

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**APLICAÇÃO E COMPARAÇÃO DE MÉTODOS PARA A
DETERMINAÇÃO DA DEFORMAÇÃO FINITA EM
METASSEDIMENTOS DA FAIXA RIBEIRA**

**Monografia de Trabalho de Formatura
TF 13/2004**

João Paulo Arnoldi Moracci
Orientador: Prof. Dr. Ginaldo Ademar da Cruz Campanha

**SÃO PAULO
2004**

TF
M827
JPA.a

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Aplicação e Comparação de Métodos para a
Determinação da Deformação Finita em
Metassedimentos da Faixa Ribeira**

João Paulo Arnoldi Moracci

Monografia de Trabalho de Formatura

Banca Examinadora

Prof. Dr. Ginaldo Ademar da Cruz Campanha _____

Prof. Dr. Carlos José Archanjo _____

Prof. Dr. Paulo César Boggiani _____

São Paulo

2004

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

DEDALUS - Acervo - IGC



30900016337

**APLICAÇÃO E COMPARAÇÃO DE MÉTODOS PARA A
DETERMINAÇÃO DA DEFORMAÇÃO FINITA EM
METASSEDIMENTOS DA FAIXA RIBEIRA**

**Monografia de Trabalho de Formatura
TF 13/2004**



João Paulo Arnoldi Moracci
Orientador: Prof. Dr. Ginaldo Ademar da Cruz Campanha

**SÃO PAULO
2004**

Índice

Resumo	3
Abstract	4
Introdução	5
Geologia regional	5
Objetivos	8
Justificativas	8
Material e métodos	9
Desenvolvimento do trabalho	16
Resultados	17
Conclusões	24
Referências bibliográficas	25
Anexo – SPO, teoria	



DOAÇÃO
IGC-USP
Data: 27/06/05

Resumo

Um conjunto de amostras de metassedimentos do Supergrupo Açungui, subgrupos Lajeado e Ribeira, previamente analisado visando à determinação da deformação finita foi estudado através do uso de métodos computacionais, na forma de softwares de processamento de imagens e cálculos de elipses e elipsóides de deformação, objetivando verificar a precisão dos dados e a desenvolver a sistematização de um método mais simples de análise da deformação finita em rochas, que consiste basicamente na digitalização de fotomicrografias de amostras orientadas, aquisição de elementos sólidos (ex.: grãos de quartzo), rasterização, cálculo das elipses para cada seção e a partir dessas o cálculo do elipsóide teórico de deformação.

Os dados mostraram aumento quase generalizado do grau de deformação máxima dos resultados em relação aos anteriores, com aumentos consideráveis da razão X/Z . Quanto à forma dos elipsóides, os novos dados apontam sensível diferença em relação aos anteriores, com poucos valores próximos a $K = 1$, sendo que dois se apresentaram pronunciadamente oblatos e seis prolatos, indicando predomínio da deformação com ganho de volume e de estiramento sobre achatamento. A posição dos eixos de deformação não sofreu grandes alterações, apesar das expressivas diferenças de orientação dos elipsóides, especialmente naqueles em que a deformação máxima é muito baixa. Os dados obtidos são coerentes com a estruturação local.

A análise da deformação pelo método computacional demonstrou boa aplicabilidade, facilitando grandemente o trabalho em relação aos métodos tradicionais, observando-se sempre o cuidado e a atenção, da orientação das amostras à obtenção dos dados.

Abstract

A set of samples of metasediments from the Açungui Supergroup, subgroups Lajeado and Ribeira, previously investigated for the determination of finite strain parameters, was analyzed by computational methods, in the form of image processing, ellipses and strain ellipsoids calculation software, for determining the precision of data, and systematizing a simpler method for strain analysis in rocks. The method consists basically in the digitalization of photomicrographies taken from spatially oriented samples, acquisition of solid elements (e.g. quartz grains), rasterization, calculation of ellipses for each section and from those the calculation of the strain ellipsoid.

The data show almost total increase in the amount of maximum strain comparing to the previous results, with considerable increase in the X/Z ratio. As to the shape of the ellipsoids, the new data point to visible differences in relation to the previous ones, with few values near $K = 1$. Two of them are pronouncedly oblate, and six prolate, indication dominance of deformation with volume gain and of stretching over flattening. Positions of strain axes were not substantially modified, despite distinct differences in ellipsoid orientation, especially those with low strain rates. The data obtained are coherent with local geological structures.

Strain analysis by the computational method has shown good applicability, making work much easier when compared to traditional methods, provided that proper care and attention are observed, from the orientation of samples to the acquisition of data.

Introdução

Os metassedimentos do Supergrupo Açungui na região do Médio e Alto Vale do Ribeira (SP), vem há algum tempo sendo objeto de estudos quantitativos de determinação de deformação finita (Campanha 1991, Campanha & Sadowski 1999, Fiori, 1997, Campanha 2002, Campanha & Sadowski 2002), tendo sido coletada um significativo volume de amostras e dados.

Os objetivos gerais da análise da deformação finita em rochas voltam-se principalmente para a obtenção de dados que permitam a avaliação das espessuras originais das unidades sedimentares, o encurtamento tectônico sofrido durante os processos orogenéticos e o mapeamento dos eixos principais e tipos de elipsóide de deformação, parâmetros necessários para o estabelecimento de modelos deformacionais baseados nas associações de estruturas presentes em uma determinada região.

Geologia regional

Para efeitos de análise, a área foi dividida em quatro blocos tectônicos, separados por grandes zonas de cisalhamento (Campanha & Sadowski 2002): Bloco Apiaí ao norte, delimitado pelas falhas do Espírito Santo e Carumbé; Bloco Lajeado, delimitado pela Falha do Carumbé e Lineamento Figueira; Bloco Ribeira, delimitado pelos lineamentos Figueira e Ribeira; Bloco Andorinhas, a sul do Lineamento Ribeira (fig. 1).

O Bloco Lajeado é composto na área pelo Subgrupo Lajeado e porções dos granitos Itaoca e Vargem Grande. O Bloco Ribeira, por sua vez, é composto da Formação Iporanga e Subgrupo Ribeira indiviso. O Subgrupo Lajeado corresponde a uma plataforma carbonática, constituída por formações terrígenas e carbonáticas sobrepostas alternadamente, intrudida na porção superior pelo Gabro de Apiaí. Na área estudada a macroestrutura do Lajeado é relativamente simples, composta de grandes anticlinais e sinclinais abertos, com eixos sub-horizontais e uma clivagem ardosiana empinada em posição plano-axial, normalmente oblíqua ou perpendicular ao acamamento reliquiar, com altos mergulhos para NW, em geral. As camadas estão quase sempre em posição normal, excetuando-se as proximidades do Lineamento Figueira, onde se encontram invertidas e com alto ângulo de mergulho para NW. Na porção norte ocorrem algumas zonas de movimentação mais intensa, principalmente ao longo de contatos entre as formações superiores, com caráter inverso ou oblíquo.

Localmente são observadas clivagens de crenulação, aparentemente não associadas a estruturas maiores.

As unidades do Bloco Ribeira são caracterizadas por uma deformação mais intensa, com dobramentos fechados a isoclinais e transposição das camadas sedimentares para a posição da clivagem ardosiana, a qual é contínua através dos blocos Lajeado e Ribeira, com mergulhando de maneira geral fortemente para NW. Esta foliação principal é defletida pelo Lineamento Ribeira, passando de direções NE a norte, para ENE nas proximidades do Lineamento Ribeira.

A Formação Iporanga constitui-se de metarritmitos finos, com intercalações de metarenitos, metaconglomerados e metabrechas polimíticas. Separa-se em parte do restante do Subgrupo Ribeira pelo Lineamento de Agudos Grandes.

O Subgrupo Ribeira constitui-se predominantemente de metapelitos de granulação fina a muito fina, em geral intensamente deformados. Ocorrem subordinadamente metabasitos, metamargas, metacalcários, metarenitos, metaconglomerados oligomíticos, formações ferríferas de pequeno porte e lâminas de metacherts.

O Subgrupo Ribeira é seccionado na área pelo Lineamento Ribeira. No bloco imediatamente a norte, indicado como Bloco Ribeira, o grau metamórfico é baixo (zona da clorita) e incipiente, com estruturas sedimentares bem preservadas, apesar da forte deformação tectônica. Os metapelitos têm sido interpretados como associados a leques turbidíticos distais e folhelhos pelágicos.

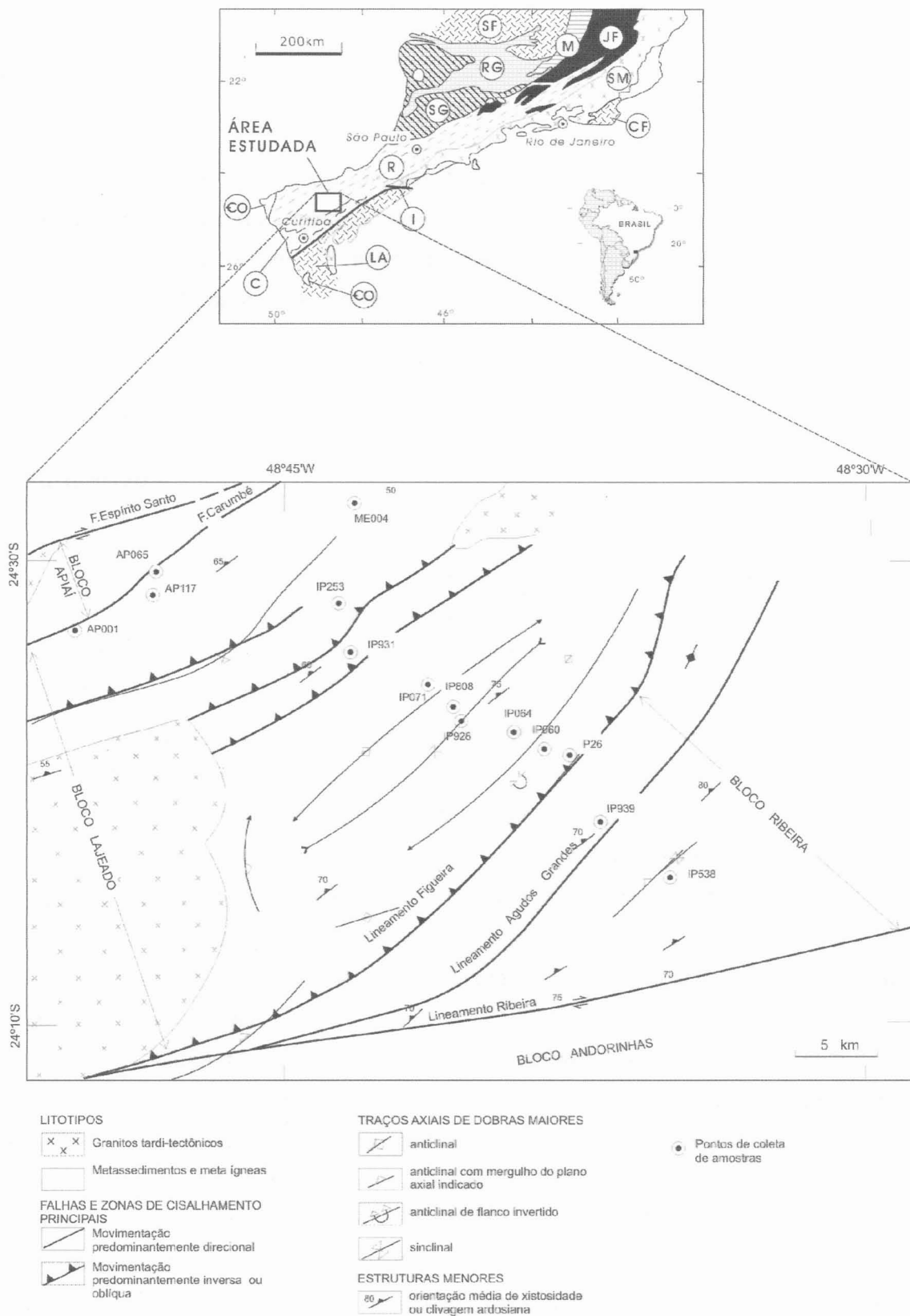


Figura 1 – Mapa de localização e mapa geológico-estrutural simplificado da área de estudo. Blocos e fragmentos cratônicos: (LA) Luís Alves, (I) Itatins, (SF) São Francisco. Faixas móveis meso- a neoproterozóicas: (RG) Alto Rio Grande, (R) Ribeira. Terrenos arqueanos e paleoproterozóicos de alto grau retrabalhados no Brasiliano: (C) Curitiba, (SM) Serra do Mar, (JF) Juiz de Fora, (M) Mantiqueira, (SG) Nappe Socorro-Guaxupé. (CO) Sequências sedimentares vulcanossedimentares cambro-ordovicianas. Seg. Campanha & Sadowski (2002), modificado.

Objetivos

As principais metas do projeto foram a aplicação dos novos métodos computacionais para a determinação de deformação finita, num conjunto de amostras previamente analisado por técnicas manuais (Campanha 1991, Campanha & Sadowski 1999, Campanha & Sadowski 2002, Faleiros 2003), e a comparação dos dados obtidos.

Justificativas

Diversos métodos e técnicas utilizados para a determinação da deformação finita em rochas têm sido propostos e aplicados nas últimas décadas. Nesta área, podem ser citados como clássicos os trabalhos de Cloos (1947), Ramsay (1967), Ramsay (1976), Ramsay & Huber (1983).

Os objetivos gerais da determinação da deformação finita em rochas incluem a obtenção de parâmetros para a restauração do estado indeformado de seções geológicas e o teste de modelos de evolução deformacional de faixas móveis.

Entretanto, o alcance destes estudos sempre foi prejudicado pelo caráter extremamente laborioso dos métodos e técnicas disponíveis para a obtenção de dados. Se a integração regional exige um razoável número de dados, com distribuição geográfica e geológica adequada, a dificuldade e o tempo despendido limitam sua aplicação em larga escala.

Hoje, começam a surgir diversos métodos totalmente baseados em softwares computacionais, que permitem vislumbrar a possibilidade de se obter dados muito mais rápida e precisamente (ou ao menos com controle estatístico de erro). Estes métodos baseiam-se em geral na análise de imagens tratadas digitalmente, destacando-se entre os programas o SPO2002 (Robin 2002, Launeau & Robin, no prelo), para a determinação da elipse de deformação bidimensional, e o Ellipsoid2003 (Robin 2002, Launeau & Robin, no prelo), para a determinação do elipsóide de deformação tridimensional, a partir de seções bidimensionais.

Material e métodos

O software SPO2002 é um programa de análise de imagens visando à obtenção de direções principais de deformação bidimensionais. O Ellipsoid2003 por sua vez utiliza dados bidimensionais de deformação para determinar direções principais de deformação em três dimensões. Ambos foram desenvolvidos e escritos pelos professores Patrick Launeau, da Universidade de Nantes, e Pierre-Yves F. Robin, da Universidade de Toronto. Seu grupo de pesquisa vem colaborando há algum tempo com pesquisadores da área de geologia estrutural do Instituto de Geociências da USP.

Para o presente estudo foram utilizadas 12 amostras previamente estudadas (Campanha 1991, Campanha & Sadowski 2002). Campanha & Sadowski (2002) enumeram os procedimentos de preparação:

- 1) Foram coletadas amostras orientadas, procurando representar cada unidade litoestratigráfica, em cada uma de suas situações estruturais, ao longo de um perfil aproximadamente NW/SE;

- 2) Foram escolhidos e marcados três cortes não paralelos entre si por amostra. Na medida do possível, os cortes foram ortogonais entre si e, de preferência, ortogonais e paralelos à foliação e lineação;

- 3) Depois de serrada a amostra, foi elaborado um esboço mostrando a disposição dos blocos cortados e a face orientada, para eventual conferência posterior;

- 4) Em cada corte, foi marcada a localização de uma seção delgada, e marcados três eixos de referência orientados e ortogonais entre si.

- 5) A amostra foi fixada na sua orientação original com relação às coordenadas geográficas; a atitude de cada seção foi medida com bússola e lançada em rede estereográfica. Os ângulos entre as faces cortadas foram conferidos na amostra e no diagrama, e, quando necessário, ajustadas as atitudes das seções;

- 6) Nas seções delgadas de cada corte também foram marcados os três eixos de referência;

7) Efetuaram-se ampliações fotográficas de cada lâmina numa escala que permitisse a perfeita individualização dos grãos clásticos e a aplicação do método de Fry, marcando-se os três eixos de referência na respectiva ampliação fotográfica. O processo é esquematizado na fig. 2.

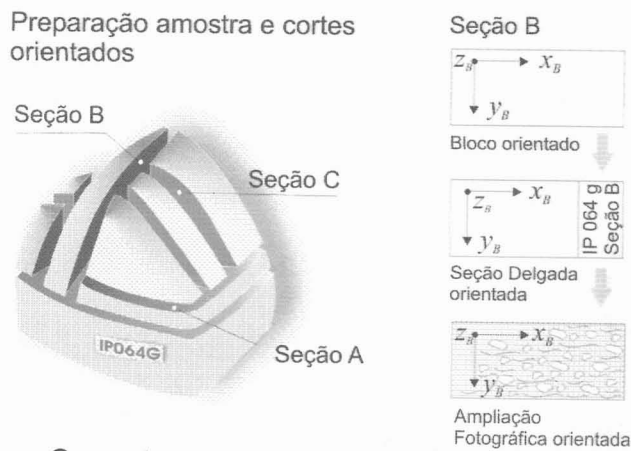


Figura 2 – Esquema do processo de preparação de amostras e seções para a determinação da deformação finita. Seg. Campanha & Sadowski (2002), modificado.

Os contornos e centros de grãos de cada seção foram traçados sobre folhas de overlay sobrepostas às ampliações; as elipses obtidas através do método de Fry, ajustadas por método gráfico (De Paor 1983, 1986) e as direções principais de deformação determinadas a partir da construção de Biot-Fresnel. Esta etapa é descrita em detalhes por Campanha (1991) e Campanha & Sadowski (2002).

Para os propósitos deste estudo, foi necessária para cada amostra uma nova etapa de preparação das amostras:

- 1) Cada seção orientada foi digitalizada por scanner, obtendo-se uma imagem digital raster, no formato bitmap (.bmp), orientada de acordo com os eixos de referência X e Y. Objetivando-se evitar a perda de detalhamento das imagens, adotou-se a resolução mínima de 200 dpi.

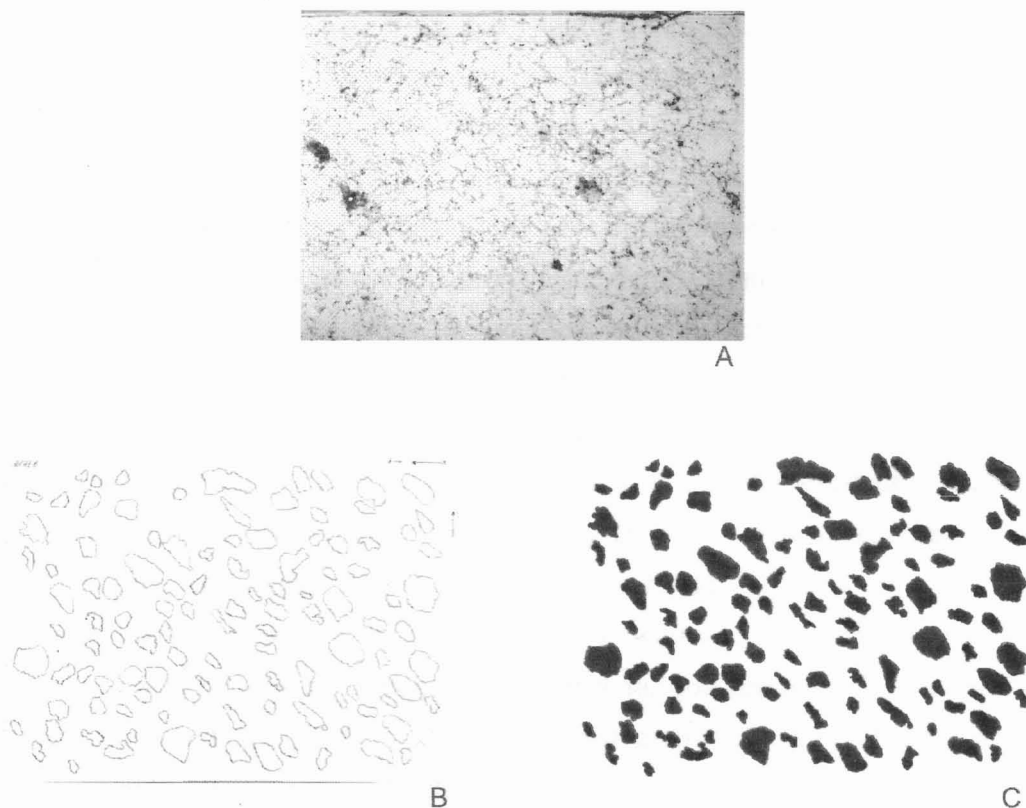


Figura 3 – Tratamento das seções para uso no software SPO2002. Utilizando-se softwares de desenho pode-se desenhar os elementos sólidos diretamente sobre a foto (A-C). O método mais rápido, entretanto, é o desenho à mão das bordas, vetorização, preenchimento e rasterização (A-B-C).

- 2) Após a digitalização, procede-se a aquisição dos dados em si. A entrada de dados no software SPO2002 deve ser uma imagem *raster* mostrando apenas os elementos a serem empregados na obtenção das elipses de deformação; no caso, foram utilizados os grãos. Para tanto, os grãos tiveram de ser “extraídos”. Inicialmente, adotou-se o programa CorelDRAW 11 para o desenho dos grãos sobre a imagem, com o auxílio do mouse. Tal método mostrou-se quase ou tão dispendioso quanto o método gráfico manual, considerando-se o tempo de execução. Passou-se então ao desenho manual dos grãos sobre uma folha de papel vegetal sobreposta à imagem, técnica que melhorou enormemente o tempo de preparação, ainda que em detrimento dos contornos absolutamente exatos dos grãos, que podiam ser obtidos no CorelDRAW utilizando-se o recurso *zoom* (ampliação da imagem). Procurou-se conseguir um mínimo de 80 elementos por seção, de maneira que se dispusesse de amostras com boa significância estatística;
- 3) Através desse procedimento foram obtidos “negativos” das seções. A entrada de dados no SPO2002 deve ser de imagens contendo elementos sólidos. Tais “negativos” foram então digitalizados por *scanner* e vetorizados. No processo de vetorização foram empregados dois softwares,

CorelTRACE 11 e R2V 5.5, tendo este apresentado os melhores resultados, com maior fidelidade aos contornos de grãos, apesar de ser um programa utilizado essencialmente para a vetorização de mapas topográficos;

- 4) As imagens *vector* assim obtidas foram então editadas no CorelDRAW, preenchendo-as, visando à presença única de elementos sólidos; dispondo de tais elementos, pôde-se isolá-los, e então convertê-los novamente a imagens *raster*, nos formatos .jpg ou .bmp (fig. 3).

O resultado desse processo, ou seja, as imagens *raster* contendo os elementos sólidos (grãos) são carregadas no programa SPO2002. Este executa a análise da imagem, podendo utilizar diversos métodos: Fry (centro-a-centro), interceptos, $R_F\text{-}\phi$, tensor de inércia, este último utilizado durante os trabalhos.

Uma vez carregada pelo SPO2002, a imagem tem os elementos (grãos) contados, individualizados e medidos pelo programa, que calcula o tensor de inércia para cada. A elipse da seção é calculada pela orientação preferencial de forma (*Shape-Preferred Orientation*), a partir dos tensores de inércia de todos os elementos (Launeau & Robin 2002). O resultado é uma elipse com as direções principais de deformação (eixo maior e eixo menor), e o ângulo entre o eixo de referência X e o eixo maior (fig. 4).

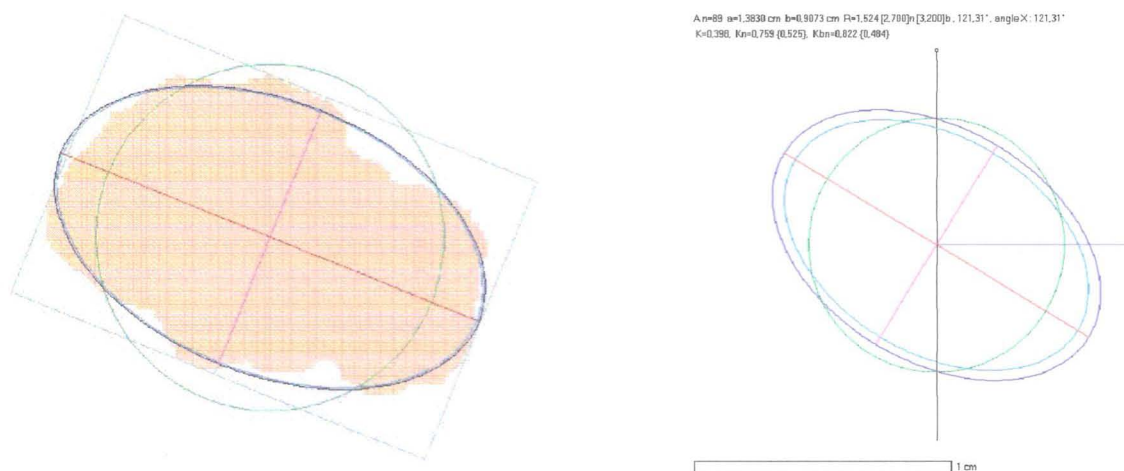


Figura 4 – Determinação do tensor de forma para um único grão (esq.) e determinação da elipse total de uma seção, pelo programa SPO2002.

Determinadas as três seções de uma amostra, prossegue-se para o software Ellipsoid2003. Neste, a entrada de dados é feita através de uma tabela, onde são inseridos a atitude de cada seção (devendo-se sempre respeitar a regra da mão direita – fig. 5), o rake do eixo maior/direção principal de alongação de cada seção, e as razões entre eixo maior e menor de cada elipse, fornecidos pelo SPO2002 (fig. 6). A partir desses dados o programa calcula o elipsóide de deformação da amostra: razões de alongação, trend e plunge dos eixos X, Y e Z, atitude do plano XY e índice K (fig.

7). A geração do elipsóide pode ser feita considerando-se ou não a escala das medidas (tamanho absoluto dos grãos – eixos). Como as fotomicrografias e as ampliações têm aumentos e escalas diferentes, neste trabalho não se utilizou a escala de medidas, apenas a razão entre direções principais de deformação.

Após as determinações de elipsóides utilizando três seções, foi aplicado em duas das amostras um método alternativo, disponível no software Ellipsoid2003, o cálculo através de seções múltiplas, buscando conhecer-se a precisão dos resultados obtidos. Para tanto, as imagens de cada seção foram divididas com o auxílio dos aplicativos da suíte Corel em “metades” (fig. 8). Cada uma teve sua elipse aproximada pelo SPO2002, pelo procedimento ilustrado pela fig. 4, para então serem inseridos os dados das seis seções no Ellipsoid2003, que forneceu a partir dessas “semi-seções” os elipsóides (fig. 9).

As amostras IP939B e IP538, do Bloco Lajeado, estudadas por Campanha (1991) e Campanha & Sadowski (2002), não foram analisadas no presente trabalho, por representarem metaconglomerados, onde foram aplicados os métodos $R_F\text{-}\phi$ e média harmônica, respectivamente, não havendo portanto seções orientadas, dificultando seu estudo. Onde surgem, os dados a elas referentes foram extraídos dos trabalhos supracitados.

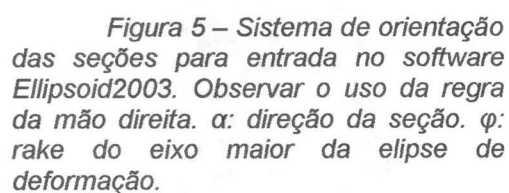


Figura 6 – Exemplo de entrada de dados através de tabela no programa Ellipsoid2003.



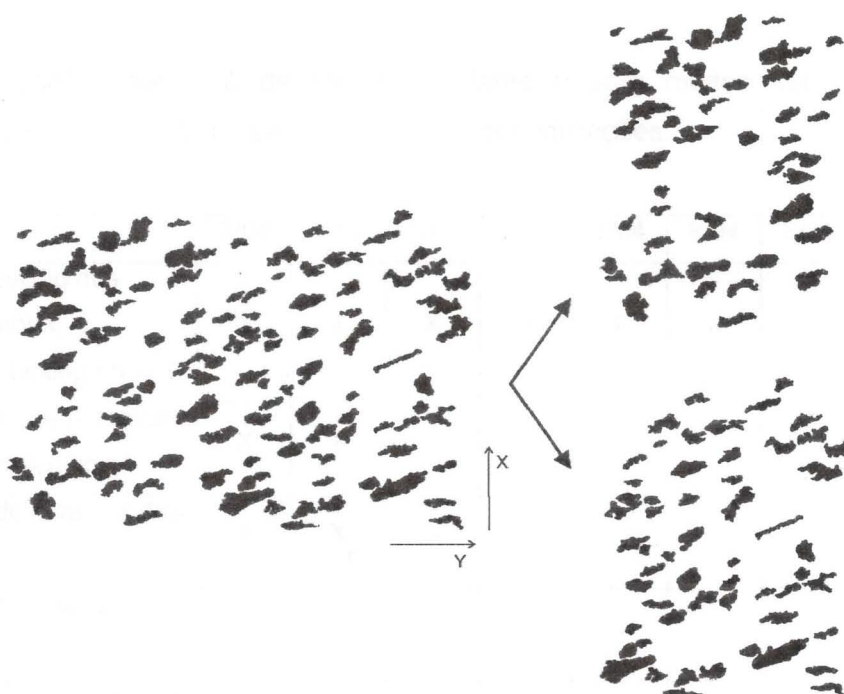


Figura 8 – Divisão de seção para obtenção do elipsóide por múltiplas seções.

Ellipsoid 2003

File Option Contact Examples (see Ref. 2) Rotation [xyz]

Number of section ☒ ☐

display section #

P ☐

Calculation

☐ WITH measured scale factor ☒ /mean L

☒ WITHOUT measured scale factor

Data format

☐ shape ratio r

☐ +surface

☐ +density **SPO**

☒ long & short axis

Combinations

☐ display [x] [y] [z]

Rotation

strike

dip

pitch/rake

Bedding

Sample orientation ?

Copy results

Delete all

Load

Paste

Ellipsoid SPO

Save

Quit

IP928.TXT

Check if selected data format is compatible with the texte, check another one if needed, and press OK to continue the calculation.

decimal separator 6 samples -1 bedding sections **SPO**

OK

Cancel

n*	azimut	pendage	pitch	axe long	axe court	poids
IP928a-l	219	22	171	2,0668	1,0542	1
IP928a-r	219	22	169,3	1,8616	0,8874	1
IP928b-l	103	80	72,5	1,8122	1,2479	1
IP928b-r	103	80	77,5	2,0670	1,2498	1
IP928c-l	6	70	57	1,9246	1,2802	1
IP928c-r	6	70	52	1,7150	1,2209	1

Figura 9 – Inserção de dados de múltiplas seções no programa Ellipsoid2003.

Desenvolvimento do trabalho

O trabalho decorreu de forma constante e sem muitos contratempos. O cronograma inicial (tab. 1) foi seguido à risca, sem alterações.

	3/04	4/04	5/04	6/04	7/04	8/04	9/04	10/04	11/04
Estudo e revisão dos métodos (teoria, referências bibliográficas)	X	X	X	X	X	X		X	
Organização de amostras e seções disponíveis	X	X							
Obtenção de imagens das seções	X	X	X						
Tratamento digital de imagens			X	X					
Determinação de elipses e elipsóides de deformação				X	X	X	X		
Análise dos resultados				X	X	X	X	X	X
Redação dos relatórios parcial / final						X			X

Tabela 1 – Cronograma proposto no projeto inicial

Esperava-se obter resultados que proporcionassem uma base sólida de comparação entre métodos computacionais e os métodos tradicionais de análise de deformação.

As principais dificuldades encontradas estavam relacionadas à orientação das amostras utilizadas, sanadas sem maiores problemas durante a fase inicial do projeto. À metodologia também foram feitas pequenas modificações, visando a melhorar um dos principais objetivos do trabalho: a rapidez de execução do processo de análise da deformação, o que é exposto em detalhes neste texto.

Resultados

A tabela 2 apresenta os resultados. As projeções estereográficas dos elipsóides de deformação, as elongações e os índices K estão representados na tabela 3, que compara os resultados com aqueles obtidos por Campanha (1991) e Campanha & Sadowski (2002). A figura 8 mostra o diagrama de Flinn bilogarítmico modificado dos dados obtidos nesses trabalhos, assim como os do presente estudo. A figura 9 demonstra as projeções estereográficas dos eixos X, Y e Z, novamente confrontando os dados recentes com os prévios. A figura 10 ilustra a disposição em mapa dos eixos X e dos planos XY.

Nos trabalhos anteriores, três amostras (IP071C, IP253B, IP928) apresentaram deformação máxima (representada pela razão R_{xz}) muito baixa ($X/Z < 1,4$), duas (IP001 e P26) deformação média ($X/Z > 2,0$) e as outras deformação baixa ($1,4 < X/Z < 2,0$). No presente, a situação se modifica: a maioria (oito amostras) apresentou deformação média, e quatro amostras tiveram deformação baixa (AP117, IP071C, IP253B e IP808); nenhuma apresentou deformação muito baixa. A maioria apresentou aumentos consideráveis de R_{xz} (AP001, AP065B, IP060B, IP928, IP931, ME004, P26), sendo que apenas a amostra AP117 teve diminuição de R_{xz} , ainda assim praticamente desprezível. Os novos dados apontam para uma intensidade média de deformação no Bloco Ribeira, contrastando com rochas pouco ou muito pouco deformadas, como levaram a crer os resultados de Campanha & Sadowski (2002). Reitera-se que a deformação é mais expressiva próximo a lineamentos importantes, como as Zonas de Cisalhamento do Carumbé (amostras AP001, AP065B) e da Figueira (P26); os já citados aumentos nas razões de strain nessas amostras nos novos resultados reforçam esta tese.

O diagrama de Flinn bilogarítmico modificado em Campanha & Sadowski (2002) mostrava que a maior parte dos elipsóides se aproximava de $K = 1$. Três eram fortemente prolatos (IP939B, IP931, IP064G), com $K \gg 1$, e um (IP538) fortemente oblato ($K \ll 1$), o que indicaria deformação planar a volume constante da maioria das amostras, ganho considerável de volume pelos elipsóides IP939, IP931 e IP064G e perda de volume por IP538 (Ramsay 1967, Davis & Reynolds 1996). Por sua vez, os novos resultados mostram menor concentração em torno da reta $K = 1$ (IP071C, IP253B, IP808B, IP928); dois elipsóides (AP001, IP060B) são pronunciadamente oblatos e os outros seis prolatos, mudando sensivelmente a configuração das formas dos elipsóides, indicando predomínio da deformação com ganho de volume e de estiramento sobre achatamento.

Notam-se expressivas mudanças na orientação dos elipsóides (tab. 3), especialmente naqueles em que a deformação máxima (representada pela razão R_{xz}) era muito baixa ($X/Z < 1,4$); a baixa razão de strain pode ser o fator determinante nesse caso, já que o elipsóide tende à forma esférica, causando a possível indeterminação das direções principais de deformação.

Não foram verificadas diferenças significativas entre os resultados dos elipsóides obtidos através de seções múltiplas e aqueles obtidos por seções simples, o que pode ser verificado na tabela 4.

A orientação dos eixos principais não mostra grandes alterações (fig. 9). Os novos dados de eixo Z são consistentes com plano de máximo achatamento de direção NE. São responsáveis pelas mudanças as ocorrências de quatro eixos Z no quadrante N-W, indicando forte mergulho do plano XY para SE, contrastando com Campanha & Sadowski (2002), onde predominavam francamente os mergulhos para NW, à exceção da amostra AP001, do flanco norte do Sinclinal do Calabouço, que indicava mergulho para S, coerente com a estruturação local; este dado é semelhante ao obtido no presente trabalho, indicando mergulho do plano de maior achatamento para SSE. Os novos resultados reforçam o caráter de orientação sub-horizontal dos eixos X para NE-SW, como nos trabalhos prévios, à exceção das amostras AP001, já discutida, IP808, IP060B e P26 estas últimas possivelmente por localizarem-se na área de influência do Lineamento de Agudos Grandes (Campanha & Sadowski 2002).

PONTO	AP001	AP65B	AP117	IP060B	IP064G	IP071C
Extensões ($S = l_1 / l_0$) relativas, considerando $S_y = 1$						
X	1,68	2,16	1,36	1,40	1,53	1,25
Y	1	1	1	1	1	1
Z	0,34	0,88	0,88	0,61	0,76	0,81
X/Z	4,98	2,47	1,56	2,29	2,01	1,55
K	0,48	1,28	2,39	0,67	1,51	0,96
Atitudes dos eixos principais de deformação finita						
X	147;46	044;07	222;18	163;68	219;16	027;24
Y	249;12	288;74	042;72	054;08	338;59	227;65
Z	350;42	136;14	312;00	321;20	121;26	121;08
rocha	quartzito	meta-aren.	meta-aren.	meta-siltito	meta-aren.	calcário
unidade	S.Boa Vista	S.Boa Vista	S.Boa Vista	Betari	Betari	B. da Serra

PONTO	IP253B	IP808B	IP928	IP931	ME004	P26
Extensões ($S = l_1 / l_0$) relativas, considerando $S_y = 1$						
X	1,18	1,46	1,46	2,04	1,87	2,29
Y	1	1	1	1	1	1
Z	0,81	0,74	0,65	0,71	0,64	0,64
X/Z	1,45	1,98	2,26	2,88	2,93	4,11
K	0,79	1,28	0,89	2,08	1,38	1,43
Extensões ($S = l_1 / l_0$) relativas, considerando $S_y = 1$						
X	026;25	296;43	039;30	066;20	065;13	272;26
Y	295;04	029;04	190;57	308;52	316;56	027;41
Z	197;65	123;47	300;13	168;31	163;31	160;38
rocha	meta-aren.	calcário	calcário	calcário	meta-siltito	calcário
unidade	S.Boa Vista	B. da Serra	B. da Serra	M. Furnas	Gorutuba	B. da Serra

Tabela 2- Resultados obtidos com a utilização dos softwares SPO2002 e Ellipsoid2003 nas amostras estudadas.

Dados	Campanha (1991)	Novos	Campanha (1991)	Novos
Amostra	AP001		AP117	
X:Y:Z	2,30:1,57:1,00		1,59:1,20:1,00	
K	0,85		1,54	
Amostra	AP065B		IP060B	
X:Y:Z	1,74:1,33:1,00		1,65:1,28:1,00	
K	0,94		1,03	
Amostra	IP064G		IP071C	
X:Y:Z	1,67:1,14:1,00		1,28:1,13:1,00	
K	2,91		1,02	
Amostra	IP253B		IP808B	
X:Y:Z	1,35:1,20:1,00		1,91:1,39:1,00	
K	0,65		0,97	
Amostra	IP928		IP931	
X:Y:Z	1,31:1,09:1,00		1,45:1,07:1,00	
K	2,13		4,49	

(continua)

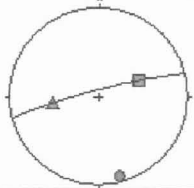
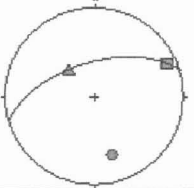
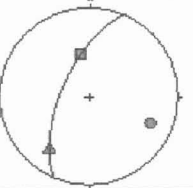
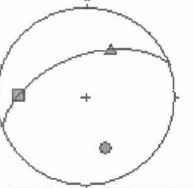
Dados	Campanha (1991)	Novos	Campanha (1991)	Novos
Amostra	ME004		P26	
				
X:Y:Z	1,87:1,42:1,00	2,93:1,57:1,00	2,79:1,53:1,00	4,11:1,79:1,00
K	0,79	1,38	1,40	1,43

Tabela 3 – Projeções estereográficas dos elipsóides: orientações dos eixos principais de deformação X(■),Y(▲) e Z (●), atitudes dos planos XY (círculos máximos), razões entre direções principais de deformação e índices K. Comparação entre resultados prévios (modificados de Campanha 1991) e novos.

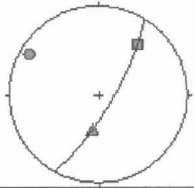
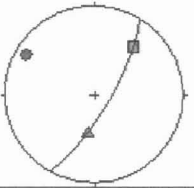
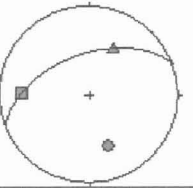
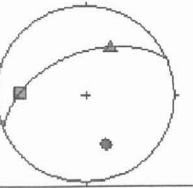
Seções	Simples	Múltiplas	Simples	Múltiplas
Amostra	IP928		P26	
				
X:Y:Z	2,26:1,54:1,00	2,27:1,53:1,00	4,11:1,79:1,00	3,98:1,81:1,00
K	0,89	0,93	1,43	1,33

Tabela 4 – Projeções estereográficas dos elipsóides: orientações dos eixos principais de deformação X(■),Y(▲) e Z (●), atitudes dos planos XY (círculos máximos), razões entre direções principais de deformação e índices K. Comparação entre elipsóides obtidos através de seções simples e múltiplas, para as amostras IP928 e P26.

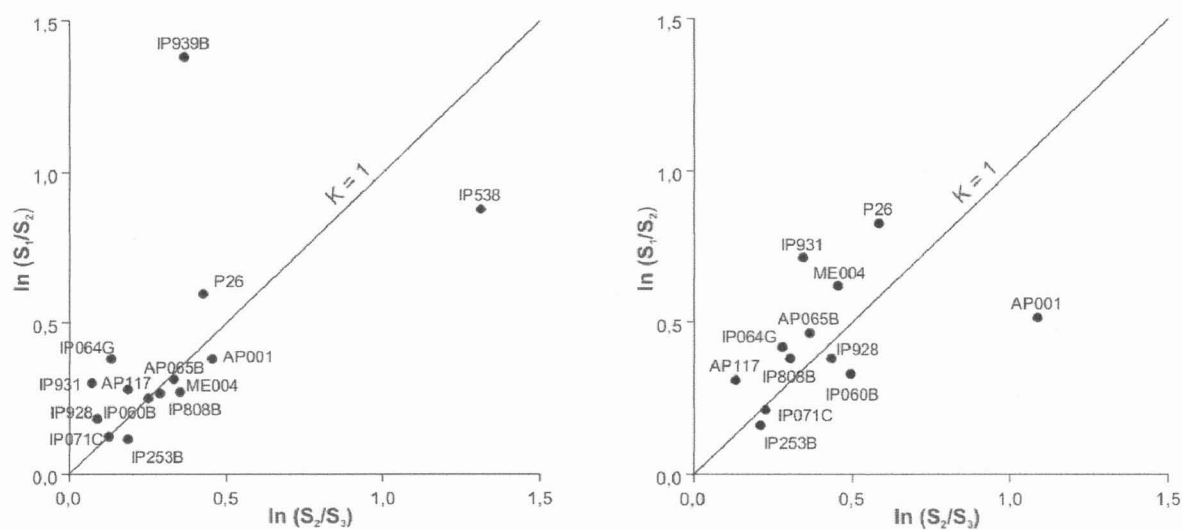


Figura 8 – Diagramas bilogarítmicos dos resultados obtidos previamente (esq.), modificado de Campanha & Sadowski (2002), e dos resultados novos (dir.). Diagrama de Flinn modificado.

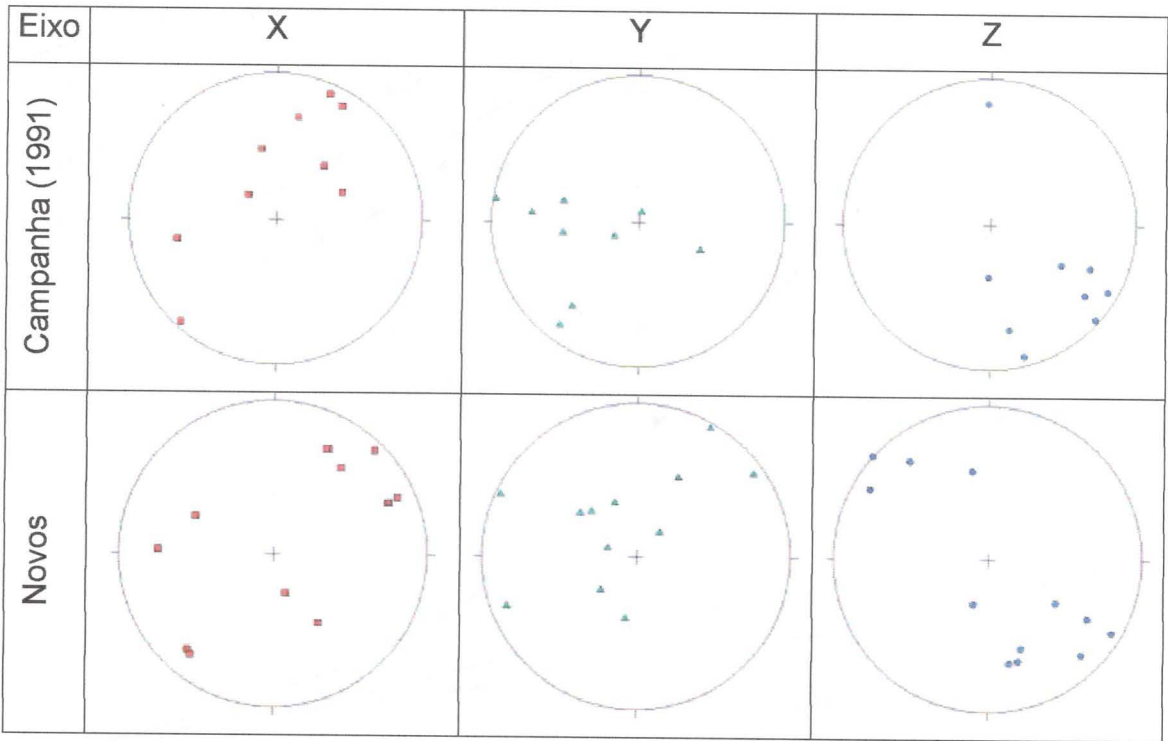
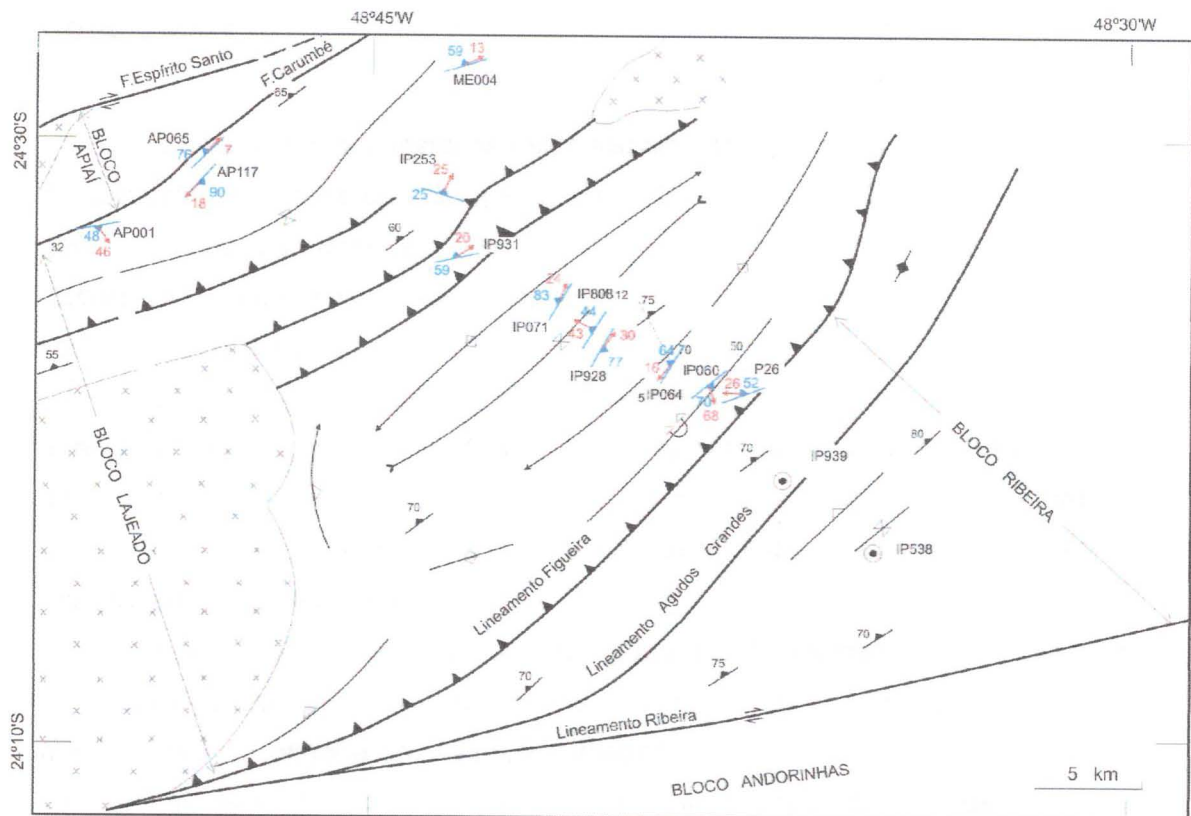


Figura 9 – Projeções estereográficas de eixos X, Y, Z dos elipsóides de deformação, comparando dados novos e prévios (modificado de Campanha 1991). As projeções dos dados anteriores não incluem as amostras IP071C, IP253B e IP928, devido às razões de strain muito baixas ($X/Z < 1,4$), além das amostras IP538 e IP939B. As projeções de dados novos contêm as 12 amostras analisadas, já que nenhuma apresenta $X/Z < 1,4$.



LITOTIPOS

- x x Granitos tardi-tectônicos
- Metassedimentos e meta ígneas

FALHAS E ZONAS DE CISALHAMENTO PRINCIPAIS

- ↗ Movimentação predominantemente direcional
- ↖ Movimentação predominantemente inversa ou oblíqua

TRAÇOS AXIAIS DE DOBRAS MAIORES

- ↗ anticlinal
- ↗ anticlinal com mergulho do plano axial indicado
- ↖ anticlinal de flanco invertido
- ↗ sincinal

ESTRUTURAS MENORES

- ↗ orientação média de xistosidade ou clivagem ardósiana

DADOS DE DEFORMAÇÃO

- 26 trend e plunge dos eixos X dos elipsóides de deformação ("lineação")
- 52 atitudes dos planos XY dos elipsóides de deformação ("foliação")

Figura 10 – Representação no mapa geológico-estrutural simplificado das atitudes dos planos XY e orientações dos eixos X dos elipsóides de deformação, ou seja, foliação e lineação teóricas, para cada ponto de amostragem.

Conclusões

Os novos métodos testados neste trabalho se mostraram plenamente passíveis de utilização na análise da deformação finita. Os “novos” resultados são de um modo geral compatíveis com aqueles obtidos anteriormente, e onde se mostram discrepantes, parecem ser mais coerentes com a área de estudo, em comparação com os dados “antigos”.

Suas principais vantagens são a simplificação do processo e extrema rapidez, quando comparados aos métodos manuais, geométricos e/ou algébricos, além de diminuir consideravelmente influência da “componente humana” (como a determinação de bordas e centros de grãos, um tanto subjetivas, feitas visualmente no método de Fry utilizado nos trabalhos prévios).

Deve-se atentar, no entanto, à qualidade dos dados inseridos nos softwares. A orientação das seções deve ser precisa, e a qualidade das fotografias utilizadas a melhor possível, afinal a conversão de imagem para elementos sólidos (o “desenho” dos grãos), têm de ser feita pelo usuário, seja por softwares de desenho ou manualmente; quão maior a dificuldade de visualização das bordas dos elementos, mais complicada será sua determinação exata, e conseqüentemente menor a qualidade dos dados carregados no software SPO2002 e Ellipsoid2003.

Referências bibliográficas

- CAMPANHA, G.A.C. & SADOWSKI, G.R. 1999. Tectonics of the southern portion of the Ribeira Belt (Apiaí Domain). *Precambrian Research* **98**:31-51.
- CAMPANHA, G.A.C. & SADOWSKI, G.R. 2002. Determinações de deformação finita em rochas metassedimentares da faixa Ribeira na região de Iporanga e Apiaí, SP. *Rev. Bras. Geoc.* **32**(1):107-118.
- CAMPANHA, G.A.C. 1991. *Tectônica proterozóica no Alto e Médio Vale do Ribeira, Estados de São Paulo e Paraná*. São Paulo, 296 p., anexos (Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo).
- CLOOS, E. 1947. Oolite deformation in the South Mountain fold, Maryland. *Geol. Soc. America Bull.* **58**:849-918.
- DAVIS, G.H. & REYNOLDS, S.J. 1996. *Structural geology of rocks and regions*. 2. ed. New York, Wiley.
- DE PAOR, D.G. 1983. Orthographic analysis of geological structures - I. Deformation theory. *J. Struct. Geol.* **5**(3/4):255-277.
- DE PAOR, D.G. 1986. Orthographic analysis of geological structures - II. Deformation theory. *J. Struct. Geol.* **8**(1):87-100.
- FALEIROS, F.M. 2003. *Zona de Cisalhamento Ribeira: deformação, metamorfismo, e termobarometria de veios sin-tectônicos*. (Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo).
- FIORI, A.P. 1997. *Introdução à análise da deformação*. Curitiba, UFPR. 249 p.
- LAUNEAU, P. & ROBIN, P.-Y. F. (no prelo). Determination of fabric and strain ellipsoids from measured sectional ellipses – Implementation and applications. *Journal of Structural Geology*.
- RAMSAY, J.G. 1967. *Folding and Fracturing of Rocks*. McGraw-Hill, New York, 568 p.

RAMSAY, J.G. 1976. Displacement and strain. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 283, 3-25.

RAMSAY, J.G. & HUBER, M.I. 1983. *The techniques of modern structural geology. Vol. I: Strain analysis*. New York, Academic Press.

ROBIN, P.-Y.F. 2002. Determination of fabric and strain ellipsoids from measured sectional ellipses – Theory. *Journal of Structural Geology*, **24**:531-544.

ANEXO

Método da orientação preferencial de forma (SPO - adaptado de Faleiros, 2003)

A razão de forma e a orientação do eixo maior de cada grão podem ser calculadas a partir do tensor de inércia de sua forma. Foram utilizadas imagens *raster* das seções (constituídas por pixels). Se x_i e y_i são as coordenadas dos pixels do grão j , e A sua área superficial (igual ao número de pixels), então o tensor de inércia (M_j) de sua forma é dado por:

$$M_j = \begin{vmatrix} m_{xxj} & m_{xyj} \\ m_{xyj} & m_{yyj} \end{vmatrix}$$

onde,

$$m_{xxj} = 1/A \sum_i (x_i - x_c)^2$$

$$m_{xyj} = 1/A \sum_i (x_i - x_c)^2 (y_i - y_c)^2$$

$$m_{yyj} = 1/A \sum_i (y_i - y_c)^2$$

são as componentes do tensor e,

$$x_c = 1/A \sum_i x_i$$

$$y_c = 1/A \sum_i y_i$$

são as coordenadas do centróide do grão (fig.1).

A razão de forma do grão pode ser definida por $r = (\lambda_1/\lambda_2)^{1/2}$, onde λ_1 e λ_2 são os autovalores de M_j . Da mesma forma, a direção de máxima elongação do grão (ϕ) é dada pelo maior autovalor de M_j .

O tamanho do semi-eixo maior (a) e do semi-eixo menor (b) de uma elipse representando o grão é dado por $a = (\lambda_1)^{1/2}$ e $b = (\lambda_2)^{1/2}$ em unidade de pixels (ou em milímetros se o tamanho do pixel é conhecido).

Para a correlação das orientações preferenciais de forma (shape-preferred orientation – SPO) com a SPO total, introduz-se a média do tensor de inércia de n formas de grãos:

$$M = 1/N \sum_j M_j = 1/N \begin{vmatrix} \sum_j m_{xxj} & \sum_j m_{xyj} \\ \sum_j m_{xyj} & \sum_j m_{yyj} \end{vmatrix}$$

o que efetivamente fornece uma SPO ponderada pela área de cada grão. A razão de forma média dos grãos, $SR_t = (\lambda_1/\lambda_2)^{1/2}$ e sua orientação ϕ , são dadas pelos autovetores máximos de **M**, respectivamente. As dimensões médias a_t e b_t são calculadas da mesma forma.

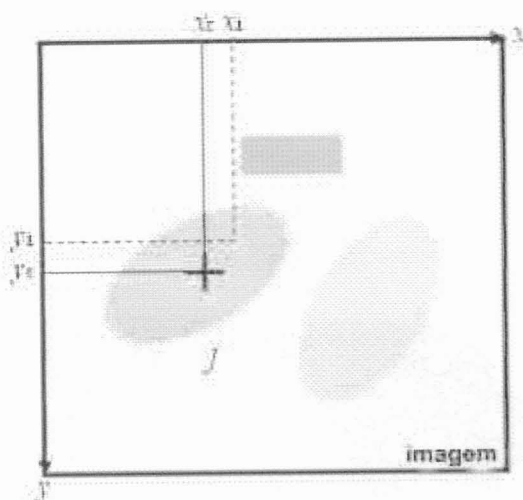


Figura 1 – Sistema de orientação de um grão teórico: pixel aleatório (x_i, y_i) e centróide do grão (x_c, y_c)