

## DETERMINAÇÕES DA DEFORMAÇÃO FINITA EM ROCHAS METASSEDIMENTARES DA FAIXA RIBEIRA NA REGIÃO DE IPORANGA E APIAÍ, SP

GINALDO ADEMAR DA CRUZ CAMPANHA &amp; GEORG ROBERT SADOWSKI

**ABSTRACT** *FINITE DEFORMATION DETERMINATIONS IN METASEDIMENTARY ROCKS OF THE RIBEIRA BELT IN THE IPORANGA AND APIAÍ REGION, SP* Quantitative finite strain estimates were performed in metasedimentary units belonging to the Lajeado and Ribeira subgroups of the Açungui Supergroup in the region of the Upper and Medium Ribeira Valley, São Paulo State. The main purposes were to determine the original thickness of the formations, the amount of tectonic shortening of the area and map the principal strain axes and types of local strain ellipsoids. Fourteen complete determinations were obtained including the orientations of the X, Y, Z principal strain axes as also the respective stretch ratios. The main method used was that of Fry by defining the strain ellipses on three concurrent rock sections for each sample; one of the samples was also submitted to the  $R/\phi$ , preferential orientation and harmonic mean determinations. The grain distributions in coarse clastics and siltstones as also those of rutile crystals were analyzed. A graphic method based on the determination of circular sections was applied for the deduction of the strain ellipsoid. The majority of the samples showed low X/Z strain ratios (between 2 and 1.4), two values were high (greater than 5) and two showed medium values (between 2 and 5). The majority of the determined ellipsoids resembles those related to planar strain with  $k=1$ , three were strongly prolate with  $k \gg 1$  and one was strongly oblate ( $k \ll 1$ ). The results confirmed the idea that the rocks of the Lajeado Subgroup are little deformed with exception of areas next to large shear zones, in contrast with those of the Ribeira Subgroup with higher strain ratios. Almost the totality of the Z axes is coherent with a NE oriented plane of maximum flattening dipping to NW at high angles, parallel to the mean directions of the schistosity and slaty cleavage of these rocks. The X axes show a general NE-SW sub horizontal trend underlining the importance of the regional transcurrent tectonics, while three samples next to the Figueira and Agudos Grandes Lineaments showed strong plunges to NW suggesting inverse or oblique slip. The kinematic analysis of the geometry of the Ribeira Lineament shear zone indicated an amount of ductile right-lateral component of slip of about 18 km. The total inferred slip using regional correlations could be in the order of 50 km.

**Keywords:** Ribeira, deformation, strain, shear.

**RESUMO** Estimativas quantitativas da deformação finita (*finite strain*) foram realizadas em metassedimentos do Supergrupo Açungui, subgrupos Lajeado e Ribeira, na região do Alto e Médio Vale do Ribeira, SP. Os objetivos foram a obtenção de dados que contribuíssem para avaliar as espessuras originais dos metassedimentos de área, o encurtamento tectônico sofrido, bem como mapear a orientação dos eixos principais e o tipo de elipsóide de deformação. Foram obtidas 14 determinações completas, incluindo as orientações dos três eixos principais do elipsóide de deformação (X, Y, Z), bem como as razões entre os três estiramentos principais. Para cada amostra, foram determinadas as elipses de deformação em três seções não paralelas entre si, utilizando-se em geral o método de Fry e, em uma amostra, os métodos  $R/\phi$ , orientação preferencial e média harmônica. Foram analisadas as distribuições de grãos de metarenitos, metassiltitos, seixos de conglomerado e cristais de rutilo. Para a integração das três seções de medida e dedução do elipsóide de deformação empregou-se método gráfico baseado na identificação das seções circulares. A maioria das amostras mostrou deformações baixas ( $2 > X/Z > 1,4$ ), duas deformações altas ( $X/Z > 5$ ), três muito baixas ( $X/Z < 1,4$ ), e duas com valores médios ( $5 > X/Z > 2$ ). A maior parte dos elipsóides obtidos aproxima-se do tipo associado à deformação planar com  $k=1$ , três deles são fortemente prolatos ( $k \gg 1$ ) e um é fortemente oblato ( $k \ll 1$ ). Estes resultados confirmam a impressão qualitativa de que as rochas do Subgrupo Lajeado são de modo geral pouco ou muito pouco deformadas com exceção das proximidades de zonas de cisalhamento, contrastando com aquelas do Subgrupo Ribeira onde os valores de deformação são mais altos. A quase totalidade dos eixos Z é coerente com a presença de um plano de máximo achatamento de direção NE e mergulho forte para NW, paralelo às direções médias da xistosidade e clivagem ardosiária dessas rochas. Os eixos X mostram atitudes com tendência geral NE/SW sub-horizontal, indicando a importância da tectônica transcorrente na região, enquanto que três amostras situadas nas proximidades das zonas de cisalhamento Figueira e Agudos Grandes mostram forte caimento para NW, sugerindo movimentação inversa ou oblíqua. A análise de geometria da Zona de Cisalhamento do Lineamento Ribeira indica um deslocamento dextral dúctil do bloco norte de cerca de 18 km. O deslocamento total inferido por correlações regionais seria da ordem de 50 km.

**Palavras-chave:** Ribeira, deformação, strain, cisalhamento

**INTRODUÇÃO** Estimativas quantitativas da deformação finita (*finite strain*) foram realizadas em metassedimentos do Supergrupo Açungui, subgrupos Lajeado e Ribeira (Campanha 1991, Campanha & Sadowski 1999), na região do Alto e Médio Vale do Ribeira, SP (Figs. 1 e 2). Os objetivos foram a obtenção de dados que contribuíssem para avaliar as espessuras originais dos metassedimentos da área, o encurtamento tectônico sofrido, bem como mapear a orientação dos eixos principais e o tipo de elipsóide de deformação. Estes últimos parâmetros são importantes para o estabelecimento de modelos deformacionais que expliquem as associações de estruturas observadas.

Para efeitos de análise, a área foi dividida em blocos tectôni-

cos, separados por grandes zonas de cisalhamento. Reconhece-se o bloco Apiaí a norte, delimitado pelas falhas do Espírito Santo e Carumbé; o Bloco Lajeado, delimitado pela Falha do Carumbé e Lineamento Figueira; o Bloco Ribeira, delimitado pelos lineamentos Figueira e Ribeira; e o Bloco Andorinhas, a sul do Lineamento Ribeira.

O Bloco Lajeado na área é composto pelo Subgrupo Lajeado e porções dos granitos Itaóca e Vargem Grande. O Bloco Ribeira por sua vez é composto pela Formação Iporanga e pelo Subgrupo Ribeira indiviso.

O Subgrupo Lajeado corresponde a uma plataforma carbonática, constituída por formações terrígenas e carbonáticas alternadamente sobrepostas, intrudida em sua porção su-

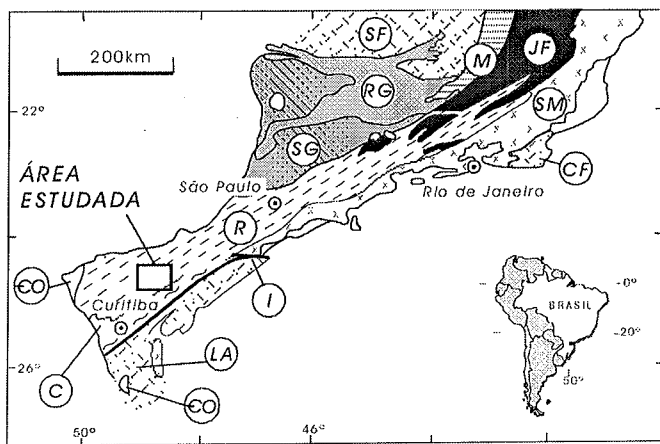


Figura 1 - Localização da área estudada e suas relações com as principais unidades tectônicas pré-silurianas do Sudeste brasileiro. Blocos e fragmento cratônicos: (LA) Luís Alves, (I) Itatins, (CF) Cabo Frio, (SF) São Francisco. Faixas de dobramento meso a neoproterozóicas: (RG) Alto Rio Grande, (R) Ribeira. Terrenos arqueanos e paleoproterozóicos de alto grau retrabalhados no Brasiliano: (C) Curitiba, (SM) Serra do Mar, (JF) Juiz de Fora, (M) Mantiqueira, (SG) Nape Socorro - Guaxupé. Sequências sedimentares e vulcanossedimentares Cambro-ordovicianas (CO).

perior pelo Gabro de Apiaí. Na área estudada a macroestrutura do Lajeado é relativamente simples, composta de grandes anticlinais e sinclinais abertos, com eixos subhorizontais e uma clivagem ardosiana empinada em posição plano-axial, normalmente oblíqua ou perpendicular ao acamamento reliquiar, em média com altos mergulhos para NW. As camadas estão quase sempre em posição normal, com exceção das proximidades do Lineamento Figueira, onde estão invertidas e com alto ângulo de mergulho para NW. Na sua porção norte ocorrem algumas zonas de movimentação mais intensa ao longo principalmente de alguns 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 caracterizam-se por uma deformação mais intensa, com dobramento fechado a isoclinal e transposição das camadas sedimentares para a posição da clivagem ardosiana, a qual é contínua através dos blocos Lajeado e Ribeira, com mergulhos médios fortes em geral 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 é constituída por metarritmitos finos, com intercalações de metarenitos, metaconglomerados e metabrechas polimíticas. Em parte separa-se do restante do Subgrupo Ribeira pelo Lineamento de Agudos Grandes.

O Subgrupo Ribeira constitui-se predominantemente de metapelitos de granulção fina a muito fina, em geral intensamente deformados. Subordinadamente ocorrem 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 a norte deste, indicado aqui como Bloco Ribeira, o grau metamórfico é fraco (zona da clorita) a incipiente, com estruturas sedimentares reliquias em geral bem preservadas, apesar da forte deformação tectônica. Os metapelitos têm sido interpretados como associados a leques turbidíticos distais e folhelhos pelágicos.

O blocos a norte (Apiá) e a sul (Andorinhas) da área estudada possuem um padrão estrutural mais complexo e grau metamórfico um pouco mais alto, não sendo abordados no presente trabalho.

As estimativas de deformação finita foram possíveis nos blocos Lajeado e Ribeira (incluindo a Formação Iporanga), onde o grande número de estruturas e texturas reliquias preservadas permite que se compare a configuração final deformada (observável), com a suposta configuração geométrica original para estas estruturas e texturas.

Procurou-se adotar os métodos mais simples e rápidos existentes na literatura especializada. Julgou-se que nesta abordagem preliminar do problema seria mais importante obter um maior número de estimativas semi-quantitativas, mas distribuídas regionalmente, do que uma ou duas determinações extremamente precisas e localizadas.

Logrou-se realizar 14 determinações completas do elipsóide de deformação, cujas locações encontram-se representadas na figura 2 e os resultados na tabela 1. Nestes 14 casos foram determinadas as orientações dos três eixos principais do elipsóide de deformação, (X, Y, Z), bem como as razões entre os três estiramentos principais ( $S_1 : S_2 : S_3$ ).

**PROCEDIMENTOS ADOTADOS** O procedimento básico consistiu na determinação das elipses de deformação em três seções não paralelas entre si de cada amostra. A partir destas três seções efetuou-se a dedução do elipsóide de deformação. Em 35 seções utilizou-se o método de Fry (Fry 1979, Ramsay & Huber 1983) para a análise de distribuição de grãos em metarenitos e metassiltitos. Cristais de rutilo boudinados foram utilizados em uma seção para se determinar a elongação em várias direções. Em uma amostra de metabrechas foram aplicados três métodos distintos em cada corte ( $R_F/\phi$ , orientação preferencial e média harmônica). Por meio da média harmônica da elipsidade dos seixos determinou-se, em um afloramento de metaconglomerados, a elipse de deformação em duas seções. Os resultados por seção, com o método utilizado em cada uma, são mostrados na tabela 2.

Para a integração das três seções de medida para a dedução do elipsóide de deformação, adaptou-se o método gráfico proposto por De Paor (1986).

O procedimento adotado, na maior parte das determinações, pode ser dividido em três etapas básicas: preparação, determinação das elipses de deformação e dedução do elipsóide de deformação, conforme segue e ilustrado na figura 3.

**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, como se vê na figura 2.

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 mos-

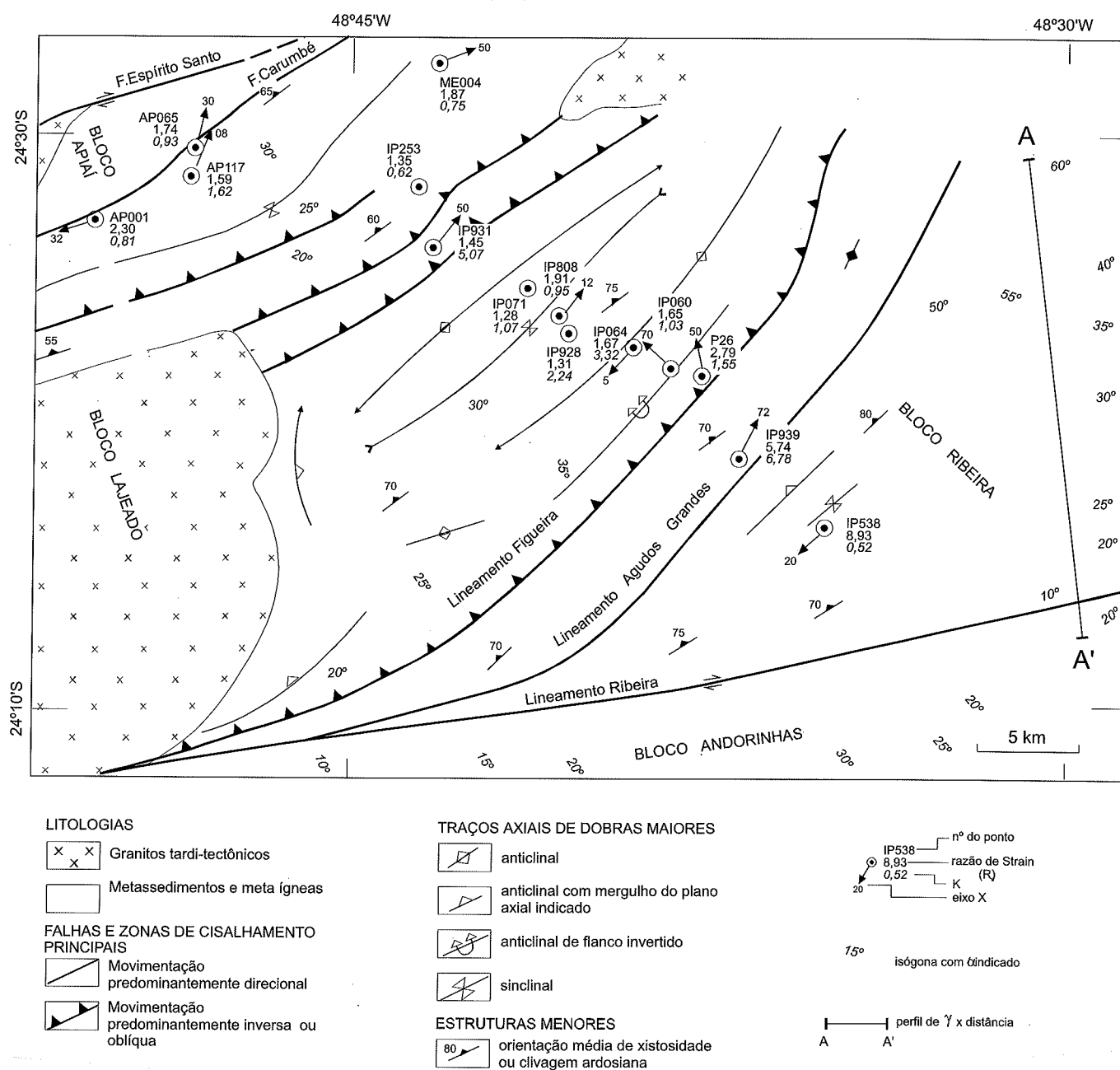


Figura 2 – Mapa estrutural simplificado da área estudada, mostrando os pontos nos quais foram realizadas medidas de deformação finita, com indicação dos valores obtidos de  $R_x$  e  $K$ , atitudes do eixo X do elipsóide de deformação finita e traçados de isógonas das linhas de tendência média das estruturas na região de influência do Lineamento Ribeira. A porção sul do Lineamento Ribeira foi tomada como direção de referência ( $\alpha = 0^\circ$ ) para o traçado das isógonas.

trando a disposição dos blocos cortados e a face orientada, para eventual conferência posterior.

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

- Nas seções delgadas de cada corte também foram marcados os três eixos de referência.
- Efetuar-se-iam 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.

**Determinação da elipse de deformação em cada seção** Em um overlay sobreposto a cada seção, foram determinados os

Tabela 1 - Parâmetros obtidos do elipsóide de deformação finita para cada amostra analisada.

PONTO	AP001	AP65B	AP117	IP060B	IP064G	IP071C	IP253B
Extensões ( $S = l_1 / l_0$ ) relativas, considerando $S_y = 1$							
X	1.46	1.31	1.32	1.29	1.46	1.13	1.12
Y	1	1	1	1	1	1	1
Z	0.64	0.75	0.83	0.78	0.88	0.88	0.83
X/Z	2.30	1.74	1.59	1.65	1.67	1.28	1.35
K	0.81	0.93	1.62	1.03	3.32	1.02	0.62
Atitudes dos eixos principais de deformação finita							
X	258/32	012/30	023/08	310/70	222/05	180/62	284/20
Y	114/52	279/02	286/46	217/03	015/84	336/26	017/10
Z	359/19	181/60	120/43	127/20	132/03	070/09	132/68
rocha	quartzito	metarenito	metarenito	metasiltito	metarenito.	calcário	metarenito.
unidade	S.Boa Vista	S.Boa Vista	S.Boa Vista	Betari	Betari	B. da Serra	S.Boa Vista

PONTO	IP808B	IP928	IP931	ME004	P26	IP939B	IP538
Extensões ( $S = l_1 / l_0$ ) relativas, considerando $S_y = 1$							
X	1.37	1.20	1.35	1.32	1.82	3.99	2.41
Y	1	1	1	1	1	1	1
Z	0.72	0.92	0.93	0.70	0.65	0.69	0.27
X/Z	1.91	1.31	1.45	1.87	2.78	5.74	8.93
K	0.95	2.24	5.07	0.75	1.55	6.78	0.52
Atitudes dos eixos principais de deformação finita							
X	030/12	179/27	042/50	068/50	348/50	025/72	224/20
Y	240/75	280/20	275/28	262/47	218/28	255/12	020/68
Z	120/08	046/58	169/27	165/07	114/26	162/02	131/10
rocha	calcário	calcário	calcário	metasiltito	calcário	Metaconglom.	Metaconglom.
unidade	B. da Serra	B. da Serra	M. Furnas	Gorutuba	B. da Serra	Iporanga	Ribeira

respectivos centros dos grãos clásticos e, em seguida, em um segundo overlay, foi aplicado o método de Fry, manualmente. Obtida a elipse pelo método de Fry, foi determinada a elipsidade (ou razão de *strain*,  $R_s$ ), bem como a orientação do eixo maior com relação aos eixos de referência.

Os métodos adotados não permitem em geral estimar-se os estiramentos absolutos sofridos, já que não se tem as dimensões absolutas originais dos grãos medidos; deste modo obtém-se apenas as razões entre os estiramentos máximos e mínimos ( $R_s$ ).

**Determinação do elipsóide** Determinadas as elipses de deformação em três seções quaisquer da amostra, é possível teoricamente obter as orientações e as alongações principais do elipsóide de deformação. Destarte, é possível abster-se de quaisquer pressupostos iniciais a respeito das orientações dos eixos e das respectivas seções principais. Este não é o procedimento mais comum na literatura de análise de *strain*, onde, em geral, se pressupõe que a xistosidade e a lineação correspondam respectivamente ao plano **XY** e ao eixo **X** do elipsóide, procurando-se realizar medidas nessas seções.

No caso de três seções ortogonais entre si, coincidindo com as seções principais do elipsóide de deformação, a resolução do problema é bastante simples. Os eixos das elipses de cada seção correspondem aos eixos principais. No entanto, a partir do momento que as seções de medida não coincidem mais com as seções principais do elipsóide, e as seções de medida não sejam mais ortogonais entre si, os eixos das elipses em cada seção não coincidem mais necessariamente com os eixos principais do

elipsóide de deformação finita (Ramsay 1967).

Experimentou-se três métodos distintos para a determinação do elipsóide tridimensional, respectivamente propostos por Ramsay (1967), Milton (1980) e De Paor (1986).

Os métodos de Ramsay (1967) e de Milton (1980.) são algébricos ou matriciais e, basicamente, calculam os coeficientes da matriz do tensor de deformação finita. A partir daí calculam os parâmetros essenciais do elipsóide respectivo. Por sua vez, De Paor (1986) desenvolve um método totalmente gráfico.

Os métodos de Ramsay (1967), e Milton (1980) foram implementados em computador e testados em casos construídos para tal fim. Notou-se que, quando as seções de medida aproximam-se dos planos principais de deformação, os resultados são coerentes. Mas, quando se trabalha com seções quaisquer, podem surgir resultados espúrios. De Paor (1986) analisa esta situação e argumenta que pequenos erros de medida e de ajuste, principalmente nos componentes de cisalhamento do tensor, podem produzir grandes diferenças no final dos cálculos. Assim, preferiu-se adotar os métodos gráficos que, embora mais trabalhosos e aparentemente menos precisos, permitem um controle visual da distribuição das alongações nas várias direções, evitando erros grosseiros.

O método aqui adotado, adaptado daquele proposto por De Paor (1986), consiste em três etapas, descritas a seguir.

**AJUSTE DE COMPATIBILIDADE ENTRE AS ELIPSES DAS SEÇÕES DE MEDIDA** Como as seções de medida são cortes do mesmo elipsóide tridimensional, as linhas de interseções entre elas devem ter alongações iguais. Como as elipses obtidas

Tabela 2 - Resultados obtidos para cada uma das seções das amostras analisadas.

Seção	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Amostra	AP001			AP065B			AP117		
método utilizado	Fry	Fry	Fry	Fry	Fry	Fry	Fry	Fry	Fry
Atitude da seção	019/72	150/60	237/38	100/78	005/60	206/38	269/88	178/56	359/42
Rs medida	1.75	1.13	2.2	1.57	1.07	1.33	1.15	1.65	1.11
Rs ajustada	-	-	-	-	-	-	1.21	1.31	-
rake eixo maior medido	148	85	63	33	103	30	20	147	60
rake do eixo maior ajustado	148	110	63	33	103	10	172	137	130
Amostra	IP60B			IP064G			IP071C		
método utilizado	Fry	rutilos	Fry	Fry	Fry	Fry	Fry	Fry	Fry
Atitude da seção	130/24	304/64	036/88	219/03	040/82	121/86	296/80	191/42	034/60
Rs medida	1.5	1.14	1.54	1.67	1.13	1.44	1.16	1.24	1.09
Rs ajustada	-	-	-	-	-	-	-	-	-
rake eixo maior medido	22	122	68	90	93	176	122	72	62
rake do eixo maior ajustado	-	-	-	-	-	-	76	-	-
Amostra	IP253B			IP808B			IP928		
método utilizado	Fry	Fry	Fry	Fry	Fry	Fry	Fry	Fry	Fry
Atitude da seção	183/79	085/14	282/78	324/16	213/82	306/78	309/22	193/80	096/70
Rs medida	1.31	1.00	1.12	1.44	1.81	1.26	1.25	1.20	1.43
Rs ajustada	-	-	-	1.79	1.60	-	-	1.00	1.27
rake eixo maior medido	164	-	168	164	94	170	10	-	160
rake do eixo maior ajustado	-	-	-	150	-	-	-	-	150
Amostra	IP931			ME004			P26		
método utilizado	Fry	Fry	Fry	Fry	Fry	Fry	Fry	Fry	Fry
Atitude da seção	332/53	199/54	082/62	318/62	209/60	078/40	311/60	045/84	132/38
Rs medida	1.33	1.15	1.27	1.00	1.62	1.87	1.07	2.55	1.50
Rs ajustada	-	-	-	-	-	-	-	-	-
rake eixo maior medido	154	0	75	-	88	82	30	56	164
rake do eixo maior ajustado	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Amostra	IP939B			IP538					
método utilizado	Rf/φ	Rf/φ	Rf/φ	m.h.	m.h.	-			
Atitude da seção	072/76	266/14	167/86	359/72	312/82	-			
Rs medida	5.00	2.40	4.60	2.65	2.41	-			
Rs ajustada	5.76	1.74	3.83	-	-	-			
rake eixo maior medido	76	105	82	98	20	-			
rake do eixo maior ajustado	-	-	86	-	-	-			

são o resultado de um processo real de medida, sempre incorporam um certo erro, tornando-se necessário um ajuste de compatibilidade. Caso as elipses nas intersecções entre as seções não coincidam, são feitos ajustes de escala, orientação e/ou elipsidade (De Paor 1986).

#### DETERMINAÇÃO DAS DIREÇÕES PRINCIPAIS DE DEFORMAÇÃO PELA CONSTRUÇÃO DE BIOT-FRESNEL

As seções de medida foram plotadas em estereograma como projeções ciclográficas, juntamente com os eixos principais das elipses obtidas e ajustadas.

Caso as seções sejam ortogonais entre si e os eixos das elipses coincidam aproximadamente com suas intersecções, as direções principais já estão determinadas. As relações entre  $X:Y:Z$  são determinadas então pelas razões entre as elipsidades das seções de medida. Caso isto não ocorra, passa-se ao procedimento geral de determinação das direções principais, pela construção de Biot-Fresnel.

A determinação das direções principais de deformação pela construção de Biot-Fresnel consiste na determinação das duas seções circulares do elipsóide de deformação. No caso geral,

existem apenas duas seções circulares, sendo a intersecção entre elas o eixo  $Y$  (intermediário) do elipsóide, e as suas bissetrizes as direções  $X$  (maior) e  $Z$  (menor).

Nas seções de medida lançadas no diagrama, o valor do estiramento  $S$  ( $\lambda^{1/2}$  ou  $1 + e$ ) foi plotado de  $10^\circ$  em  $10^\circ$ .

Foram aqui adotadas as definições de elongação quadrática ( $\lambda$ ), extensão ( $e$ ) e estiramento ( $S$ ) a seguir:

$$\lambda = (l_1/l_0)^2 \quad e = (l_1 - l_0)/l_0 \quad S = l_1/l_0$$

onde  $l_1$  é o comprimento de uma linha após a deformação, e  $l_0$  o seu comprimento inicial, antes da deformação.

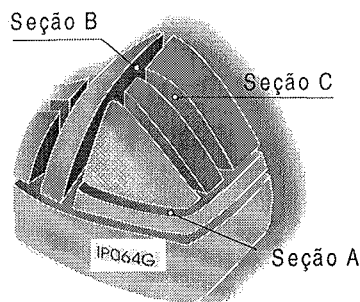
Como em geral não são obtidas as elongações absolutas, mas sim razões de *strain*,  $R_s = S_1/S_2 = (\lambda_1/\lambda_2)^{1/2}$ , das seções, atribui-se arbitrariamente  $\lambda = 1$  para uma das intersecções entre as seções (ou para uma das elongações principais menores). Os demais valores são obtidos segundo a relação:

$$\lambda = \lambda'_1 \cos^2 \theta' + \lambda'_2 \sin^2 \theta'$$

onde  $\lambda'$  é elongação quadrática recíproca ( $\lambda' = 1/\lambda$ ) de uma determinada linha, que faz um ângulo  $\theta'$  com a direção principal  $\lambda_1$ , (no estado deformado), e  $\lambda'_1$ ,  $\lambda'_2$  são as elongações quadráticas recíprocas principais.

Esta técnica produz na projeção estereográfica um "mapa"

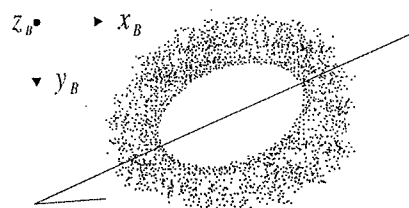
1- Preparação amostra e cortes orientados



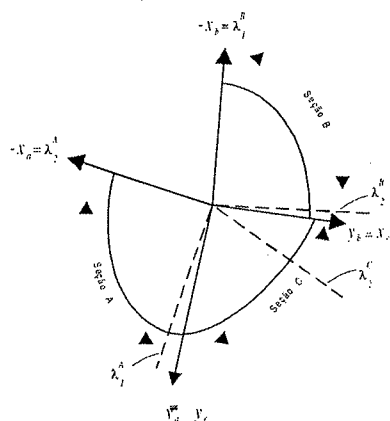
Seção B



2- Determinação da elipse em cada seção



3- Ajuste de compatibilidade entre as elipses



4- Determinação dos eixos principais de deformação

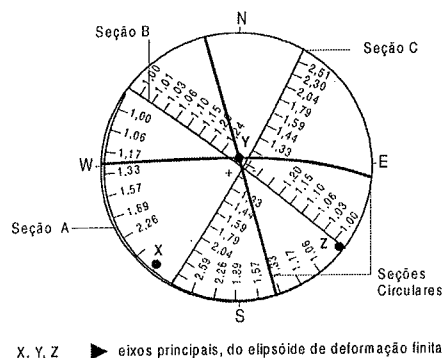


Figura 3 - Esquema da sequência de procedimentos utilizada.

das elongações nas várias direções, que já permite visualizar as áreas do diagrama onde podem estar localizadas as direções principais de deformação **X** e **Z**. A determinação das seções circulares consiste então na localização de dois círculos máximos que interceptam as três seções de medida em pontos com o mesmo valor de elongação. Para isso é necessário checar sistematicamente os círculos máximos de todas as direções e mergulhos, até localizar as seções circulares.

**DETERMINAÇÃO DAS RAZÕES ENTRE AS ELONGAÇÕES PRINCIPAIS** Para a determinação das razões entre os eixos principais **X:Y:Z** do elipsóide, preferiu-se adotar um procedimento algébrico.

Uma vez determinadas as três direções principais, têm-se também os três planos principais do elipsóide. Cada plano principal intercepta as três seções de medida. Portanto, em cada plano principal conhece-se a posição dos eixos principais e as elongações de três linhas (as interseções com as seções de medida). As elongações principais podem ser obtidas pela resolução do seguinte sistema:

$$\lambda'_a = \lambda'_1 \cos^2 \theta'_a + \lambda'_2 \sin^2 \theta'_a$$

$$\lambda'_b = \lambda'_1 \cos^2 \theta'_b + \lambda'_2 \sin^2 \theta'_b$$

onde  $\lambda'_a$ ,  $\lambda'_b$ ,  $\lambda'_1$ ,  $\lambda'_2$  são respectivamente as elongações quadráticas recíprocas e os ângulos com a direção principal  $\lambda'_1$  de duas linhas **a** e **b**, as quais podem ser duas das três interse-

ções possíveis. Alguns testes com casos construídos mostraram que devem ser escolhidas as duas linhas com elongações e orientações as mais diferenciadas possível, para diminuir os erros.

**DISCUSSÃO DOS RESULTADOS** **Intensidade da deformação**

Os resultados obtidos estão listados na Tabela 1. As atitudes dos eixos principais obtidos estão representadas na figura 4. A figura 2 mostra também a orientação do eixo maior **X** de cada determinação de deformação finita, com sua localização em mapa e os valores de **R** e **K** obtidos. A figura 5 mostra um diagrama de Flinn modificado (Ramsay 1967).

Em termos da deformação máxima (**X/Z**), nota-se que duas amostras (IP538, IP939) mostraram deformação alta (**X/Z** > 5). Três (IP071C, IP253B, IP928) mostraram deformação muito baixa (**X/Z** < 1,4). A maioria mostrou deformações baixas ( $2 > \text{X/Z} > 1,4$ ), e duas amostras (IP001, P26) apresentaram deformação média ( $5 > \text{X/Z} > 2$ ) (Figs. 2 e 5, Tabela 1).

Estes resultados confirmam a impressão qualitativa de que as rochas do Bloco Lajeado são de modo geral pouco ou muito pouco deformadas, a não ser próximo a zonas de cisalhamento (o caso das amostras AP001 e P26). Enquanto que no Bloco Ribeira as deformações são mais altas (amostras IP939B e IP538). A figura 2 mostra claramente este aspecto, principalmente os valores de deformação mais altos nas proximidades das zonas de cisalhamento da Figueira e do Carumbé.

À parte destas determinações completas da deformação finita, algumas indicações parciais confirmam aproximadamente a faixa de variação desses resultados.

Manchas elipsoidais milimétricas em filitos de Formação Iporanga, possivelmente devidas a óxido-redução sindiagenética, apresentam razões  $X:Y:Z$  de ordem 8:6:1. Manchas elipsoidais em mármore do Bloco Lajeado, junto ao Lineamento da Figueira, apresentam razões  $X:Y:Z$  de 14:5:1. Em nenhum dos casos foi possível obter amostras orientadas. Contudo, mostram que a deformação, junto às zonas de cisalhamento e nos metapelitos finos, pode ser maior do que nos pontos analisados.

Analisando-se o perfil NW através da área (Campanha 1991) no tocante ao comprimento das camadas dobradas versus o comprimento do perfil, para várias unidades estratigráficas, não considerando a deformação interna das camadas, foram obtidos valores de encurtamento da ordem de 20% para o Subgrupo Lajeado, e de 66% para o Subgrupo Ribeira, na direção NW (Tabela 3). Estes valores são compatíveis com as relações  $Y/Z$  obtidas para as amostras dessas unidades (Tabela 1).

Fiori (1997) analisando os conglomerados deformados da Formação Camarinha, próximos à Falha da Lancinha, a SW da presente área, obteve valores de  $R_s$  entre 1,8 e 2,4.

**Forma dos elipsóides** No diagrama de Flinn (Fig. 5), nota-se que a maior parte dos elipsóides obtidos aproxima-se do tipo com  $k = 1$ . Três deles (IP939B, IP931 e IP064G) são fortemente prolatos ( $k \gg 1$ ) e um (IP538) é fortemente oblato ( $k \ll 1$ ).

Adotando-se como hipótese que na direção do eixo principal intermediário de deformação ( $Y$ ) não tenha ocorrido deformação ( $\lambda = 1$  ou  $e = 0$ ), a maior parte dos elipsóides corresponderia a deformação planar a volume constante, enquanto que os correspondentes às amostras IP939B, IP931 e IP064G apresentariam ganho apreciável de volume e, o associado à amostra IP538, perda de volume.

**Orientação dos eixos principais** Com relação à orientação dos eixos principais, nota-se na figura 4 que a quase totalidade dos eixos  $Z$  é coerente com uma orientação do plano de máximo achatamento com direção NE e mergulhos fortes para

NW, o que é concordante com a orientação média da xistossidade e clivagem ardósiana nessa área. A exceção é feita pelo ponto AP001, no flanco norte do Sinclinal do Calabouço, mas que é coerente com as estruturas locais. Deve-se atentar que as amostras IP928, IP071C e IP253B, que não foram lançadas na figura 4, fugiram deste padrão. No entanto, correspondem àqueles valores muito baixos de deformação finita ( $X/Z < 1,4$ ). Espera-se nestes casos um erro ou indeterminação grande das direções principais, já que o elipsóide aproxima-se de uma esfera.

Em termos de orientação do eixo  $X$ , nota-se nas figuras 2 e 4 que, desprezando-se as amostras já citadas com baixa razão de deformação, a maior parte dos eixos  $X$  mostra uma tendência de orientação NE/SW sub-horizontal, inclusive aquelas si-

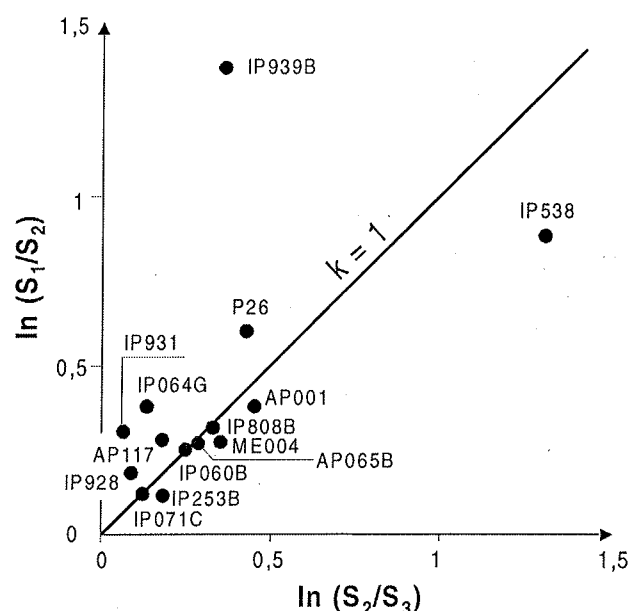


Figura 5 - Diagrama bilogarítmico das razões entre as extensões principais obtidas (Diagrama de Flinn, modificado).

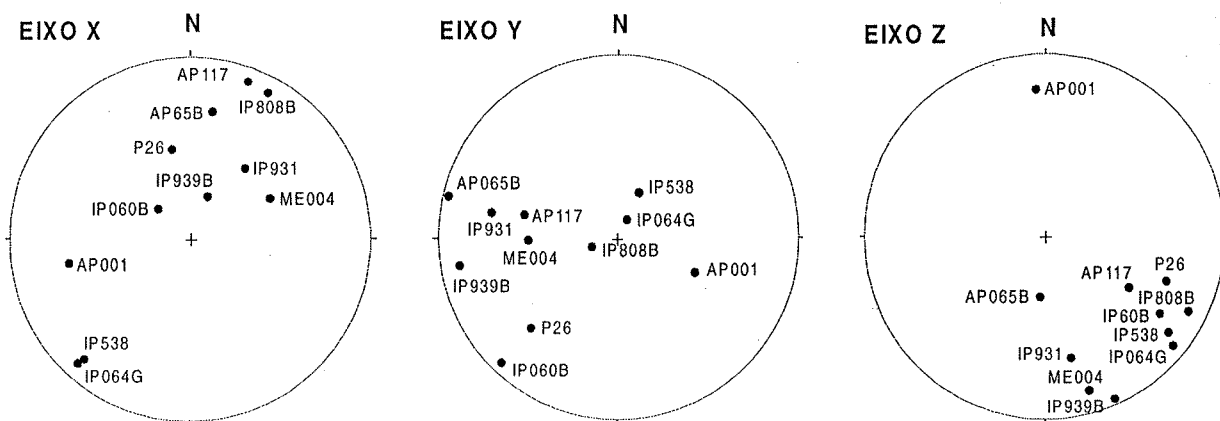


Figura 4 - Orientações dos eixos principais de deformação finita ( $X, Y, Z$ ) obtidas. As amostras IP071C, IP253B e IP928 apresentam razões de deformação ( $R_s = S_1/S_3$ ) muito baixas ( $R_s < 1,4$ ), e por este motivo não foram mostradas (diagramas de Schmidt-Lambert, hemisfério inferior).

tuadas na porção central do Bloco do Lajeado. São exceção a amostra AP001, discutida acima, e as amostras situadas na zona de influência dos lineamentos da Figueira e de Agudos Grandes (IP060B, P26, IP939), as quais tendem a mostrar eixos **X** com forte caimento e/ou com orientação para NW, configurando uma posição de mergulho a oblíqua com relação à atitude dessas zonas de cisalhamento. Isto reforça o caráter de movimentação inversa a oblíqua dessas estruturas, que por sua vez são defletidas com sentido dextral pelo Lineamento Ribeira, e portanto devem ser algo mais antigas que este.

Fiori (1997) também obteve eixos **X** subhorizontais, com direções em torno de N70-80E, para os conglomerados da Formação Camarinha, junto ao Lineamento Lancinha, não tendo por outro lado obtido atitudes com forte mergulho. Possivelmente esta diferença se deve ao fato de Fiori (1997) ter trabalhado nas proximidades do Lineamento Lancinha, não ocorrendo em sua área de estudo estruturas com orientação mais oblíqua à regional e movimentação inversa, tais como o Lineamento Figueira.

**Análise de amostra de metabrecha** As determinações feitas com a amostra IP939B merecem análise adicional. Trata-se de uma brecha de matriz metapelítica com fragmentos de metassiltitos e metarritmitos. Nela foram aplicados os métodos de orientação preferencial,  $R_F/\phi$  e média harmônica. Como o contraste de ductilidade entre a matriz e os fragmentos deve ser baixo, já que são do mesmo material, e uma dimensão (comprimento) é muito maior do que a outra (largura), tentou-se a aplicação do método da orientação preferencial (Ramsay & Huber 1983). Análise de orientação dos fragmentos foi feita através de histogramas de orientação da dimensão maior dos fragmentos *versus* frequência (Fig. 6), comparados com o gráfico padrão de curvas com diferentes razões de deformação ( $R_s$ ). Esta comparação forneceu os resultados da Tabela 4.

A aplicação do método  $R_F/\phi$  mostrou resultados muito semelhantes, como se vê na figura 7 e tabela 4. A razão de deformação ( $R_s$ ) foi obtida através dos gráficos padrão fornecidos por Lisle (1985). As nuvens de pontos obtidas são aproximadamente simétricas, com relação à linha de orientação ( $\phi$ ) média, evidenciando que não havia orientação preferencial de natureza pré-deformacional dos fragmentos (Ramsay 1967, Lisle 1985).

Já o método da média harmônica (Ramsay & Huber 1983) forneceu resultados discrepantes para a seção menos deformada, provavelmente devido ao formato original extremamente longitudinal dos fragmentos.

**Análise da geometria das zonas de cisalhamento** A inflexão sigmoidal que fazem as estruturas ao norte do Lineamento Ribeira sugere fortemente uma geometria de zona de

cisalhamento dúctil, como já observou Sadowski (1983). Uma forma de analisar a geometria das zonas de cisalhamento é através do desenho de isógonas (no caso, linhas que unem pontos com mesma direção da foliação das rochas) das estruturas sigmoidais que se formam em torno delas (Ramsay & Huber 1983, p. 37, fig. 3.5). Se a deformação for toda devida a um sistema de cisalhamento simples heterogêneo, conforme preconizado por Ramsay & Graham (1970) e, se as estruturas afetadas tiverem um comportamento passivo (isto é, sem contraste de competência), deve-se esperar isógonas aproximadamente paralelas à zona de cisalhamento.

A figura 2 mostra simplificada o padrão de isógonas obtido. As isógonas foram traçadas a partir do desenho de direções médias das estruturas, que forma a superfície axial na charneira das macrodobras mapeadas, e  $So/Sx$  nos seus flancos. Foi adotada como referência a direção da porção sul do Lineamento Ribeira ( $\alpha' = 0$ ).

Nota-se para as isógonas um paralelismo aproximado com o Lineamento Ribeira, mantido somente até a isógona de 25°. A primeira isógona a aparecer é a de 10°. Este é aproximadamente o menor ângulo que fazem as estruturas mapeadas com o Lineamento Ribeira.

A partir dos 30°, as isógonas são fortemente defletidas quando alcançam a zona de influência dos lineamentos Agudos Grandes e Figueira. Este comportamento se deve ao truncamento das estruturas, produzido provavelmente pela movimentação diferencial com relação ao Lineamento Ribeira. Este truncamento é de muito baixo ângulo, quando visto em planta, e percebido somente com muita atenção nos mapas geológico-estruturais, e em fotos aéreas. Porém é ressaltado pelo traçado das isógonas.

No Bloco Lajeado o padrão é totalmente diverso, provavelmente devido à alternância de pacotes com forte contraste de ductilidade, além da ação de várias zonas de cisalhamento menores bem como por efeitos deformativos provocados pela intrusão do Granito Itaoca. No Bloco Andorinhas, o padrão de isógonas foge também ao previsto pelo modelo de zonas de cisalhamento simples.

Na porção leste do Bloco Ribeira, onde o traçado das isógonas é mais homogêneo, elaborou-se um gráfico de cisalhamento *versus* distância, visando estimar o deslocamento dúctil produzido pelo Lineamento Ribeira, conforme proposto por Ramsay & Graham (1970).

Para o cálculo do valor de cisalhamento em cada ponto, considerou-se que as estruturas dispostas agora em forma de sigmoidal, seriam pré-cisalhamento, e foram rotacionadas por este de modo passivo. Esta interpretação é apoiada pelo fato destas estruturas fazerem regionalmente ângulos muito altos

Tabela 3 - Extensões das unidades estratigráficas medidas segundo perfil NW.

	$l_1$ (km)	$l_0$ (km)	$S = l_1/l_0$	$\lambda = (l_1/l_0)^2$	$e = (l_1 - l_0)/l_0$
Subgrupo Lajeado					
Fm. Betari	9.4	12.2	0.77	0.59	-0.23
Fm. Bairro da Serra	10.2	14.0	0.73	0.53	-0.27
Fm. Mina de FURNAS	18.5	22.6	0.82	0.67	-0.18
Subgrupo Ribeira	7.5	22.1	0.34	0.11	-0.66

Tabela 4 - Valores de  $R_s$  obtidos para a amostra IP-939B por vários métodos, para os três cortes analisados.

Corte A	Corte B	Corte C	Método
4.75	3.79	4.10	média harmônica
5.75	2.40	4.75	orientação preferencial
5.00	2.40	4.60	$R_F/\phi$



com a direção de cisalhamento. Na área estudada, e um pouco a norte dela, as estruturas chegam a um ângulo de aproximadamente  $60^\circ$  com o Lineamento Ribeira. Dentro do modelo de zona de cisalhamento dúctil, produzida unicamente por cisalhamento simples heterogêneo, o ângulo máximo que pode fazer a xistosidade (*i.e.*, o plano de máximo achatamento do elipsóide de deformação finita) com a zona de cisalhamento, seria de  $45^\circ$ . Assim, considerando o ângulo máximo que as estruturas fazem com a zona de cisalhamento, como  $\alpha = 60^\circ$ , o valor  $\gamma$  de cisalhamento pode ser calculado pela relação (Ramsay 1980):

$$\cotg \alpha' = \cotg \alpha + \gamma$$

$$\gamma = \cotg \alpha' - \cotg 60^\circ$$

onde  $\alpha'$  é o ângulo que a linha passiva faz com a zona de cisalhamento num determinado ponto. O ângulo  $\theta'$  que o eixo maior do elipsóide de deformação produzido faz com a direção de cisalhamento é dado por:

$$\tg 2\theta' = 2/\gamma$$

As elongações quadráticas  $\lambda_1$  e  $\lambda_3$  respectivamente dos eixos maior e menor do elipsóide de deformação são dadas por:

$$\lambda_1 = 1/2 [2 + \gamma^2 + (\gamma^2 + 4)^{1/2}]$$

$$\lambda_3 = 1/2 [2 + \gamma^2 - (\gamma^2 + 4)^{1/2}]$$

A partir destas relações, construiu-se a tabela 5, na qual se vêem os valores teóricos esperados de  $\gamma$ ,  $\theta'$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_3$  e  $R_s$ , esperados para cada ângulo  $\alpha'$  da figura 10. Note-se que  $R_s$  deve atingir valores muito altos próximo ao Lineamento Ribeira, da ordem de 1:30 (para  $\alpha' = 10^\circ$ ). Estes valores de deformação

muito altos podem explicar as feições miloníticas observadas em alguns pontos.

A figura 8 mostra a curva de cisalhamento *versus* distância construída para o perfil indicado na figura 2. A área sob esta curva (sua integral) indica o deslocamento (rejeito) produzido pela zona de cisalhamento (Ramsay & Graham 1970). No caso, o rejeito dúctil estimado para o bloco norte do Lineamento Ribeira foi de 18 km.

A figura 9 mostra outra forma de estimativa do rejeito associado ao Lineamento Ribeira, por meio das correlações litoestratigráficas e da própria inflexão regional das estruturas. Os rejeitos foram tomados na direção mediana do lineamento. O rejeito total estimado desta forma foi de 50 km, sendo 16 km de rejeito dúctil no bloco norte, possivelmente cerca de 14 km de rejeito rúptil dado pela interrupção da continuidade da Formação Iporanga e sua possível continuidade nos metarritmitos da Formação Votuverava no Paraná, e 20 km de rejeito dúctil no bloco sul.

Fiori (1985, 1997), analisando as falhas do Morro Agudo e Lancinha, com abordagem semelhante à aqui adotada, obteve rejeitos dúcteis totais significativamente diferentes, da ordem de 87 a 122 km para a primeira, e de 100 a 142 km para a segunda. Para a Falha da Lancinha seria mesmo de se esperar um rejeito maior, já que esta é considerada pela maioria dos autores como uma das mais importantes do sistema, representando um limite crustal mais significativo. Para a Falha do Morro Agudo, a qual se une com o Lineamento Ribeira, tal diferen-

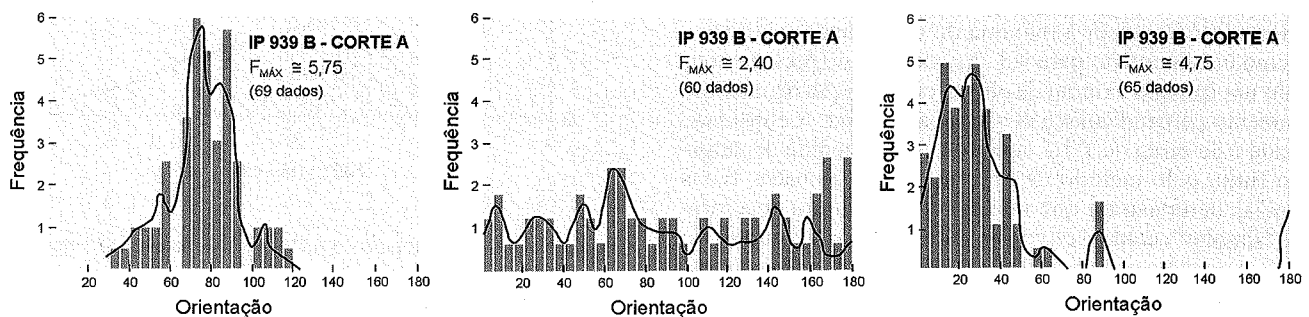


Figura 6 - Histogramas da orientação de fragmentos ripiformes da brecha de Iporanga, em três cortes da amostra IP939B.

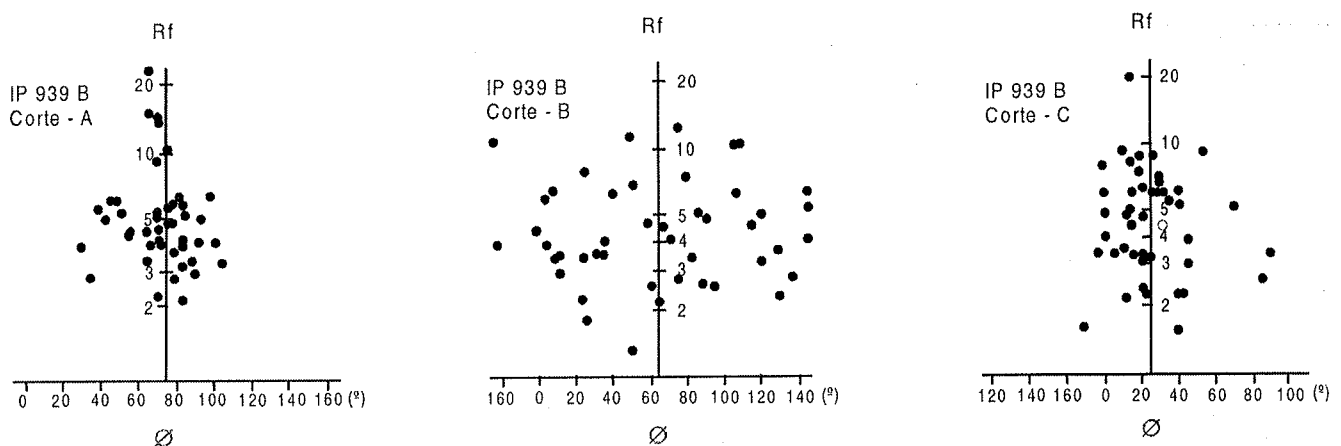


Figura 7 - Gráficos  $R_F$  versus  $\phi$  de três cortes da amostra IP939B (Brecha de Iporanga).

ça ainda permanece por ser melhor explicada. Observa-se que os eixos de dobras e traços de foliação da área analisada por Fiori (1985, 1997) apresentam um padrão quase paralelo com os traços das zonas de cisalhamento, sobre uma faixa mais larga, quando comparados com a área aqui analisada, implicando no cálculo de valores de  $g$  mais altos, e portanto de rejeitos maiores. Este maior paralelismo por sua vez poderia ser tentativamente explicado ou pela maior proximidade com a Falha da Lancinha, ou pela ocorrência de componentes de achatamento perpendiculares à faixa.

**Evidências da história deformacional** As determinações quantitativas da deformação finita baseiam-se na comparação da geometria inicial suposta com a geometria final deformada das rochas. Não têm implicação direta quanto à história deformacional, ou seja, sobre as trajetórias realizadas pelas partículas que compõem o *continuum* dos corpos rochosos. Não entra em consideração se a deformação foi progressiva, episódica, em quantas fases, coaxial ou não-coaxial, embora permita verificar em alguns casos, a presença de anisotropia prévia. Outro tipo de evidência tem que ser procurado para indicar o tipo de processo deformacional que atuou.

Nos mármores do Subgrupo Lajeado observam-se por vezes cristais de pirita com sombras de pressão preenchidas por cristais de quartzo e/ou calcita. Na amostra IP803B foram confeccionadas três seções delgadas orientadas, ortogonais entre si, cortando as sombras de pressão, paralelas e perpendiculares à clivagem ardosiana. As fibras de quartzo neste caso aparentam configurar formas tridimensionais complexas. Mostram uma rotação das direções principais de deformação incremental superior a  $90^\circ$  (superior à máxima do cisalhamento simples,  $45^\circ$ ), com cisalhamento para sul. As sombras de pressão configuram um formato externo de elipse, com direção de máximo achatamento perpendicular à clivagem ardosiana. A elipsidade mostrada é de cerca de 1:1,8 coerente com a medida de deformação finita pelo método de Fry, na mesma amostra. Estas evidências demonstram que mesmo uma estrutura aparentemente "simples", como a clivagem ardosiana nos mármores do Lajeado, com orientação bastante uniforme, e no caso da amostra analisada situando-se na região de charneira de uma macrodobra, pode ser produto de uma história deformacional complexa, não-coaxial.

Dentro das zonas de cisalhamento que cortam o Lajeado, as evidências de deformação rotacional são mais facilmente observadas, tais como porfiroclastos e boudins assimétricos, sugerindo deformação rotacional.

Nos metassedimentos do Bloco Ribeira foram observadas sombras de pressão sobre cristais de pirita, com fibras de quartzo desde retas até encurvadas a  $35^\circ$  concordantes com a clivagem ardosiana. Foram também observadas concreções sedimentares, com a clivagem tectônica contornando-as com configuração assimétrica, sugerindo deformação rotacional. Ainda no Bloco Ribeira, algumas dobras com plano-axial paralelo ou aproximadamente paralelo com a clivagem ardosiana apresentam características de dobras por cisalhamento (*slip-folds*). Estas evidências mostram a presença importante de deformações não coaxiais.

**Modelos de Deformação** As evidências levantadas neste trabalho levam a crer que o sistema de zonas de cisalhamento transcorrentes tardio que afetou a região possui grande importância, não só na compartimentação tectônica, como também

Tabela 5 - Valores teóricos de cisalhamento associados ao Lineamento Ribeira, para  $\alpha = 60^\circ$ .

$\alpha$	$\gamma$	$\theta$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$R_s$
60	0	-	1.00	1.00	1.00
55	0.12	43.24	1.13	0.88	1.13
50	0.26	41.27	1.30	0.77	1.30
45	0.42	39.03	1.52	0.66	1.52
40	0.61	36.46	1.83	0.55	1.83
35	0.85	33.48	2.29	0.44	2.29
30	1.15	30.00	3.00	0.33	3.00
25	1.57	25.96	4.22	0.24	4.22
20	2.17	21.33	6.56	0.15	6.56
15	3.15	16.19	11.87	0.08	11.87
10	5.09	10.72	27.91	0.04	27.91
5	10.85	5.22	119.77	0.01	119.77

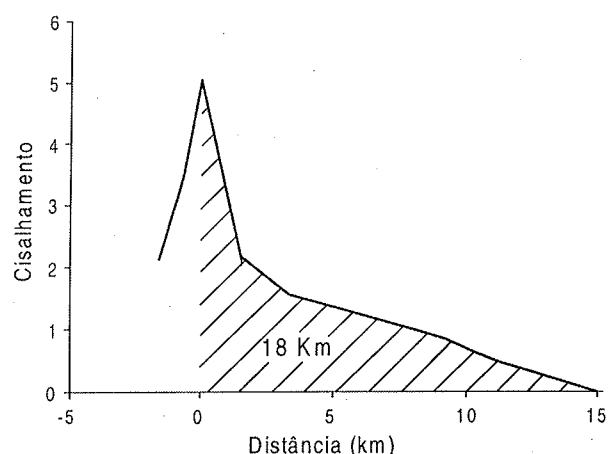


Figura 8 - Estimativa do rejeito dúctil associado ao bloco norte do Lineamento Ribeira, através do cálculo da área sob a curva de cisalhamento ( $\gamma$ ) versus distância.

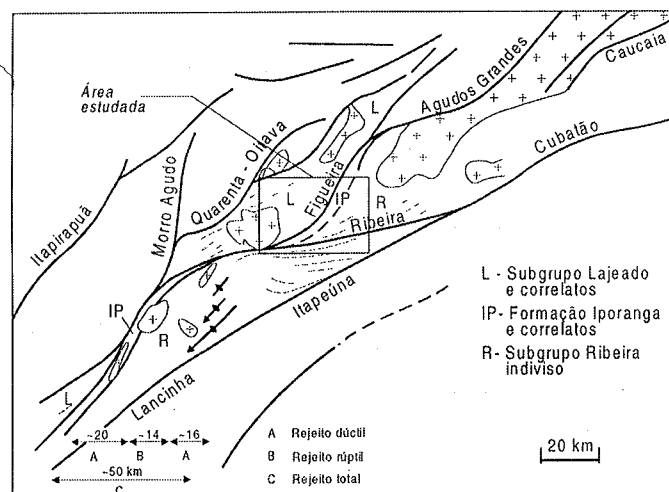


Figura 9 - Estimativas do rejeito ao longo do Lineamento Ribeira por correlações regionais.

no padrão da distribuição da deformação e das estruturas dos blocos intervenientes. As amplas inflexões sigmoidais das estruturas regionais, o incremento da deformação em direção às zonas de cisalhamento, e a predominância da posição subhorizontal de máximo estiramento atestam esta importância.

Em tese, é possível elaborar um modelo deformacional que procure explicar a maior parte das deformações observadas em termos de um sistema único de cisalhamento transcorrente ou transpressivo. As variações de orientação e intensidade das foliações tectônicas seriam devidas à variação de posição e forma do elipsóide de deformação, num processo de deformação heterogênea. A lenticularização tectônica regional, com blocos transpressivos e transtensivos também induziria a estilos estruturais distintos em várias áreas.

No entanto, existem evidências de que o sistema transcorrente afeta estruturas tectônicas anteriormente desenvolvidas. O desenvolvimento da xistosidade regional não se coaduna totalmente com o modelo de zonas de cisalhamento simples, já que este por vezes faz ângulos maiores que 45° com a mesma. Isto seria possível apenas num regime transtrativo, ou seja, com extensão perpendicular ao cinturão, o que não parece razoável. Granitos pós- ou tardi-tectônicos são afetados pelas zonas de cisalhamento transcorrentes, como o Itaoca, milonitizado pelo Lineamento Ribeira em seu extremo sul. A intrusão deste granito por sua vez deforma pelo menos uma xistosidade pré-existente, e provoca o crescimento de uma associação mineralógica termal sobre esta xistosidade e paragéneses minerais pré-existent. Estas evidências sugerem ou que haja um lapso de tempo razoável entre o desenvolvimento inicial da xistosidade (S<sub>1</sub>) e o cisalhamento transcorrente, ou que esses eventos sejam recorrentes no tempo.

Outra questão refere-se à diferença de estilo estrutural observada entre o Bloco Lajeado e o Bloco Ribeira. Além do fator já analisado relativo à quantidade de deformação total, em geral maior no Bloco Ribeira, cabem observações quanto ao comprimento de onda dos dobramentos. Este é decamétrico a quilométrico nas camadas mais competentes e espessas do Lajeado, e decimétrico a centimétrico nos metapelitos do Bloco Ribeira. Isto coaduna-se com os modelos de Ramberg e de Biot (*apud* Ramsay 1967, Ramsay & Huber 1992), onde o comprimento de onda de uma dobra é diretamente proporcional à espessura da camada e também função positiva do contraste de competência entre os estratos. Quanto mais competente e espessa for a camada, maior o comprimento de onda da dobra gerada. A imposição do estilo de deformação dos estratos mais competentes de quartzitos sobre filitos, anfíbolitos etc. se observa claramente nas estruturas de dobramento da Serra do Cadeado (Formação Perai) e no vale do Betari.

Evidências de sobreposição de estruturas observadas na área (Campanha 1991) sugerem o desenvolvimento inicial de empurrões com vergência de NW para SE, seguidos ou acompanhados de um evento puramente compressivo, passando para um estágio transcorrente destrai que rotacionou as estruturas inicialmente desenvolvidas.

A xistosidade em todos os blocos estaria possivelmente associada a uma compressão oblíqua que evoluiu de um sistema de lascas de empurrão (*thrust sheets*) com movimentação predominante de NW para SE; para um sistema de caráter transcorrente destrai, ENE-WSW.

**CONCLUSÕES** Os resultados obtidos, aliados a dados de

campo, regionais e de detalhe, mostraram consistência, seja com o padrão de xistosidade e estruturas menores observado, seja na aplicação de diferentes métodos em uma mesma amostra, na comparação com os valores de encurtamento deduzidos do dobramento de unidades estratigráficas e com os valores de cisalhamento obtidos pela análise das inflexões regionais produzidas pelo Lineamento Ribeira.

Os métodos aqui aplicados, adaptados dos existentes na literatura, foram escolhidos visando uma abordagem preliminar do problema, onde seria mais importante um maior número de estimativas semi-quantitativas distribuídas regionalmente, do que um número menor de determinações precisas e localizadas. Os métodos gráficos adotados, embora mais trabalhosos e aparentemente menos precisos, permitiram por outro lado o controle visual de diversos parâmetros, como o ajuste de compatibilidade entre as seções de medida, evitando erros grosseiros. Algumas ressalvas no entanto devem ser feitas. As técnicas utilizadas permitem em geral apenas a análise de rochas com granulação relativamente grossa (metassiltitos, metarenitos e metaconglomerados). Deste modo, as rochas de granulação mais fina, em geral mais incompetentes, e potencialmente mais deformadas, são subamostradas. Por outro lado, para as rochas pouco deformadas, existe uma indeterminação das direções principais, já que o elipsóide aproxima-se de uma esfera.

As orientações obtidas dos eixos principais de deformação finita sugerem a predominância de direções de estiramento máximo (X) subhorizontais NE-SW. Exceção é a região dos Lineamentos Figueira e Agudos Grandes, onde a direção de máximo estiramento (X) apresenta fortes mergulhos, para NW ou N/S, confirmando a movimentação inversa ou oblíqua dessas estruturas. Os eixos Z obtidos são em geral coerentes com um plano de máximo achatamento com direção NE e mergulho forte para NW, concordante com a orientação média da xistosidade e clivagem ardosiana na área.

A porção central do Lajeado aponta deformação finita em geral muito baixa. Foram obtidos valores de X/Z entre 1,31 e 1,91. Esta aumenta em direção às zonas de cisalhamento (2,30 e 2,79), e dentro do Bloco Ribeira (5,74 e 8,93). Isto concorda com o estilo deformacional observado nessas unidades.

A maior parte dos elipsóides obtidos aproxima-se do tipo com  $k = 1$ . Três são fortemente prolatos ( $k \gg 1$ ) e um é fortemente oblato ( $k < 1$ ).

Análise de geometria da Zona de Cisalhamento do Lineamento Ribeira mostra um deslocamento destrai dútil do bloco norte de cerca de 18 km. O deslocamento total inferido é de cerca de 50 km, por correlações regionais.

Estes padrões de distribuição da deformação finita atestam a importância de uma tectônica de blocos de diferentes ductilidades, fortemente impregnada pelo evento de tectônica transcorrente de caráter regional. Em termos de um *strain partitioning* de caráter aparentemente diacrônico, pode-se imaginar uma componente de cisalhamento simples de baixo ângulo NW-SE, uma componente de encurtamento horizontal NW-SE, e uma componente de cisalhamento simples destrai, com direção NE-SW.

**Agradecimentos** Os autores expressam agradecimentos aos relatores da RBG que revisaram e contribuíram com este trabalho, e à FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo apoio financeiro.

## Referências

- 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. 1991. *Tectônica Proterozóica no Alto e Médio Vale do Ribeira, Estados de São Paulo e Paraná*. São Paulo, 296 p., anexos (Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo).
- De Paor D.G. 1983. Orthographic analysis of geological structures -I. Deformation theory. *J. Struct. Geol.*, **5**:255-277.
- De Paor D.G. 1986. Orthographic analysis of geological structures -II. Deformation theory. *J. Struct. Geol.*, **8**:87-100.
- Fiori A.P. 1985. Avaliação preliminar do deslocamento dúctil das falhas de Lancinha e de Morro Agudo no Estado do Paraná. *Bol. Paranaense de Geoc.* **36**:15-30.
- Fiori A.P. 1997. *Introdução à análise da deformação*. Curitiba, Ed. da UFPR, 249 p.
- Fry N. 1979. Random point distributions and strain measurements in rocks. *Tectonophysics* **60**:89-105.
- Lisle R.J. 1985. *Geological strain analysis: a manual for the Ruff method*. Oxford, Pergamon Press, 99 p.
- Milton N.J. 1980. Determination of strain ellipsoid from measurements on any three sections. *Tectonophysics*, **64**:19-27.
- Ramsay J.G. 1967. *Folding and fracturing of rocks*. McGraw-Hill Book Co., New York, 568 p.
- Ramsay J.G. 1980. Shear zone geometry: a review. *J. Struct. Geol.*, **2**:83-99.
- Ramsay J.G. & Graham R.H. 1970. Strain variation in shear belts. *Can. J. Earth Sci.*, **7**:786-813.
- Ramsay J.G. & Huber M.I. 1983. *The techniques of modern structural geology*. Volume 1: *Strain Analysis*. New York, Academic Press 307 p.
- Sadowski G.R. 1983. *Sobre a geologia estrutural de cinturões de cisalhamento continentais*. São Paulo. Tese de Livre Docência, Instituto de Geociências, USP, 108 p.

Manuscrito A-1252

Recebido em 14 de agosto de 2001

Revisão dos autores em 20 de março de 2002

Revisão aceita em 21 de março de 2002