de AF2 para AF3, composta pelas seguintes fácies sedimentares:

Fácies Aml: arenitos finos a médios laminados

Descrição: arenitos finos a médios bem selecionados, micáceos, com intraclastos de argila e laminação plano-paralela. Ocorrem em camadas tabulares com espessuras em torno de 30cm, intercaladas à fácies de siltitos laminados.

Interpretação: São interpretados como depósitos de leito plano sob correntes trativas. A granulação tendendo a média e a presença de abundante mica detrítica sugerem regime de fluxo inferior, com decantação associada à tração. A intercalação com depósitos de decantação de material pelítico (ver abaixo) indica caráter episódico para os eventos de corrente geradores desta fácies.

Fácies Sl: siltitos laminados

Descrição: siltitos morrom escuros, laminados em camadas de 2 a 6 cm de espessura, lateralmente contínuas por vários metros.

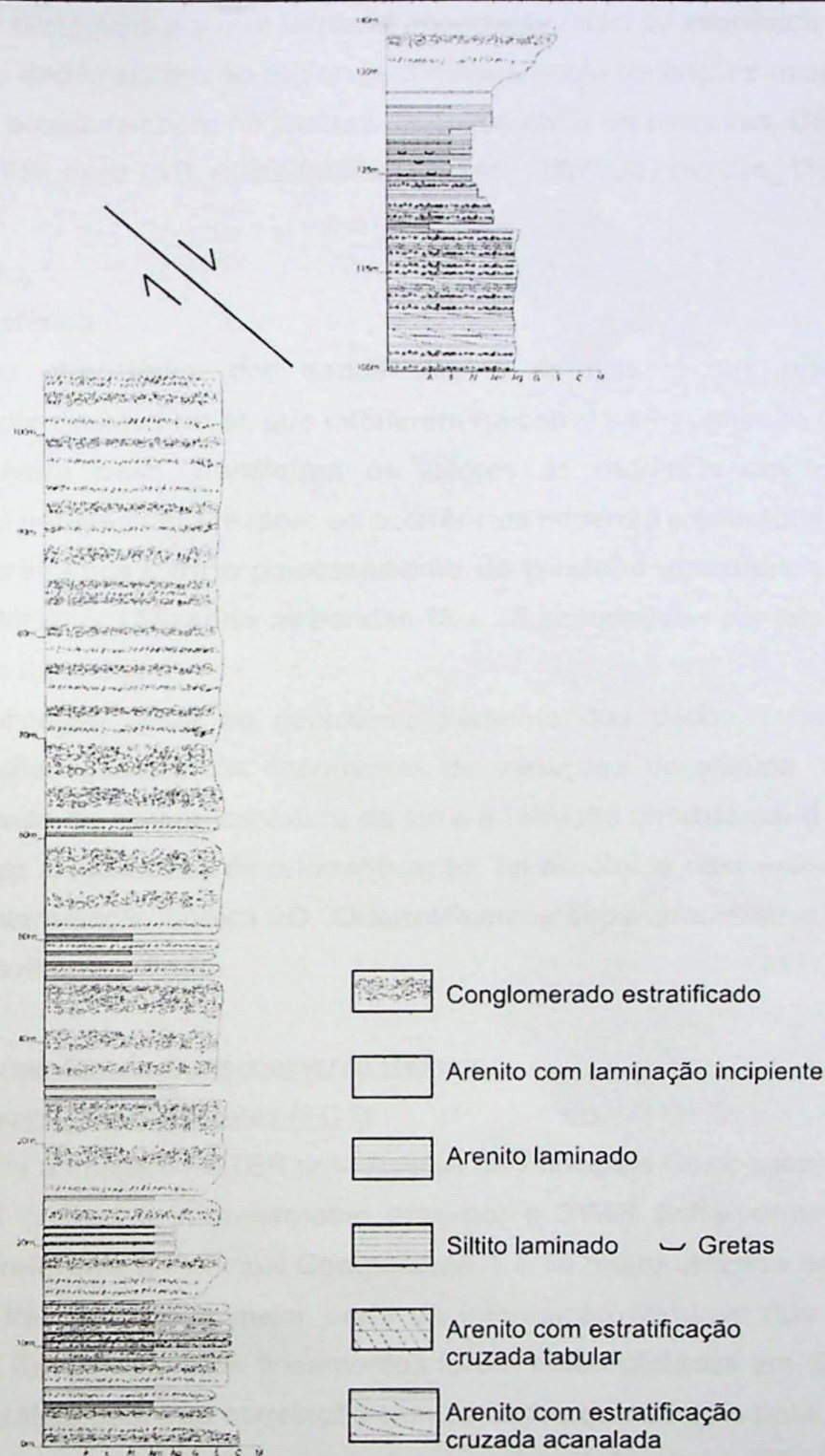
Interpretação: Depósitos de decantação de material transportado por suspensão. Sua relação com a fácies Aml sugere decantação após atenuação de fluxo trativo episódico.

Fácies Sg: siltitos com gretas

Descrição: siltito marrom com níveis gretados. Somente observados em blocos caídos.

Interpretação: interpreta-se esta fácies como resultado de exposição subaérea de sedimentos finos decantados, com conseqüente contração por desidratação de argilas e formação de polígonos separados por gretas que são posteriormente preenchidas por areia.

Interpretação da Associação de Fácies 3: Interpreta-se um ambiente deposicional de planícies de inundação aluviais, possivelmente distais em relação às associações de fácies I e II, localmente predominando decantação de finos. Os arenitos laminados seriam referentes a aporte episódico de areia por correntes trativas, e as demais fácies à decantação e eventual exposição subaérea entre tais eventos. Nos níveis estratigráficos superiores começam a aparecer novamente os arenitos conglomeráticos da AF1.



Prancha 3: Coluna estratigráfica obtida na Zona Uruguai da Cava Uruguai das Minas do Camaquã.

6.2 Análise de Sensoriamento Remoto

O Sensoriamento Remoto fornece importante informação estrutural regional. Aliado a dados de campo pode fornecer informações a expressão estrutural, em relevo, de diferentes eventos tectônicos e assim fornecer importante base de informação para uma correlação de dados em escala regional. O mapeamento de feições espectrais de minerais e rochas auxilia também na procura de novos alvos de pesquisa. Utilizamos uma imagem ASTER, cena L1B_00309032003134148_20070327153954_11727 .

Pré-processamento:

A. Correção Atmosférica

A correção atmosférica dos dados elimina as informações referentes à quantidade de vapor de água no ar, que interferem na correta interpretação dos dados de reflectância. Além disso, transforma os valores de radiância em valores de reflectância. Estes servirão para mapear as ocorrências minerais e estruturais na área. Usamos como parâmetros para o processamento de correção atmosférica os dados do sensor orbital MODIS. Utilizamos as bandas 18 e 26, responsáveis por tais feições.

B. Ortorretificação da imagem

A ortorretificação ajuda no georreferenciamento dos dados, uma vez que corrige as distorções geométricas decorrentes de variações de altitude, atitude de escarpas, velocidade do sensor, curvatura da terra e refração atmosférica (Lillesand & Kiefer, 1994). Para a realização da ortorretificação, foi escolhida uma matriz 9X9 em um método de interpolação cúbica 2D. Ortorretificamos separadamente o VNIR e o SWIR, para um melhor resultado.

Extração de lineamentos via Sensoriamento Remoto

A. Análise de principais componentes (PC1)

Foi aplicada à imagem ASTER uma Análise de Principais Componentes com as bandas do VNIR (visível e infra-vermelho próximo) e SWIR (infra-vermelho ondas curtas). A banda referente à Principal Componente 1 é há muito utilizada em análises estruturais, pois traz consigo a maior parte da informação texturais das diferentes bandas (prancha 6). Os dados de lineamentos foram então plotados em Sistema de Informação Geográfica para sua correlação com os dados de campo e para confrontar a localização da mina em relação às estruturas regionais (prancha 18). Importante notar que algumas das falhas constatadas em campo não foram observadas em escala maior na extração de lineamentos regionais.

B. Razões de bandas para realce de comportamento vegetal

Aplicamos as técnicas de Ribeiro de Almeida (2005) para correlação da geologia local com sua cobertura vegetal. Sendo o solo da região de pequena

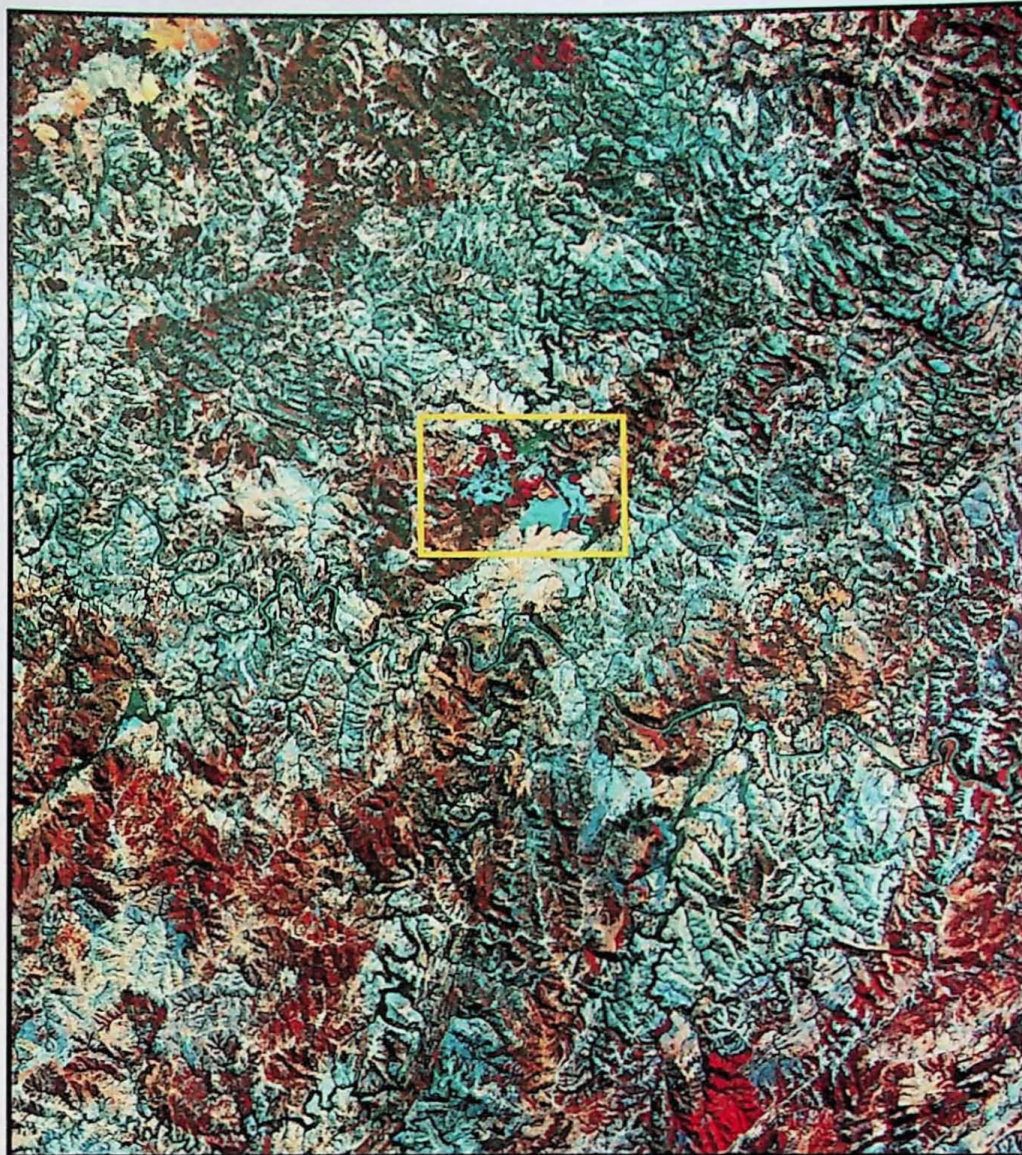
espessura, a contribuição da geologia apresenta uma maior importância na flora local, caracterizando uma boa oportunidade para se testar o método. A imagem acentua as estruturas NNE e a janela estrutural do grupo Santa Bárbara (prancha 5).

B Sombreamento digital de relevo

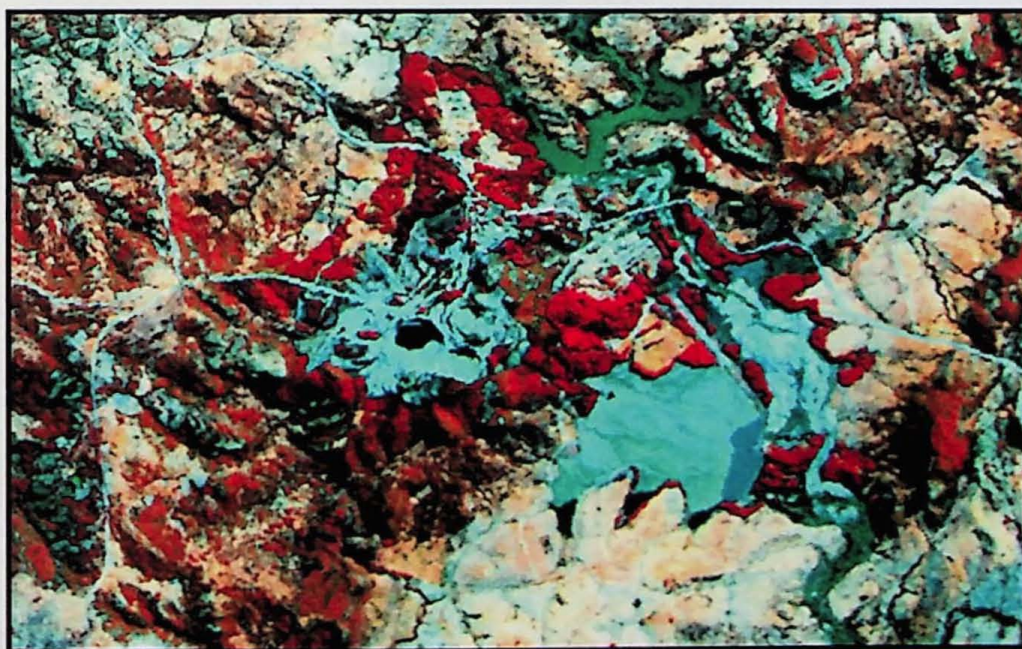
Através do modelo digital de terreno DEM ASTER, foram realizados diferentes modelos de sombreamento de terreno visando o realce de estruturas com base nos dados estruturais regionais. Para o realce das estruturas W-NW, utilizamos um processamento de sombreamento de terreno com elevação de iluminação de 25° e Azimute de 30° (prancha 6C). Para o realce das estruturas N-NE, utilizamos um processamento de sombreamento de terreno com elevação de iluminação de 25° e Azimute de 300° (prancha 6B). Os lineamentos com direção N-NE apresentaram forte resposta em tais análises, indicando talvez que devem ter sido fruto de uma deformação mais proeminente.

C Modelo Digital de Terreno

Elaboramos um modelo digital de terreno através das bandas 3A e 3B ASTER. O exagero vertical de 25x foi escolhido para um maior realce de feições estruturais em relevo. A expressão dos lineamentos NNE e WNW é pronunciada através de picos e vales com tais direções. O complexo das Minas do Camaquã localiza-se num alto estrutural de direção WNW, no truncamento deste com a expressão topográfica dos lineamentos NNE. Sua localização pode ser definida como a região de truncamento entre as duas principais zonas de cisalhamento regionais (prancha 4). Observando em detalhe a área da mina através de dados de lineamentos regionais, fica evidente a afirmação anterior (prancha 7). Evidente também ficou a orientação WNW da Mina Uruguai, acompanhando as estruturas mineralizadas. Pudemos distinguir três direções principais de lineamentos. Os dois principais são de fato os de direção WNW e NNE, mas ocorre também em menor densidade lineamentos de direção NW. A Mina Uruguai é particularmente cortada pelas três direções acima (prancha 7).

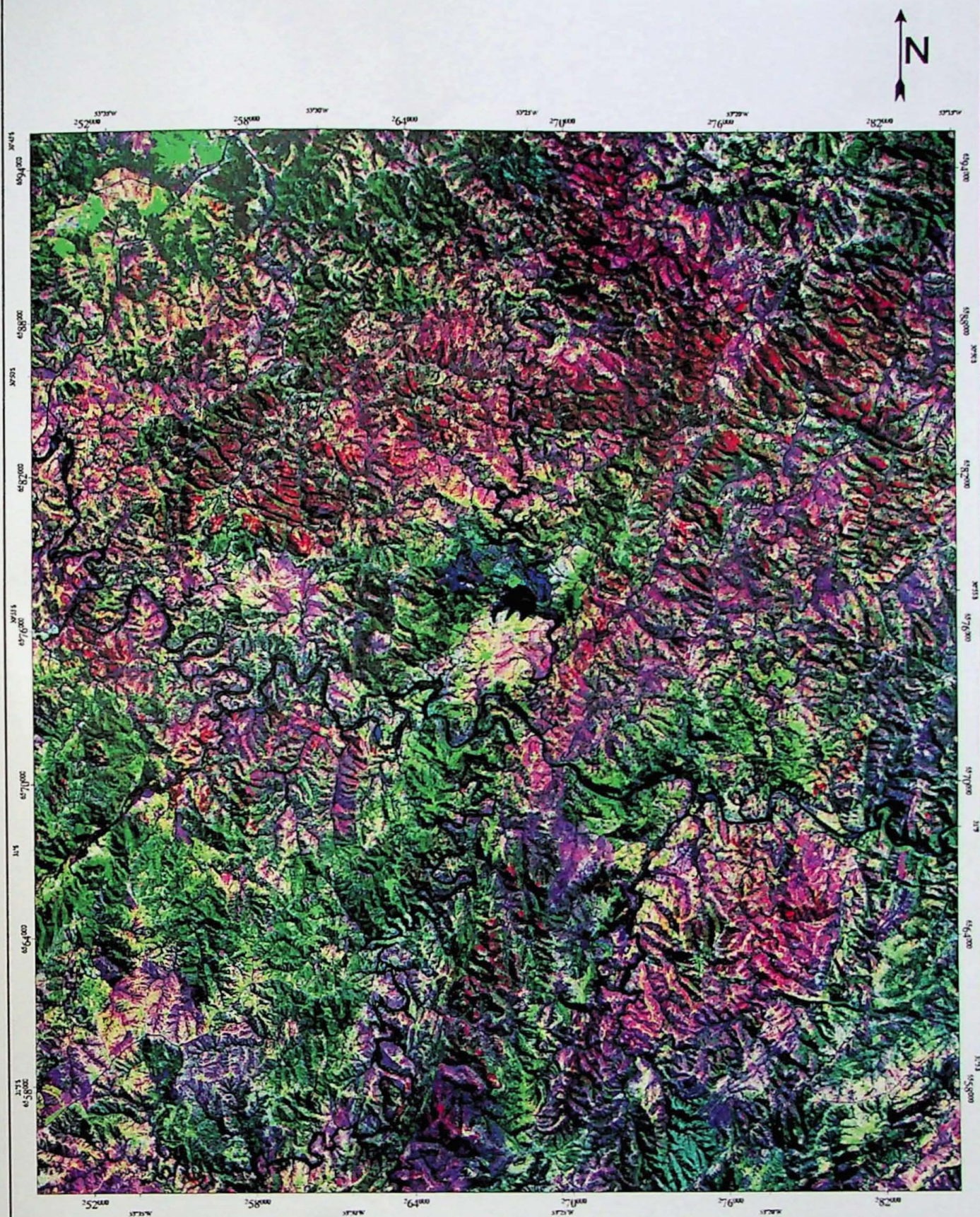


A

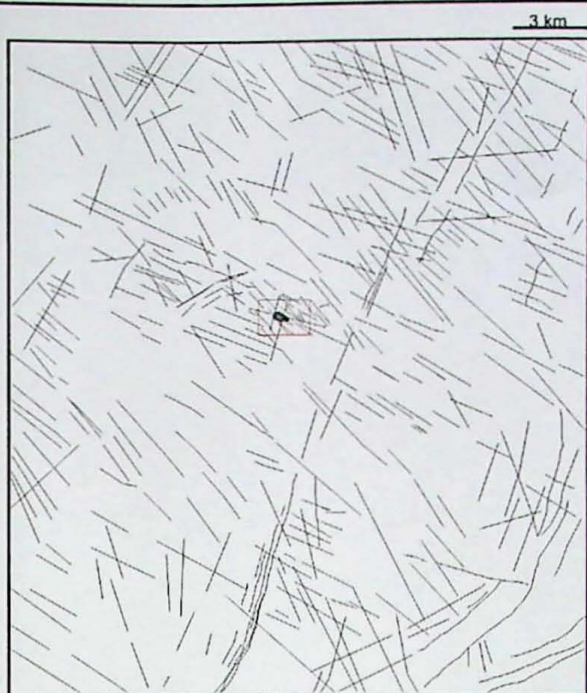


B

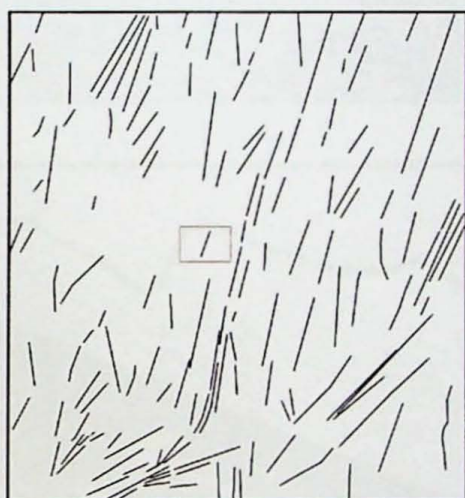
Prancha 4: A) Imagem ASTER 312. A região das Minas aparece destacada em amarelo. Abaixo, no detalhe, a cava da Mina Uruguai. Nota-se a expressão dos lineamentos WNW no relevo e sua relação com a estrutura da mina.



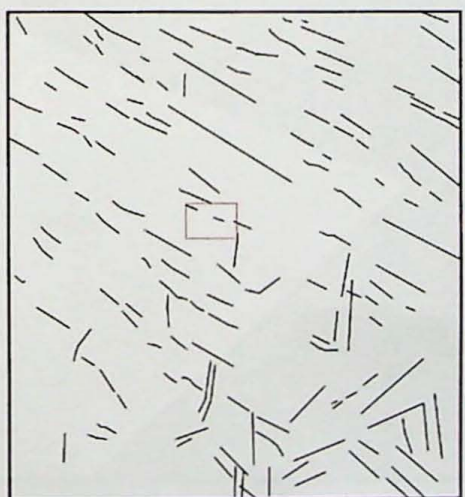
Prancha 5: processamento digital de imagem ASTER: razões de bandas para realce de comportamento vegetal e análise de principais componentes das razões obtidas. A composição RGB é PC 324. Para uma maior nitidez foi aplicado HSV com a Pc1 das bandas originais como imagem de alta resolução.



A



B

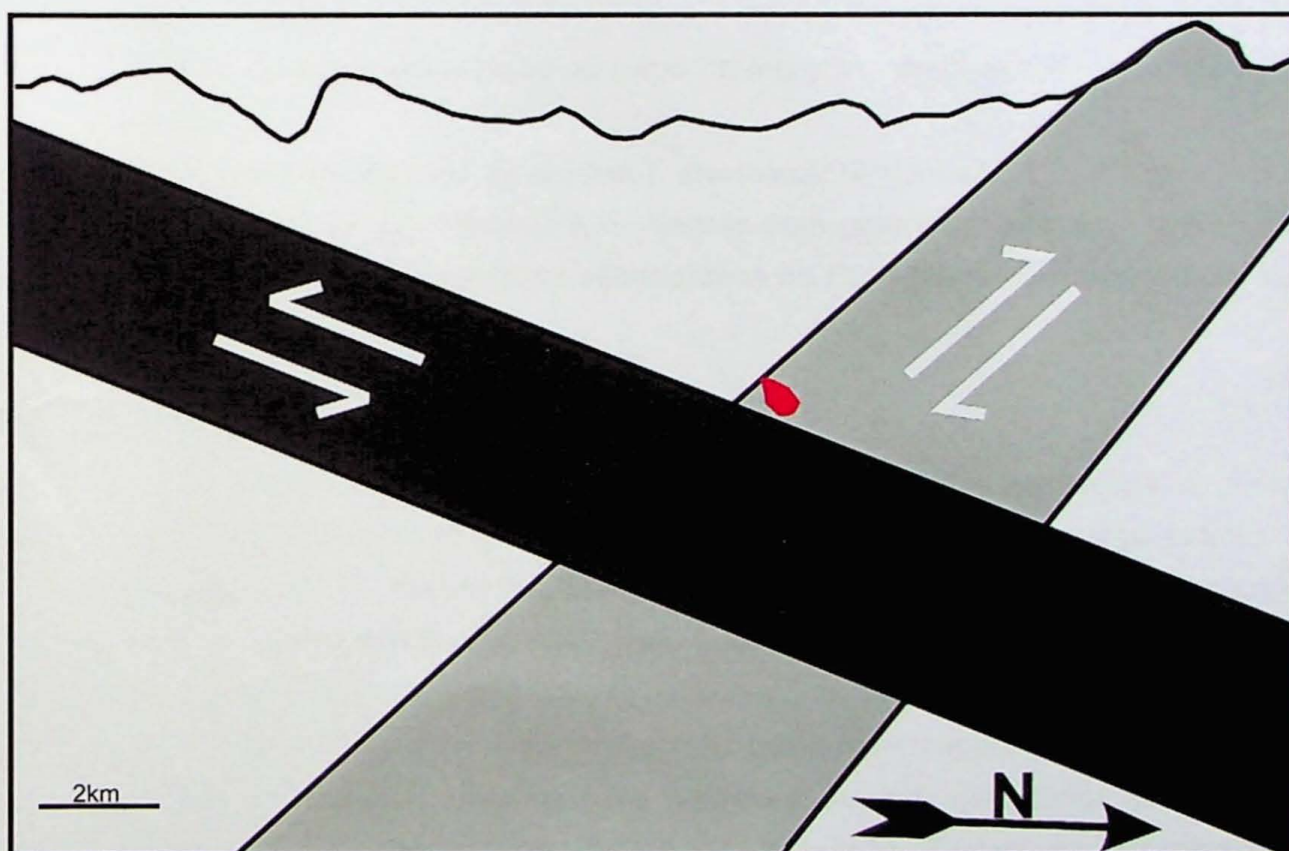
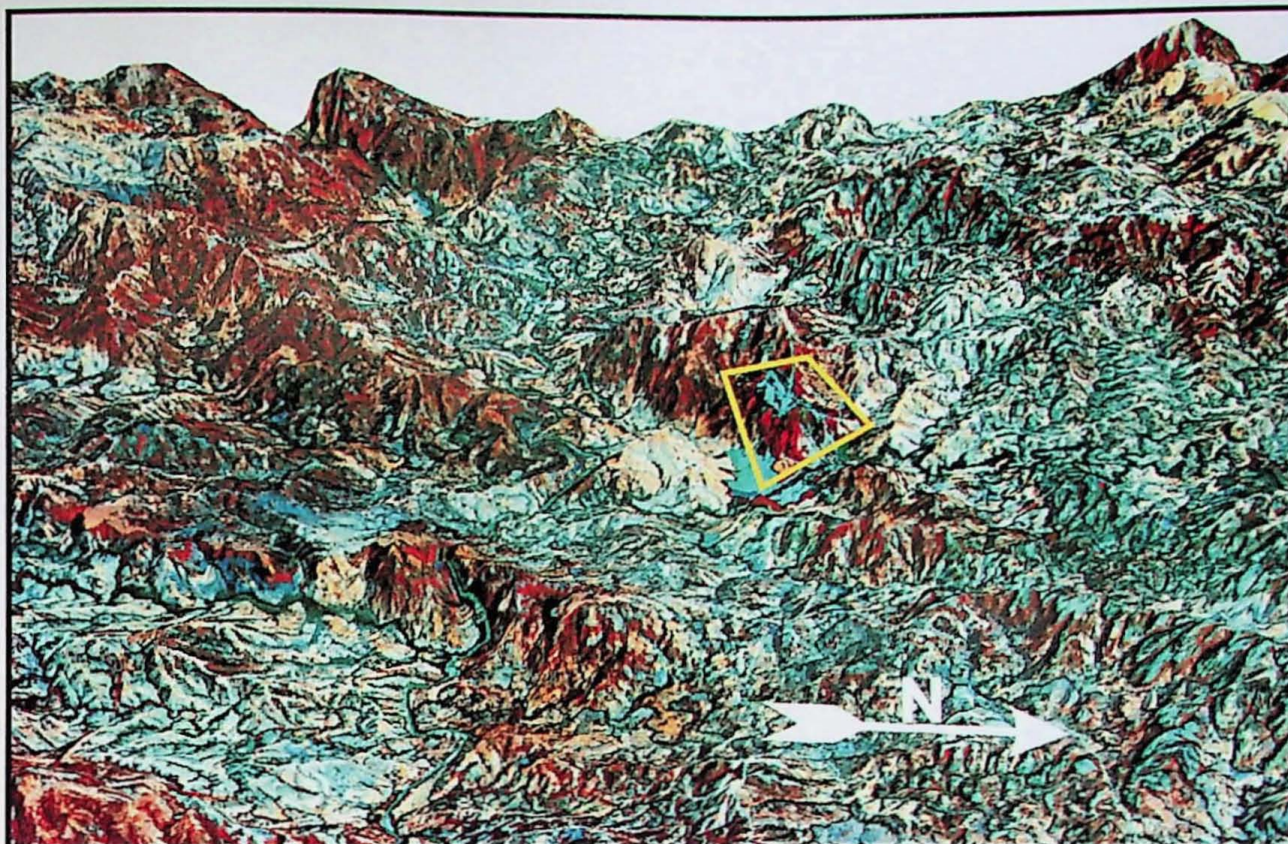


C

N

2km

Prancha 6: A) PC 1 ASTER e extração de lineamentos. A Mina Uruguai aparece dentro do retângulo vermelho; B) relevo sombreado a partir de DEM ASTER, iluminação no azimute 300, 25° de elevação; C) relevo sombreado a partir de DEM ASTER, iluminação no azimute 30, 25° de elevação.



Prancha 7: Acima, modelo digital de terreno DEM ASTER (exagero vertical de 25x). A região das minas aparece destacada em amarelo. Abaixo, interpretação da expressão em relevo das duas principais zonas de cisalhamento regionais e sua cinemática, interpretada através dos processamentos de dados em campo. A cava da Mina Uruguai aparece destacada em vermelho.

6.3 Análise Estrutural

A análise estrutural primeiramente contou com a coleta de 94 dados de falhas com estrias e indicação de movimento, sendo a maior parte referente à Mina Uruguai. A análise preliminar dos dados revela múltiplos eventos de deformação rúptil, pois não há um campo de tensões único que possa ter sido responsável por todas as estruturas observadas. Relacionamos todas as mineralizações presentes em estruturas para uma possível correlação cronológica com os eventos deformadores que atuaram na região.

Obtenção de dados

Os dados estruturais do trabalho foram colhidos de forma sistemática visando atender os parâmetros aplicados no programa TENSOR. Como material utilizamos uma bússola tipo Clar, para medidas de planos e mergulhos, e um transferidor para medida direta do rake (obliquidade) no plano de falha, evitando assim possíveis erros de inclusão da estria no plano de falha.

As medidas foram organizadas da seguinte maneira:

1. rumo do mergulho do plano
2. caimento do plano
3. rake da estria
4. atitude da estria em relação ao rumo do mergulho do plano (R- direita ou L- esquerda)
5. cinemática (S- sinistral, D- destal, I- inversa ou N- normal)
6. tipo de indicador cinemático (DS- degrau sem preenchimento, DC- degrau com preenchimento, SE- separação estratigráfica ou PLR- planos alternadamente lisos e rugosos)
7. Nota de confiabilidade do dado.

Ex.: 250/61//05 R S DS 2

A riqueza das exposições rochosas da Zona Piritas vai desde a intensa mineralização (prancha 8) à abundância de estruturas em excelente estado de conservação. Já na entrada da cava pode-se observar um excelente exemplo de estrutura em flor (prancha 10), apontando para a ocorrência no local de pelo menos um evento transcorrente importante. O basculamento pronunciado das superfícies de acamamento é frequentemente cortado por falhas de comportamentos cinemáticos diversos. A mineralização obedece a um controle estrutural, aparecendo em planos de falha (prancha 9), preenchimento de fraturas de tensão (*T-Fracture*) (prancha 11) e brechas tectônicas (prancha 9) paralelas aos planos de falhas.

Uma coloração esverdeada das rochas no local aponta para uma cloritização generalizada em torno da zona de cisalhamento. A fratura de tensão tipo T, preenchida por barita, aponta para uma tensão principal horizontal com atitude NW (prancha 11).

Encontramos diversas fraturas e falhas com estrias, muitas com preenchimento

mineral de calcita, pirita, bornita, hematita, quartzo, e malaquita (pranchas 8 e 9). Observamos também a coloração dominante esverdeada das rochas indicando cloritização e malaquita. Da entrada da mina era evidente uma grande estrutura em flor (prancha 10). Encontramos grande quantidade de brechas tectônicas (prancha 9).

X Na Zona Uruguai foram observadas diversas estruturas de falhamentos normais semelhantes a estruturas tipo dominó, (pranchas 11 e 12), indicando um sistema distensivo na localidade que pode estar relacionado à transcorrência determinada na análise de paleotensores, no caso a distensão NE ocasionada pela compressão NW, num análogo à fratura T. Em uma análise mais cuidadosa pudemos observar que ocorreu um sistema aparentemente normal que foi basculado posteriormente. Isso evidenciaria um sistema normal anterior ao regime de transcorrência, que basculou tanto as superfícies de acamamento como as próprias fraturas. Outra hipótese é que isso seja decorrente apenas do próprio regime transcorrente.

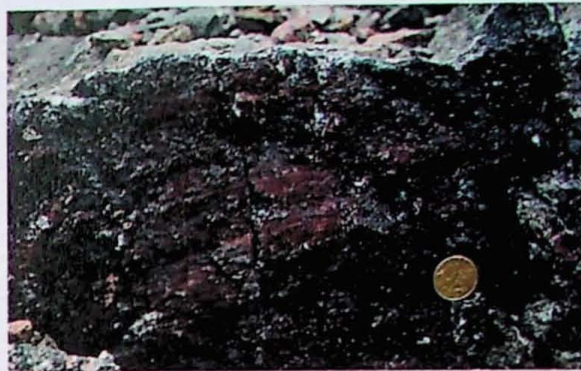
X As mineralizações que pudemos observar no nível hoje acima do lençol freático são muito mais escassas comparativamente às que ocorrem na Zona Piritas. Devido ao menor basculamento das rochas, pudemos realizar um levantamento estratigráfico confiável que será interpretado mais abaixo. Fica evidente também que não mais se vê a coloração esverdeada das rochas, típica na Zona Piritas.

Foram também observadas em campo as relações de corte entre estrias (pranchas 8 e 10), dados cruciais para a correta correlação cronológica entre os eventos tectônicos analisados. Computamos as ocorrências minerais associadas às estruturas, observando preenchimento mineral em estrias, planos e juntas. Dentre os minerais observados podemos ressaltar os sulfetos como pirita, bornita e calcopirita, assim como preenchimento de planos e veios de quartzo, hematita, calcita, barita e malaquita.

Em um afloramento de corte de estrada perto das minas, foi observado um dique básico de granulação fina cortando arenito fino laminado, com intraclastos de argila. A parede lateral do dique apresenta mergulho para 079/79, com uma largura de cerca de quatro metros.



A



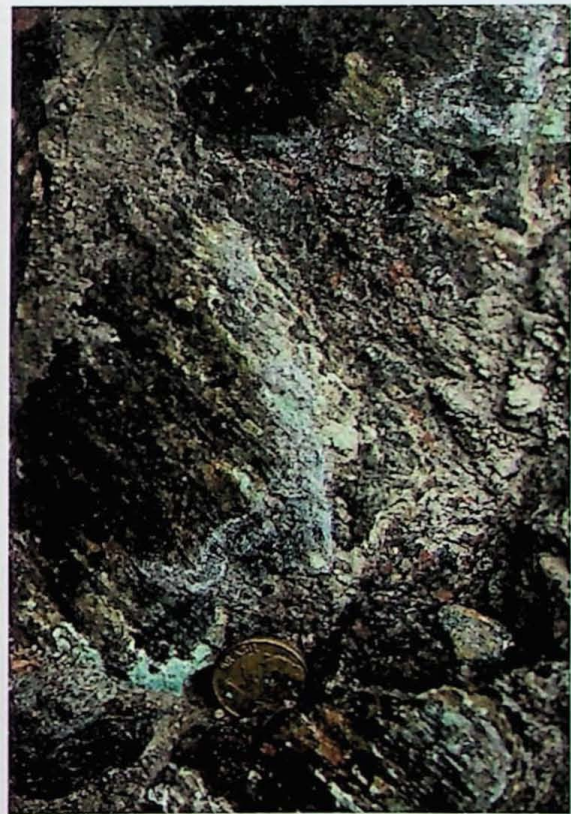
B



C

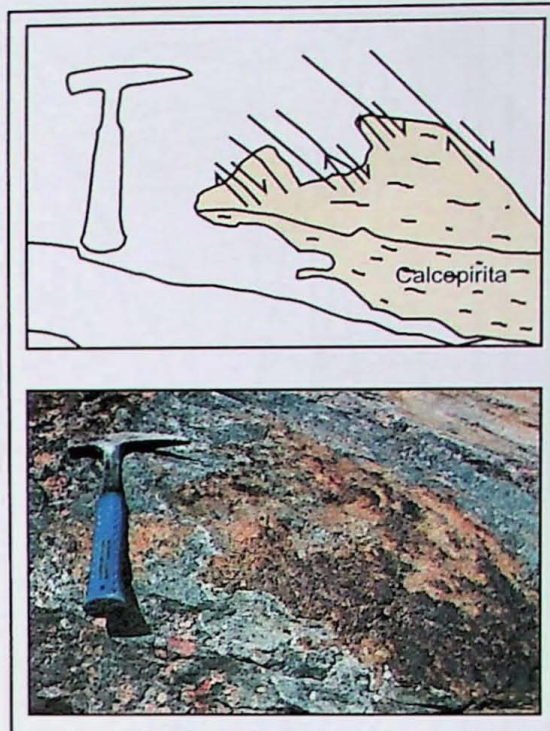
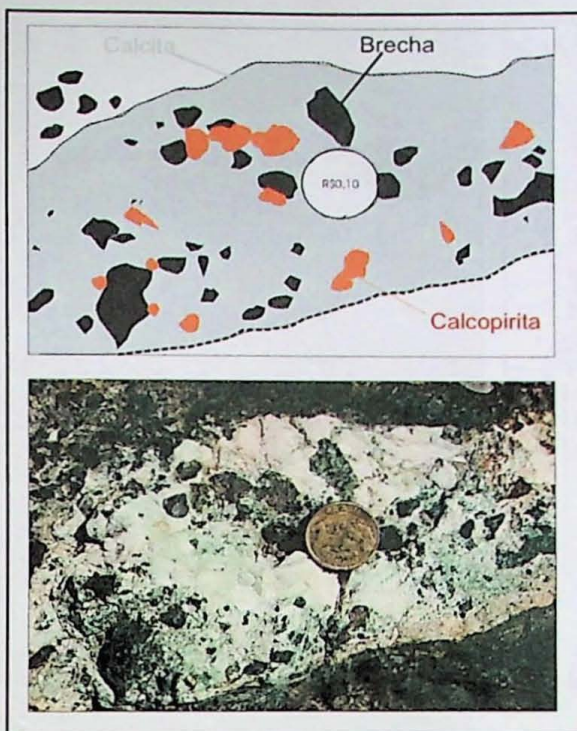


D

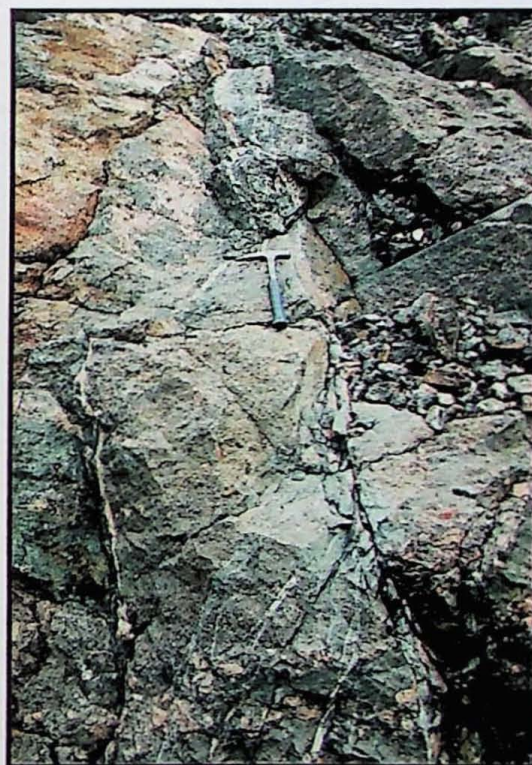
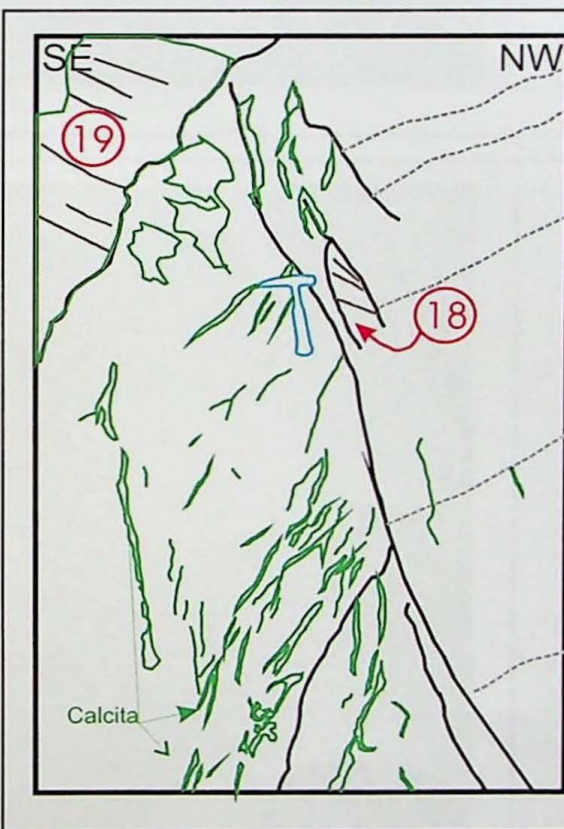


E

Prancha 8: A) veios mineralizados em calcita, bornita e calcopirita; B) plano de falha estriado com mineralização de hematita; C) fratura tipo T preenchida por barita e brecha tectônica; D) brechamento e venulação calcítica próximas a espelho de falha; E) plano de falha com duas gerações de estrias, uma delas sendo preenchida por calcita. As estrias mais novas, preenchidas por carbonato apresentam atitude $230/52/20$ L S DC 3, enquanto que as mais velhas apresentam atitude $230/52/10$ L D DS 1.

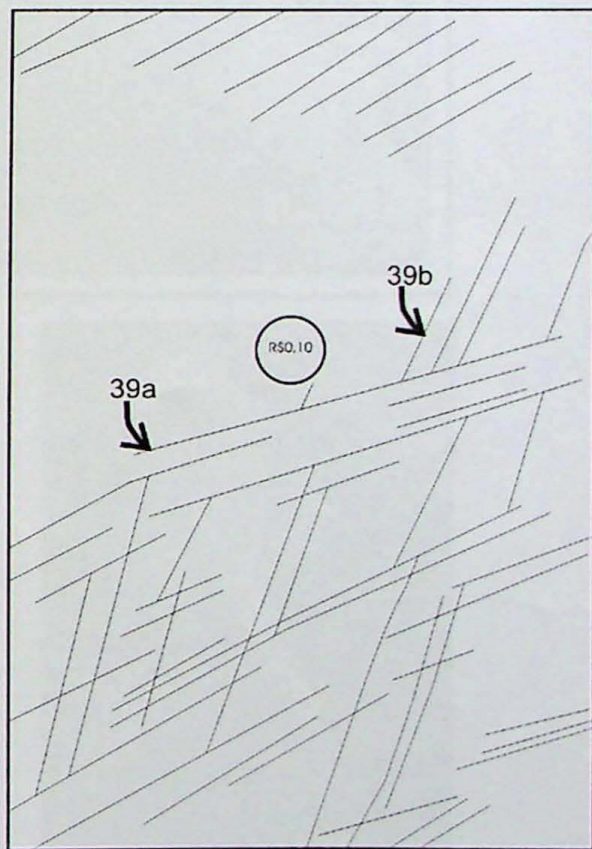
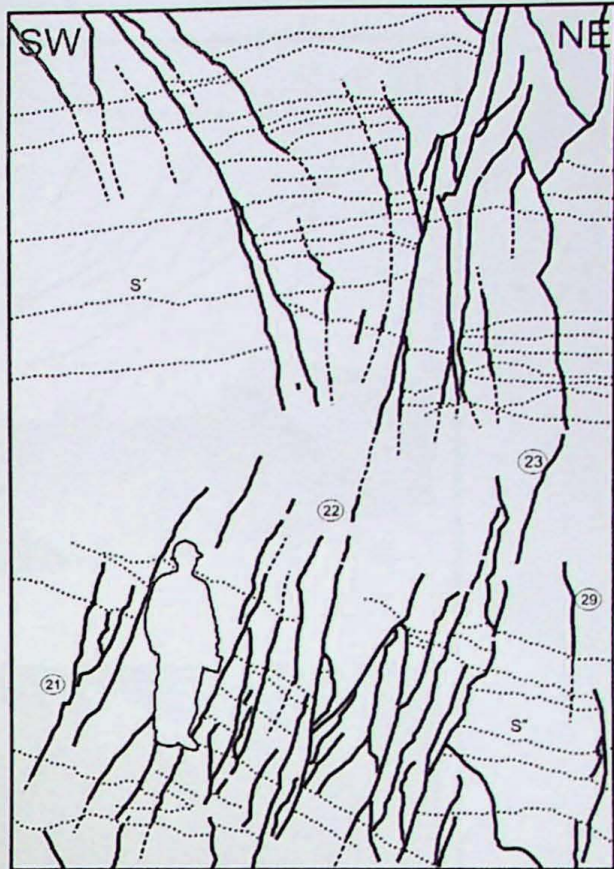
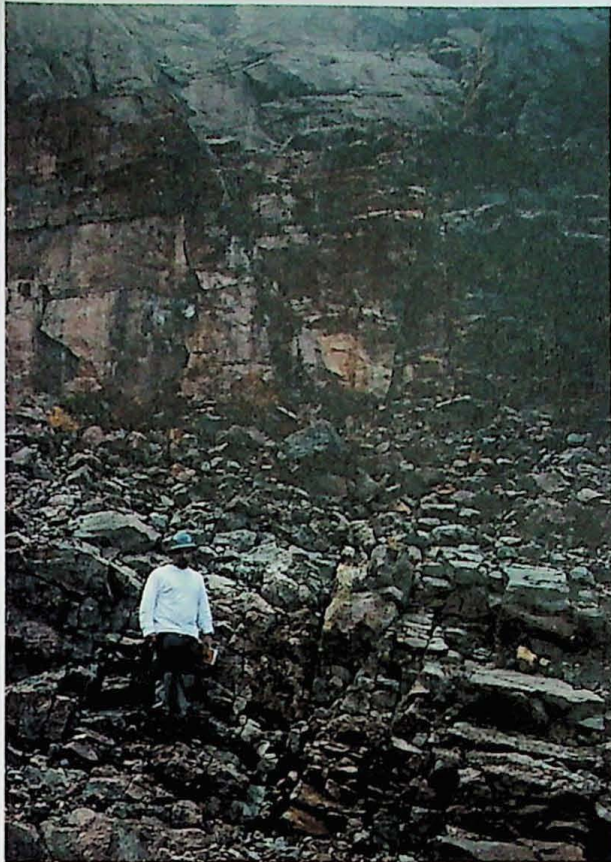


A

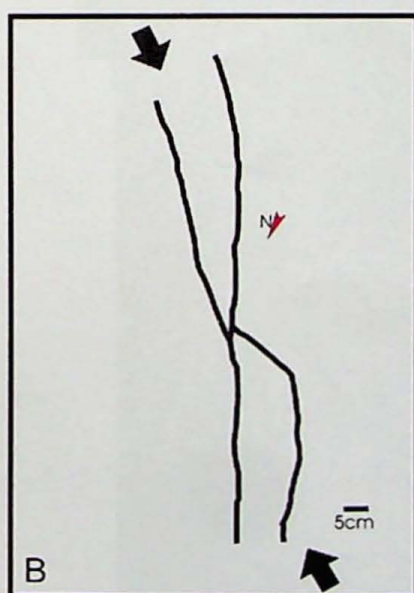
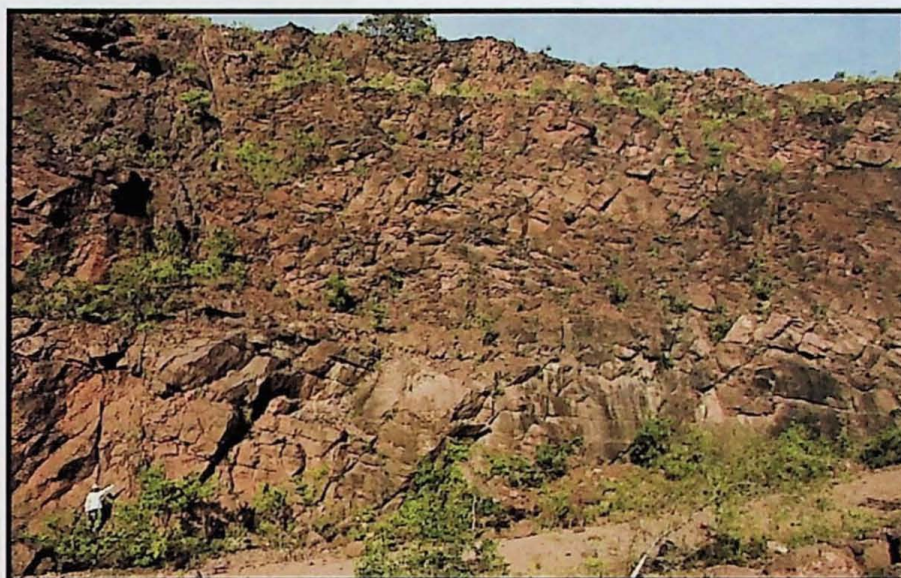
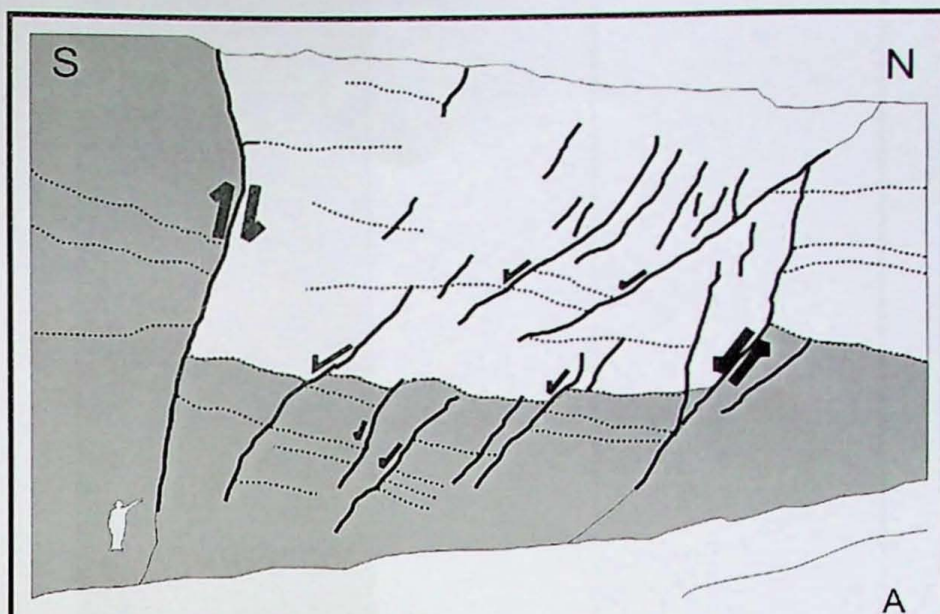


C

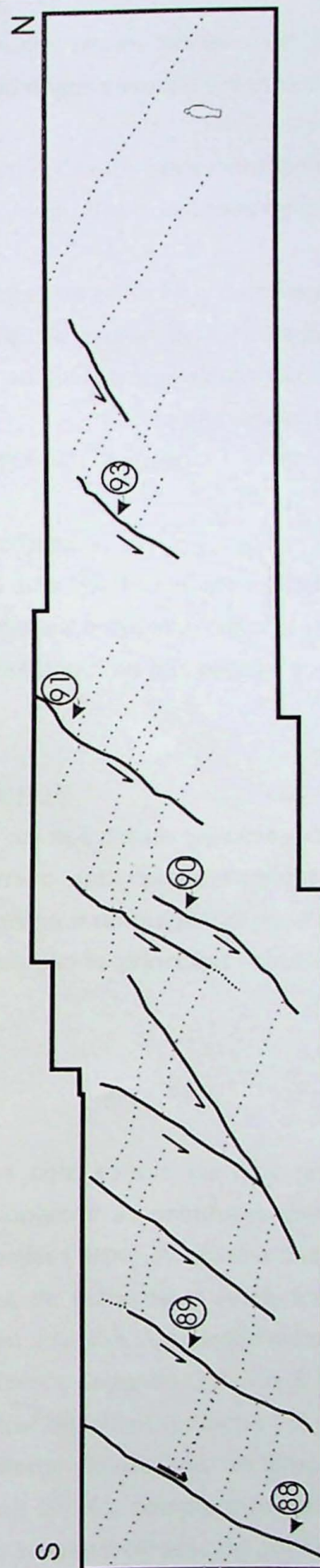
Prancha 9: A) Foto: Brecha Tectônica em veio de calcita, mineralizado em calcopirita. Observa-se a grande quantidade de malaquita. B) Plano de falha com estrias preenchidas por calcopirita com atitude 230/49//60L N DC 3. C) Veio de calcita e sulfeto preenchendo fraturas associadas a planos de falhas. Medidas 18 e 19 aparecem em laranja, com atitudes respectivamente 198/58//15 R D DC 3 e 223/51//00 D DC 3 com fibras preenchidas por calcita. As estrias são as linhas contínuas cinzas.



Prancha 10: A) estrutura em flor com as respectivas medidas apontadas: 21) 230/65, 22) 023/68, 23) 032/55, 29) 225/75; B) relação de corte entre estrias com atitudes 39a) 006/61//25 R D DS 2 cortando 39b) 006/61//60 R N DS 1.



Prancha 11: A) sistema de falhas normais em série e sua interpretação cinemática; B) fratura tipo T indicando compressão NW. As setas pretas indicam a direção do esforço principal.



Prancha 12: sistema de falhas normais na Zona Uruguai. As medidas são indicadas na imagem. 88) 198/85//45 L N SE 3; 89) 217/56//85 R N DS 2; 90) 212/41//40 L N SE 3; 91) 190/42//75 L N DS 1; 93) 185/75//80 D N SE 3.

As coordenadas UTM de áreas que incluíam algum número de medidas foram registradas, ressaltando que várias estruturas encontravam-se a uma distância menor que a do erro do próprio GPS.

Dados de sensoriamento remoto foram utilizados para extração de lineamentos estruturais. Tais dados foram confrontados e integrados aos dados de campo.

Tratamento de dados

Após o campo, o trabalho concentrou-se na reflexão e comparação dos dados obtidos com os dados exibidos na literatura. Seguiu-se a computação de todos os dados e pesquisa bibliográfica focalizando artigos sobre paleotensão publicados em periódicos especializados, assim como artigos sobre a região específica das minas. Os dados foram também plotados em plataforma GIS usando-se como base o mapa fornecido pela CBC.

Na parte final do trabalho, foram realizados os processamentos computacionais dos dados que geraram campos de paleotensão que foram interpretados e discutidos entre professores e aluno. Foi confeccionada para o trabalho uma coluna estratigráfica FIGURA! e foram interpretadas as fácies sedimentares das rochas que abrigavam as estruturas na região.

Processamento dos dados no programa TENSOR

Os dados estruturais coletados em campo foram processados no programa TENSOR segundo dois métodos: um primeiro onde processamos todos os dados adquiridos como pertencentes a um único grupo e um segundo onde os dados foram separados de acordo com sua posição em relação às principais estruturas.

Dados da Zona Piritas

Método 1

Ao tratar todos os dados de falhas com estrias num só grupo, aplicamos diferentes orientações de esforços e selecionamos as estruturas que pudessem ser agrupadas em famílias de falhas *sensu* Angelier (1994). A escolha das orientações de esforços iniciou-se com o teste de regimes de esforços já relatados em diferentes eventos descritos na literatura e que afetaram a região. Aplicamos métodos rotacionais para um melhor ajuste de orientação de esforços segundo Delvaux & Sperner (2003). Pudemos assim dividir um total de seis famílias de falhas (prancha 13).

Uma família foi relacionada a um esforço distensional de direção NE, com σ_1 apresentando atitude 89/121, σ_2 01/301 e σ_3 00/211, compreendendo um número de dez dados. Foram interpretados como grupo semelhante descrito por Almeida (2005), relacionado à distensão NE de idade Cretácea.

Outra família de falhas separadas pelo método apresenta doze dados de falhas com estrias com cinemática associada a regime de esforços transcorrentes decorrentes de uma compressão NE, com eixos de esforços apresentando as seguintes atitudes: σ_1 22/049, σ_2 52/287 e σ_3 29/152. Pode estar associado tanto à compressão NE do começo do Triássico como à compressão NE de 545 Ma, identificados por Almeida (2005) e Tomba (2006).

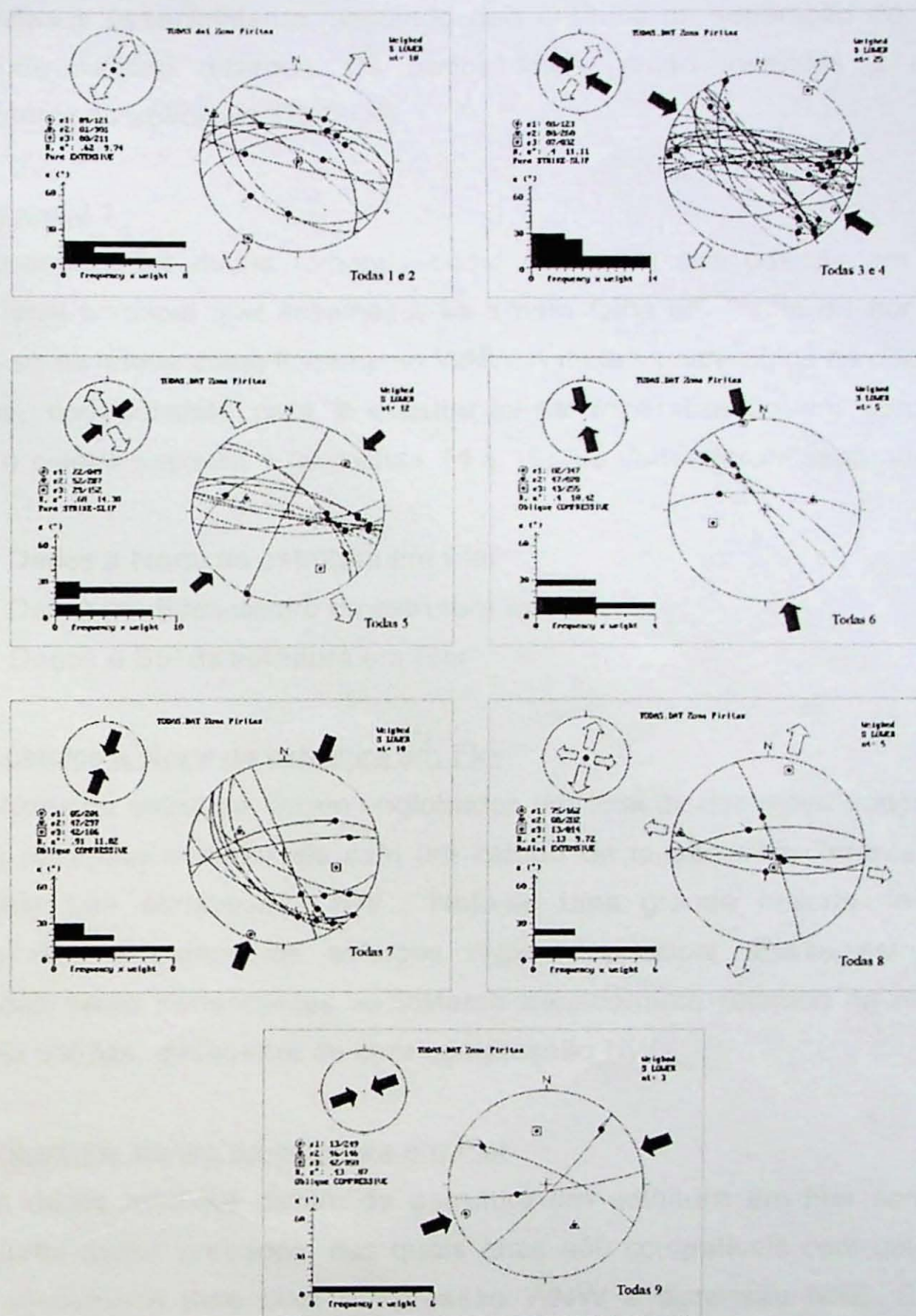
Uma família de dez falhas dados com estrias apresenta cinemática relativa a regime compressivo oblíquo com eixos de esforços σ_1 05/201, σ_2 47/297 e σ_3 42/106. A compressão responsável apresenta direção NE, representando provavelmente o mesmo evento registrado pelas estruturas transcorrentes com esforço principal σ_1 no quadrante NE.

A principal família de falhas envolveu ao todo vinte e cinco dados de falha com estria. O tratamento aplicado através do programa TENSOR indicou um regime de esforços tipo transcorrente puro, com σ_1 apresentando atitude 08/123, σ_2 80/260 e σ_3 07/032. Foi relacionado ao sistema transcorrente interpretado na região como ocorrido há 530 Ma, decorrente de uma compressão NW (Almeida 2005).

Um outro grupo com apenas cinco dados apresenta cinemática derivada de regime compressivo oblíquo decorrente de compressão NNW. O eixos de esforços obtidos pelo método apresentam as seguintes atitudes: σ_1 02/347, σ_2 47/078 e σ_3 43/255. Provavelmente esta família é resultado de rotação de blocos localizados pela progressão da compressão NW registrada pela segunda família.

Uma última família de dados apresentou distensão radial, com eixo distensivo principal com direção NNE. Porém o reduzido número de dados, cinco, nos leva a descartar tal família da relação de dados.

A seguir, adotamos um método de separação de grupos de falhas por critério espacial.



Prancha 13: paleocampos de tensão obtidos pelo critério segundo o qual os dados foram reunidos primeiramente num só conjunto. Depois de analisados, foram separadas as famílias de falhas coerentes com os esforços acima representados.

Método 2 – Critérios Espaciais

Adotamos o mapa da mina fornecido pela CBC escala 1:1000 como base de dados. Os pontos de campo foram plotados em plataforma SIG através de localização em coordenadas UTM obtidas com o auxílio de um GPS. Separamos os dados em grupos limitados espacialmente, seguindo dois critérios de separação de pontos de obtenção de medida distintos. Os dados foram então inseridos e analisados separadamente no aplicativo TENSOR.

Critério Espacial 1

Separamos os dados tomando como referência sua posição em relação à estrutura local principal que assemelha-se a uma falha em forma de flor positiva e manifesta-se no relevo como lineamento WNW. A mina foi construída na direção desse lineamento, corroborando para a orientação da mineralização em corpos WNW. Segundo o critério espacial 1 (pranchas 14 e 15), os dados foram separados em três grupos:

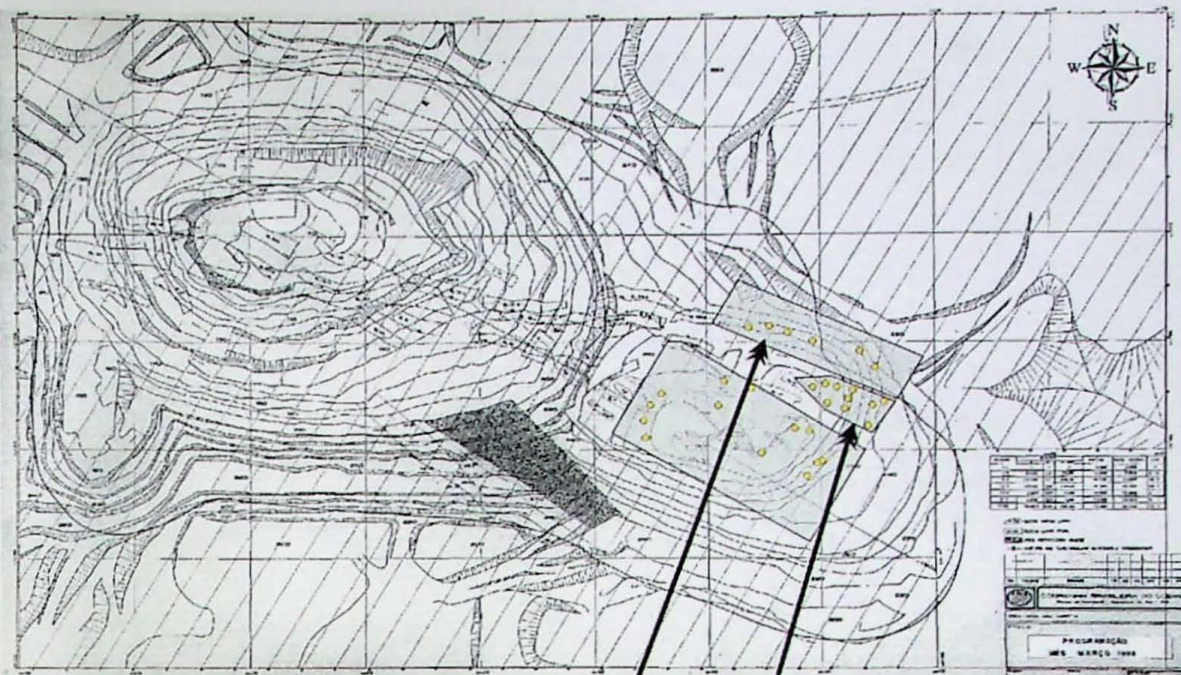
- A. Dados a Norte da estrutura em Flor
- B. Dados medidos dentro da estrutura em Flor
- C. Dados a Sul da estrutura em Flor

A. Dados obtidos a Norte da estrutura em Flor

A Norte da estrutura, foram englobados um total de dezenove dados pareados dos quais onze são compatíveis com um campo de tensão transcorrente distensivo (transtrativo) com compressão NW. Nota-se uma grande maioria de estruturas coerentes com o campo de esforços regional principal. Essas estruturas são interpretadas como pertencentes ao sistema transcorrente relatado na região como ocorrido há 530 Ma, decorrente de uma compressão NW.

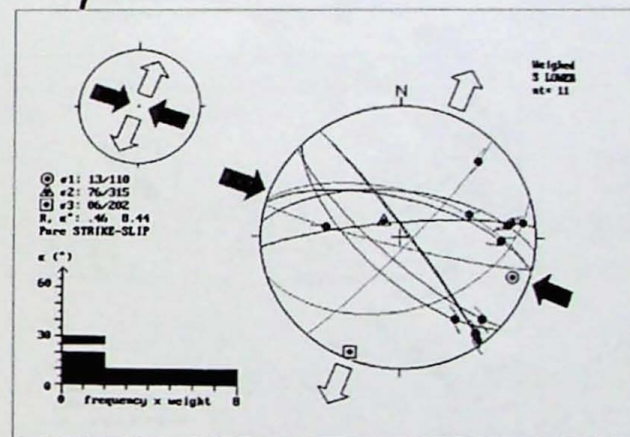
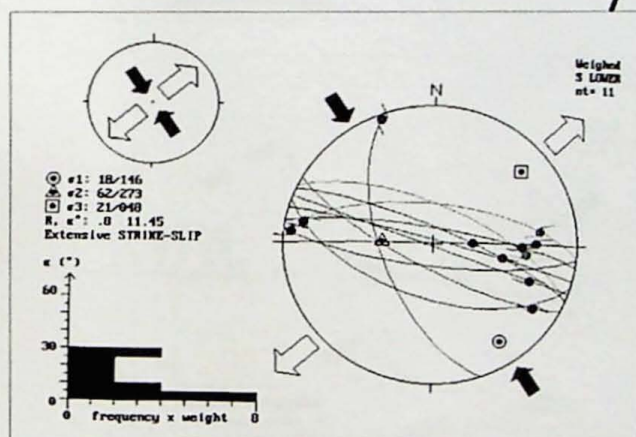
B. Dados medidos dentro da estrutura em Flor

Os dados medidos dentro da estrutura em estrutura em Flor compreendem vinte e quatro dados pareados, dos quais onze são compatíveis com um campo de tensão transcorrente puro com compressão WNW e distensão NNE. Este evento também estaria relacionado ao sistema transcorrente interpretado na região como ocorrido há 530 Ma, decorrente de uma compressão NW.

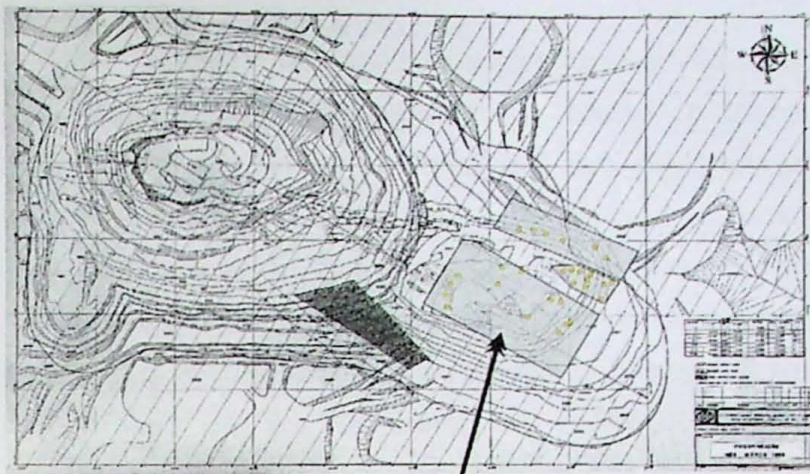


Legenda:

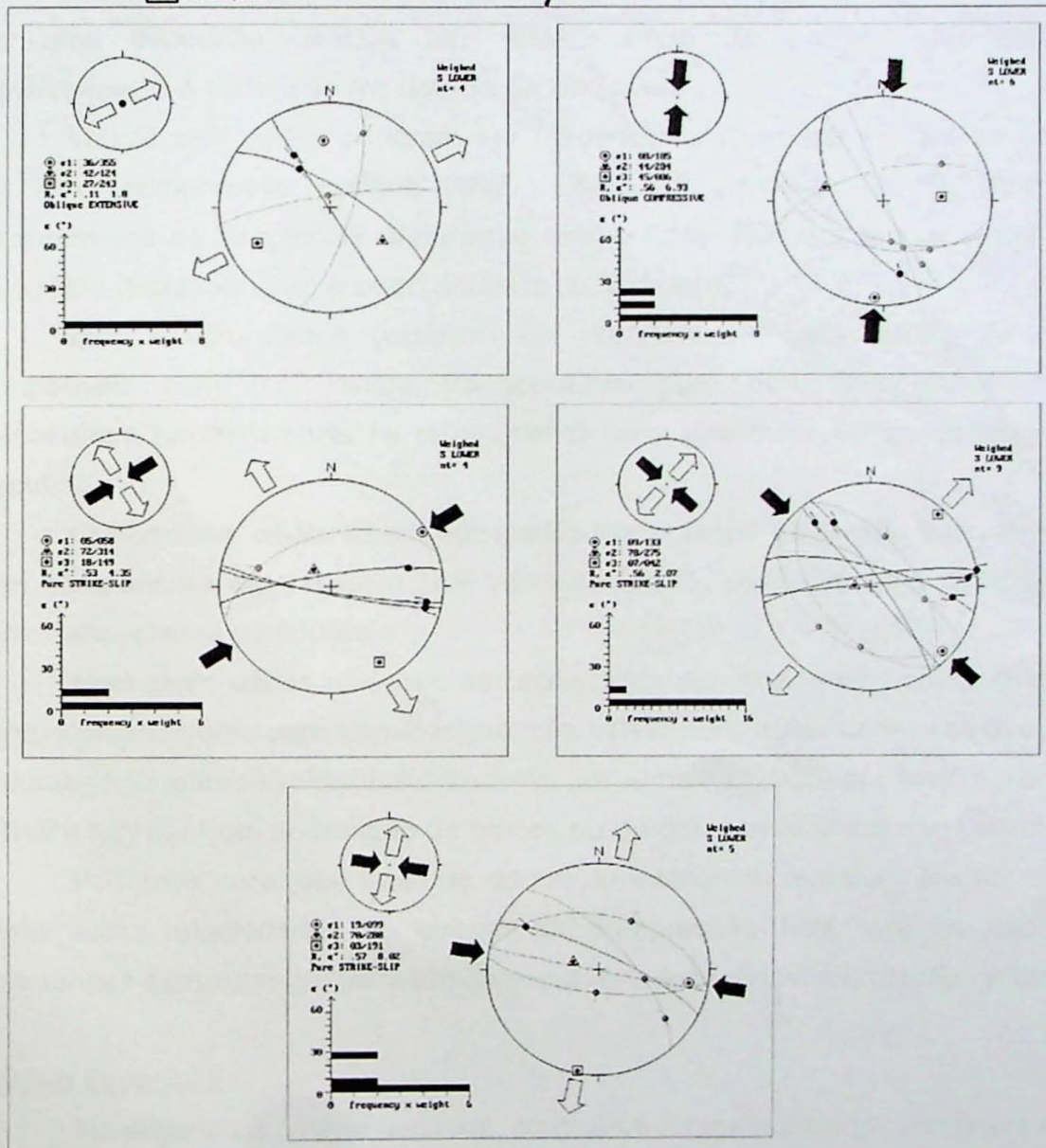
- Pontos de Campo
- Critério Espacial 1



Prancha 14 :Acima, mapa da Mina Uruguai com pontos de campo. As três áreas selecionadas em cinza representam os grupos do critério espacial 1. Abaixo, os paleocampos de tensão obtidos, plotados em diagrama de igual área, hemisfério inferior. As setas pretas nos diagramas representam o campo de tensão máximo..



Legenda:
 ● Pontos de Campo
 ■ Critério Espacial 1



Prancha 15: Acima, mapa da Mina Uruguai com pontos de campo. As três áreas selecionadas em cinza representam os grupos do critério espacial 1. Abaixo, os paleocampos de tensão obtidos, plotados em diagrama de igual área, hemisfério inferior. As setas pretas nos diagramas representam o campo de tensão máximo..

C. Dados obtidos a Sul da estrutura em Flor

A Sul da estrutura em Flor, foram reunidos trinta e três dados pareados que não puderam ser reunidos em apenas um campo de tensão, (prancha 16). Pelo contrário, são diversos os campos de tensão possíveis que abrigam estruturas em menor número. A grande diversidade de direção de estruturas nos leva a conjecturar diferentes fases de deformação que atingiram, ao que parece, mais a zona a Sul da estrutura em Flor do que as outras regiões da Mina. Resultados obtidos mostram tensores oblíquos, o que sugere também rotação de blocos. Talvez possamos afirmar que a Sul da estrutura em flor, as estruturas sofreram uma pronunciada rotação, ocasionando as direções quase caóticas de regimes de esforços.

Quatro dados puderam ser agrupados em um campo de tensão caracterizado por uma distensão oblíqua NE. Este campo de paleotensões relaciona-se provavelmente à distensão NE datada do Cretáceo.

Outros seis dados puderam ser agrupados em um campo que se caracteriza por uma compressão oblíqua NNE. Segundo Almeida (2005), dois eventos compressivos de direção NE afetaram o Grupo Santa Bárbara: um de idade em torno de 535Ma (Eocambriano) e outro datando do Triássico.

Mais quatro dados puderam ser reunidos em uma família de estruturas compatíveis com um campo transcorrente puro com compressão NE. Este paleocampo também pode se relacionar a uma das duas compressões NE acima discutidas.

Outros nove dados foram agrupados num campo de tensão transcorrente puro com componente compressivo NW. Almeida (2005) descreve uma compressão NW com idade relativa de 530Ma.

Mais cinco dados puderam ser agrupados em uma família compatível com um campo transcorrente puro com compressão WNW. Estruturas com essa direção foram incluídas no mesmo evento das anteriores por Almeida (2005) podendo a dispersão de WNW a NW ser fruto de rotação de blocos ou de um evento ainda não descrito.

Pudemos notar que tanto os dados do interior da estrutura em flor como os a Norte estão relacionados ao evento de compressão NW. Já os dados a Sul apresentam estruturas geradas em diversos eventos e possível rotação de blocos.

Critério Espacial 2

No segundo o critério espacial, os grupos foram separados em áreas com raios de no máximo 50m (para manter uma homogeneidade estrutural, seguindo as recomendações de Hancock 1985), seguindo formas poligonais e resultando em um

total de 8 grupos. Tal agrupamento buscou evitar interações relativas entre blocos e planos de falha (vide Pollard et al., 1993; Twiss and Unruh, 1998).

Alguns grupos apresentaram dados compatíveis com campos de tensão específicos, porém alguns grupos apresentaram dados extremamente díspares quanto a possíveis campos de tensão em comum, sendo considerados espúrios, como descrito a seguir.

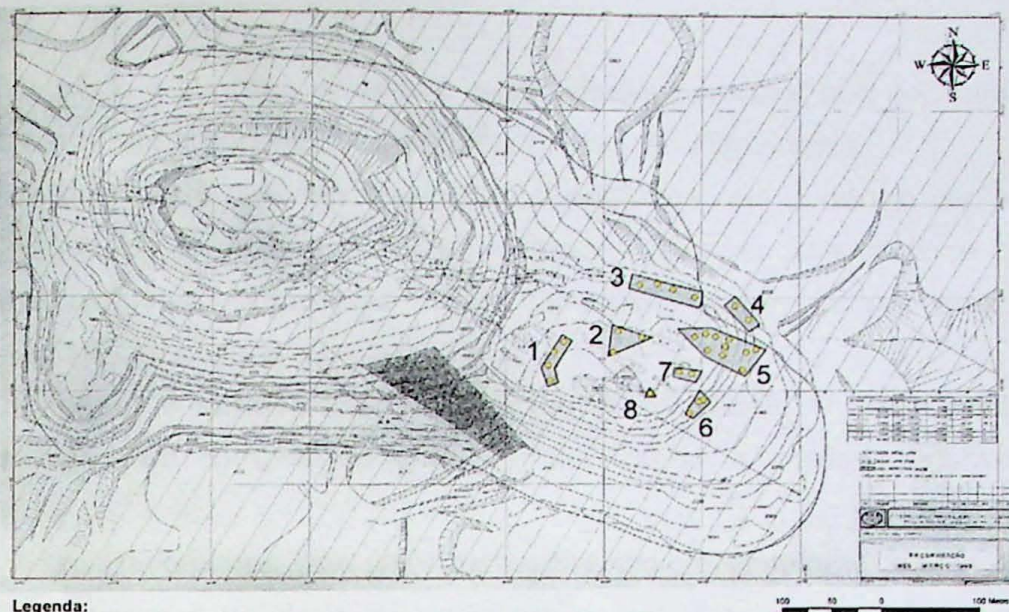
O grupo 1 segundo este critério apresenta oito dados pareados de falhas com estrias que não puderam ser encaixados em apenas um ou dois campos de tensão, lembrando que são necessários no mínimo quatro dados pareados para determinar um campo.

O grupo 2 apresenta treze dados de falhas com estrias, dos quais cinco são compatíveis com um campo de tensão transcorrente distensivo (transtrativo) com Compressão NE. Segundo ALMEIDA (2005), dois eventos compressivos de direção NE afetaram o Grupo Santa Bárbara: um de idade em torno de 535Ma (Eo-Cambriano) e outro datando do início do Triássico.

O grupo 3 apresenta quinze dados pareados que puderam ser reunidos em nove estruturas conjugadas ou ativadas por um campo de tensão transcorrente compressivo (transpressivo) com compressão NW. Foi relatado na região um evento compressivo com direção NW datando de 530Ma.

O grupo 4 apresenta quatro dados pareados que geraram um campo oblíquo puro, não apresentando nenhum campo de tensão significativo.

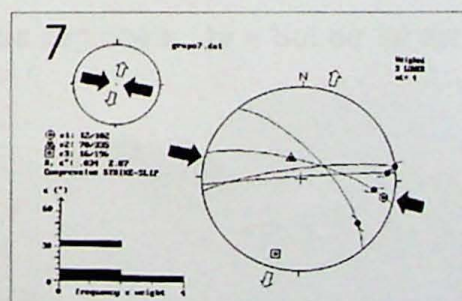
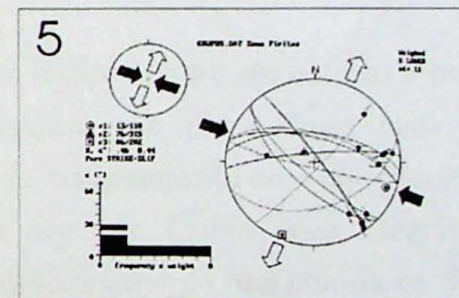
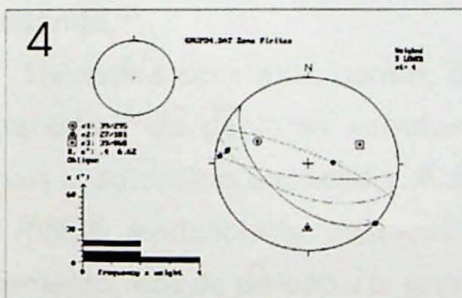
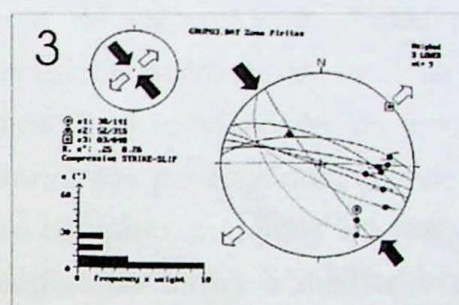
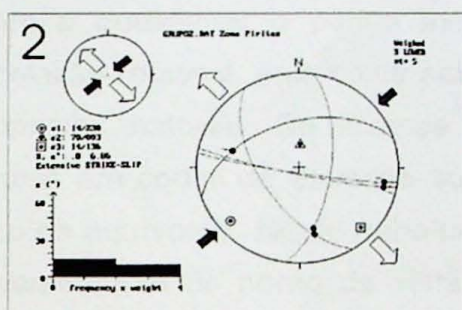
O grupo 5, que compreende os dados obtidos dentro da estrutura em flor propriamente dita, apresenta vinte e quatro dados pareados que puderam ser reunidos em onze estruturas conjugadas ou pareadas compatíveis com um campo de tensão transcorrente puro com compressão WNW. Tal evento estaria relacionado à compressão NW de 530Ma ou ainda seria fruto de diversos esforços transcorrentes relatados na região.



Legenda:

● Pontos de Campo

■ Critério Espacial 2



Prancha 16: Acima, mapa da Mina Uruguai com pontos de campo. As três áreas selecionadas em cinza representam os grupos do critério espacial 2. Abaixo, os paleocampos de tensão obtidos, plotados em diagrama de igual área, hemisfério inferior. As setas pretas nos diagramas representam o campo de tensão máximo..

O grupo 6 também apresenta quatro dados pareados que geraram um campo oblíquo puro, não apresentando nenhuma orientação significativa.

Já o grupo 7 apresenta seis dados pareados que puderam ser reunidos em quatro estruturas compatíveis com um campo de tensões transcorrente compressivo (transpressivo) com compressão WNW. Tal evento, assim como o grupo 5, estaria relacionado à compressão NW de 530Ma.

O grupo 8 também não apresentou número de estruturas mínimo para a caracterização de campos de esforços, finalizando a análise segundo o critério espacial.

A análise segundo este critério espacial não ofereceu grandes resultados e nos leva a questionar a validade da aplicação de tal método, uma vez que os dados puderam ser melhor compreendidos através do primeiro critério espacial. Nos leva também a questionar o perigo inerente à utilização de dados pontuais para extrapolação regional, pois como sabemos dados de falhas com estrias são raros em afloramentos naturais. Se ficamos sujeitos à ocasionalidade do encontro de tais estruturas em cortes de estradas ou afloramentos privilegiados, grande parece ser a chance de equívocos. Neste trabalho, pelo contrário, pudemos usufruir um corte feito conscientemente do ponto de vista geológico de forma a melhor expor o alvo da mineração, que para nossa sorte está acompanhando as estruturas regionais e as aproveitando.

Devemos constatar, porém, que os dados dentro da estrutura principal e mais representativa da geologia estrutural regional são compatíveis com os resultados regionais e do critério espacial 1. A zona de cisalhamento com direção WNW aflora na Zona Piritas evidenciada pela estrutura em flor. Como área central da zona de cisalhamento, era de se esperar grande rotacionamento nos planos de fratura gerados no interior da estrutura. Porém os dados medidos e analisados mostram grande coerência com os dados regionais. Já a Sul de tal estrutura, os dados parecem indicar uma possível rotação.

ZONA URUGUAI

Os dados pareados de falhas com estrias são, nessa cava, muito mais escassos. Devido ao reduzido número, não se pode aplicar critério de separação espacial, sendo todos os dados tratados em conjunto. Ao processá-los no programa TENSOR, obtivemos dois campos transcorrentes puros com componente compressional variando de NW-SE a WNW-ESSE, compatível com o evento Eocambriano relatado anteriormente (prancha 17A). As estruturas apresentam um mergulho preferencial para SW e apresentam em sua maioria rejeitos normais a transcorrentes destrais. Nas pranchas 11 e 12 podemos notar as falhas mergulhando para Sul, em cinemática aparente normal.

Relações cronológicas de corte entre estrias

A compressão NW, relatada em trabalhos na região como em Almeida (2005), foi datada em ~530Ma, por correlação com idade obtida para a suíte Intrusiva Rodeio Velho, unidade mais nova afetada pelo evento. Todas as relações de corte entre estrias em planos de falhas apontaram esse evento transcorrente como o mais antigo entre os campos de tensão obtidos através do tratamento de dados apresentado neste trabalho. Os campos de tensão relativos a uma Compressão NNE, uma Distensão NNE e uma Compressão NNW seriam portanto todos mais novos que 530Ma, ou seja, ocasionados por eventos Fanerozóicos. São relatados na região (Almeida 2005, Tomba 2006) uma compressão NE Triássica e uma distensão NE de idade Cretácea nas quais podemos facilmente encaixar os campos acima.

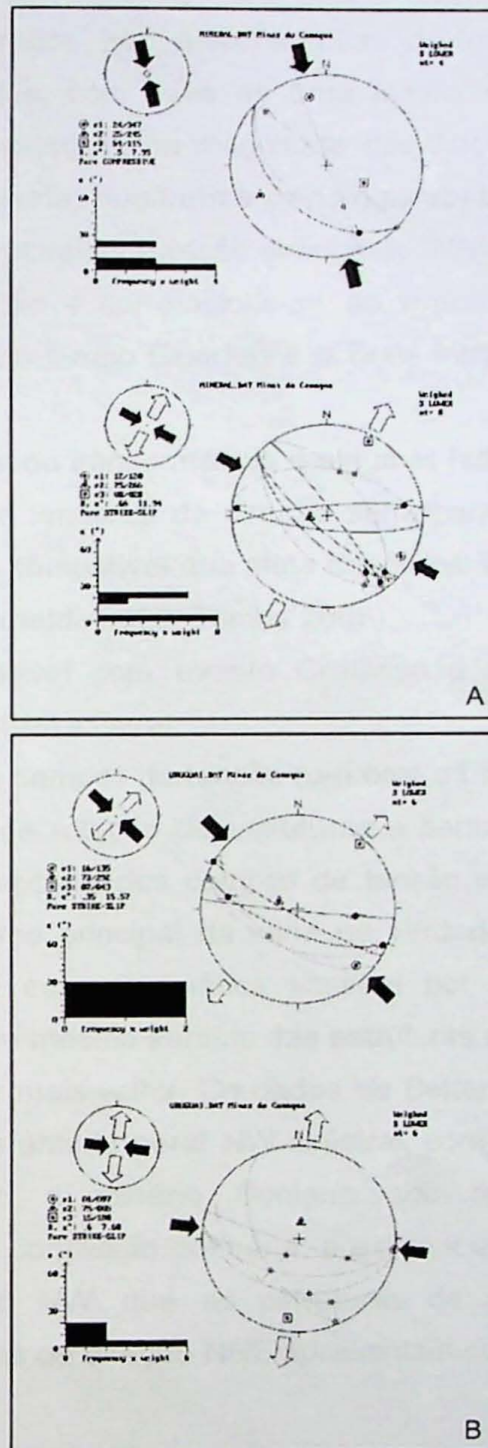
Como foi constatado, ocorre uma compressão NNW mais nova que a compressão NW. Isso pode evidenciar um esforço principal da mina na verdade com direção NNW com cinemática sinistral por binário transcorrente N-S, implicando uma rotação de mesmo sentido das estruturas medidas, (prancha 17B).

Relação entre estruturas e mineralizações

As ocorrências minerais das Minas do Camaquã são, como já dito anteriormente, fortemente controladas pela estrutura rúptil das rochas hospedeiras. Concentram-se em grande maioria nas estruturas de direção NW-SE a WNW-ESSE. São abundantes os exemplos de brechas tectônicas mineralizadas e de estruturas T preenchidas. A cinemática interpretada varia entre estruturas transcorrentes destrais e estruturas normais também destrais.

Tratando separadamente os dados referentes às estruturas mineralizadas, pudemos distinguir dois campos de tensão distintos. Um campo de tensão transcorrente com componente compressivo NW incluiu o maior número (oito) de estruturas mineralizadas com indicadores cinemáticos (prancha 18). Um segundo campo, compressivo com σ_1 NNW, apresentou quatro estruturas mineralizadas compatíveis. Como se encontram em uma zona de intenso cisalhamento, é possível que estas estruturas sejam também fruto de uma compressão NW que teriam sofrido rotação em um eixo vertical, causada pelo cisalhamento transcorrente (prancha 19).

Comparando com os campos de tensão obtidos nos métodos anteriores e sua interpretação geocronológica, é possível dizer que a mineralização das Minas do Camaquã teria se inserido em suas rochas hospedeiras durante o evento deformador interpretado por Almeida (2005) como de idade em torno de 530Ma.



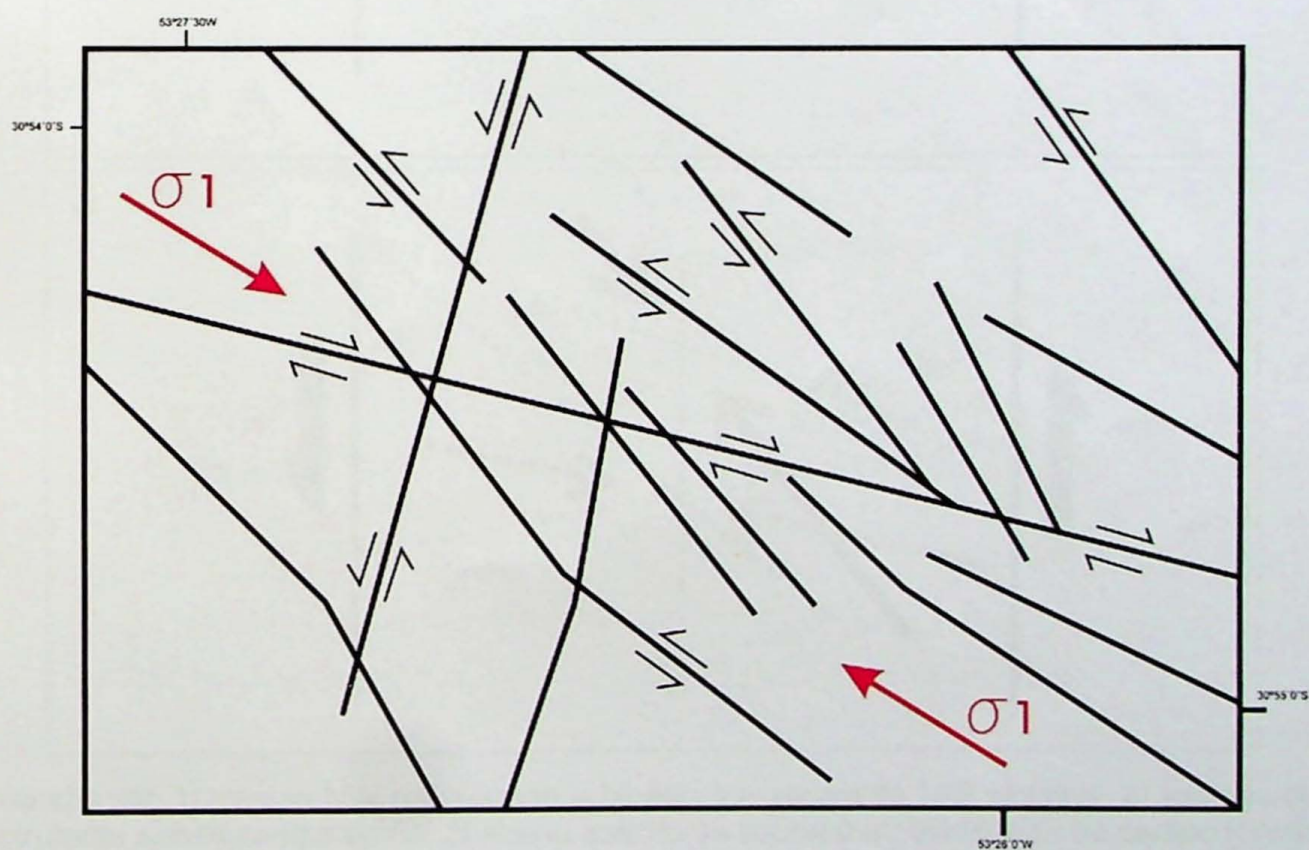
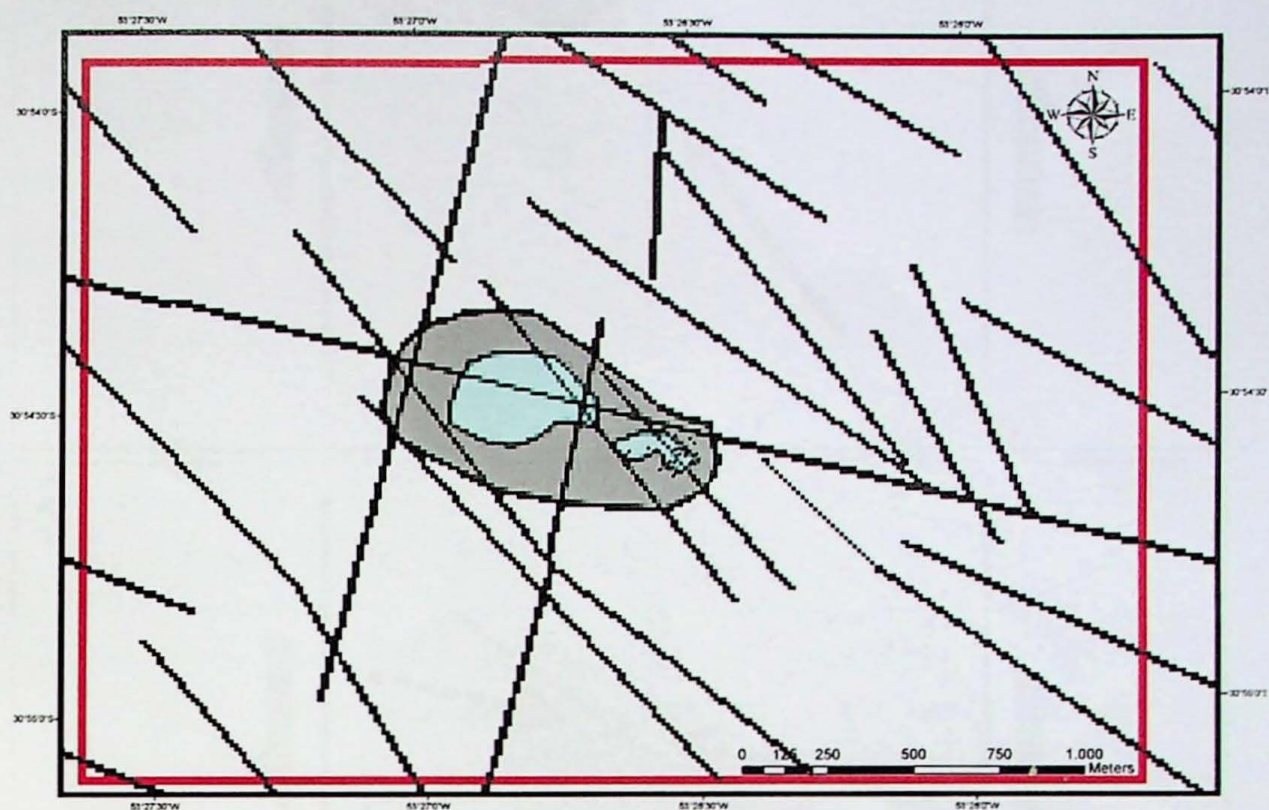
Prancha 17: A) Paleocampos de tensão obtidos com os dados de campo da Zona Uruguai; B) Paleocampos de tensão obtidos com os dados de todas as estruturas de falhas preenchimento mineral.

7. Interpretação e discussão dos resultados

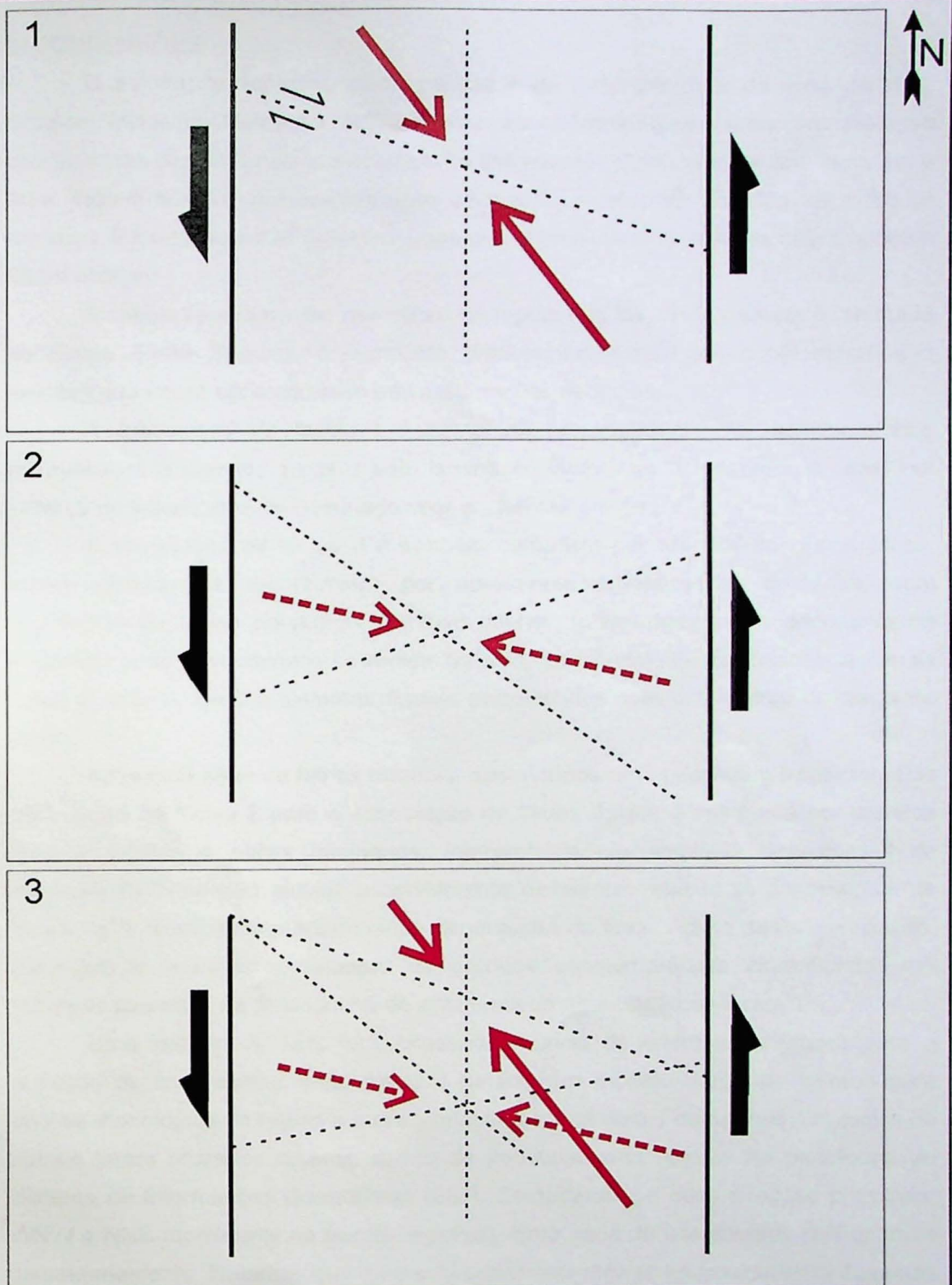
A análise de paleotensões revelou, tanto no conjunto total de dados quanto na análise de grupos separados por área, famílias de estruturas que podem ser agrupadas em três eventos, com mais de uma família em alguns eventos sendo resultado de rotação ou variações na magnitude dos vetores, mantidas as direções. Relações de cortes entre estrias sugerem a cronologia abaixo:

1. Compressão NW, com possível rotação simulando WNW. Esta fase é diretamente relacionada à mineralização e correlaciona-se ao evento de ~530Ma descrito por Almeida (2005), que afeta o Grupo Guaritas e a Suíte Intrusiva Rodeio Velho, datada de 535Ma.
2. Compressão NE, causando transcorrência e algumas falhas inversas e oblíquas por variação de magnitude de tensores de direção semelhante. Este evento deve estar relacionado à deformação compatível que afeta depósitos Triássicos do Grupo Rosário do Sul a Leste da área (Almeida 2005, Tomba 2006).
3. Distensão NE, compatível com evento Cretáceo e com colocação de diques relacionados à Formação Serra Geral.

A distinção de dois campos de tensão (um com σ_1 NNW e outro com σ_1 NW) é provavelmente resultado de rotação de estruturas a partir de um eixo vertical ou de variações espaciais e temporais dos campos de tensão em um mesmo evento. Isso pode evidenciar um esforço principal da mina na verdade não com orientação NW, mas com direção NNW com cinemática sinistral por binário transcorrente N-S, implicando uma rotação de mesmo sentido das estruturas medidas e explicando o fato de a compressão NW ser mais velha. Os dados de Bettencourt & Damasceno (1974) apontam para fraturas de atitude geral NW sinistral, com mergulhos para SW e NE, que teriam concentrado o minério filoniano sob regime transtrativo. Nossa interpretação nos levou à conclusão contrária: a existência de um esforço principal de deformação com direção NW, que as estruturas de direção WNW apresentam cinemática dextral e que as de direção NNE apresentam cinemática sinistral (pranchas 18 e 19).



Prancha 18: Detalhe da região das Minas do Camaquã, aparecendo ao centro as duas cavas. Os dados de extração regional de lineamentos foram relacionados com os dados obtidos pelo trabalho, resultando na cinemática apresentada. O esforço principal é representado pelas setas vermelhas.



Prancha 19: 1) campo NW relacionado a binário transcorrente N-S sinistral; 2) rotação de estruturas simula campo WNW; 3) Novas estruturas sobrepõem evidências de campo NW às estruturas rotacionadas que simulam WNW. As setas vermelhas contínuas indicam a direção do esforço principal σ_1 . As setas pontilhadas representam σ_1 rotacionado.

8. CONCLUSÕES

O estudo de aspectos estratigráficos e de tectônica rúptil da área da Mina Uruguai, Minas do Camaquã, RS, permitiu reconhecimento de fácies, interpretação dos sistemas deposicionais, caracterização dos eventos deformadores que afetaram a área, individualizados por paleocampos de tensão, e relações cronológicas entre os mesmos. Inferências sobre o evento responsável pela mineralização de cobre também foram obtidas.

A sucessão sedimentar que aflora na região das Minas do Camaquã, atribuída ao Grupo Santa Bárbara, é composta predominantemente por conglomerados e arenitos que foram agrupados em três associações de fácies.

A associação de fácies I é composta principalmente por conglomerados estratificados e arenitos grossos com laminação incipiente. É interpretada como um sistema de leques aluviais dominados por enchentes-em-lençol.

A associação de fácies II é também composta por arenitos conglomeráticos, porém distingue-se da primeira por apresentar estratificações cruzadas, num predomínio de fácies de regime de fluxo inferior. Interpretada como decorrente de ambiente onde predominam correntes trativas, possivelmente confinadas a canais rasos e amplos. Seriam sistemas fluviais entrelaçados com predomínio de carga de fundo.

Após uma série de falhas normais, observamos uma passagem transicional da associação de fácies 2 para a associação de fácies 3, que é composta por arenitos finos a médios e siltitos laminados. Interpreta-se um ambiente deposicional de planícies de inundação aluvial, possivelmente distais em relação às associações de fácies I e II, localmente predominando decantação de finos. Acima desta associação, começam a aparecer novamente os arenitos conglomeráticos estratificados em camadas pareadas de desmanche de antidunas da associação de fácies 1.

Uma imagem ASTER foi processada através de diferentes métodos para a extração de lineamentos regionais. Foi gerado um modelo digital de terreno para análise morfológica da região e sua correlação com os dados estruturais. Os dados de campo foram cruzados com os dados de sensoriamento remoto via plataforma de Sistema de Informações Geográficas (SIG). Destacaram-se duas direções principais: WNW e NNE (dominante na escala regional). Uma série de lineamentos NW aparece secundariamente. Notamos que a Mina Uruguai encontra-se no truncamento das duas principais zonas de cisalhamento e sua cava se desenvolveu na direção WNW, que abriga a maior parte do minério.

Foram aplicados e testados três métodos de análise de dados estruturais. No primeiro os dados foram inseridos como pertencentes a um único grupo e então foram separadas as famílias referentes a diferentes regimes de esforços. No segundo

método os dados foram separados de acordo com sua posição em relação à estrutura principal da área. Num terceiro método, os dados foram reunidos em grupos confinados a pequenas áreas poligonais. O primeiro e segundo método mostraram-se mais adequados e apresentaram resultados semelhantes entre si.

Através da análise de paleotensões pudemos distinguir três eventos de deformação rúptil com cronologia estabelecida por relações de corte entre estrias e por correlação com estudos regionais embasados em determinações geocronológicas.

O evento mais antigo reconhecido é o evento de compressão WNW a NW, gerador de falhas principalmente transcorrentes, mas também normais e inversas, relacionado à mineralização de sulfetos. Nesse contexto, as fraturas mineralizadas, por vezes relacionadas a falhas com estrias, foram analisadas separadamente. Observamos que estas ocorrem em direções paralelas ao esforço horizontal máximo obtido, configurando um contexto de mineralização em sistema transcorrente, relacionado à abertura de fraturas paralelas à direção de esforço máximo, assemelhando-se a estruturas do tipo T.

Pudemos distinguir também um evento transcorrente com compressão NNW que, através de dados de corte entre estrias, revelou-se mais novo que a compressão NW. A distinção de dois campos de tensão (um com σ_1 NNW e outro com σ_1 NW) é provavelmente resultado de rotação de estruturas a partir de um eixo vertical ou de variações espaciais e temporais dos campos de tensão em um mesmo evento. Isso pode evidenciar um esforço principal da mina na verdade não com orientação NW, mas com direção NNW com cinemática sinistral por binário transcorrente N-S, implicando uma rotação de mesmo sentido das estruturas medidas e explicando o fato de a compressão NW ser mais velha.

Um segundo evento foi responsável por estruturas com cinemática contrária ao primeiro, causado por compressão no quadrante NE. Falhas transcorrentes compatíveis com esse campo de tensões são menos freqüentes que aquelas originadas por compressão no quadrante NW. Relações de corte entre estrias revelam sua posterioridade em relação à deformação principal, sendo provavelmente relacionadas à deformação rúptil com campo de tensões compatível que afeta depósitos Triássicos a leste da área estudada (Almeida 2005, Tomba 2006).

O mais recente evento de deformação reconhecido comporta falhas predominantemente normais geradas por distensão no quadrante NE, de possível idade Cretácea, conforme interpretado para estruturas semelhantes em trabalhos regionais (Almeida 2005, Tomba 2006). Dique básico de direção NNW identificado no entorno da área estudada sugere que este evento pode estar relacionada ao magmatismo Eocretáceo responsável pelos derrames da Formação Serra Geral na região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F.F.M. 1969. Diferenciação tectônica da Plataforma Brasileira. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 23, Salvador, *Anais*, 1:29-46
- ALMEIDA, R. P. 2001. Evolução tectono-sedimentar da Formação Santa Bárbara na Sub-bacia Camaquã Ocidental, RS. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 160 p.
- ALMEIDA, R. P. 2005. Tectônica e Sedimentação do Ediacariano ao Ordoviciano: Exemplos do Supergrupo Camaquã (RS) e do Grupo Caacupé (Paraguai Oriental) (Tese de Doutorado)- Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- ANGELIER, J.; MECHLER, P. (1977) Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en séismologie: la méthode des dièdres droits. *Bulletin de la Société Géologique de France*, v.19, n.6, p.1309-1318.
- ANGELIER J., BERGERAT F. & CHU T.Q. 1990. Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress – 3. A new rapid direct inversion method by analytical means. *Geophysical Journal International*, 103: 363-376.
- ANGELIER, J. 1990. Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress – III. A new rapid direct inversion method by analytical means. *Geophys. J. Int.* 103: 363-376.
- ANGELIER, J. 1994. Fault slip analysis & paleostress reconstruction. In: P.L. Hancock (ed.): *Continental Deformation*. Oxford, Pergamon Press, 53-100.
- ARTHAUD, F. (1969) Méthode de détermination graphique des directions de raccourcissement, d'allongement et intermédiaire d'une population de failles. *Bulletin de la Société Géologique de France*, v.11, n.5, p. 729-737.
- ASHLEY, G. M. 1990. Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem. *Journal of Sedimentary Petrology*, 60:160-172.
- BETTENCOURT, J. S. . Geologia da Mina de Camaquã, RS. 1972 Tese de Doutorado, IG-USP, São Paulo, SP, 267p.
- BETTENCOURT, J. S. ; DAMASCENO, E. C. . Análise tectônica e controles de mineralização no distrito cuprífero de Camaquã, RS.. In: XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia, 1974, Porto Alegre, RS. Boletim de Resumos do XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia, 1974. v. 1. p. 719-723.
- BETTENCOURT, J. S. ; DAMASCENO, E. C. . Análise tectônica e controles de mineralização no Distrito Cuprífero de Camaquã, RS. In: XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia, 1974, Porto Alegre, RS. Anais do XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia, 1974. v. 4. p. 85-105.
- BLAIR, T. C. 1999. Sedimentary processes and facies of the waterlaid Amil Spring Canyon Alluvial Fan, death Valley, California. *Sedimentology*, 1999, 46, 913-940
- BOTT, M.H.P. 1959. The mechanics of oblique slip faulting. *Geol. Mag.* 96: 109-117.
- CAREY-GAILHARDIS, E. & MERCIER, J.L. 1987. A numerical method for determining the state of stress using focal mechanisms of earthquake populations: application to Tibetan teleseisms and microseismicity of southern Peru. *Earth. Planet. Sci. Lett.* 82: 165-179.
- CARVALHO, P. F. 1932. Reconhecimento Geológico no Estado do Rio Grande do Sul: Instit. Geol. e Miner. Do Brasil, Bol. 66, 72p.
- DELVAUX, D.; MOEYS, R.; STAPEL, G.; PETIT, C.; LEVI, K.; MIROSHNICHENKO, A.; RUZHICH, V. & SANKOV, V. 1997. Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia, Part 2. Cenozoic rifting. *Tectonophysics* 282: 1-38.
- DELVAUX, D. & SPERNER, B. 2003. New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. In: D. Nieuwland (ed.). *New insights into structural interpretation and modelling*. Geological Society of London Special Publication 212. 75-100.
- DOBLAS M. 1998. Slickenside kinematic indicators. *Tectonophysics* 295(1-2):187-197.
- DUNNE W.M. & HANCOCK P.L. 1994. Paleostress analysis of small-scale brittle structures. In: Hancock, P.L. (ed.), *Continental deformation*, Oxford, Pergamon Press, p. 101-120.
- FAMBRINI, G.L. 1998. O Grupo Camaquã (Transição Proterozóico-Fanerozóico) na região das Minas do Camaquã, RS: análise estratigráfica de fácies, proveniência e paleocorrentes.

- Dissertação de Mestrado, IGUSP, São Paulo, SP, 182 p (inédito).
- FAMBRINI, G.L. 2003. O Grupo Santa Bárbara (Neoproterozóico III) da Bacia do Camaquã, Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado, IG-USP, São Paulo, SP, 264p.
- FRAGOSO-CESAR, A.R.S. 1991. Tectônica de Placas no Ciclo Brasileiro: as orogenias dos Cinturões Dom Feliciano e Ribeira no Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado, IG-USP, São Paulo, SP, 366 p. (inédito).
- FRAGOSO-CESAR, A.R.S., FACCINI, U.F., PAIM, P.S.G., LAVINA, E.L., ALTAMIRANO, J.A.F. 1985. Revisão na estratigrafia das molassas do Ciclo Brasileiro no Rio Grande do Sul. In: SBG, II Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, Florianópolis, *Anais*, 477-491.
- FRAGOSO-CESAR, A. R. S.; FAMBRINI, G. L.; PAES de ALMEIDA, R.; PELOSI, A.P.M.R.; JANIKIAN, L. – 2003. A Bacia Camaquã: Um Sistema Intracontinental anarogênico de rifts do Neoproterozóico III – Eopaleozóico no Rio Grande do Sul. In: I Encontro sobre A Estratigrafia do Rio Grande do Sul: Escudos e Bacias. *Boletim de Resumos*. 139- 144.
- FRAGOSO-CESAR, A.R.S., SILVA FILHO W.F., FAMBRINI G.L., MACHADO R., RICCOMINI C., ALMEIDA R.P., PELOSI A.P.M.R., JANIKIAN L. 1999. Significado tectônico do magmatismo Rodeio Velho no rift Guaritas (Eopaleozóico do Rio Grande do Sul, Brasil). In: Simpósio sobre vulcanismo e ambientes associados, *Boletim de resumos*, p.16.
- FRAGOSO-CESAR, A.R.S., FAMBRINI G.L., ALMEIDA R.P., PELOSI A.P.M.R., JANIKIAN L., NOGUEIRA, A.C.R., RICCOMINI C., MACHADO R. 2000a. The Neoproterozoic and Eopaleozoic Successions of the Rio Grande do Sul state, southern Brazil: Superposed Basins of the end of the Brazilides Tectonics and the birth of the intracratonic Paraná Basin. In: International Geological Congress, 31, Rio de Janeiro - Brazil, *Abstracts (CDROM)*.
- FRAGOSO-CESAR, A.R.S., FAMBRINI G.L., ALMEIDA R.P., PELOSI A.P.M.R., JANIKIAN L., RICCOMINI C., MACHADO R., NOGUEIRA, A.C.R., SAES G.S. -2000b. The Camaquã extensional basin: Neoproterozoic to early Cambrian sequences in southernmost Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(3):438-441.
- FRAGOSO-CESAR, A.R.S., FAMBRINI G.L., ALMEIDA R.P., PELOSI A.P.M.R., JANIKIAN L., RICCOMINI C., MACHADO R. 2000a. Fragoso-Cesar A.R.S., R. 2001. Estruturas induzidas por abalos sísmicos na Formação Santa Bárbara (Neoproterozóico III –Eocambriano), Bacia do Camaquã, RS: o exemplo do Passo da Capela. *Revista Brasileira de Geociências* 31(2):155-162.
- GONZALES, M.; TEIXEIRA, G. 1980 Considerações sobre a estratigrafia e ambientes de sedimentação da região das Minas do Camaquã e jazida Santa Maria-RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31. Camboriú, 1980. *Anais...* Camboriú, SC, SBG, v.3, p.15132-1524.
- GORCEIX, H. 1875. Résultant d'une première exploration de La Province du Rio Grande do Sul (Brésil). *Bulletin de la Societe Géologique de France*, v.3, Serv. III, Paris.
- HANCOCK, P.L., 1985. Brittle microtectonics: principles and practice. *J. Struct. Geol.* 7 (3/4), 437–457.
- LEINZ, V. 1939. Problema Geológico do Post-Arqueano no Rio Grande do Sul. *Mineração e Metalurgia*, v.4, n.22, Rio de Janeiro, p.203-206.
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley & Sons, Inc. Fourth Edition. New York. 1994, 750p.
- MACHADO R., SAYEG H.S. 1992. Aplicação da análise geométrica e cinemática nos falhamentos que condicionaram a bacia molássica do Arroio Boici, RS. In: SBG/UNISINOS, I Workshop Sobre as Bacias Molássicas Brasileiras, São Leopoldo. *Boletim de Resumos Expandidos*. 73-76.
- MIALL, A.D. 2000. *Principles of sedimentary basin analysis*. 3rd ed., New York, Springer-Verlag, 616 p.
- OLIVEIRA J.M.M.T., Fernandes L.A.D. 1992. Bacias molássicas brasileiras, mito ou realidade? In: SBG/UNISINOS, I Workshop Sobre as Bacias Molássicas Brasileiras, São Leopoldo. *Boletim de Resumos Expandidos*. 97-105.
- PAIM, P. S. G. . As Minas do Camaquã. In: Carlos Schobbenhaus; D. A. Campos; E. T. Queiroz; Manfredo Winge; M. L. C. Berbert-Born. (Org.). *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*. 1 ed. Brasília: UNB, 2002, v. , p. 501-510.
- PAIM, P.S.G. 1994. Depositional Systems and Paleogeographical Evolution of the Camaquã and Santa Bárbara Basins, Brazil. Phil. Doctor Thesis, Oxford. v.I, 277 p. (inédito).
- PAIM, P.S.G., FACCINI, U.F., NETTO, R.G., NOWATZKI, C.H. 1992. Estratigrafia de seqüências e

- sistemas deposicionais das bacias do Camaquã e Santa Bárbara, Eopaleozóico do RS (Brasil). Universidad Nacional de Tucumán, *Serie Correlación geologica*, 9:41-45.
- PAIM, P.S.G., LOPES R.C., CHEMALE JR., F. 1995. Aloestratigrafia, sistemas deposicionais e evolução paleogeográfica da Bacia do Camaquã -Vendiano Superior/ Ordoviciano Inferior do RS. In: Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, 6/ Encontro Geologia Do Cone Sul, 1, Porto Alegre, , SBG. Núcleo RS, *Boletim de Resumos Expandidos*, p. 39-50.
- PETIT, J.P. 1987. Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks. *Journal of Structural Geology*, 9(5/6): 597-608
- POLLARD, D.D., SALTZER, S.D., RUBIN, A.M., 1993. Stress inversion methods: are they based on faulty assumptions? *J. Struct. Geol.* 15 (8), 145– 154.
- RAMSAY, J.G. & Lisle, R. 2000 The techniques of Modern Structural Geology vol.3: Applications of Continuum Mechanics in Structural Geology
- READING, H.G. 1986. Facies. In: H.G. Reading (ed.) 1986. *Sedimentary Environments and Facies 2nd edition*. 4-19.
- RIBEIRO, M.J. (1978) Mapa previsual do cobre no Escudo Sul-Rio-Grandense. Nota explicativa. *Série Geologia*, n.3 – *Seção Geologia Econômica*, DNPM, Brasília, n.1, p.1-104.
- RIBEIRO, M.; BOCCHI, P. R.; FIGUEIREDO FILHO, P. M.; TESSARI, R. I. 1966. Geologia da quadricula de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul. Rio de Janeiro, DNPM/DFPM, 232 p. (Boletim127).
- RIBEIRO DE ALMEIDA, T. I. 2005. Geobotânica por sensoriamento remoto em florestas tropicais e a abordagem sistêmica: uma ferramenta auxiliar no mapeamento geológico regional e na prospecção mineral. Livre Docência. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- ROBERTSON, J. F. 1966. Revision of Stratigraphy and nomenclature of rock units in Caçapava-Lavras Region. *Notas e Estudos*, IG-UFRGS, Porto Alegre, 1(2): 41-54.
- SILVA FILHO, W.F. 1997. A Formação Guaritas na Porção Centro-Sudeste da Bacia do Camaquã-RS. (Dissertação de Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- TEIXEIRA, G., GONZALEZ, A. P., GONZALES, H., LICHT, O.A.B. 1978^a. Contribuição ao estudo de mineralizações cupríferas disseminadas no distrito Minas do Camaquã. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., Recife, 1978. *Anais...*, Recife, SBG, v.4, p.1633-1643.
- TEIXEIRA, G; GONZALES, A.P.; GONZALES, M.A.; LICHT, O.A..B. 1978b. Situação das Minas do Camaquã, Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30, Recife, 1978. *Anais...*, Recife, SBG, v.4, p.1893-1905
- TESSARI, R.I. & PICADA, R.S. 1966. *Geologia da Quadrícula Encruzilhada do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil*. Rio de Janeiro, DNPM/DFPM, 147 p. (Boletim 124).
- TOMBA, C. L. B. 2006. Tectônica e sedimentação das coberturas triássicas isoladas sobre o Alto Estrutural de Rio Grande na região entre Santana da Boa Vista e Canguçu, RS.. 2006. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Geologia) - Instituto de Geociências - Universidade de São Paulo.
- TWISS, R.J., Unruh, J.R., 1998. Analysis of fault slip inversion; do they constrain stress or strain rate? *J. Geophys. Res.* 103 (B6), 12205– 12222.
- WALKER, R.G. 1992. Facies, facies models and modern stratigraphic concepts. In: Walker R.G. & James N.P. (eds): *Facies Models and Response to Sea-level Change* 1-14. Geological Association of Canada Geotext 1. p. 1-14.

DOAÇÃO

IGC-USP

Data: *07/05/08*

