

ANÁLISE ESTRUTURAL DA TECTÔNICA DEFORMADORA DA BACIA DE ITAJAÍ, ESTADO DE SANTA CATARINA, BRASIL

STRUCTURAL ANALYSIS OF THE DEFORMING TECTONICS OF THE ITAJAÍ BASIN, SANTA CATARINA, BRAZIL

Sidnei Pires Rostirolla¹, Paulo César Soares² e Fernando Flecha de Alkmim³

RESUMO – A análise estrutural do Grupo Itajaí indicou uma polaridade da deformação, crescente de noroeste para sudeste, em direção ao domínio interno do cinturão orogênico Dom Feliciano, tal como esperado para uma bacia de antepaís envolvida pela deformação nas fases finais de uma convergência de placas. Duas famílias de estruturas foram reconhecidas, as quais corresponderiam a duas fases de deformação, com campos de tensões distintos. A primeira fase relacionou-se à deformação tardi-colisional do cinturão Dom Feliciano, fato que ocasionou o desenvolvimento de estruturas frontais a uma compressão SE-NW, principalmente falhas reversas, dobras assimétricas e um sistema conjugado de falhas transcorrentes. Conforme evoluiu a convergência, a rotação do campo de tensões proporcionou uma situação de obliquidade durante o transporte tectônico, cuja cinemática seguiu um caráter reverso dextral. A segunda fase registra a reativação distensional pós-orogênica, durante a qual as estruturas prévias foram reativadas e os movimentos no par conjugado de falhas transcorrentes foram invertidos.

(Originais recebidos em 29.05.92).

ABSTRACT – *Structural analysis of the Itajaí Group has confirmed and increase in deformation magnitude from NW to SE, toward the more deformed zone of the Dom Feliciano mobile belt. This condition is in agreement with the predicted characteristics of a foreland basin deformed in a convergent environment. Two families of tectonic structures were recognized, both corresponding to different deformation phases and associated stress fields. The first represents the late collisional phase of the orogenic cycle, which caused the development of reverse faults, asymmetric folds, and a conjugate system of strike-slip faults. The progressive evolution of this convergence led to the change from a frontal to an oblique collision, with dextral-reverse kinematics. The second phase records a post-collisional extensional pulse, leading to the reactivation of earlier structures and inversion of movements along the conjugate system of strike-slip faults.*

(Expanded abstract available at the end of the paper).

1 – INTRODUÇÃO

O Grupo Itajaí situa-se no leste do estado de Santa Catarina e abrange uma área de aproximadamente 1 800 km², limitada pelos paralelos 26° 45' e 27° 30' sul e pelos meridianos 48° 45' e 49° 45' oeste (fig. 1). Consiste em sedimentos siliciclásticos terrígenos depositados no final do Proterozóico Superior, correspondendo a uma bacia molássica brasileira.

A análise estrutural das rochas do Grupo Itajaí, na bacia homônima, mostrou a existência de um inventário estrutural polarizado de NW para SE, representando um padrão regional coerente com as informações de Basei (1985) sobre o cinturão orogênico Dom Feliciano.

Diversos estudos geotectônicos já estabeleceram que o Grupo Itajaí situa-se entre uma faixa móvel e um cráton brasileiro (Almeida, 1967; Fragoso César *et al.* 1982; Jost e Hartmann, 1984; fig. 2), sendo classificado como uma seqüência depositada em uma antefossa molássica tipo *rift* (Basei, 1985), bacia periférica (Issler, 1985) ou bacia tardi-colisional (Soares, 1988). A maioria dos trabalhos indica uma deformação pós-deposicional predominantemente compressiva, embora a ocorrência de uma leve modificação transcorrente no decorrer da deformação (Rostirolla, 1991) tenha levado alguns autores a considerarem um contexto de bacia *pull-apart* (Krebs *et al.* 1988 e 1990b).

O registro estrutural, assim como o padrão de

1 - Consultor no Setor de Estratigrafia (SESTRA), Divisão de Exploração (DIVEX), Centro de Pesquisas (CENPES), Cidade Universitária, Quadra 7, Ilha do Fundão, CEP 21949-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

2 - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.

3 - Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Geologia, Morro do Cruzeiro, CEP 35400, Ouro Preto, MG, Brasil.

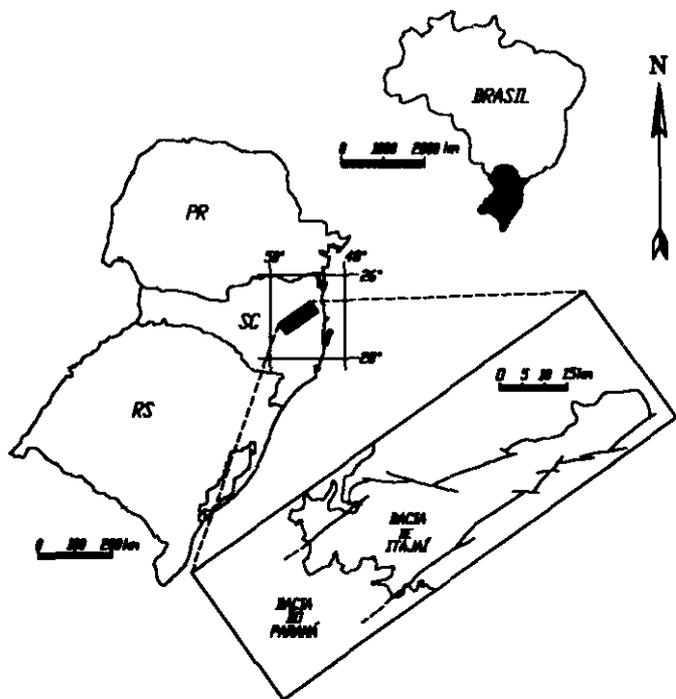


Fig. 1 - Mapa de localização da Bacia de Itajaí.
 Fig. 1 - Location map, Itajaí Basin.

preenchimento sedimentar (Appi, 1991; Rostirolla, 1991; Rostirolla *et al.* 1992), conduzem a uma hipótese de bacia de antepaís, com possibilidade de alguma contribuição de falhas normais durante a fase inicial de subsidência flexural.

Por meio de uma análise estrutural baseada em dados de campo foram observadas duas famílias de estruturas tectônicas, que far-se-iam corresponder a duas fases de deformação, representando a tectônica modificadora da bacia. A primeira fase (D1), compressiva, domina o quadro estrutural da Bacia de Itajaí. Já a segunda (D2), teve uma intensidade muito menor e registra a reativação distensiva das estruturas da primeira fase.

Determinou-se uma deformação em regime rúptil a rúptil-dúctil, com as estruturas mais penetrativas, constituindo falhas e juntas, indicando que os corpos alcançaram o ponto de ruptura sem sofrer uma fluência significativa. Além disso, as zonas de cisalhamento não apresentam evidência de fluxo milonítico durante a deformação e os dobramentos foram absorvidos, em grande parte, ao longo de descontinuidades prévias.

2 - IDADE

O Grupo Itajaí representa o registro de uma sedi-

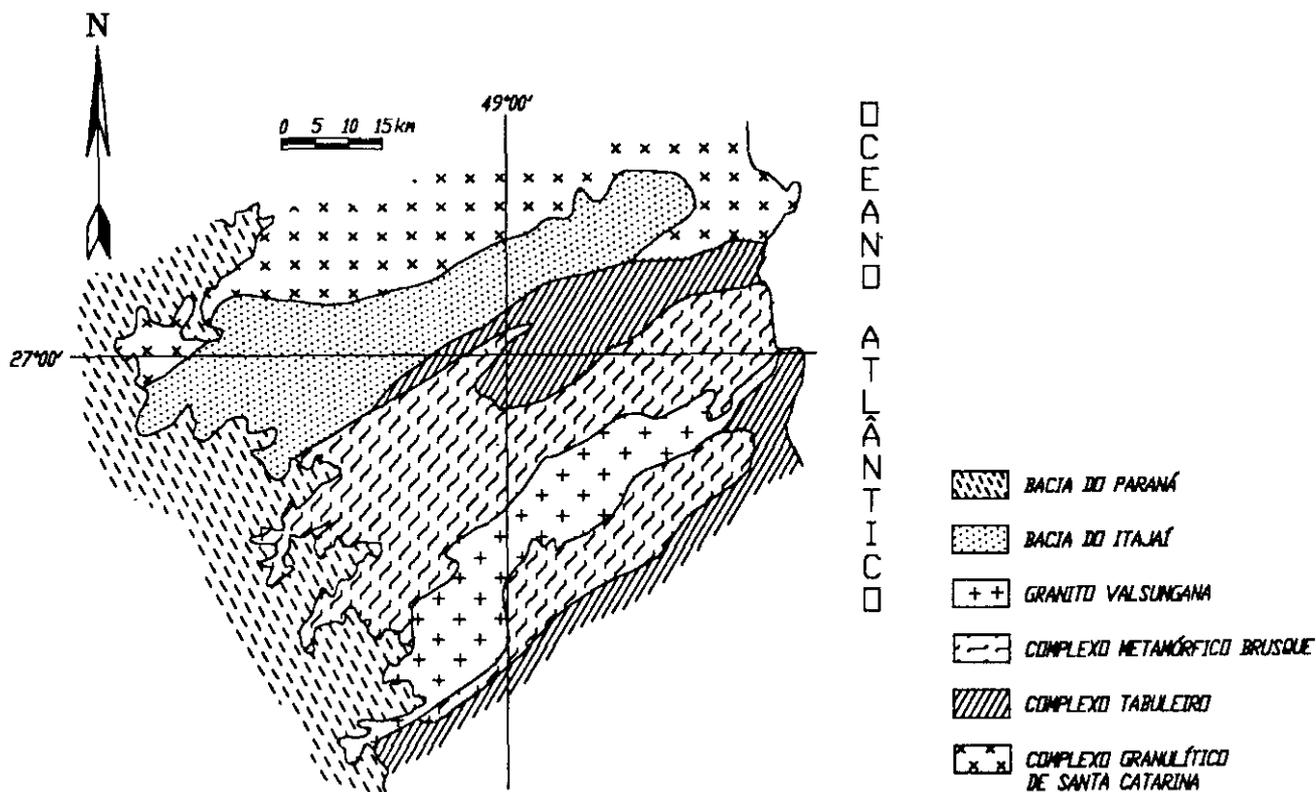


Fig. 2 - A Bacia de Itajaí no contexto geológico regional. O complexo granulítico de Santa Catarina corresponde ao bloco cratônico e os complexos Tabuleiro, Brusque e Granito Valsungana, ao cinturão dobrado (modificado de Silva, 1987).

Fig. 2 - Regional geological context of Itajaí Basin. The Santa Catarina granulitic complex corresponds to the cratonic block, while the Tabuleiro and Brusque complexes, and the Valsungana granite correspond to the fold belt (adapted from Silva, 1987).

mentação terrígena brasileira associada ao fechamento do cinturão orogênico Dom Feliciano (Fragoso Cesar *et al.* 1982; Basei, 1985; Soares, 1988; fig. 2).

Segundo Macedo *et al.* (1984), a idade de sedimentação situa-se em torno de 558 ± 48 M.a., tendo a área sofrido um episódio metamórfico de intensidade epi a anquizonal por volta de 550 M.a. (datação Rb-Sr em rocha total e frações finas de folhelhos e siltitos), e resfriamento com valor médio cerca de 525 M.a. (datação K-Ar em frações finas de folhelhos e siltitos).

Como registro de magmatismo ocorre o Granito Subida (546 ± 9 M.a.; Rb-Sr; $r_i = 0,700 \pm 0,002$; Basei, 1985) e corpos riolíticos ($544 \pm$ M.a.; Rb-Sr; $r_i = 0,705 \pm 0,001$; Basei, 1985), intrusivos nos sedimentos do Grupo Itajaí na região de Ibirama e Subida, SC.

3 – ESTRATIGRAFIA

Ao longo dos limites noroeste e nordeste da bacia ocorrem depósitos siliciclásticos de granulometria grosseira (associação faciológica A nas figuras 3 e 4), denominados Formação Gaspar (Silva e Dias, 1981)

ou Sequência Gaspar (Appi, 1991). Tais depósitos foram interpretados como originados em planícies de rios entrelaçados (Popp e Silva, 1985), e corresponderiam a leques aluviais e deltaicos retrogradantes (Rostirolla, 1991; Appi, 1991; Rostirolla *et al.* 1992).

Na parte central da bacia aflora um conjunto espesso de arenitos, pelitos e ritmitos, incluídos na Formação Garcia por Salamuni *et al.* (1961). Tais rochas representam as porções inferiores da Sequência Garcia, de Appi (1991), correspondendo a sistemas turbidíticos na base e pelitos transgressivos no topo (respectivamente associações faciológicas B e C nas figuras 3 e 4).

Nos setores sul e sudeste da bacia ocorre outra cunha clástica, que foi incluída na Formação Gaspar (Silva e Dias, 1981), e interpretada como sistemas deltaicos transgressivos (Krebs *et al.* 1988 e 1990a), sendo posicionada abaixo das rochas que afloram no setor central. Entretanto, em Rostirolla (1991) e Appi (1991) verificou-se que tal conjunto de rochas é formado por sistemas de leques deltaicos regressivos, e situa-se na parte superior da seção sedimentar (associação faciológica D nas figuras 3 e 4).

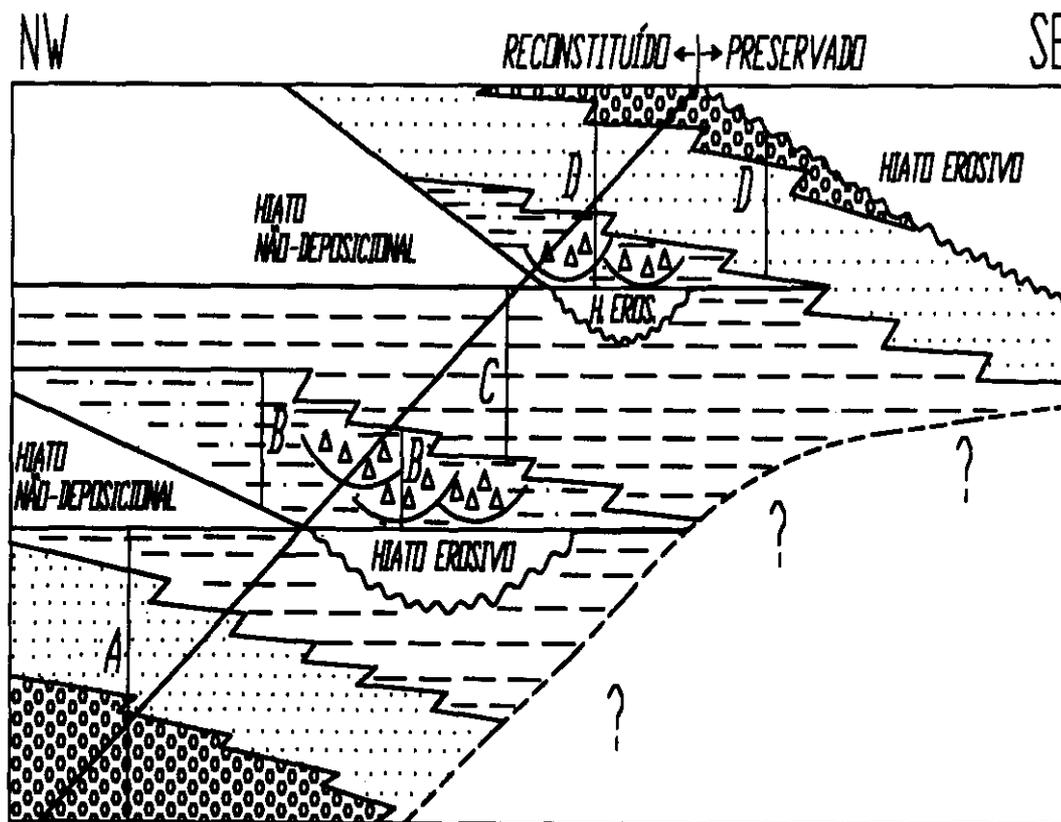


Fig. 3 - Carta estratigráfica esquemática do Grupo Itajaí. A associação faciológica A corresponde a sistemas de leques aluviais e deltaicos retrogradantes, provenientes da margem cratônica, sobrepostos por sistemas plataformais. A associação faciológica B compreende depósitos de sistemas turbidíticos, com paleocorrentes axiais. A associação C é representada por pelitos que colmataram o sítio deposicional turbidítico. A associação D corresponde a sistemas de leques deltaicos provenientes da margem orogênica da bacia (Rostirolla *et al.* 1992).

Fig. 3 - Schematic stratigraphic chart of Itajaí Group. Facies association A corresponds to retrograding alluvial and deltaic fan systems from the cratonic margin, overlain by platform systems. Facies association B consists of turbidite system deposits with axial paleocurrents. Association C consists of pelites that covered the turbidite depositional site. Association D corresponds to deltaic fan systems from the orogenic margin of the basin (Rostirolla *et al.* 1992).

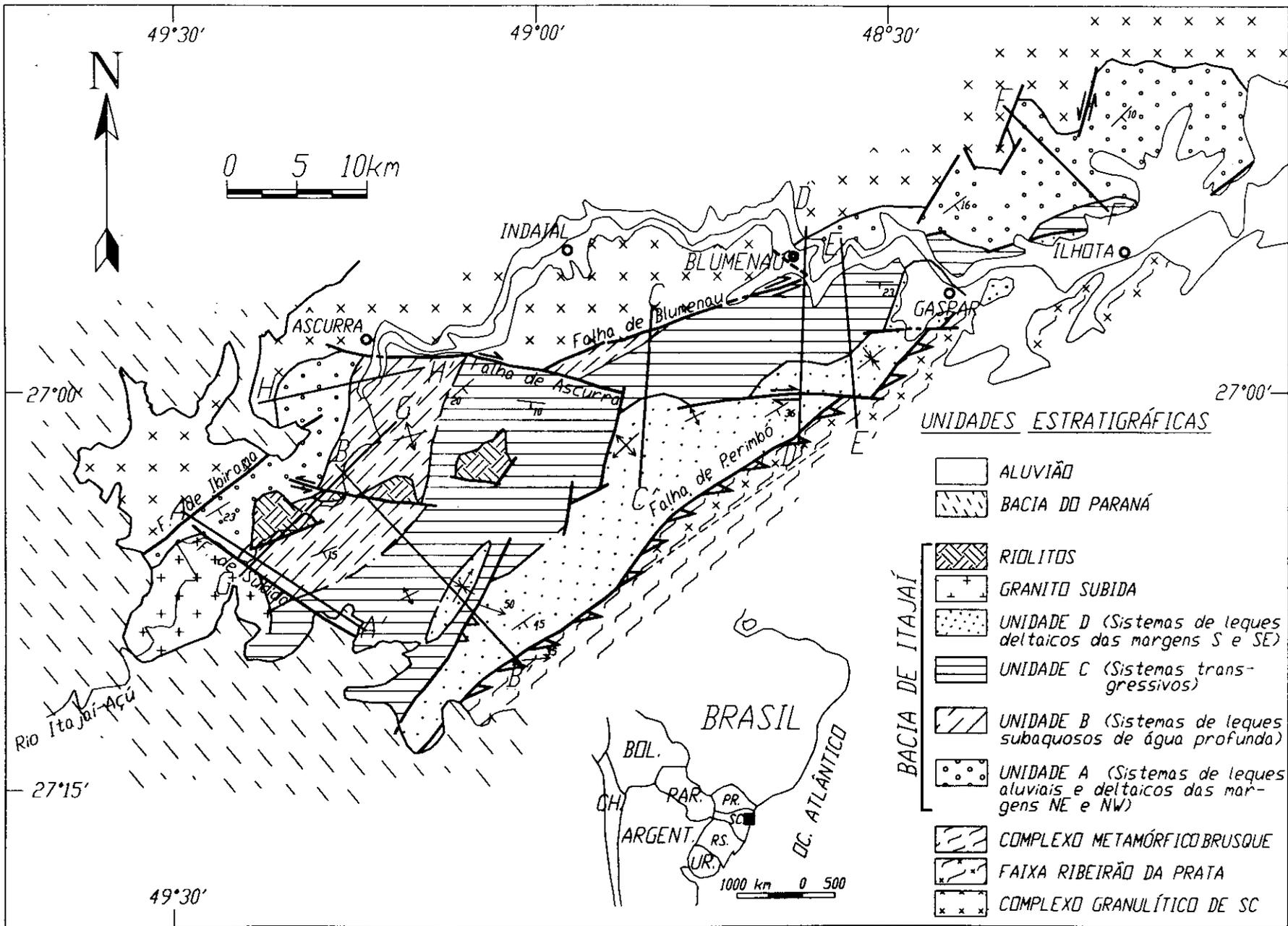


Fig. 4 - Mapa geológico da Bacia de Itajaí.
 Fig. 4 - Geologic map, Itajaí Basin.

4 – ANÁLISE ESTRUTURAL DESCRITIVA

4.1 -- Estruturas da Fase de Deformação D1

4.1.1 – Dobras e Estruturas Associadas

Dobras megascópicas – Os dobramentos regionais da primeira fase apresentam-se descontínuos e ocorrem com maior frequência na porção sul-sudoeste da área estudada. O seu efeito, em um diagrama sinóptico de acamamento, constitui uma dispersão em torno de eixos com direção NE-SW. O diagrama com medidas de acamamento de toda a área (fig. 5) exemplifica tal dispersão, que satisfaz um eixo F1 N60E/4.

Os diagramas referentes a cada uma das associações faciológicas mapeadas (fig. 4) demonstram a descontinuidade da deformação na bacia. Notar que, para as associações B (fig. 7), C (fig. 8) e D (fig. 9), a dispersão dos valores de acamamento em estereograma é mais visível do que quando consideramos as medidas em conjunto (fig. 5), enquanto para a associação A (fig. 6) a dispersão é menor do que aquela evidenciada em toda a bacia. Isto sugere que os dobramentos da primeira fase estão restritos a algumas áreas mais deformadas, estando também diretamente relacionados à competência da litologia predominante em cada associação faciológica.

Observou-se que as megadobras da primeira fase apresentam simetria monoclinica e são suaves a abertas (fig. 8). As seções estruturais (figs. de 10 a 12) reproduzem a visão bidimensional dessas estruturas, com comprimentos de onda da ordem de centenas de metros e vergência para NW, em alguns locais ocorrendo homoclinais mergulhando para sudeste.

Um dado importante refere-se à ocorrência de camadas invertidas, que correspondem ao flanco inverso subverticalizado de dobras sinclinais fechadas da

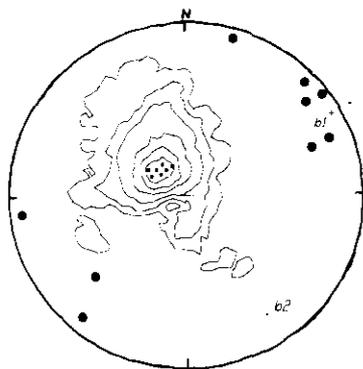


Fig. 5 - Diagrama de isolinhas com 478 medidas de acamamento. Isolinhas: 1, 2, 4, 8, 12, 16%. Máximos: N54E/15SE (19,9%), N42E/15SE (19,5%), N30E/18SE (18,3%). Eixos: b1-N62E/04 e b2-S34E/18. Os pontos isolados, em destaque, representam os eixos de dobras medidos em afloramentos.

Fig. 5 - Isopleth diagram with 478 bedding measurements. Isopleths: 1, 2, 4, 8, 12, 16%. Maxima: N54E/15SE (19.9%); N42E/15SE (19.5%); N30E/18SE (18.3%). Axes: b1-N62E/04 and b2-S34E/18. Large dots represent axes of folds measured in outcroppings.

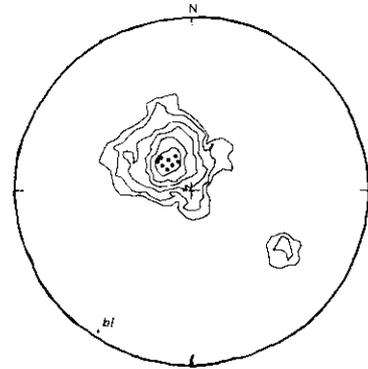


Fig. 6 - Diagrama de isolinhas com 79 medidas de acamamento da Unidade A. Isolinhas: 2, 4, 8, 12, 18, 24%. Máximos: N48E/21SE (29,5%), N54E/18SE (28,1%). Eixo b1: S35W/04.

Fig. 6 - Isopleth diagram with 79 bedding measurements of Unit A. Isopleths: 2, 4, 8, 12, 18, 24%. Maxima: N48E/21SE (29.5%); N54E/18SE (28.1%). Axis b1: S35W/04.

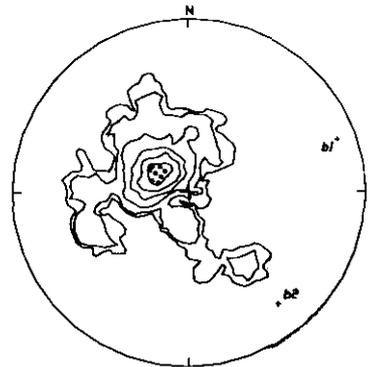


Fig. 7 - Diagrama de isolinhas com 164 medidas de acamamento da Unidade B. Isolinhas: 1, 2, 5, 10, 16, 24%. Máximos: N30E/18SE (29,1%), N42E/15SE (29,1%), N18E/18SE (27,1%). Eixos: b1-N71E/10 e b2-S41E/18.

Fig. 7 - Isopleth diagram with 164 bedding measurements of Unit B. Isopleths: 1, 2, 5, 10, 16, 24%. Maxima: N30E/18SE (29.1%); N42E/15SE (29.1%); N18E/18SE (27.1%). Axes: b1-N71E/10 and b2-S41E/18.

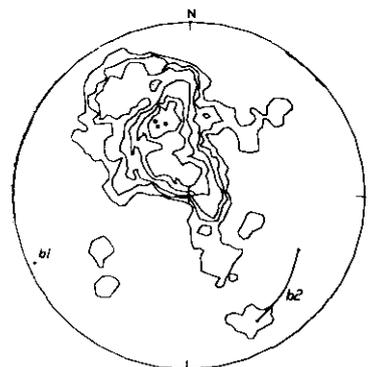


Fig. 8 - Diagrama de isolinhas com 169 medidas de acamamento da Unidade C. Isolinhas: 1, 2, 3, 5, 7, 9%. Máximos: N72E/36SE (12,4%), N66E/36SE (11,8%). Eixos: b1-S66W/04, b2-S64E/30 a S29E/20.

Fig. 8 - Isopleth diagram with 169 bedding measurements of Unit C. Isopleths: 1, 2, 3, 5, 7, 9%. Maxima: N72E/36SE (12.4%); N66E/36SE (11.8%). Axes: b1-S66W/04; b2-S64E/30 to S29E/20.

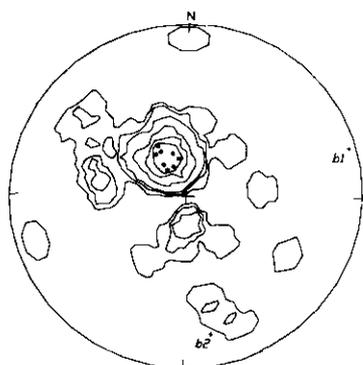


Fig. 9 - Diagrama de isolinhas com 66 medidas de acamamento da Unidade D. Isolinhas: 1, 3, 5, 10, 15, 20%. Máximos: N54E/18SE (25,2%), N60E/27SE (25,2%). Eixos: b1-N74E/04 e b2-S18E/21.

Fig. 9 - Isopleth diagram with 66 bedding measurements of Unit D. Isopleths: 1, 3, 5, 10, 15, 20%. Maxima: N54E/18SE (25.2%); N60E/27SE (25.2%). Axes: b1-N74E/04 and b2-S18E/21.

primeira fase. Tais dobras são associadas à zona de falha de Perimbó, e são mais frequentes na porção sul-sudoeste da área (seções B-B', Ribeirão Neisse; e C-C', Rio Encano; fig. 10).

Dobras Mesoscópicas — Encontram-se isoladas ou contidas nos flancos das dobras F1 maiores, nesse caso como estruturas de segunda ordem (fig. 5). Constituem dobras paralelas, ortorrômbicas ou monoclinicas, com comprimentos de onda da ordem de centímetros a dezenas de metros, variando desde dobras fechadas, em *chevron*, até suaves. Muitas vezes apresentam um padrão de comprimento de onda e encurtamento heterogêneos para diferentes camadas, como resposta a diferentes competências dos estratos envolvidos. Dobras do tipo *kink* ocorrem com moderada frequência e isoladas.

Superfícies de Deslizamento — Relacionam-se às dobras da primeira fase, com deslizamento definido por degraus, estrias e lineações de fibras minerais nos planos de acamamento, como também por uma clivagem com geometria sigmoidal afetando camadas pelíticas. Os indicadores cinemáticos evidenciam o transporte das camadas superiores para a zona de charneira, segundo uma direção fazendo um ângulo de 70° com os eixos F1 (figs. 13 e 14).

Falhas Associadas às Dobras Mesoscópicas — Constituem descontinuidades de origem secundária, com baixo a médio ângulo de mergulho e arrastos associados, formadas devido ao ajuste de espaço no intrado das dobras F1. Essas falhas resultaram da acomodação ao processo de dobramento por meio de compressão paralela às camadas, o que provocou a sua conexão com zonas de deslizamento inter e intra-estratais.

Mecanismo de Dobramento -- Nos flancos das

dobras predominaram mecanismos de deslizamento flexural, enquanto na região de charneira prevaleceu a flambagem (*flexural slip* e *buckling*, *sensu* Park, 1989; fig. 15).

A relação angular entre os indicadores cinemáticos nas superfícies de deslizamento e os eixos das dobras F1 indica a atuação de uma componente de rotação horária durante o fenômeno de deslizamento flexural (fig. 13). Alternativamente, poder-se-ia dizer que esta rotação ocorreu após a nucleação das dobras F1.

O processo de dobramento por deslizamento flexural foi consequência da anisotropia mecânica entre as camadas, com a deformação concentrando-se em níveis de folhelhos e siltitos, intercalados a arenitos. Por outro lado, o mecanismo de flambagem indica uma resposta homogênea do material próximo à zona de charneira das dobras, com a nucleação de falhas reversas revelando ter a deformação atingido o ponto de ruptura.

4.1.2 -- Clivagem

A clivagem expressa-se na área na forma de superfícies de partição pouco penetrativas, que estão restritas aos folhelhos, siltitos e ritmitos, menos competentes à deformação, podendo ser classificada como clivagem espaçada (*sensu* Davis, 1984).

O arranjo espacial sugere que a clivagem e as dobras da primeira fase sejam cogenéticas. Contudo, é importante salientar que a concentração máxima de N30-35E/subvertical (fig. 16) não coincide exatamente com a superfície axial obtida no diagrama geral de acamamento (fig. 5), com direção em torno de N60-70E. É válido destacar ainda que a clivagem encontra-se restrita principalmente às regiões sul e sudeste da área estudada e, portanto, não apresenta grande distribuição em escala de bacia.

4.1.3 -- Falhas Reversas

As falhas reversas mais expressivas concentram-se na porção sul-sudeste da área, quanto mais próximo à faixa metassedimentar adjacente. Algumas falhas menores ocorrem de modo subordinado, distribuídas por uma região um pouco mais ampla, ainda assim com incidência crescente rumo ao setor sul-sudeste.

Exceto no caso das falhas associadas ao processo de dobramento, as falhas reversas apresentam um ângulo de mergulho de no mínimo 50 a 60° (fig. 17). Esse fato é observado com clareza nas seções geológicas regionais, elaboradas sem exagero vertical (figs. de 10 a 12). Localmente, os planos de falha podem refletir uma posição subparalela ao acamamento, como, por exemplo, na porção sudeste da seção B-B', embora ainda ocorrendo com altos mergulhos.

Convém salientar que as falhas reversas observadas em escala de afloramento apresentam caimentos variados, oscilando entre sudeste e noroeste (fig. 17),

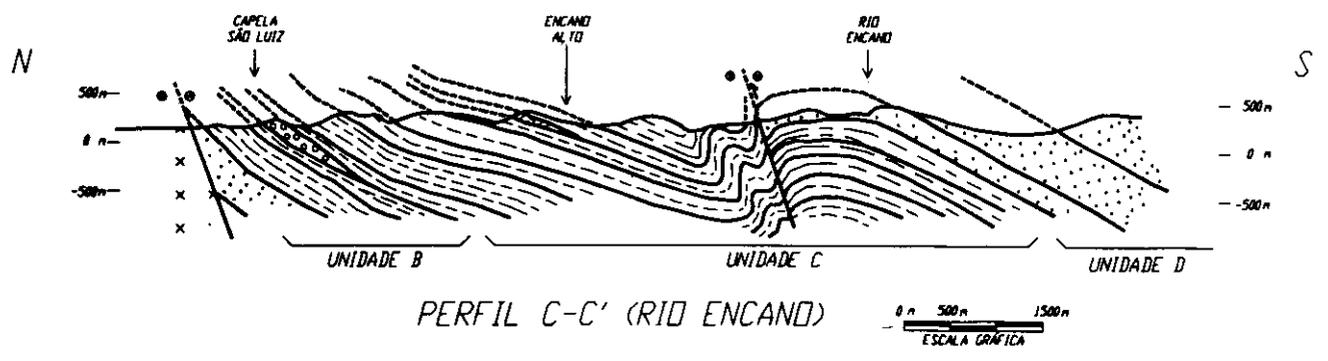
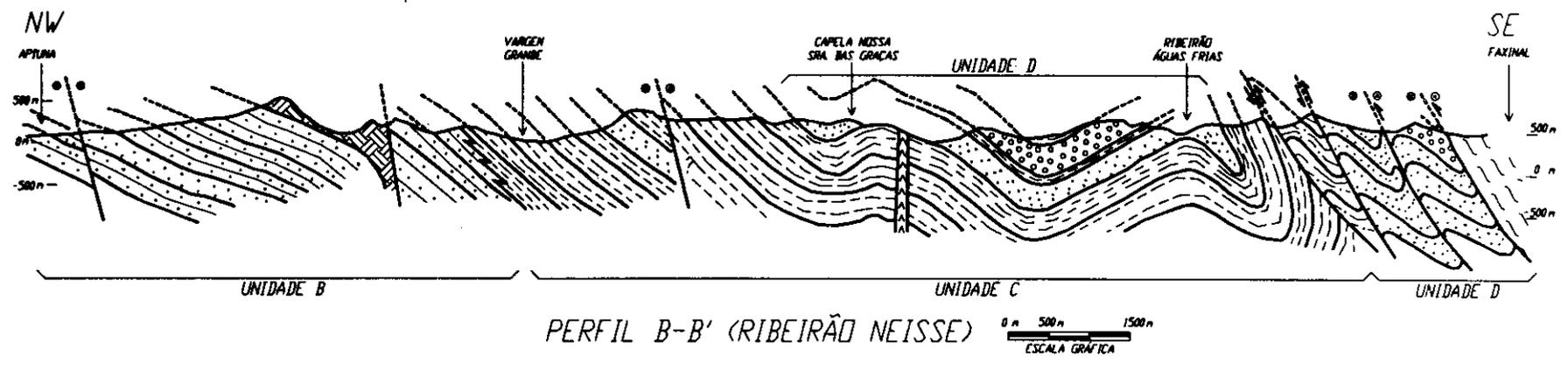
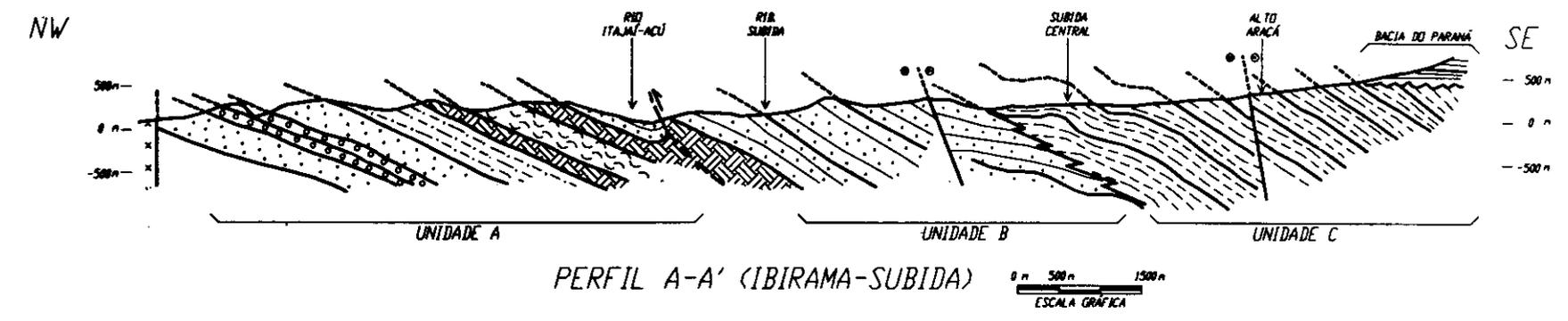


Fig. 10 - Seções estruturais transversais à principal estruturação, setores central e oeste da bacia (ver figura 4 para localização).
 Fig. 10 - Structural cross-sections transverse to main structuring, central and western sectors of basin (see fig. 4 for location).

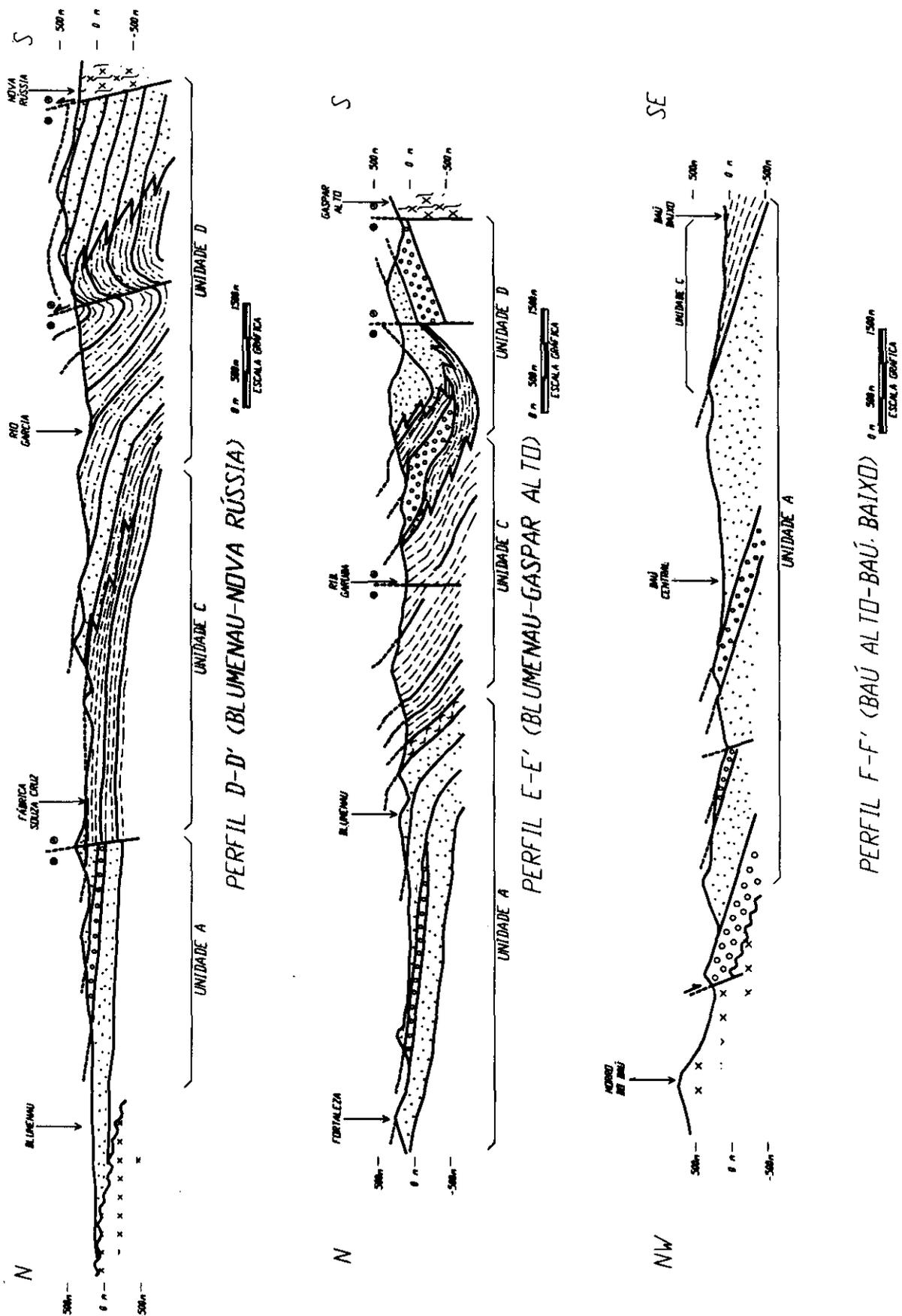


Fig. 11 - Seções estruturais transversais à principal estruturação, setor leste da bacia (ver figura 4 para localização).
 Fig. 11 - Structural cross-sections transverse to main structuring, eastern sector of basin (see fig. 4 for location).

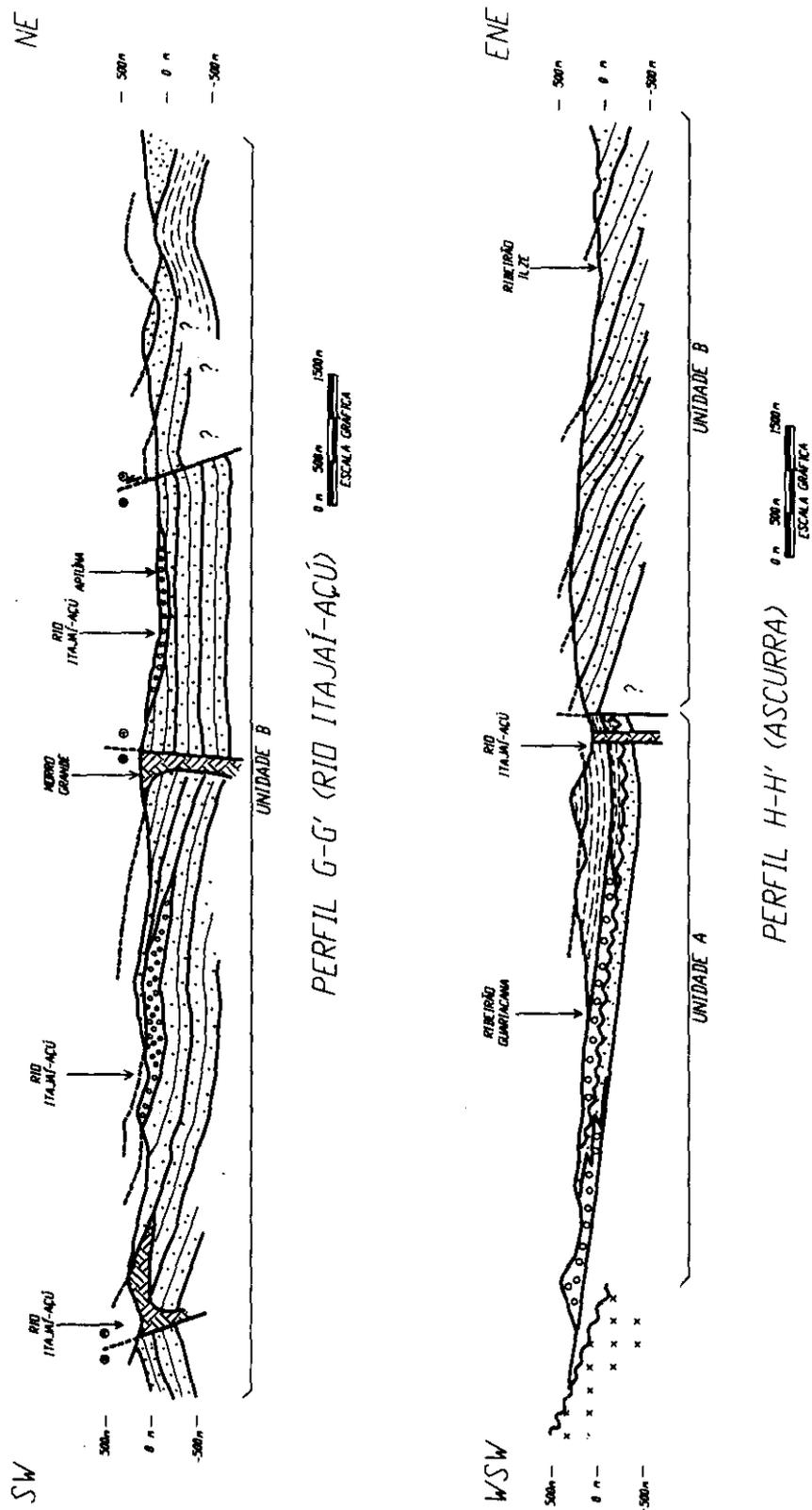


Fig. 12 - Seções estruturais aproximadamente paralelas ao eixo da bacia, setor noroeste (ver figura 4 para localização).
 Fig. 12 - Structural cross-sections lying roughly parallel to basin axis, northwestern sector (see fig. 4 for location).

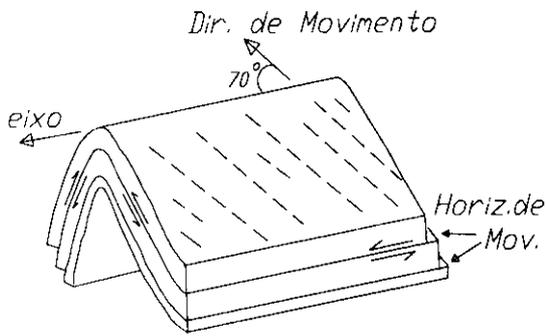


Fig. 13 - Relação de obliquidade entre os indicadores cinemáticos e os eixos de dobras formados por processos de deslizamento flexural oblíquo (modificado de Tanner, 1989).

Fig. 13 - Obliqueness of kinematic indicators to axes of folds formed by oblique flexural slip (adapted from Tanner, 1989).

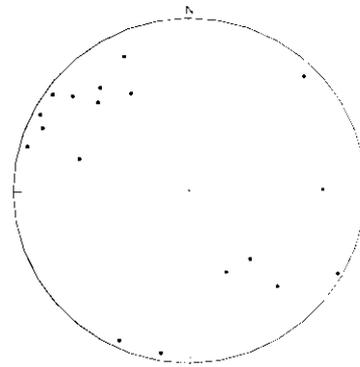


Fig. 16 - Diagrama de pólos com 19 medidas de clivagem. Máximo: N30E/84SE (18,5%).

Fig. 16 - Stereonet showing poles of 19 cleavage measurements. Maxima: N30E/84SE (18.5%).

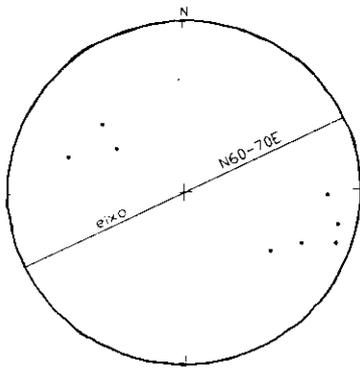


Fig. 14 - Diagrama de pólos de estrias de deslizamento nos horizontes de movimento, indicando transporte para a charneira das dobras. Oito medidas.

Fig. 14 - Stereonet showing poles of slip-marks along slip-surfaces indicating transportation to hingezone. Eight measurements.

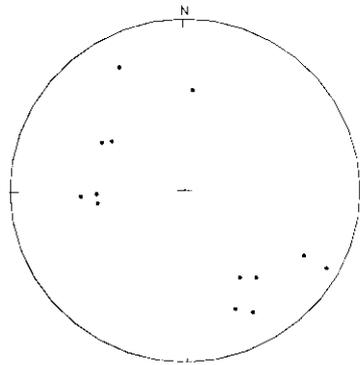


Fig. 17 - Diagrama de pólos com 13 medidas de falhas reversas da primeira fase.

Fig. 17 - Stereonet showing poles of 13 measurements of first-phase reverse faults.

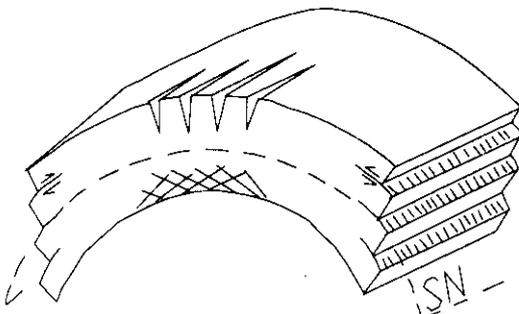


Fig. 15 - Feições secundárias associadas ao dobramento da primeira fase de deformação. Observar os mecanismos de deslizamento flexural nos flancos e de flambagem próxima à zona de charneira (SN - superfície neutra).

Fig. 15 - Secondary features associated to folding of first phase of deformation. Note flexural-slip mechanisms along flanks and buckling mechanisms et hingezone (SN - neutral surface).

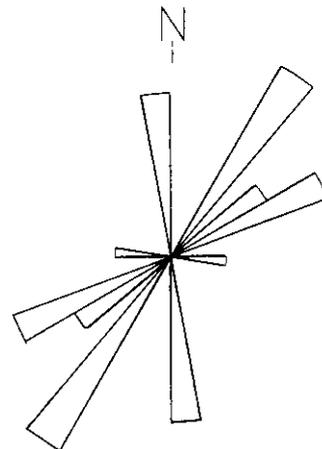


Fig. 18 - Roseta de freqüências com 13 medidas de falhas reversas da primeira fase. Máximo: N30-40E (30,77%).

Fig. 18 - Rose diagram with 13 measurements of first-phase reverse faults. Maxima: N30-40E (30.77%).

com valor máximo em torno de N30-40E (fig. 18), ao passo que a zona de falha de Perimbó, que representa o limite sul da bacia, exhibe mergulho constante para sudeste, com atitudes N60-70E/50-60SE (fig. 4).

A zona de falha de Perimbó constitui a megafeição mais proeminente da área estudada. Denota características de zona de cisalhamento dútil, sendo composta de uma série de falhas menores interconectadas, curvilíneas e retilíneas em mapa, algumas vezes seccionadas por falhas transcorrentes dextrais (fig. 4).

Em afloramentos, a cinemática das falhas reversas é definida por zonas cataclásticas sigmoidais, lineações de fibras de quartzo, degraus e estrias de deslizamento (fig. 19), evidenciando um deslocamento reverso dextral ou segundo a direção de maior mergulho, além de um aumento na magnitude dos rejeitos de noroeste para sudeste.

4.1.4 -- Falhas Transcorrentes

As falhas transcorrentes, juntamente com as falhas reversas, constituem as estruturas descontínuas mais importantes da Bacia de Itajaí. Podem ser agrupadas espacialmente em duas concentrações máximas: a primeira, N80-90W/65SW, com cinemática dextral (figs. 20 e 21); e a segunda N10-20E, sinistral, com mergulho variando entre 60 e 70° para noroeste (figs. 22 e 23).

As falhas de Acurra e Blumenau são as feições transcorrentes mais significativas e apresentam movimentação dextral, limitando a porção centro-norte da bacia com o complexo granulítico de Santa Catarina (fig. 4).

As falhas transcorrentes consistem, basicamente, em dois tipos: a) zonas de cisalhamento subverticais, com cerca de 1 m a 5 m de espessura, contendo feições cataclásticas lenticulares indicativas de movimento direcional e b) planos lisos e regulares menos conspícuos, ainda que mais freqüentes, com cinemática indicada por degraus, lineações de fibras minerais e estrias, subhorizontais a até 30° de mergulho (fig. 24).

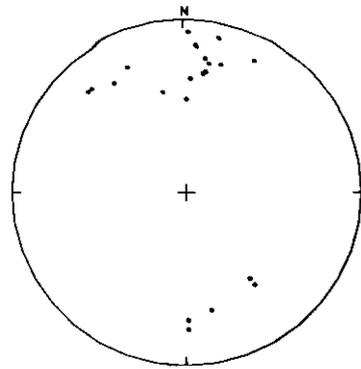


Fig. 20 - Diagrama de pólos com 21 medidas de falhas dextrais da primeira fase.

Fig. 20 - Stereonet showing poles of 21 measurements of first-phase dextral faults.

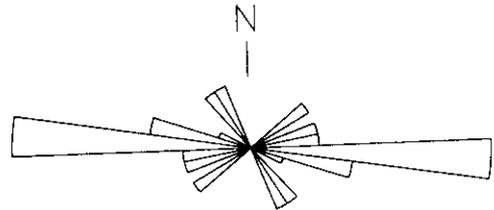


Fig. 21 - Roseta de freqüências com 21 medidas de falhas dextrais da primeira fase. Máximo: N80-90W (33,3%).

Fig. 21 - Rose diagram with 21 measurements of first-phase dextral faults. Maxima: N80-90W (33.3%).

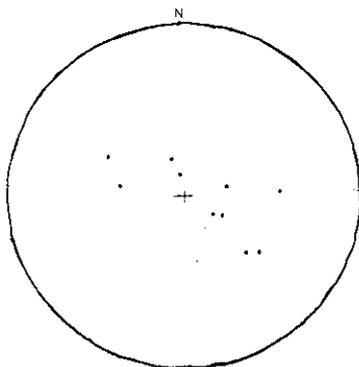


Fig. 19 - Diagrama de pólos com dez medidas de estrias e lineações de fibras em falhas reversas da primeira fase.

Fig. 19 - Stereonet showing poles of ten measurements of striations and fiber growth lineations in first-phase reverse faults.

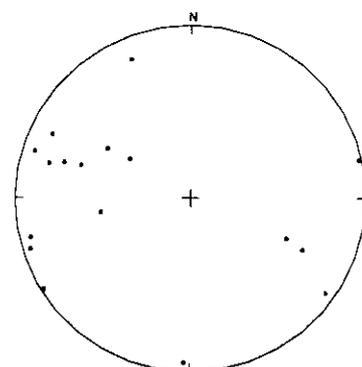


Fig. 22 - Diagrama de pólos com 16 medidas de falhas sinistrais da primeira fase.

Fig. 22 - Stereonet showing poles of 16 measurements of first-phase sinistral faults.

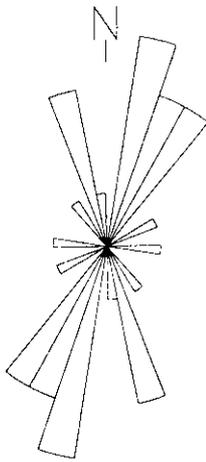


Fig. 23 - Roseta de frequências com 16 medidas de falhas sinistrais da primeira fase. Máximo: N20-30E (23,53%).

Fig. 23 - Rose diagram with 16 measurements of first-phase sinistral faults. Maxima: N20-30E (23.53%).

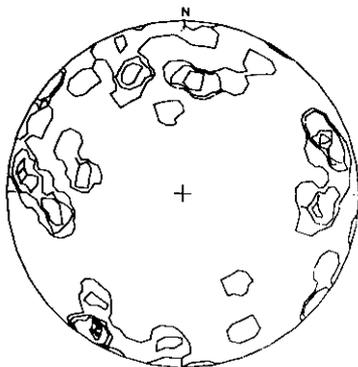


Fig. 24 - Diagrama de isolinhas com 52 medidas de estrias e lineações de fibras em falhas transcorrentes da primeira fase. Isolinhas: 2, 4, 6, 8%. Máximo: S33W/12 (10,68%).

Fig. 24 - Isoleth diagram with 52 measurements of striations and fiber growth lineations in first-phase strike-slip faults. Isoleths: 2, 4, 6, 8%. Maxima: S33W/12 (10.68%).

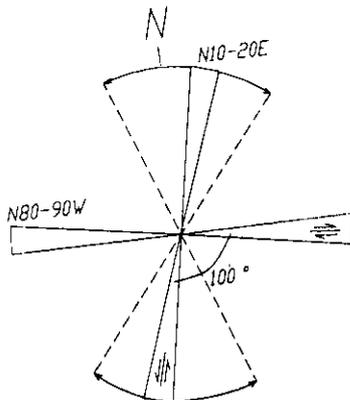


Fig. 25 - Sistema conjugado de falhas transcorrentes. Orientações verificadas nos diagramas das figuras 17 e 19.

Fig. 25 - Conjugate system of strike-slip faults. Orientations in figs. 17 and 19.

Um tipo secundário é representado por sistemas de falhas de pequeno rejeito, cujo indicador cinemático corresponde ao deslocamento de camadas ou fraturas prévias.

Em superfície, apresentam-se como falhas de alto ângulo que, na interpretação dos autores, compõem um sistema conjugado de falhamentos, conforme ilustra-se na figura 25, com uma constância dos valores de falhas dexas F1 em torno de N80-90W (fig. 21), enquanto as falhas sinistrais distribuem-se em leque, com valores variando desde N20W até N40E (fig. 23). A interpretação de cogeneticidade entre as duas direções principais de falhas transcorrentes advém da relação geométrica com as outras estruturas da fase D1, bem como das evidências, em afloramentos, demonstrando que ora as falhas dexas seccionam as sinistrais, ora ocorre o contrário. Soma-se a isto o fato de ambas as direções denotarem feições de reativação referentes à segunda fase de deformação.

4.1.5 – Juntas

Tais estruturas foram observadas em toda a área mapeada, todavia ocorrem com maior intensidade próximo à margem sul-sudeste da bacia, sendo difícil estabelecer quais juntas associam-se às dobras e quais são relativas aos processos de falhamentos. Além disso, o evento mesozóico de abertura do Oceano Atlântico Sul, posterior à estruturação aqui estudada, certamente impôs um novo padrão de fraturamento, o que dificultaria definir as relações cronológicas existentes. Por exemplo, os diagramas ilustrados nas figuras 26 e 27 certamente agrupam múltiplas fases de geração de juntas.

A análise das juntas foi efetuada, portanto, de modo seletivo, optando-se por desenvolver um estudo detalhado apenas das juntas sistemáticas que claramente se relacionam, em afloramentos, aos principais episódios formadores de dobras e falhas. Para este estudo, foram utilizadas as juntas que denotam uma relação de consangüinidade com as outras estruturas mapeadas, tendo sido escolhidos como critérios a penetrabilidade, o tipo e a relação geométrica do inventário estrutural em cada afloramento.

Apesar das limitações, é possível caracterizar um padrão espacial de distribuição de juntas sistemáticas coerente com a primeira fase de deformação. Os diagramas das figuras 28 e 29 exibem uma moda principal em torno de N40-50W/subvertical, que corresponde à direção de juntas com preenchimento de quartzo e juntas plumosas (*plume structures*, conforme o modelo de Price e Cosgrove, 1990). Esta orientação aproxima-se à direção esperada para juntas transversais às dobras da primeira fase (fig. 30), e também a uma hipotética bissetriz do sistema conjugado de falhas transcorrentes (fig. 31). Nota-se, entretanto, que o ângulo médio de 70° entre estas juntas e os eixos de dobras F1 (comparar as figs. 5 e 31) é anômalo, dando consistência a uma hipótese de convergência oblíqua

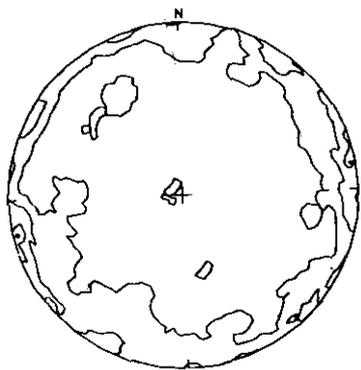


Fig. 26 - Diagrama de isolinhas com 346 medidas de juntas. Isolinhas: 1, 3, 5%. Máximo: N12W/87SW (6,7%).
 Fig. 26 - Isopleth diagram with 346 measurements of joints. Isopleths: 1, 3, 5%. Maxima: N12W/87SW (6.7%).

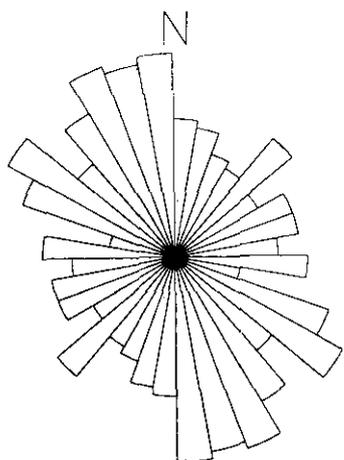


Fig. 27 - Roseta de frequências com 346 medidas de juntas. Máximos: N00-10W (8,09%), N20-30W (8,09%).
 Fig. 27 - Rose diagram with 346 measurements of joints. Maxima: N00-10W (8.09%); N20-30W (8.09%).

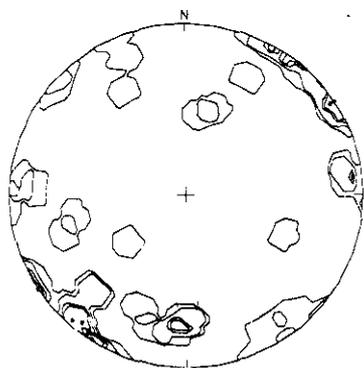


Fig. 28 - Diagrama de isolinhas com 37 medidas de sistemas de juntas sistemáticas. Isolinhas: 2; 2,4; 6,5; 8%. Máximos: N33W/90 (12%), N51W/87SW (12%).
 Fig. 28 - Isopleth diagram with 37 measurements of systematic joint systems. Isopleths: 2; 2,4; 6,5; 8%. Maxima: N33W/90 (12%); N51W/87SW (12%).

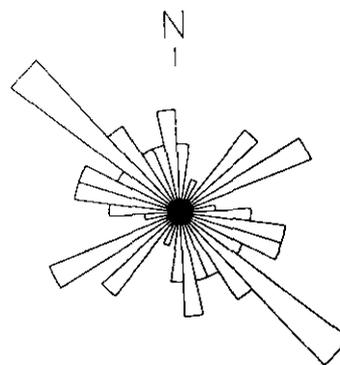


Fig. 29 - Roseta de frequências com 37 medidas de sistemas de juntas sistemáticas. Máximo: N40-50W (16,22%).
 Fig. 29 - Rose diagram with 37 measurements of systematic joint systems. Maxima: N40-50W (16.22%).

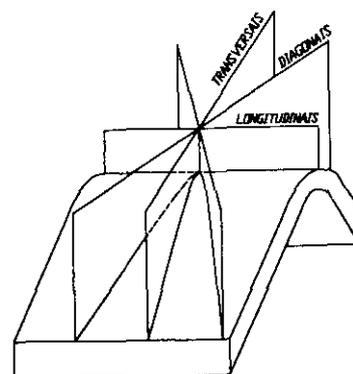


Fig. 30 - Relação ideal entre juntas e dobras geradas na mesma fase (Price e Cosgrove, 1990).
 Fig. 30 - Ideal relation between joints and folds generated during the same phase (Price and Cosgrove, 1990).

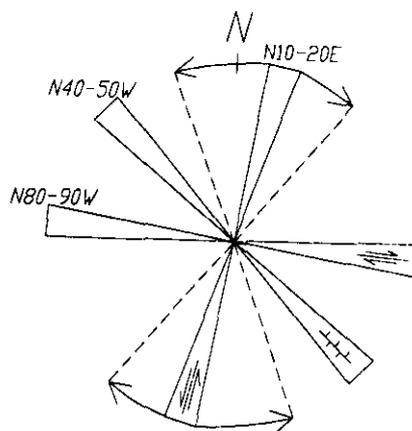


Fig. 31 - Relação geométrica entre o sistema conjugado de falhas transcorrentes e as juntas de distensão.
 Fig. 31 - Geometric relation between conjugated system of strike-slip faults and tension joints.

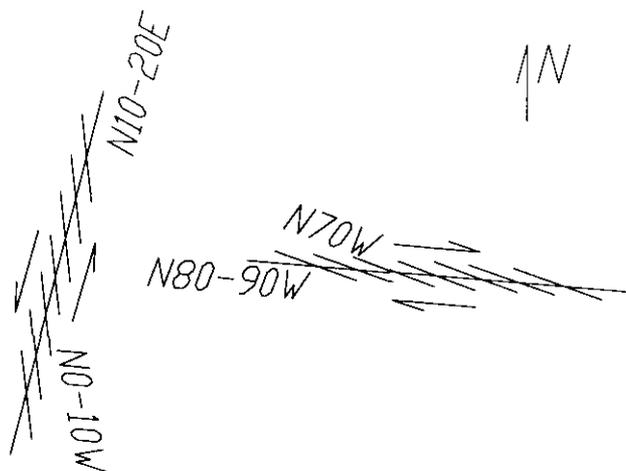


Fig. 32 - Relação geométrica entre as juntas sistemáticas (N0-10W e N70W/42SW) e as falhas transcorrentes (N10-20E e N80-90W).
 Fig. 32 - Geometric relation between systematic joints (N0-10W and N70W/42SW) and strike-slip faults (N10-20E and N80-90W).

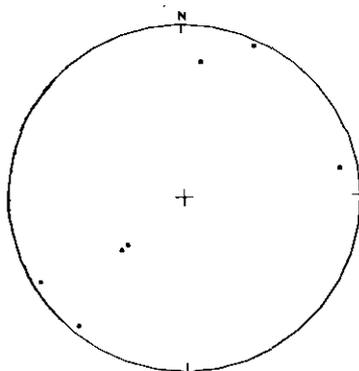


Fig. 33 - Diagrama de pólos com sete medidas de falhas normais da primeira fase.
 Fig. 33 - Stereonet showing poles of seven measurements of first-phase normal faults.

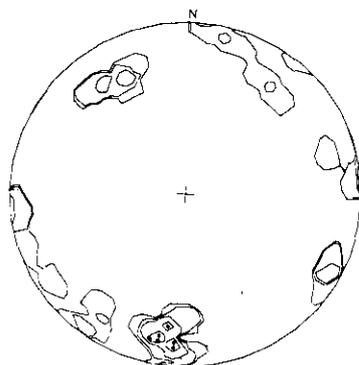


Fig. 34 - Diagrama de isolinhas com 35 medidas de falhas da segunda fase. Isolinhas: 3, 5, 8, 12%. Máximos: N87W/78NE (15,33%), N78W/75NE (15,33%).
 Fig. 34 - Isopleth diagram with 35 measurements of second-phase faults. Isopleths: 3, 5, 8, 12%. Maxima: N87W/78NE (15,33%); N78W/75NE (15,33%).

(ver item 5, que trata da análise cinemática aqui desenvolvida).

A segunda moda compreende juntas sistemáticas pouco espaçadas e sem preenchimento, distribuídas entre N40-50E e N60-70E subverticais e representa a posição de juntas longitudinais ao dobramento (fig. 30).

A terceira moda, dividida entre N60-80W/42SW e N0-10W/70NE pode corresponder tanto à direção de juntas diagonais às dobras D1 (fig. 30) quanto representar estruturas de segunda ordem associadas às falhas transcorrentes da primeira fase (fig. 32).

4.1.6 - Falhas Normais

Ocorrem de maneira subordinada em relação às demais estruturas da primeira fase e orientam-se em torno de N30-40W/subvertical (fig. 33), seguindo aproximadamente a direção das juntas abertas com preenchimento de quartzo (fig. 29).

4.2 - Estruturas da Fase de Deformação D2

4.2.1 - Dobras

Ondulações de caráter regional, caracterizadas por dispersões dos pólos de acamamento em torno de eixos S18E/21 e S36E/20, foram agrupadas em uma segunda família de dobras. Exibem uma leve vergência para nordeste (fig. 8) ou, na maioria dos casos, são classificadas em diagramas e afloramentos como dobras descontínuas, verticais, de simetria ortorrômbica, com pequena amplitude e comprimentos de onda de centenas de metros a quilômetros.

Esta família de estruturas pode estar associada à fase D2, ou então representar a tendência à forma cônica das dobras da primeira fase, neste caso com caimentos duplos de camadas nas regiões de periclinais, dando uma impressão de superposição de dobramentos nos estereogramas. Vale notar que as dobras F2, suaves, são observadas nas seções estruturais paralelas ao eixo da bacia (fig. 12), reforçando a idéia de uma segunda fase de dobramento com eixo aproximadamente ortogonal à primeira.

4.2.2 - Falhas

As falhas da segunda fase ocorrem normalmente como reativações das estruturas F1 prévias. De maneira geral, exibem mergulho subvertical (figs. 34 e 35) e denotam cinemática contrária em relação aos falhamentos da primeira fase. Apresentam uma orientação sinistral em torno de N50-60W e N80-90W subverticais, ao passo que a orientação dextral varia entre N20W e N50E, com o máximo de N10-20W/subvertical.

4.3 - Fotolineamentos

Utilizou-se o termo lineamento para designar

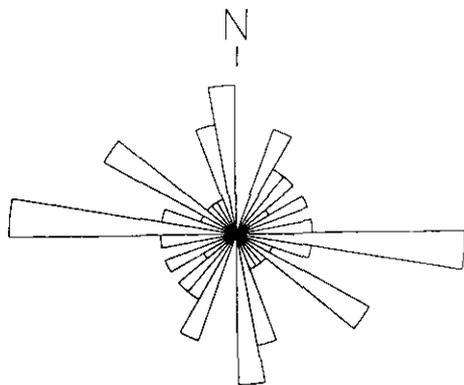


Fig. 35 - Roseta de frequências com 35 medidas de falhas da segunda fase. Máximo: N80-90W (17,14%).

Fig. 35 - Rose diagram with 35 measurements of second-phase faults. Maxima: N80-90W (17.14%).

elementos fisiográficos com conotação estrutural, ou seja, a uma família de feições naturais na superfície terrestre em forma alinhada, refletindo uma descontinuidade estrutural em subsuperfície, independente da escala (no sentido de Soares *et al.* 1982).

O resultado da interpretação das imagens de satélite e mosaicos de radar, executada na escala 1:250.000, encontra-se representado na figura 36. Quatro direções preferenciais de elementos lineares puderam ser caracterizadas: EW, N30-50W, N0-10E e N20-30E (fig. 36), sendo, estes, agrupados como fotolineamentos em feixe ou alinhados (fig. 37). Suas orientações coincidem com algumas das grandes falhas mapeadas (comparar a figura 37 com o mapa geológico, fig. 4).

A organização e a amplitude dos fotolineamentos sugerem que as principais feições fisiográficas correspondem a estruturas tectônicas em subsuperfície.

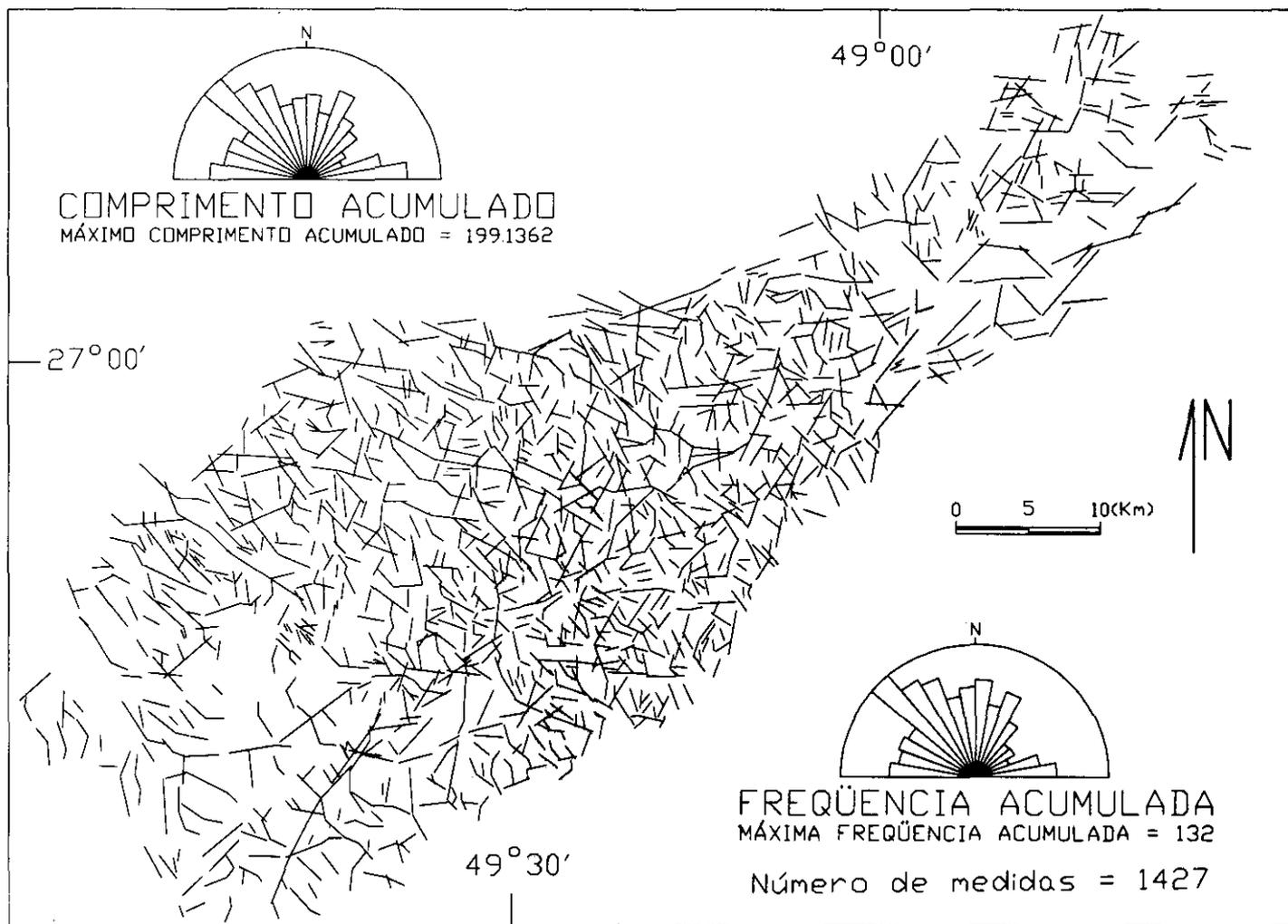


Fig. 36 - Traços de drenagens e alinhamentos de cristas de relevo obtidas em imagens de satélite LANDSAT, 1:100.000 e 1:250.000, e mosaico de radar 1:250.000.

Fig. 36 - Rectilinear segments of drainage network and alignment of relief crests. LANDSAT images, 1:100,000 and 1:250,000, and radar mosaic, 1:250,000.

Na área de abrangência da zona de falha de Perimbó, os elementos apresentam geometria lenticular anastomosada, ao passo que, ao norte da mesma, tendem a ser mais retilíneos, isolados e dispersos em toda a área estudada, compondo assim sistemas regulares NE, EW ou NW. O lineamento correspondente à Falha de Ascurra (fig. 4) divide a bacia em duas áreas, com diferenças no padrão de distribuição de elementos, predominando as direções EW na porção nordeste, e NW no setor sudoeste (fig. 37).

5 – ANÁLISE ESTRUTURAL CINEMÁTICA

A distribuição espacial de estruturas poderia sugerir um estilo transcorrente para a fase D1, com as falhas sintéticas em N80-90W, as antitéticas em N10-20E, as reversas em N30-40E e ainda as juntas de distensão e as falhas normais em torno de N40-50W (figs. 38 e 39). O padrão geométrico observado se

aproxima do modelo teórico para transcorrência transpressional (*sensu* Sanderson e Marchini, 1984; comparar as figuras 38 e 40), que seria uma hipótese para explicar a principal fase da tectônica modificadora da bacia.

Entretanto, a interpretação de um regime transcorrente simples, como efetuada em Krebs *et al.* (1990b), implica em alguns problemas. Entre eles, o principal seria a inexistência da zona de deslocamento principal (ZDP), ou seja, a falha transcorrente propriamente dita.

Um modelo alternativo, assumindo condições de pequeno deslocamento ao longo do plano de falha, onde a zona de deslocamento principal não se desenvolve prontamente (Naylor *et al.* 1986), talvez fosse um argumento em favor de um regime transcorrente. Tal modelo não explicaria, contudo, porque a zona de falha de Perimbó, apesar de considerada como a falha transcorrente principal (N60-70E; Krebs *et al.* 1990b),

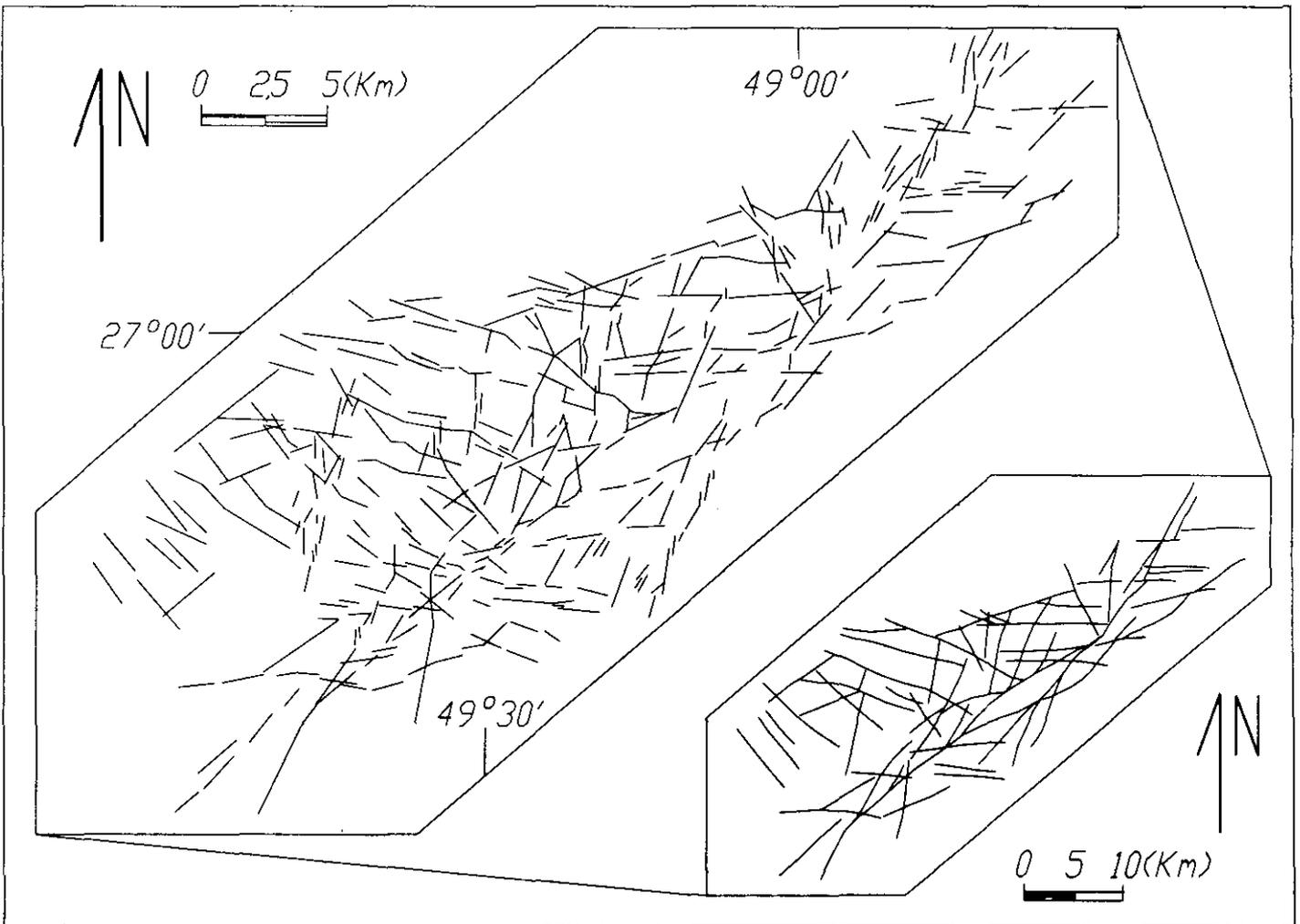


Fig. 37 - Acima: fotolineamentos com distribuição sistemática, obtidos através da filtragem dos elementos da figura 32. Abaixo: principais direções definidas pelos fotolineamentos.
 Fig. 37 - Top: photolineaments with systematic distribution, obtained by filtering elements in fig. 32. Bottom corner: principle directions defined by photolineaments.

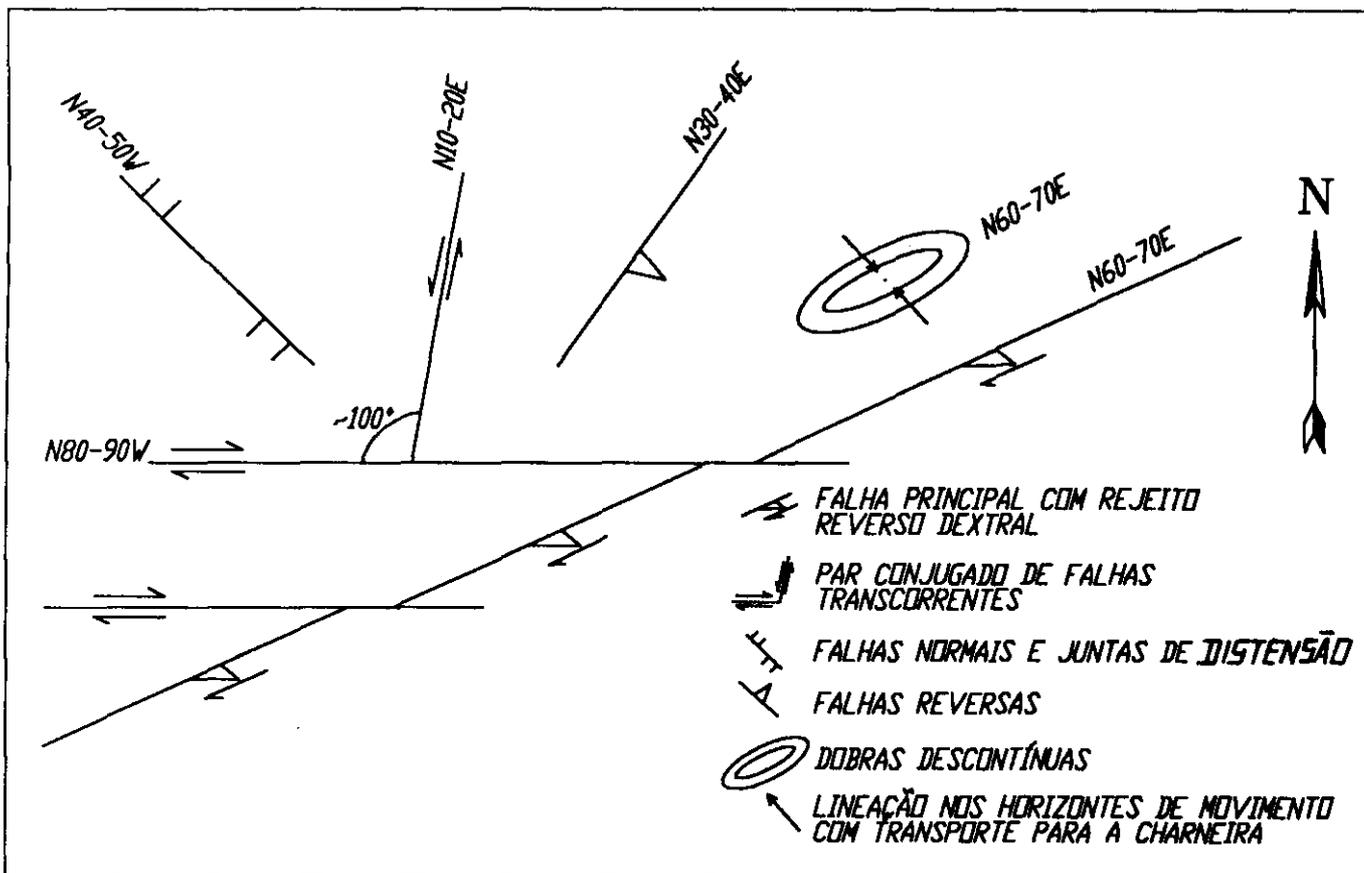


Fig. 38 - Quadro sinóptico das estruturas da primeira fase de deformação.
 Fig. 38 - Synoptic chart of structures of first phase of deformation.

mostra um mergulho constante para sudeste e um movimento reverso pronunciado. Além do mais, o aparente paralelismo entre os eixos de dobramentos e a zona de falha de Perimbó, assim como o ângulo médio de 100° entre as direções modais de falhas conjugadas (fig. 25) exigiriam uma situação totalmente adversa, tal como uma transcorrência de grande desloca-

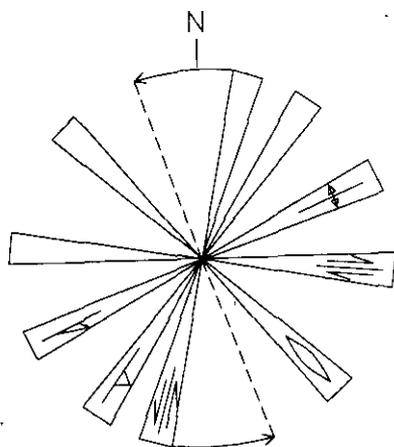


Fig. 39 - Diagrama sinóptico das estruturas da primeira fase de deformação.
 Fig. 39 - Synoptic diagram of structures of first phase of deformation.

mento.

Segundo Wilcox *et al.* (1973), durante o desenvolvimento de uma transcorrência, as falhas antitéticas rotacionam com a mesma cinemática da zona de falha principal, enquanto as falhas sintéticas apresentam pouca ou nenhuma rotação. Deste modo, caso fosse considerado um estilo transcorrente para a primeira fase de deformação que afetou a bacia, a abertura do ângulo entre o suposto par conjugado, de 60° (teórico ideal para deformações em baixa profundidade) para 100° , seria causada basicamente por uma rotação horária das falhas antitéticas, ou sinistras, expostas na figura 39, em torno de 40° . Tal situação poderia ser quantificada, no caso bidimensional, por meio da fórmula:

$$\cotg \alpha' = \cotg \alpha + \gamma \quad (\text{Ramsay, 1967})$$

onde:

α é o ângulo inicial que um marcador linear forma com a direção de cisalhamento máximo, α' é o ângulo que esse marcador faz com a mesma direção após a rotação imposta por um processo de cisalhamento simples e γ é o coeficiente de deformação cisalhante.

Utilizando a posição de falhas antitéticas como marcador linear e a zona de falha de Perimbó como a direção de cisalhamento máximo, tem-se a situação

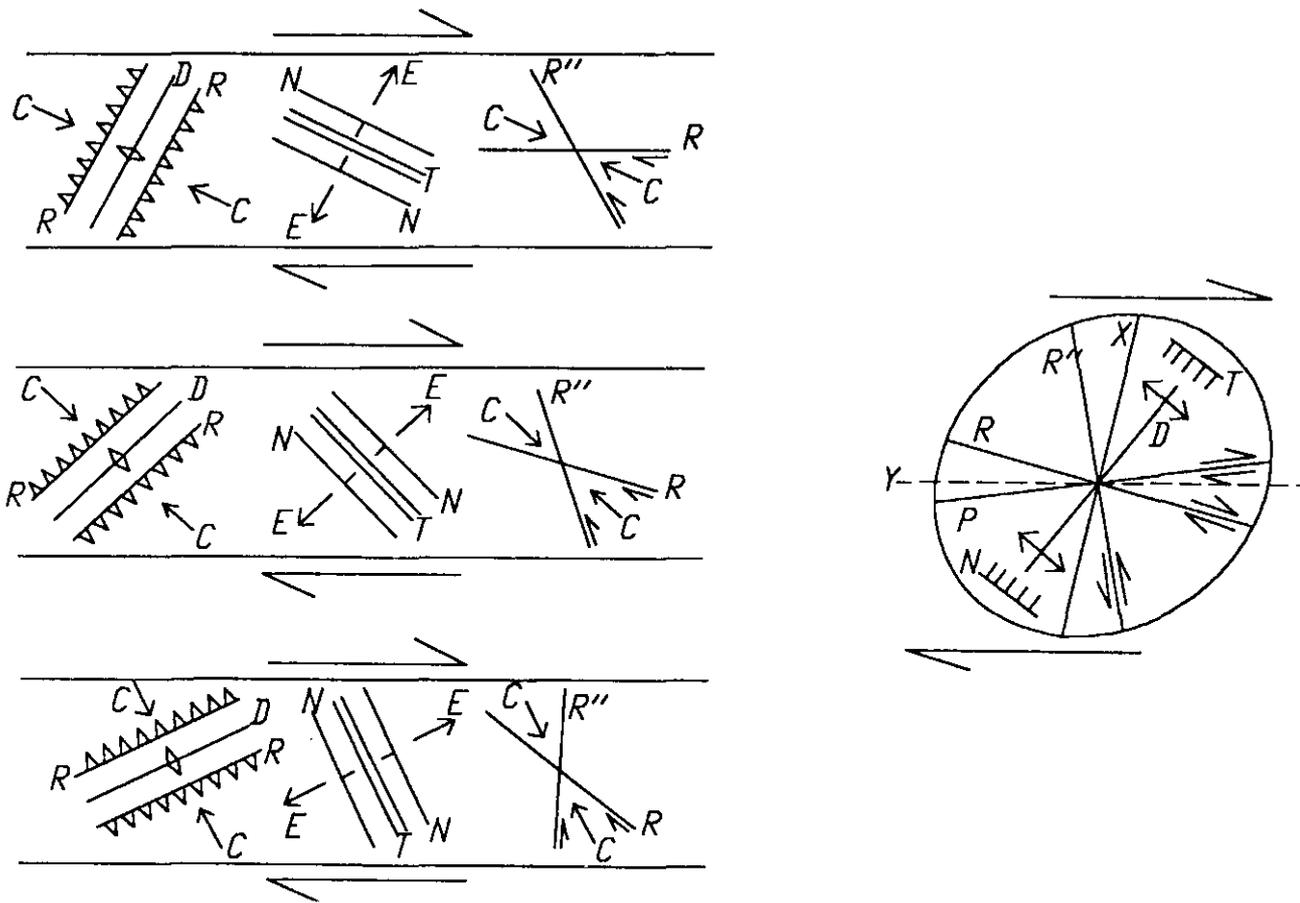


Fig. 40 - Relações angulares idealizadas entre estruturas formadas em uma transcorrência com cinemática dextral. As figuras da esquerda representam os regimes transensional (acima), transcorrente puro (meio) e transpressional (abaixo), onde C = direção de compressão, E = direção de distensão, R = falhas sintéticas, R' = falhas antitéticas, N = falhas normais, T = juntas de distensão, D = dobras, R = falhas reversas (Sanderson e Marchini, 1984). O diagrama à direita ilustra a disposição geométrica para uma transcorrência simples e, além das estruturas referenciadas, contém as fraturas P, X e Y (modelo de Bartlett et al. 1981).

Fig. 40 - Idealized angular relations between structures formed in transcurrent fault system with dextral kinematics. On left: divergent (top), pure strike-slip (middle), and convergent (lower), where C = direction of compression; E = direction of extension; R = synthetic faults; R' = anti-thetic faults; N = normal faults; T = tension joints; D = folds; R = reverse faults (Sanderson and Marchini, 1984). On right: geometric layout of simple strike-slip fault, which, in addition to other structures, contains fractures P, X and Y (model by Bartlett et al. 1981).

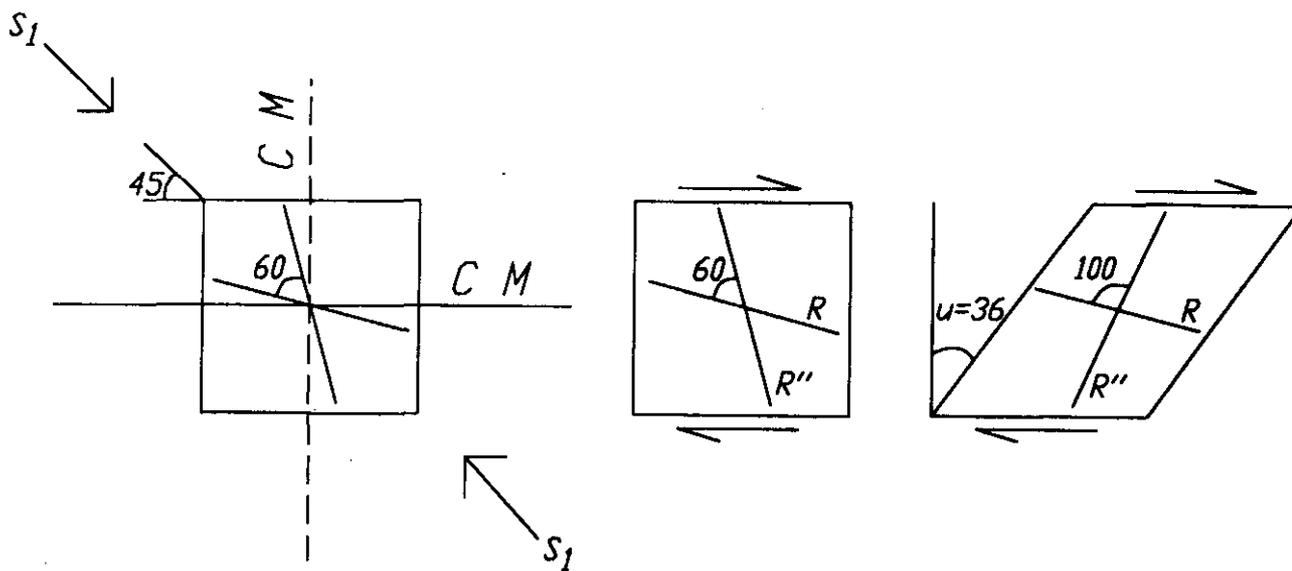


Fig. 41 - Estimativa da abertura do ângulo entre o par conjugado de falhas transcorrentes por processos não-coaxiais (cisalhamento simples). O forte cisalhamento resultante seria incompatível com a ausência da transcorrência principal.

Fig. 41 - Estimated angle of opening between conjugate pair of strike-slip faults by noncoaxial processes (simple shear). Resultant strong shearing would be incompatible with absence of the main strike-slip fault.

da figura 41, com ângulos $\alpha = 150^\circ$ e $\alpha' = 65^\circ$ (para uma rotação de 40°). Substituindo na fórmula: $\cotg \alpha' = \cotg \alpha + \gamma$, observa-se:

$$\cotg 65^\circ = \cotg 105^\circ + \gamma$$

$$\gamma = 0,73$$

Se $\gamma = \tg \phi$,

onde:

ϕ é o ângulo de cisalhamento, então:

$$0,73 = \tg \phi \text{ e } \phi = 36^\circ$$

Um ângulo de cisalhamento de 36° (fig. 41) não é coerente com uma transcorrência de pequeno deslocamento, sem o desenvolvimento da direção Y de fraturamento ou da zona de deslocamento principal (modelo de Bartlett *et al.* 1981; fig. 40).

Outro complicador para a hipótese de transcorrência (ou transpressão, no sentido de Sanderson e Marchini, 1984) refere-se à disposição espacial das juntas de distensão. Observa-se que a rotação dessas estruturas foi nula ou muito pequena, e não aquela esperada para um suposto coeficiente de deformação cisalhante igual a 0,73. Essa distribuição demonstra, ao contrário, condições próximas à coaxialidade durante o desenvolvimento progressivo da primeira fase de deformação.

Um segundo aspecto, que merece um tratamento especial, dadas suas implicações estruturais, diz respeito à condição de obliquidade constatada nos indicadores de transporte tectônico nos flancos de dobras D1 (item 4.1.1). A condição anômala de obliquidade requer processos adicionais de rotação, sejam eles síncronos ao processo de deslizamento ou condicionados por movimentos posteriores, como por exemplo o deslizamento de camadas previamente inclinadas com relação à horizontal (Ramsay, 1967). Todavia, a geometria das dobras D1 não comporta tal explicação, uma vez que evidencia uma rotação dos flancos segundo eixos subhorizontais (figs. de 5 a 9).

Três outras hipóteses poderiam ser consideradas para justificar a obliquidade constatada (Tanner, 1989): a) um evento de cisalhamento anterior à nucleação das dobras, caso em que as lineações preexistentes seriam rotacionadas pelo dobramento superimposto; b) uma deformação regional tardia em relação ao dobramento, causando reorientações localizadas dos indicadores cinemáticos; c) formação de dobras em um regime reverso oblíquo ou transpressivo, o que produziria uma rotação progressiva dos indicadores cinemáticos.

Para a área estudada, a hipótese a não justifica a cinemática contrária, comparando-se os dois flancos das dobras D1, já que as camadas apresentam sempre um deslocamento em direção à zona de charneira. A hipótese b é pouco provável, pois deveria ocorrer também uma dispersão dos valores de acamamento que amostrassem uma suposta deformação tardia.

Por fim, a hipótese c, considerando-se a condição de obliquidade constante em toda a área, seria compatível com a cinemática definida pelos outros elementos estruturais.

Outro fato importante relaciona-se ao seccionamento da zona de falha de Perimbó pelas falhas transcorrentes, principalmente pelas falhas dextrais (ver mapa geológico, fig. 4). Isto sugere uma evolução direcional posterior à nucleação frontal da referida zona de falha, situação contrária à que ocorreria se o regime fosse transpressivo.

Com base no exposto, pode-se concluir que a evolução da primeira fase de deformação deu-se a partir de uma convergência, com vetor tectônico direcionado de SE para NW. Assim, verifica-se que no início ocorreria uma deformação predominantemente frontal, quando então seriam desenvolvidas as dobras F1, a zona de falha de Perimbó com características reversas e um sistema conjugado de falhas transcorrentes, conforme mostrado na figura 42. A continuação do campo compressivo provocaria o achatamento desse par conjugado e a concentração do movimento ao longo das falhas transcorrentes dextrais.

O encurtamento poderia ser quantificado tomando-se como base um marcador linear, paralelo à direção de compressão máxima. Essa hipótese seria uma alternativa para explicar a abertura do ângulo entre o par conjugado de 60° para 100° . Para o caso bidimensional, e considerando um mecanismo de cisalhamento puro (deformação irrotacional, plana, homogênea e sem mudança de volume), o encurtamento seria expresso pelo fator E (*extension*), na fórmula $E = (\ell - \ell_0) / \ell_0$ (Park, 1989), onde ℓ_0 é o comprimento do marcador inicial, e ℓ o comprimento final de um marcador linear.

Na figura 43 representa-se uma situação ideal, na qual a direção de compressão máxima coincide com a bissetriz das falhas conjugadas. Considerando que tais falhas não sofreram mudança de comprimento F, e que a rotação deu-se igualmente para os dois lados, tem-se:

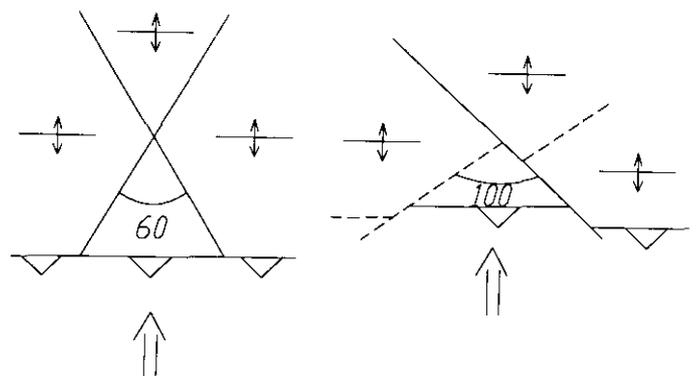


Fig. 42 - Representação do encurtamento associado à compressão.
Fig. 42 - Representation of shortening associated to compression.

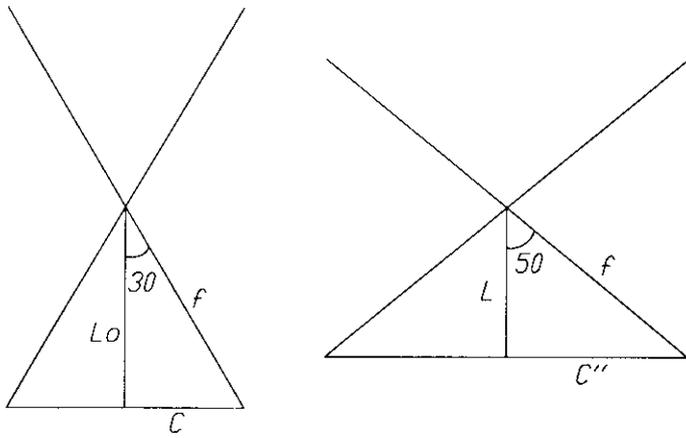


Fig. 43 - Estimativa da abertura do ângulo entre o par conjugado de falhas transcorrentes por processos coaxiais (cisalhamento puro).

Fig. 43 - Estimated angle of opening between conjugate pair of strike-slip faults via coaxial processes (pure shear).

Se: $l_0 = F \cdot \cos 30^\circ$ e $l = F \cdot \cos 50^\circ$

$E = (l - l_0) / l_0$

$E = (F \cdot \cos 50^\circ - F \cdot \cos 30^\circ) / F \cdot \cos 30^\circ$

$E = (\cos 50^\circ - \cos 30^\circ) \cdot F / \cos 30^\circ \cdot F$

$E = -0.26$

Portanto, o encurtamento total seria de 26% na direção de compressão máxima. Com o desenvolvimento da fase F1, a zona de falha de Perimbó e as dobras nucleadas sofreriam rotação horária, além de reativações progressivas com movimentos reversos dextrais, como evidenciado pelos indicadores cinemáticos. Associada a tal fenômeno, teria ocorrido uma rotação adicional das falhas sinistrais no sentido horário (figs. 25 e 31).

Um encurtamento de 26% é perfeitamente com-

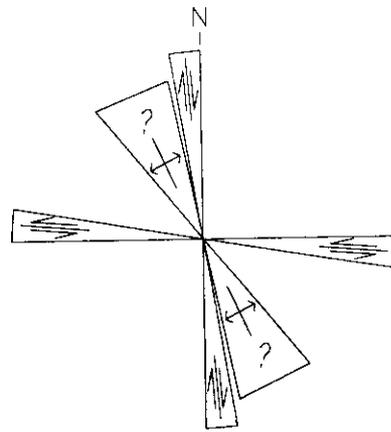


Fig. 44 - Diagrama sinóptico das estruturas da segunda fase.

Fig. 44 - Synoptic diagram of second-phase structures.

patível com o registro estrutural observado, incluindo tanto o encurtamento por compressão coaxial como aquele decorrente do cisalhamento simples.

No tocante às estruturas da segunda fase, as características estruturais e a distribuição espacial dos elementos (fig. 44) indicam uma inversão cinemática das estruturas da fase anterior. Cabe notar que as atitudes das falhas dextrais da primeira fase coincidem com as das falhas sinistrais da segunda, ambas apresentando direções modais N80-90W.

Caso as dispersões, segundo eixos S18E/21 e S36E/20, sejam consideradas como dobras de uma segunda fase (item 4.2.1), elas teriam se originado em virtude de uma componente compressiva NE-SW, subordinada a uma distensão SE-NW, sugerida aqui para a segunda fase.

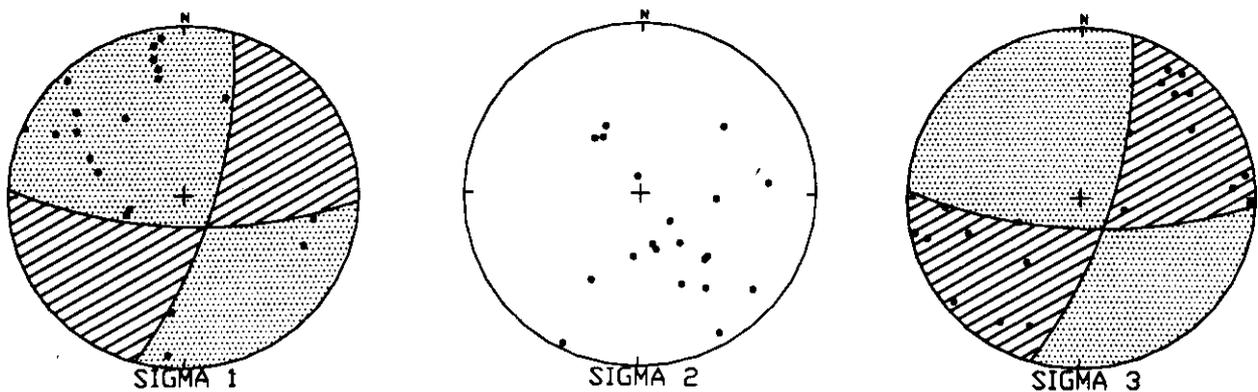
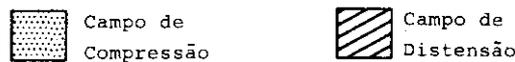


Fig. 45 - Paleotensões obtidas a partir de estruturas da primeira fase de deformação.

Fig. 45 - Paleostresses obtained from structures of first phase of deformation.

A reativação tracional referente à fase F2 dispõe de importante conotação tectônica, indicando um relaxamento tectônico pós-fase F1, possivelmente condicionado por esforços distensivos associados ao alinhamento de blocos em condições pós-orogênicas.

6 – ANÁLISE ESTRUTURAL DINÂMICA

A análise dinâmica (*sensu* Davis, 1984) foi efetuada neste trabalho com o intuito de interpretar a evolução estrutural cinemática em termos de esforços aplicados, não abrangendo uma abordagem quantitativa da deformação. Os elementos utilizados no estudo de paleotensões consistiram nas falhas com indicação do sentido e direção do movimento, bem como nos sistemas de fraturas conjugadas, que, segundo o método de Angelier (1979 e 1984), permitem definir as direções de tensões quando uma população de falhas é nucleada. Foram obtidos vinte campos de tensões para a primeira fase (fig. 45) e oito para a segunda (fig. 46), distribuídos homogênea-mente por toda a área. Tais dados foram integrados àqueles obtidos através das análises descritiva e cinemática, possibilitando, assim, inferir a evolução do campo de tensões no decorrer de ambas as fases de deformação.

Como pode ser observado na figura 45, para a primeira fase de deformação, a orientação modal da tensão principal máxima (σ_1) distribui-se entre N15W/20° e N57W/25°, a tensão intermediária (σ_2) varia entre N34W/60° e S18E/64° e a tensão menor (σ_3) apresenta valores entre N39E/16° e N80E/9°. Tais orientações são coerentes com a distribuição espacial das estruturas da primeira fase (figs. 38 e 39), estando registrada uma dispersão de 40° nos valores de σ_1 e σ_3 (fig. 45), enquanto a tensão intermediária

σ_2 apresenta uma moda com ângulo maior de caí-mento.

Segundo o modelo andersoniano, a distribuição de paleotensões para a primeira fase representaria um estilo transcorrente. Contudo, cabe salientar que tais direções foram obtidas principalmente a partir das falhas transcorrentes, que exibem maior penetrabilidade na área. As falhas reversas, como por exemplo a zona de falha de Perimbó, registram maior magnitude de deformação e refletem o comportamento regional, mas a sua menor frequência dificulta o estudo estatístico.

De um ponto de vista mecânico, embora ocorra uma clara distinção entre falhas transcorrentes e falhas reversas, é necessário lembrar que, durante a primeira fase de deformação, a nucleação de ambos os tipos de falhas deve ter ocorrido sob a mesma tensão compressiva (σ_1).

A formação de falhas transcorrentes do tipo andersoniano é estimada pelo critério de Mohr-Coulomb, através do qual define-se uma direção vertical para a tensão intermediária (σ_2). Em falhas reversas, por outro lado, a tensão principal intermediária é horizontal e coincide com a direção (*strike*) das falhas.

Na porção frontal de um cinturão de empurrões e dobramentos, como no caso da Bacia de Itajaí, as condições de tensões para a geração de falhas reversas e transcorrentes podem ser bastante próximas, e pequenas mudanças relativas na magnitude da compressão horizontal (σ_1) produzem desvios entre os dois tipos de estruturas. Segundo Mandl (1988), esse fenômeno ocorre porque uma região em equilíbrio litostático apresenta a tensão de sobrecarga, vertical, como sendo a tensão maior. Durante uma compressão, a tensão horizontal excede a tensão de sobrecarga e torna-se a tensão principal máxima (σ_1). Quando o encurtamento associado à compressão não é compen-

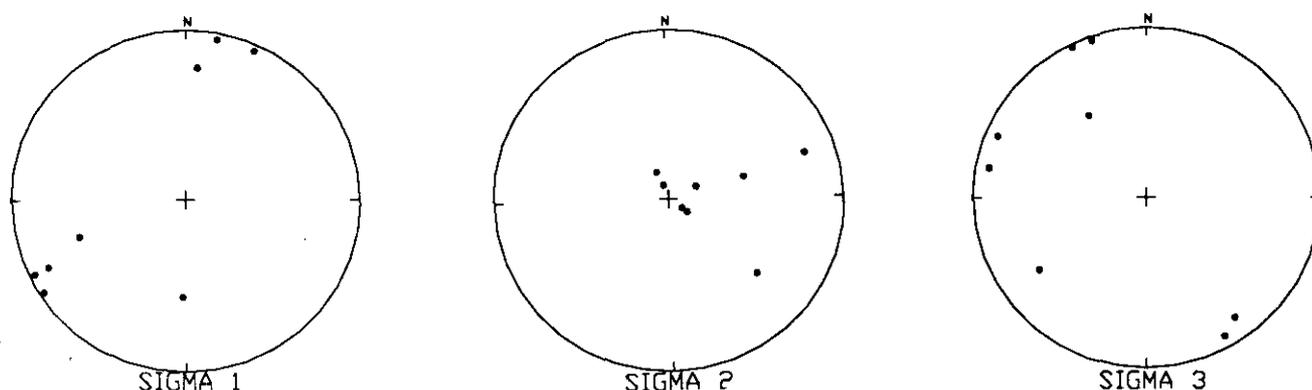


Fig. 46 - Paleotensões obtidas a partir de estruturas da segunda fase de deformação.
Fig. 46 - Paleostresses obtained from structures of second phase of deformation.

sado pelo espessamento, falhas reversas são nucleadas; entretanto, se o encurtamento for compensado por uma distensão (σ_3) no plano horizontal, verifica-se o desenvolvimento de falhas transcorrentes (fig. 47).

As estruturas descritas na área estudada sugerem que a primeira fase iniciou-se com a tensão intermediária (σ_2) na horizontal. Conforme evoluiu o transporte tectônico, o espessamento na faixa orogênica adjacente condicionou uma redistribuição do campo de tensões em termos regionais, com a tensão de sobrecarga, vertical, assumindo a condição de tensão intermediária (σ_2). Essa idéia confere com a evolução cinemática da primeira fase, cuja análise indicou que o desenvolvimento das falhas transcorrentes conjugadas sucedeu a deformação com caráter reverso da zona de falha de Perimbó.

Convém ainda ressaltar que as orientações obtidas para a tensão horizontal máxima (σ_1) apresentam caimentos para o quadrante noroeste (fig. 45), na mesma posição espacial esperada para os esforços compressivos causadores dos dobramentos assimétricos da primeira fase, que exibem vergência para noroeste.

Além das observações acima, deve-se considerar a modificação do campo de tensões após a nucleação e durante o movimento nas falhas. As trajetórias de tensões máximas se modificam nas proximidades das deformações permanentes, dependendo das quantidades de energia consumida e acumulada durante o falhamento. Após a deformação alcançar o ponto de ruptura (*failure stress*), a tensão que origina o deslocamento efetua trabalho mecânico durante o cisalhamento.

O trabalho (W), em um plano de falha que superou a resistência ao deslizamento friccional, é: $W = \Delta \cdot \tau$ (Price e Cosgrove, 1990), onde Δ é o deslocamento e τ a tensão cisalhante agindo no plano de movimento. Se o ângulo entre a tensão principal (σ_1) e a direção da falha é α (fig. 48), a componente cisalhante τ será $\sigma_1 \cdot \cos \alpha$. Portanto, o trabalho efetuado pela tensão (σ_1) é $W = \Delta \cdot \tau = \Delta \cdot \sigma_1 \cdot \cos \alpha$. Nota-se que o trabalho efetuado pela força normal (σ_n) é nulo, pois quando $\alpha = 90^\circ$, $W = \Delta \cdot \sigma_n \cdot \cos 90^\circ = 0$.

A quantidade de calor gerada pelo trabalho (W) é $g = W/J = (\Delta \cdot \tau)/J$, onde J é o equivalente mecânico do calor (Price e Cosgrove, 1990). Se a resistência friccional ao cisalhamento é dada por $Tf = Mk \cdot \tau_n$, com Mk sendo o coeficiente de fricção cinética, a taxa de produção de calor por unidade de área do plano de falha será $q = Mk \cdot \sigma_n \cdot v$, onde v é a velocidade (Sibson, 1975).

Caso o calor gerado pelo movimento seja dissipado, o processo será irreversível, e parte da energia que estava disponível para efetuar trabalho, antes do processo, torna-se indisponível para utilizar-se como trabalho. A tensão cisalhante (τ), diretamente proporcional ao trabalho realizado, diminui em módulo, enquanto a tensão normal (σ_n) mantém-se constante. Em adição, após a ruptura, a coesão da rocha reduz-se a zero no plano de falha, com o envelope de ruptura no gráfico de Mohr sendo representado então pela fórmula $\tau' = Mk' \cdot \sigma_n$, onde τ' é o novo valor da tensão cisalhante, e Mk' , o coeficiente de deslizamento friccional do plano após a ruptura (fig. 49).

Considerando-se que os valores de τ e σ_n relacionam-se com as magnitudes das tensões principais σ_1 e

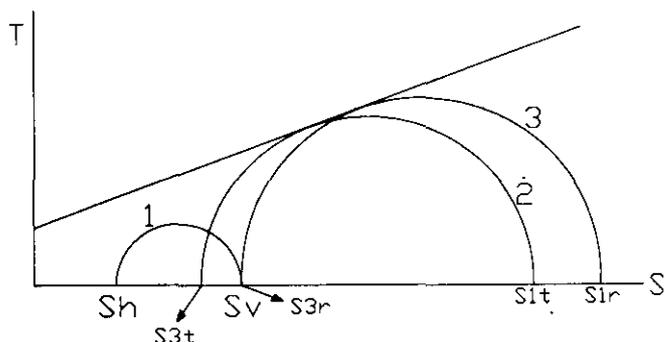


Fig. 47 - Diagrama de tensões de Mohr. Representa as condições para a nucleação de falhas reversas e transcorrentes, quando uma região em equilíbrio litostático é submetida a uma tensão compressiva horizontal. (1) Estado não-perturbado; (2) estado-limite para a nucleação de falhas transcorrentes; (3) estado-limite para a nucleação de falhas reversas (modificado de Mandl, 1988).

Fig. 47 - Mohr circles. Shows conditions for cretion of reverse and strike-slip faults when a region in lithostatic equilibrium is subjected to horizontal compressive stress. (1) Undisturbed state; (2) threshold for clustering of strike-slip faults; and (3) threshold for clustering of reverse faults (adapted from Mandl, 1988).

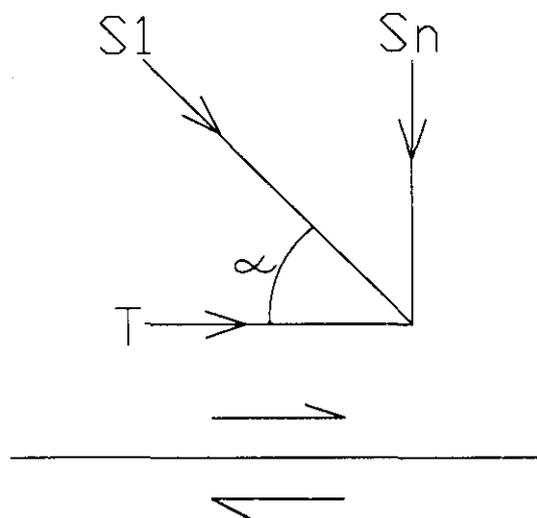


Fig. 48 - Representação, em corte, de um plano de falha, com indicação da tensão principal máxima (S_1) e das componentes cisalhante (T) e normal (S_n).

Fig. 48 - Representation of fault plane, indicating maximum main stress (S_1) and shear (T) and normal (S_n) stresses.

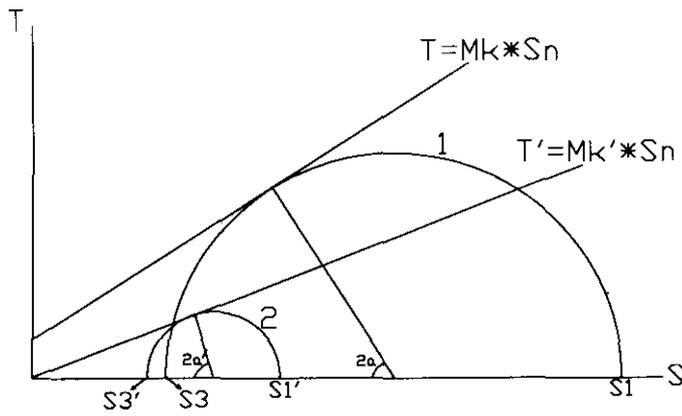


Fig. 49 - Diagrama de tensões de Mohr, onde o semicírculo (1) representa o estado-limite para a nucleação da falha principal, e o semicírculo (2), o estado-limite para causar o deslocamento da falha já formada. Notar o ângulo $2a'$, maior que $2a$, em decorrência da perda de coesão e da queda da tensão cisalhante T no plano de falha (explicações no texto).

Fig. 49 - Mohr circles. Semi-circle (1) represents threshold for creation of main fault, while semi-circle (2) represents threshold for displacement of an already existing fault. Note angle $2a'$, which is greater than $2a$, due to loss of cohesion and drop in shear stress T along fault plane.

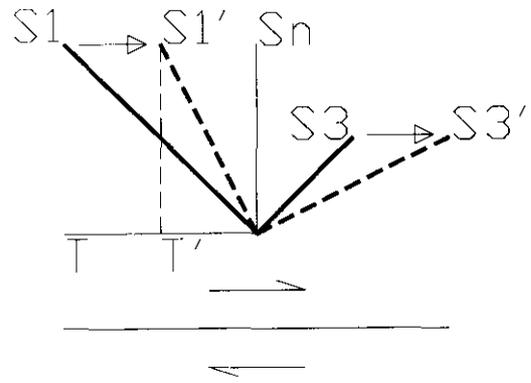


Fig. 50 - Representação da rotação do campo de tensões durante o desenvolvimento de uma falha. Notar que a rotação procede de acordo com o sentido de movimento da falha, como consequência da tensão cisalhante diminuir de T para T' , em módulo, e da magnitude da tensão normal S_n ser mantida (explicações no texto).

Fig. 50 - Representation of stress field rotation during development of fault. Note that rotation proceeds in the direction of fault movement, in consequence both of shear stress dropping from T to T' , in module, and of the magnitude of normal stress being maintained.

σ_3 e com os ângulos que tais tensões formam com o plano de falha, conseqüentemente haverá uma mudança nos valores e nos ângulos das tensões principais. Nesse caso, o ângulo α (fig. 48) torna-se maior, e a tensão máxima (σ_1) diminui e rotaciona no sentido do movimento da falha, enquanto a tensão mínima (σ_3) rotaciona no mesmo sentido (fig. 50).

Teoricamente, essa reorganização do campo de tensões ocorreria no desenvolvimento de qualquer tipo de falha, desde que fossem observados os parâmetros de Mohr-Coulomb. No entanto, com relação às falhas reversas presentes na bacia, uma rotação expressiva dos valores das tensões σ_1 e σ_3 não deve ser considerada. Isto porque em falhas desse tipo, a alta pressão de fluidos, induzida pelo rápido empilhamento tectônico, reduz a resistência friccional ao cisalhamento, não sendo, portanto, efetuado trabalho durante o deslocamento.

Nas falhas transcorrentes conjugadas, ao contrário, as posições subverticais teriam favorecido a perda de fluidos por convecção, mantendo a mesma pressão de fluidos. Nestas condições, a resistência friccional permaneceria a mesma, sendo efetuado trabalho durante o deslocamento da falha.

Desse modo, para a primeira fase de deformação, a partir do início do movimento nas falhas transcorrentes conjugadas, considera-se uma rotação do campo de tensões segundo um eixo subvertical, representado pela tensão intermediária (σ_2). Tal rotação deve ter ocorrido no sentido horário, visto que as falhas dextrais foram as que mais se desenvolveram. Seguindo esse raciocínio, além da rotação das estruturas nucleadas durante o campo de tensões inicial, haveria a possibilidade de serem geradas novas estruturas devi-

do à rotação do campo de tensões. Esse fato contribuiria para a dispersão dos valores de falhas reversas e sinistrais, observada nas figuras 18 e 23, respectivamente.

Para a segunda fase de deformação, embora o número de dados obtidos seja menos representativo, observa-se que os valores da tensão intermediária (σ_2) mantêm-se na posição vertical, a tensão maior (σ_1) tem direção NE-SW e a tensão menor (σ_3) distribui-se entre NW-SE (fig. 46). Os dados acima, associados às posições espaciais das estruturas (fig. 44), permitem inferir que a segunda fase registra uma inversão do campo de tensões com relação à primeira, agora com a direção de distensão (σ_3) representando a tensão tectônica principal, ou seja, o relaxamento do vetor compressivo da primeira fase deformativa.

7 - CONCLUSÕES

A análise estrutural do Grupo Itajaí, baseada nas descrições geométrica, cinemática e dinâmica de estruturas tectônicas, indicou um acréscimo na magnitude da deformação, de NW para SE, em direção à faixa orogênica, situação coerente com a polaridade esperada para uma bacia flexural de antepaís.

Determinou-se um comportamento rúptil a rúptil-dúctil para a deformação das rochas presentes na área, sendo que o estudo dos elementos estruturais indicou o registro de duas fases deformativas.

A primeira fase, ocorrida sob uma ambiência tectônica compressiva, foi a mais penetrativa e estruturou a área em maior ordem. Iniciou-se com a tensão principal máxima (σ_1) direcionada de SE para NW, em posição de ortogonalidade com o traço das

estruturas em superfície, e com a tensão principal intermediária (σ_2) na horizontal, favorecendo o desenvolvimento de falhas reversas de direção N60-70E (por exemplo, a zona de falha de Perimbó), dobras assimétricas vergentes para noroeste, as quais apresentam eixos subhorizontais em torno de N60-70E, assim como um par conjugado de falhas transcorrentes (N10-20E, sinistrais, e N80-90W, dextrais).

A evolução da convergência propiciou o achatamento do par conjugado, bem como a concentração do movimento ao longo das falhas transcorrentes dextrais (N80-90W), proporcionando a rotação do campo de tensões, nesse período com a tensão principal intermediária (σ_2) assumindo a posição vertical. Conseqüentemente, a zona de falha de Perimbó, assim como as dobras já nucleadas, sofreram rotações horárias e reativações progressivas com movimentos reversos dextrais.

A segunda fase, cujas estruturas apresentam ocorrência restrita, ocasionou a reativação distensiva das estruturas formadas previamente, com processos deformativos menos intensos. Em conseqüência, o par conjugado de falhas transcorrentes foi submetido a uma inversão com cinemática contrária à da primeira fase, configurando uma nova situação, onde as falhas dextrais distribuíram-se em torno de N0-10W, e as sinistrais, N80-90W.

AGRADECIMENTOS

A PETROBRÁS e à UFOP pelas oportunidades financeira e educacional para o desenvolvimento da dissertação de mestrado que resultou na presente publicação. Aos geólogos Edison José Milani, Osmar Zannotto, Chang Hung Kiang, Ricardo Perez Bedregal, Marcos Vallério Gonçalves Galvão e André Danderfer Filho pelas sugestões e troca de informações nos trabalhos de campo desenvolvidos e na correção do texto. Aos revisores, João Cláudio de Jesus Conceição e Pedro Victor Zalán. Paulo César Soares agradece o apoio da FINEP/PADCT, projeto nº 4389-0041.00.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F. F. M. *Origem e evolução da plataforma brasileira*. Rio de Janeiro: DNPM. Divisão de Geologia e Mineralogia, 1967. 36 p. (Boletim, n. 241).
- ANGELIER, J. Determination of the mean principal directions of stresses for a given fault population. *Tectonophysics*, Amsterdam, v. 56, n. 1/2, p. 17-26, 1979.
- ANGELIER, J. Tectonic analysis of fault slip data sets. *Journal of Geophysical research*, Washington, v. 89, p. 5835-5848, 1984.
- APPI, C. J. *Análise estratigráfica da seção metassedimentar do Grupo Itajaí no estado de Santa Catarina*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1991. 119 p. Dissertação de mestrado.
- BARTLETT, W. L., FRIEDMAN, M., LOGAN, J. M. Experimental folding and fracturing of rocks under confining pressure. *Tectonophysics*, Amsterdam, v. 79, n. 3/4, p. 255-277, 1981.
- BASEI, M. A. S. *O cinturão Dom Feliciano em Santa Catarina*. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1985. 193 p. Tese de doutorado.
- DAVIS, H. G. *Structural geology of rocks and regions*. New York: John Wiley & Sons, 1984. 492 p.
- FRAGOSO, C. A. R. S., WERNICKE, E., SOLIANI Jr., E. Evolução geotectônica do Cinturão Dom Feliciano: uma contribuição através da aplicação do modelo de tectônica de placas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32, Salvador, 1982. *Anais...* Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia, 1982. v. 1, p. 13-23.
- ISSLER, R. S. Bacia periférica Camaquã-Itajaí: elemento tectônico desenvolvido pela tectônica de placas. In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 2, Florianópolis, 1985. *Anais...* Florianópolis: Sociedade Brasileira de Geologia, 1985. p. 184-198.
- JOST, H., HARTMANN, L. A., Província mantiqueira: setor meridional. In: ALMEIDA, F. F. M., MASUI, Y. (coords). *O pré-cambriano do Brasil*. São Paulo: Edgar Blücher, 1984. 378 p.
- KREBS, A. S. J., CALDASSO, A. L. S., LOPES, R. C. Interpretação preliminar da seqüência deposicional da Bacia do Itajaí na área da folha de Botuverá. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35, Belém, 1988. *Anais...* Belém: Sociedade Brasileira de Geologia, 1988. v. 2, p. 592-605.
- KREBS, A. S. J., LOPES, R. C., CAMOZZATO, E. Caracterização faciológica do Grupo Itajaí na folha Botuverá (SC). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36, Natal, 1990. *Anais...* Natal: Sociedade Brasileira de Geologia, 1990. v. 1, p. 82-92.
- KREBS, A. S. J., SILVA, M. A., DIAS, A. A., CAMOZZATO, E., LOPES, R. C. O Grupo Itajaí na folha Botuverá (SC), modelo geométrico-cinemático e relações com o Cinturão Granulítico e Cinturão Metavulcano-Sedimentar Brusque: instalação, preenchimento e inversão da Bacia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36, Natal, 1990. *Anais...* Natal: Sociedade Brasileira de Geologia, 1990. v. 6, p. 2966-2975.
- MACEDO, M. H. F., BASEI, M. A. S., BONHONE, M. G., KAWASHITA, K. Dados geocronológicos referentes às rochas metassedimentares do Grupo Itajaí (SC). *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 14, n. 1, p. 30-34, 1984.
- MANDL, G. *Mechanics of tectonic faulting, models and basic concepts*. Developments in structural geology, 1. Amsterdam: Elsevier, 1988. 407 p.
- NAYLOR, M. A., MANDL, G., SIJPESTEIJN, C. H. K. Fault geometry in basement induced wrench faulting under Different Initial Stress States. *Journal of Structural Geology*, Washington, v. 8, p. 737-752. 1986.
- PARK, R. G. *Foundations of structural geology*. New York: Chapman and Hall, 1989. 148 p.
- POPP, J. H., SILVA, L. C. Excursão n. 02: estratigrafia das bacias do Paraná e Itajaí-perfil Lages-Blumenau. In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 2, Florianópolis, 1985. *Anais...* Florianópolis: Sociedade Brasileira de Geologia, 1985. p. 49-79.
- PRICE, N. J., COSGROVE, J. W. *Analysis of geological structures*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 502 p.
- RAMSAY, J. C. *Folding and fracturing of rocks*. New York: McGraw-Hill, 1967. 568 p.
- ROSTIROLLA, S. P. *Tectônica e sedimentação da Bacia de Itajaí, SC*. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 1991. 132 p. Dissertação de mestrado.

- ROSTIROLLA, S. P., ALKMIN, F. F., SOARES, P. C. O Grupo Itajaí, SC, Brasil: exemplo de sedimentação em uma bacia flexural de antepaís. *Boletim de Geociências da PETROBRÁS*, Rio de Janeiro, 1992. Neste volume.
- SALAMUNI, R., BIGARELLA, J. J., TAKEDA, F. K. Considerações sobre estratigrafia e tectônica da Série Itajaí. *Boletim Paranaense de Geografia*, [s.l.], v. 4/5, p. 188-201, 1961.
- SANDERSON, D. J., MARCHINI, W. R. D. Transpression. *Journal of Structural Geology*, Oxford, v. 6, n. 5, p. 449-458, 1984.
- SIBSON, R. H. Generation of pseudotachylite by ancient seismic faulting. *Geophysical J. r. astr. soc.*, [s.l.], v. 43, p. 775-789, 1975.
- SILVA, L. C. Geologia do pré-cambriano/eopaleozóico de Santa Catarina. In: SILVA, L. C., BORTOLUZZI, A. A. (eds). *Texto explicativo para o mapa geológico do estado de Santa Catarina*. Santa Catarina: DNPM/CRM-SC, 1987. p. 12-90. mapa: Escala 1 : 500.000.
- SILVA, L. C., DIAS A. A. *Projeto Timbó-Barra Velha, Brasil*. Porto Alegre: Convênio DNPM/CPRM, 1981. 282 p.
- SOARES P. C., BARCELLOS, P. E., CSORDAS, S. M., MATTOS, J. Y., BALIEIRO, M. G., MENESES, P. R. Lineamentos em imagens de Landsat e radar: suas implicações no conhecimento tectônico da Bacia do Paraná. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENS. REMOTO, 2, Brasília, 1982. *Anais. . .* Brasília: CNPO/INPE, 1982. p. 143-156.
- SOARES, P. C. Tectônica colisional em torno do Bloco Paraná, Brasil. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE GEOLOGIA, 7, Belém, 1988. *Anais. . .* Belém: Sociedade Brasileira de Geologia, 1988. v. 1, p. 63-79.
- TANNER, P. W. G. The flexural slip mechanism. *Journal of Structural Geology*, Oxford, v. 11, n. 6, p. 635-655, 1989.
- WILCOX, R. E., HARDING, T. P., SELEY, D. R. Basic wrench tectonics. *AAPG Bulletin*, Tulsa, v. 57, n. 1, p. 74-96, 1973.

EXPANDED ABSTRACT

Structural analysis of the Itajaí Group has confirmed a late collisional deformation during evolution of the Dom Feliciano mobile belt within the context of a foreland basin. The structural framework suggests a polarity in deformation magnitude from NW to SE, running opposite to structural vergence.

Deformation was brittle to brittle-ductile in nature. Two families of tectonic structures have been recognized, each corresponding to a different deformation phase. The first phase (D1), compressive in nature, dominates the structural fabric of the Itajaí Basin. The second (D2), much less intense, saw extensional reactivation of first-phase structures.

Evolution of first-phase deformation began with a SE-NW-trending convergence. Deformation was mainly frontal at first, with development of F1 folds, the Perimbó reverse fault zone, and a conjugate system of strike-slip faults. Continuation of the compressive field led to the flattening of this conjugate pair and concentration of movement along the dextral strike-slip faults.

Dynamic analysis indicates that phase D1 began with intermediate stress (σ_2) along the horizontal: as tectonic transportation developed, thickening prompted a redistribution of stress fields, with vertical stress from overburden becoming the source of intermediate stress (σ_2). This is consistent with kinematic evolution, which

indicates that development of the strike-slip faults followed deformation of the Perimbó reverse fault zone. When movement of the strike-slip faults began, the stress field rotated around a subvertical axis, represented by intermediate stress (σ_2). This rotation must have been clockwise, given that the dextral faults are the most developed. According to this reasoning, in addition to rotation of the structures originated during the period of the initial stress field, new structures could be generated by rotation of the stress field.

The structural characteristics and spatial distribution of phase D2 structures are indicative of kinematic inversion of earlier structures. It should be noted that the attitudes of first-phase dextral faults coincide with those of second-phase sinistral faults, with both displaying modal directions N80-90W.

Intermediate stress values (σ_2) remained vertical during this phase of deformation, while maximum stress (σ_1) occurred NE-SW and minimum stress (σ_3), NW-SE. This information, linked with the spatial positions of the structures, suggests that the stress field in the second phase was inverted in relation to the first, with the direction of extension (σ_3) becoming the main tectonic stress — in other words, relaxation of the compressive vector of the first phase of deformation.