

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

TECTÔNICA RÚPTIL CENOZOICA NA BACIA DE SÃO PAULO

Enrico VialScacchetti

Orientador: Claudio Riccomini

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2012/13)

SÃO PAULO
2012

Sumário

Índice de figuras	i
Agradecimentos	iii
Resumo.....	iv
Abstract	v
1. Introdução	1
2. Objetivos	2
3. Justificativas	2
4. Estado da arte	3
5. Materiais e métodos	8
5.1. Falhas como indicadores de esforços tectônicos.....	9
6. Geologia local	11
7. Resultados obtidos	14
8. Resultados obtidos.....	15
8.1. Distensão inicial NNW-SSE, eocena-oligocena.....	15
8.2. Compressão NW-SE, pleistocena	18
8.3. Distensão NW-SE a E-W, pleistocena a holocena	19
8.4. Compressão E-W, atual	21
9. Discussão e conclusões	22
10. Referências bibliográficas	24

Índice de figuras

Figura 1: Principais localidades na área geográfica da Bacia de São Paulo.	3
Figura 2: Esboço paleotectônico da evolução do segmento central do Rift Continental do Sudeste do Brasil – Legenda no quadro D: 1) falhas de componente predominante normal; 2) falha de componente transcorrente sinistral; 3) falha de componente transcorrente dextral; 4) falha de componente predominantemente reversa; 5) falha com movimentação não caracterizada. Fonte: Riccomini (1989), Salvador e Riccomini (1995) e Riccomini <i>et al.</i> (2004).....	5
Figura 3: SHmax de dados geológicos. Tamanho do símbolo indica a qualidade do dado, segundo Riccomini & Assumpção (1999).....	6
Figura 4: SHmax de dados geofísicos. Tamanho do símbolo indica a qualidade do dado, segundo Riccomini & Assumpção (1999).	7
Figura 5: Modelo matemático das tensões intraplaca. Linhas indicam a direção de compressão; Duas flechas indicam a direção de distensão, segundo Meijer (1995).	8
Figura 6: Método dos diedros retos. A) Falha F e plano auxiliar A, delimitando diedros compressivos P e distensivos T. A direção e o sentido de movimento da falha estão representados pelo vetor unitário de movimento s e vetor unitário ortogonal à falha (n); B) Projeção estereográfica de Schmidt, hemisfério inferior de referencia, dos planos F e A, onde P representa o diedro compressivo e T o diedro distensivo. (Angelier, 1994).	9
Figura 7: Princípio dos diedros retos, projeção de Schmidt, hemisfério inferior de referência. A figura D representa a somatória das falhas A, B e C, com ênfase na área vermelha no centro representando o eixo σ_1 comum à população de falhas e a porção azul que representa o eixo σ_3 comum à esta população.	9
Figura 8: Classificação dos principais tipos de falhas: a) falha normal; b) falha transcorrente; c) falha inversa.....	10
Figura 9: Feições assimétricas observáveis em planos de falhas: 1) degraus de minerais acrescionários em função do crescimento de cristais fibrosos ou de outros cristais durante o movimento da falha (neoformados); 2) marcas de objetos tectônicos, ocorrem tanto como relevo positivo ou cavidades assimétricas na superfície de falha, em função do lado em observação; 3) fraturas conjugadas de Riedel (<i>Riedel shears</i> - R); 4) superfícies antitéticas (planos R' de Riedel); 5) facetas polidas e rugosas; 6) <i>tension gashes</i> (fraturas T de Riedel); 7) picos ou lineações estilolíticas, produzidos por dissolução em facetas friccionais; 8) marcas parabólicas formas em meia-lua com concavidade voltada no sentido do movimento do bloco abatido; 9) vesículas deformadas em lavas. Extraído de Angelier (1994).....	10
Figura 10: Mapa geológico da Bacia de São Paulo e porção sudoeste da Bacia de Taubaté – 1) embasamento Pré-Cambriano; 2) Formação Resende (sistema de leques aluviais proximais; 3) Formação Resende (sistema de leques aluviais medianos a distais associados a planícies aluviais de rios entrelaçados); 4) Formação Tremembé; 5) Formação São Paulo; 6) Formação Itaquaquecetuba; 7) sedimentos quaternários 8) falhas cenozoicas, em parte reativadas do embasamento pré-cambriano. Fonte: Riccomini & Coimbra (1992), Riccomini <i>et al.</i> (2004).....	11
Figura 11: Quadro litoestratigráfico e evolução tectono-sedimentar do segmento central do RCSB – Letras: p – leques aluviais proximais; m-d – leques aluviais medianos a distais associados a planície aluvial de rios entrelaçados; t – depósitos de talus; c – depósitos coluviais; ca – depósitos colúvio-aluviais; a – depósitos aluviais. Fontes: modificado de Riccomini (1989), Mancini (1995), Salvador & Riccomini (1995).	12

Figura 12: Seções geológicas na BSP construída a partir de dados de sondagens para água subterrânea e observações de superfície – 1) embasamento Pré-Cambriano; 2) orto e paraconglomerados de leques aluviais proximais da Formação Resende; 3) lamitos de leques aluviais medianos a distais da Formação Resende; 4) lamitos de leques aluviais distais e, principalmente, areias e conglomerados de sistema fluvial entrelaçado da Formação Resende; 5) predominância de areias grossas e conglomerados da Formação Resende; 6) sistema lacustre da Formação Tremembé; 7) sistema fluvial meandrante da Formação São Paulo; 8) aluviões Quaternários; 9) falha normal (A) e falha transcorrente dextral (B). Fonte: Riccomini <i>et al.</i> (2004).....	13
Figura 13: Localidades estudadas: A- Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU); B- Rio Jaguari; C- Arujá; D- Santa Isabel, E- Itaquaquecetuba; F- Jacareí; G- Rio Pinheiros; H- Guarulhos; I- Santa Isabel 2; J- Rio Jaguari 2; K- Largo da Batata; 1) sedimentos cenozoicos; 2) sedimentos quaternários; 3) falhas.....	15
Figura 14: População de falhas e estrias analisadas no local K (Largo da Batata), Local D (Santa Isabel) e Local F (Jacareí), indicando distensão de direção NW-SE, relacionada à instalação da BSP.	16
Figura 15: Falha normal lítrica, sin-sedimentar, local D, indicando distensão de direção NW-SE, relacionada à instalação da BSP. Medida das falhas principais observadas: 1 – 148/47//150/47 normal; 2 – 295/25//293/25 normal; 3 - 055/68 normal.....	17
Figura 16: Falha normal, sin-sedimentar, provavelmente lítrica pela presença da anticlinal de volteio, Local F indicando distensão NW-SE relacionada à instalação do RCSB.....	17
Figura 17: População de falhas e estrias analisadas no Rio Jaguari (Local B), Arujá (Local C), Santa Isabel (Local D) e Guarulhos (Local H), indicando compressão NW-SE e distensão NE-SW.	19
Figura 18: População de falhas e estrias analisadas em Santa Isabel (Local I), Rio Pinheiros (Local G), Itaquaquecetuba (Local E), Rio Jaguari (Local J), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU – USP) (Local A).....	20
Figura 19: Figura 19: Falha normal em Itaquaquecetuba (Local E).....	21
Figura 20: População de falhas e estrias analisadas na Faculdade de Arquitetura e Urbanismo FAU – USP (Local A), Rio Jaguari (Local B), Indicando uma compressão E-W .	22

Agradecimentos

Gostaria, primeiramente, de agradecer aos meus pais Roberto e Ligia e ao meu irmão Piero, e a toda minha família, pois tudo que sou devo a eles. Agradeço por todo o apoio e por todo o esforço que dispenderam para me oferecer condições de concluir o curso de Geologia, me apoiando, inclusive, quando desisti do bacharelado em Oceanografia, já no quarto ano, para seguir meu caminho na Geologia.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela oportunidade de desenvolver meu projeto de pesquisa, e pela confiança a mim concebida, ao me contemplar com bolsa de iniciação científica.

Agradeço também ao professor Claudio Riccomini pela excelente orientação, pelas longas conversas em sua sala sobre pescaria, comida e geologia, pela sua enorme paciência em me orientar e me passar seu valioso conhecimento e pelo seu esmero na correção de meu trabalho, corrigindo cada vírgula e pontos nos i's.

A minha namorada Alynne, por estar sempre ao meu lado nesses últimos 5 anos, ajudando, me aguentando, inclusive nos momentos de mau humor ao longo de toda minha graduação e pela sua grande ajuda na correção e finalização deste trabalho.

Aos grandes amigos de Orcas Republic, que me acompanharam ao longo de tantos anos na USP, meus companheiros Jaburte e Bernoca, aos grandes amigos do IO, JagaDollynho e Reclamão. A todas as pessoas da Geologia que, de alguma forma, me ajudaram nesta escalada, funcionários, professores e colegas. À República Cativairo pelos belos churrascos, boas risadas e a grande amizade.

Resumo

A Bacia de São Paulo (BSP), local com a maior e mais densa ocupação urbana do País, está localizada no segmento central do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (RCSB). Este *rift*, de idade cenozoica, é uma feição alongada e deprimida de direção ENE, desenvolvida entre Tijucas do Sul, PR, e a área submersa defonte Macaé, RJ, numa extensão de aproximadamente 900 km. Os depósitos sedimentares da BSP distribuem-se irregularmente numa área de aproximadamente 1000 km², com eixo maior de 75 km entre Arujá, a leste, e Embu-Guaçu, a oeste, e eixo menor de 25 km, entre o bairro de Santana, ao norte e Santo André, ao sul. Esses depósitos são afetados por falhas rúpteis relacionadas tanto à geração como à deformação da bacia.

O presente trabalho teve como meta a elaboração de um modelo tectônico evolutivo para a BSP a partir de dados estruturais rúpteis e sua relação com os depósitos sedimentares terciários e quaternários. Para tanto foram analisados mais de 250 dados de falhas rúpteis e respectivas estrias presentes em rochas sedimentares da Bacia de São Paulo e no seu embasamento. Essas falhas foram ordenadas cronologicamente de acordo com as relações de campo e estratigráficas. Os dados foram analisados graficamente com vistas à determinação dos paleocampos de tensões, pelo método dos diedros retos.

Apesar das limitações existentes na BSP quanto à disponibilidade de exposições de rochas sedimentares passíveis de análise estrutural, dos cinco eventos tectônicos cenozoicos previamente descritos na região RCSB, quatro foram identificados neste trabalho. De particular relevância foi o reconhecimento inicial de registros do evento gerador e do último evento deformador do RCSB na BSP. Os dados obtidos confirmam a validade dos modelos evolutivos propostos regionalmente.

Abstract

The São Paulo Basin (SPB) encompasses the region with the largest and most densely populated region of Brazil. It is located in the central segment of the Continental Rift of Southeastern Brazil (CRSB), a 900 km long, ENE-oriented Cenozoic tectonic feature developed between Tijucas do Sul, in the State of Paraná, and Macaé, in the State of Rio de Janeiro. The sedimentary deposits of the SPB covers an area of about 1000 sq. km, with a major axis of 75 km between Arujá and Embu-Guaçu, and a minor axis of 25 km between Santana and Santo André. These sedimentary deposits are affected by brittle faults related to the installation and deformation of the basin.

The present study was developed aiming to elaborate aevolutive tectonic model for the SPB based on the study of brittle faults and their relationship with the Tertiary and Quaternary deposits. For this purpose, more than 250 data on faults affecting the sedimentary deposits and the basement rocks were analyzed. The fault data set was classified on the basis of field and stratigraphic relations, in order to determine the paleostress fields using the right diedra inversion method.

Despite the limitation of outcrops with faults, four episodes of Cenozoic tectonic deformation were recognized in the SPB. Of particular significance was the recognition, for the first time, of faults related to the basin generation and to the younger tectonic deformation episodes of the CRSB in the region of the SPB. The results of the present study corroborate the previous regional tectonic models proposed for this region.

1.Introdução

Coube a Almeida (1953) os primeiros estudos relacionando a geomorfogênese da Serra de Cubatão e dos sistemas de *Rift Valley* do sudeste do Brasil à falhas. Em Almeida (1955) estudos sobre a tectônica da Serra da Mantiqueira apresentaram as primeiras descrições sobre a existência de falhas transcorrentes antigas e profundas reativadas. Almeida (1976) nomeou estas feições como Sistemas de Rifts da Serra do Mar, e posteriormente em Riccomini (1989) o termo *Rift Continental* do Sudeste do Brasil (RCSB) foi apresentado.

Este *rift*, de idade cenozoica, é uma feição alongada e deprimida de direção ENE, desenvolvida entre Tijucas do Sul, no Estado do Paraná, e a área submersa defronte a Macaé, no Estado do Rio de Janeiro, numa extensão de aproximadamente 900 km (Riccomini *et al.* 2004). A Bacia de São Paulo (BSP), local com a maior e mais densa ocupação urbana do país, está localizada no segmento central do *Rift Continental* do Sudeste do Brasil (RCSB) e foi desenvolvida sobre terrenos policíclicos, constituídos essencialmente por rochas metamórficas, migmatitos e granitoides, cobertas com sedimentos terciários e quaternários. Os depósitos sedimentares da BSP distribuem-se irregularmente numa área de aproximadamente 1000 km², com eixo maior de 75 km entre Arujá, a leste, e Embu-Guaçu, a oeste, e eixo menor de 25 km, entre o bairro de Santana, na Cidade de São Paulo, ao norte e Santo André, ao sul.

Com base na análise de estruturas tectônicas rúpteis e suas relações com os depósitos sedimentares cenozoicos, foi proposto um modelo de evolução tectono-sedimentar para o RCSB (Riccomini 1989; Riccomini *et al.* 2004; Salvador & Riccomini 1995).

O quadro tectônico disponível para a evolução da Bacia de São Paulo compreende quatro regimes superimpostos originalmente reconhecidos por Riccomini (1989), acrescido de um quinto regime de esforços mais novo, reconhecido por Salvador & Riccomini (1995). Este conjunto de dados corresponde às estruturas pré-cambrianas reativadas no Mesozoico-Cenozoico, constituindo assim elementos importantes para compreender as fases de embaciamento e posterior deformação dos sedimentos. Estas fases são:

- 1) distensão inicial de direção NNW-SSE, responsável pela instalação das bacias do RCSB (Riccomini 1989);
- 2) transcorrência sinistral, no Mioceno, o primeiro evento deformador que agiu na bacia (Riccomini 1989; Salvador 1994);
- 3) transcorrência dextral de idade pleistocena, segundo evento deformador (Riccomini 1989; Salvador & Riccomini 1995);
- 4) no Pleistoceno-Holoceno ocorreu o terceiro evento deformador que agiu no RCSB, apresentando distensão WNW-ESE a E-W (Salvador & Riccomini 1995).

5) segundo Salvador & Riccomini (1995), além dos regimes anteriormente reconhecidos, há um outro regime de esforços compressivos de direção geral E-W agindo na bacia, correlacionável a dados sísmológicos de Assumpção (1992).

Em função da intensa ocupação, na Bacia de São Paulo existem poucas exposições de rochas sedimentares, o que dificulta sobremaneira a obtenção de dados estruturais. Estes somente podem ser obtidos em circunstâncias especiais, como durante a execução de fundações ou de obras subterrâneas.

A maior parte dos dados estruturais e estratigráficos disponíveis para a BSP foi obtido na década de 1980, compilados e publicados no início da década seguinte. Desde então novos dados foram acumulados a partir de observações realizadas em frentes de obras, o que permitiu o incremento de informações sobre a tectônica e sedimentação na bacia e, em adição, favorece a reavaliação dos modelos anteriormente propostos e o teste da sua validade para a BSP, objetivo central deste trabalho.

2. Objetivos

Este trabalho de graduação teve como meta a elaboração de um modelo de evolução para a BSP a partir de dados estruturais rúpteis e sua relação com os depósitos sedimentares terciários e quaternários. Para tanto, pretendeu-se atingir os seguintes objetivos:

1. compilar os dados estruturais existentes e avaliar a relação das estruturas com os depósitos sedimentares terciários e quaternários;
2. obter dados adicionais em exposições vizinhas na região de Arujá e Santa Isabel, na proximidade da Soleira de Arujá, alto estrutural que separa as bacias de São Paulo e Taubaté;
3. comparar os resultados obtidos e modelos estabelecidos para a BSP com aqueles disponíveis para o RCSB.

3. Justificativas

O estudo reveste-se de importância acadêmica e aplicada. No plano acadêmico é relevante à compreensão da evolução tectônica da BSP e do RCSB, no contexto da margem continental passiva atlântica e na formulação de modelos tectônicos para a área submersa adjacente à Bacia de Santos, com implicações na atividade exploratória de hidrocarbonetos. Ressalta-se também a relevância aplicada do estudo na compreensão dos padrões de fraturas das rochas e sua importância em obras de engenharia, exploração de

recursos hídricos subterrâneos em aquíferos fraturados e estudos de fluxo de contaminantes em meios fraturados. Adicionalmente, a execução do trabalho representa uma oportunidade de treinamento do aluno em Geologia Estrutural, especificamente na análise de maciços fraturados.

Apesar de a BSP englobar a quase totalidade da área da Região Metropolitana de São Paulo (Figura 1), foi apenas no início da década de 1980 que o conhecimento sobre a geologia da BSP sofreu um avanço significativo. Os trabalhos das décadas anteriores, a partir da década de 1940, realizados principalmente pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, contemplavam essencialmente observações geotécnicas obtidas a partir de sondagens. Estes estudos tinham como finalidade obter dados sobre a resistência e compressibilidade de solos, sedimentos e rochas sedimentares para fins de fundações de edifícios e pontes, e não estudar os processos geológicos que agiram na bacia.

Figura 1: Principais localidades na área geográfica da Bacia de São Paulo.

Melo *et al.* (1989) apresentaram um trabalho sobre a evolução dos conhecimentos sobre a BSP na década de 80, reconhecendo na área duas unidades litoestratigráficas, as formações São Paulo e Itaquaquetuba.

Riccomini (1989) realizou uma análise conjunta de fácies e sistemas deposicionais, propondo ainda uma revisão na litoestratigrafia do RCSB. Esta revisão foi fundamentada na continuidade pretérita entre as bacias do *rift*, nas relações de transição entre os sistemas deposicionais e nas suas idades datadas do Oligoceno.

Apesar dos estudos da geologia da BSP terem apresentado uma grande evolução nas décadas de 70 e 80, investigações sobre a geologia estrutural da área foram iniciados apenas em meados da década de 80, na região de Itaquaquetuba (Coimbra *et al.*, 1983; Almeida *et al.*, 1984). Posteriormente, Melo *et al.* (1986) estenderam os estudos estruturais para quase toda a área da BSP e sudoeste da Bacia de Taubaté.

Riccomini (1989) reanalisou as pesquisas até então disponíveis e as complementou, elaborando uma síntese da evolução tectônica para o segmento do RCSB compreendido entre as bacias de São Paulo e Volta Redonda, visando o estabelecimento das relações entre as deformações no substrato pré-cenozóico com a cobertura sedimentar mais jovem, terciária e quaternária. O autor dividiu em dois grupos principais as estruturas encontradas na área da BSP. O primeiro grupo encerra as estruturas do Pré-Cambriano ao Eopaleozóico, como as foliações metamórficas e de transposição, zonas de cisalhamento e juntas. O segundo grupo compreende as estruturas de reativação e deformação que afetaram o embasamento pré-cenozóico e os sedimentos terciários e quaternários.

Ainda segundo (Riccomini 1989, Salvador & Riccomini 1995), o RCSB apresenta uma evolução tectônica com cinco fases superimpostas de regimes de esforços distintos (Figura 2):

1) distensão inicial NNW-SSE, responsável pela instalação das bacias do RCSB, uma depressão alongada e extensa, impostas pelo basculamento termomecânico da Bacia de Santos, com preenchimento vulcano-sedimentar sintectônico (Grupo Taubaté), compreendendo um sistema de leques aluviais associados à planície aluvial de rios entrelaçados (Formação Resende), um sistema *playa-lake* (Formação Tremembé), e um sistema fluvial meandrante (Formação São Paulo); este regime teria σ_1 vertical e σ_3 orientado segundo NNW-SSE, e teria atuado entre o Eoceno e Oligoceno, causando reativação em falhas mestras normais de zonas de cisalhamento proterozóicas com direção entre NE e ENE (Riccomini 1989);

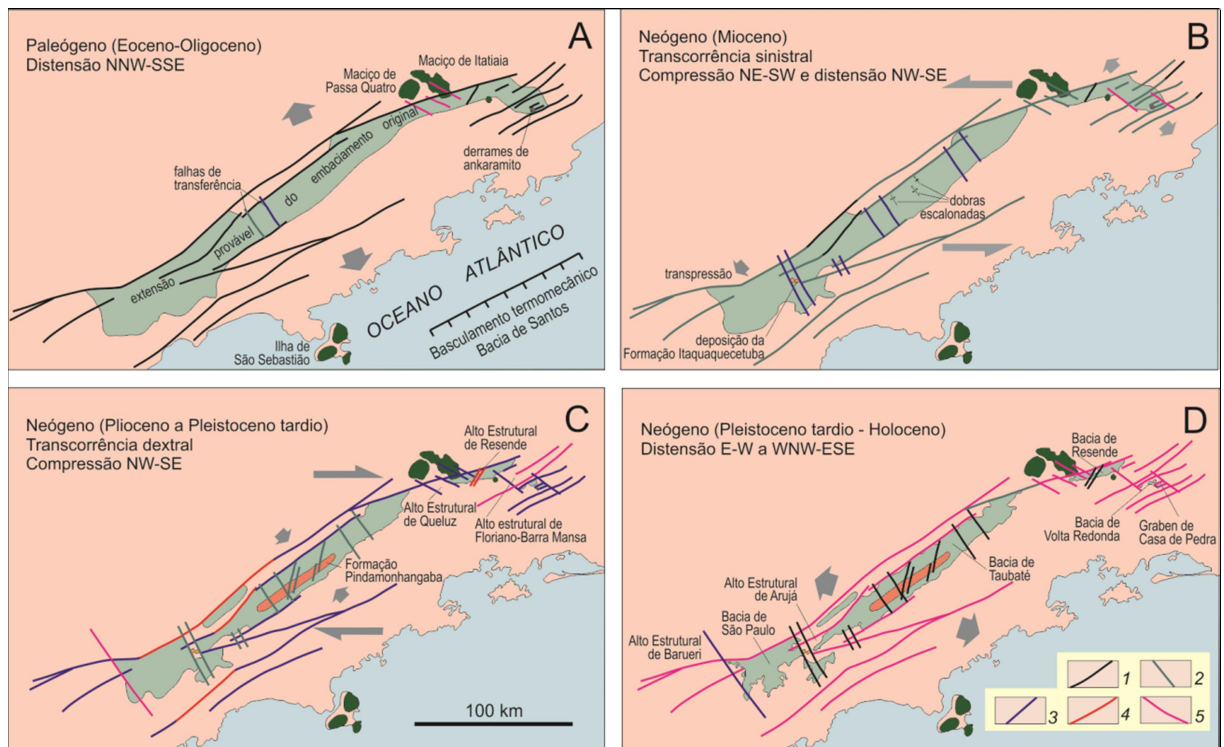


Figura 2: Esboço paleotectônico da evolução do segmento central do Rift Continental do Sudeste do Brasil – Legenda no quadro D: 1) falhas de componente predominante normal; 2) falha de componente transcorrente sinistral; 3) falha de componente transcorrente dextral; 4) falha de componente predominantemente reversa; 5) falha com movimentação não caracterizada. Fonte: Riccomini (1989), Salvador e Riccomini (1995) e Riccomini et al. (2004)

2) transcorrência sinistral, durante o Mioceno, o primeiro evento deformador que agiu na bacia, responsável por falhas transcorrentes originando bacias de afastamento e possivelmente soerguimento de blocos que geraram o Alto Estrutural de Queluz e Arujá, estes relacionados à transpressão, ou bacias do tipo *pull-apart* e consequentemente a individualização das bacias de Taubaté, Resende e São Paulo, com a separação das drenagens dos rios Tietê e Paraíba do Sul e a deposição do sistema entrelaçado da Formação Itaquaquecetuba; este regime compreenderia um esforço horizontal máximo (σ_1), orientado na direção NE-SW, e σ_3 horizontal, de direção NW-SE (Riccomini 1989, Salvador 1994);

3) o segundo evento deformador da bacia foi caracterizado por uma transcorrência dextral de idade pleistocena a holocena, com σ_1 horizontal, segundo NW-SE, e σ_3 horizontal, de direção NE-SW, criando condições para transpressão e transtação, gerando o Alto Estrutural de Caçapava, o Alto Estrutural de Resende, e falhas que seccionam depósitos coluviais e colúvio-alúvios pleistocênicos, (Riccomini 1989, Salvador & Riccomini 1995);

4) o terceiro evento deformador que agiu no RCSB teria idade pleistocena a holocena, e apresenta distensão WNW-ESE a E-W; neste evento teria ocorrido o embutimento tectônico de depósitos de baixos terraços coluviais em grabens de direção geral NNE (Salvador & Riccomini 1995).

5) segundo Salvador & Riccomini (1995), além dos regimes anteriormente reconhecidos, há um outro regime de esforços compressivos com $SH_{\max}$ σ_1 horizontal, segundo E-W, agindo na bacia (Figura 3); esta última fase de compressão foi relacionada a dados sismológicos de mecanismos focais de pequenos terremotos no Sudeste do Brasil (Assumpção 1992, Assumpção 1998, Riccomini & Assumpção 1999) (Figura 4), e corresponde ao campo de esforços atuais que age na área da bacia.

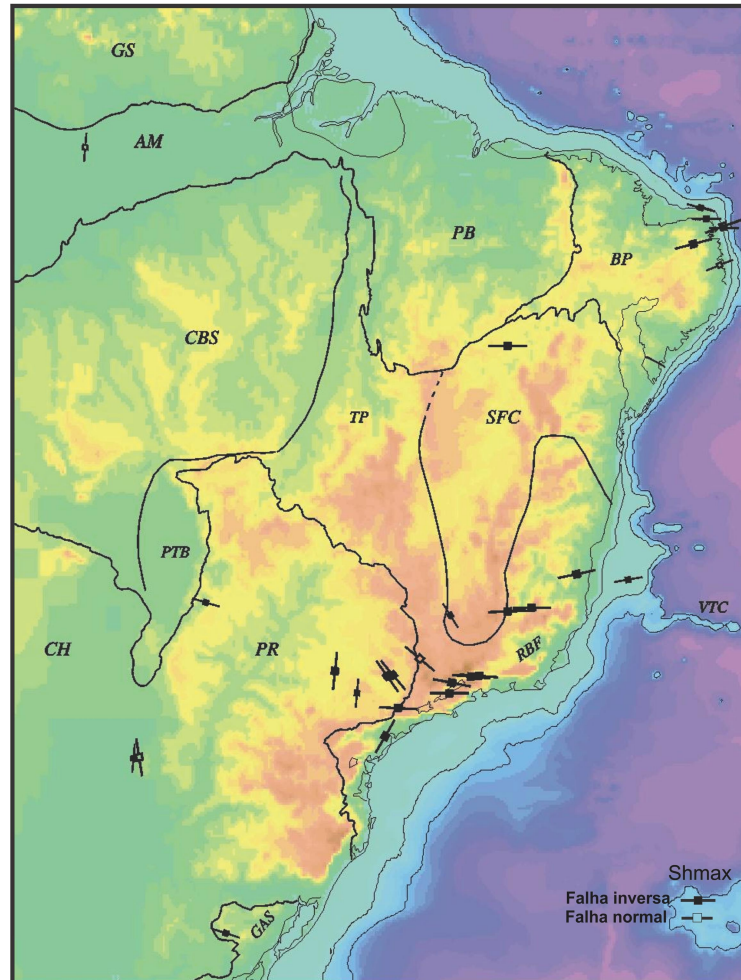


Figura 3: $SH_{\max}$ de dados geológicos. Tamanho do símbolo indica a qualidade do dado, segundo Riccomini & Assumpção (1999).

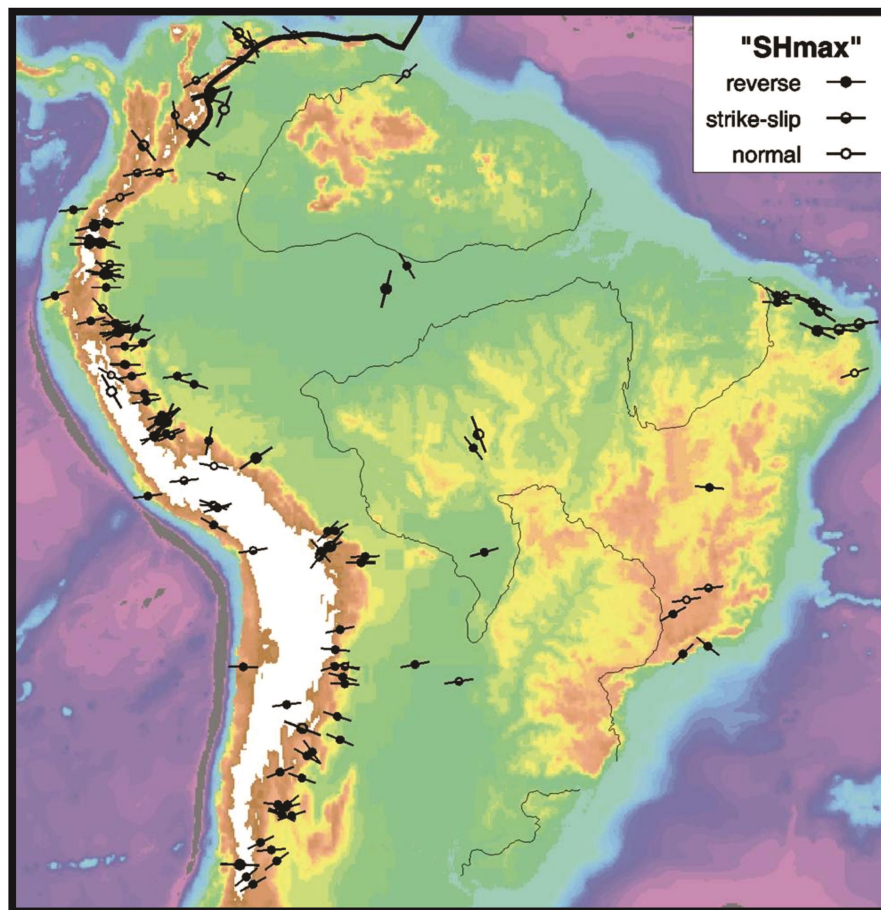


Figura 4: SHmax de dados geofísicos. Tamanho do símbolo indica a qualidade do dado, segundo Riccomini & Assumpção (1999).

Meijer (1995) fez uso de modelos numéricos em escala global para a obtenção dos esforços atuais que agem nas placas tectônicas (Figura 5). A modelagem numérica nos permite avaliar quantitativamente o papel dos vários fatores e parâmetros que afetam um determinado processo. Além disso, também nos fornece um meio de testar hipóteses: um mecanismo proposto é simulado, e os resultados do modelo são criteriosamente comparados com os dados disponíveis, para avaliar se o mecanismo assumido é realista. O uso de um modelo numérico nos permite estimar a relevância das observações disponíveis e apontar qual informação adicional é necessária.

Atualmente está disponível um considerável número de informações do comportamento da litosfera no passado e no presente, o conhecimento de como as placas se movimentaram e se movimentam. A habilidade de reconstruir a evolução de regiões intensamente deformadas constitui apenas um passo para acharmos respostas para a causa dessas deformações.

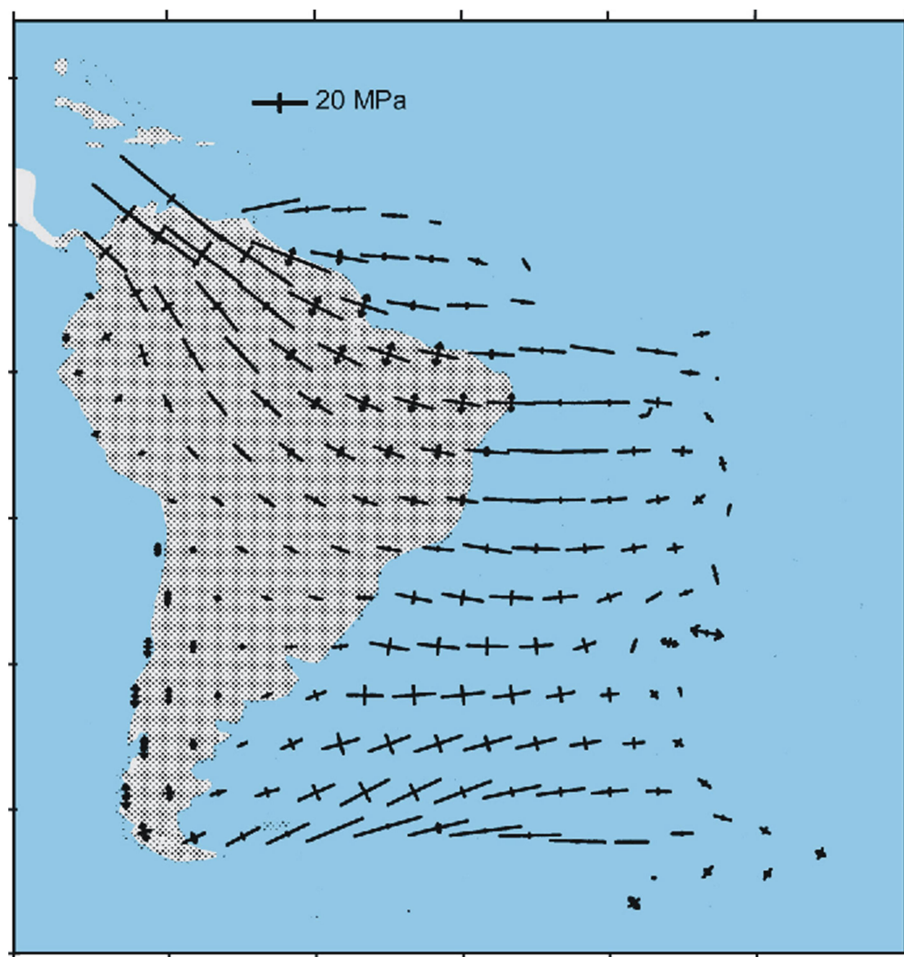


Figura 5: Modelo matemático das tensões intraplaca. Linhas indicam a direção de compressão; Duas flechas indicam a direção de distensão, segundo Meijer (1995).

5. Materiais e métodos

Para o desenvolvimento do trabalho de graduação, foram compilados os dados estruturais existentes, especialmente aqueles para os quais a relação com a estratigrafia pode ser estabelecida.

Os resultados foram empregados para a elaboração de um modelo de evolução estrutural da BSP e regiões vizinhas, e comparado/confrontado com o modelo existente para o RCSB.

Os dados obtidos foram tratados com vistas à determinação dos paleocampos de tensões, pelo método dos diedros retos (Angelier & Mechler 1977), empregando-se o programa T-Tecto (Žalohar & Vrabec 2007) que determina os três principais eixos de tensões ortogonais entre si, que correspondem à compressão máxima, intermediária e mínima, denominado respectivamente de σ_1 , σ_2 e σ_3 (Figura 6).

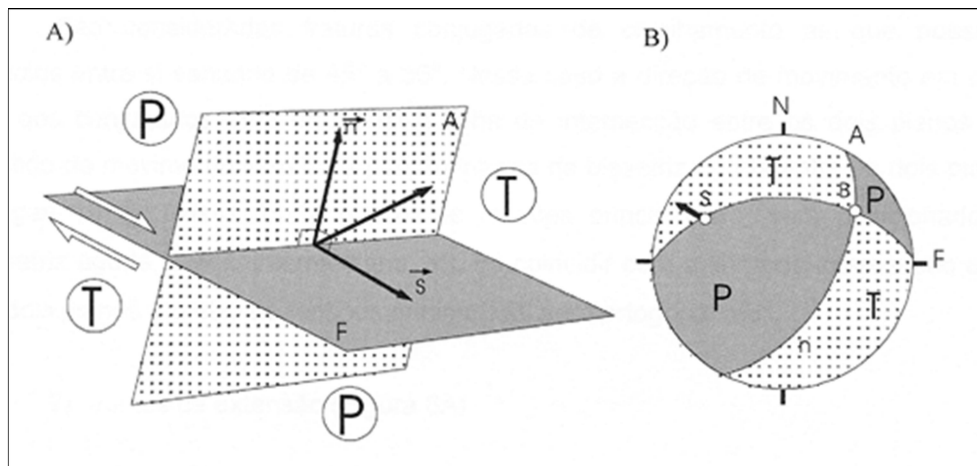


Figura 6: Método dos diedros retos. A) Falha F e plano auxiliar A, delimitando diedros compressivos P e distensivos T. A direção e o sentido de movimento da falha estão representados pelo vetor unitário de movimento s e vetor unitário ortogonal à falha (n); B) Projeção estereográfica de Schmidt, hemisfério inferior de referencia, dos planos F e A, onde P representa o diedro compressivo e T o diedro distensivo. (Angelier, 1994).

Partindo do pressuposto que o eixo σ_1 pertence ao diedro compressivo P, enquanto o eixo σ_3 pertence ao diedro distensivo T, tem-se que uma população de falhas ocorridas em um mesmo regime tectônico apresentará um eixo médio σ_1 que pertencerá à área em comum dos campos P dos diedros da população de falhas, assim como o eixo σ_3 deverá ser a área comum à todos os campo T dos diedros da população de falhas (Figura 7).

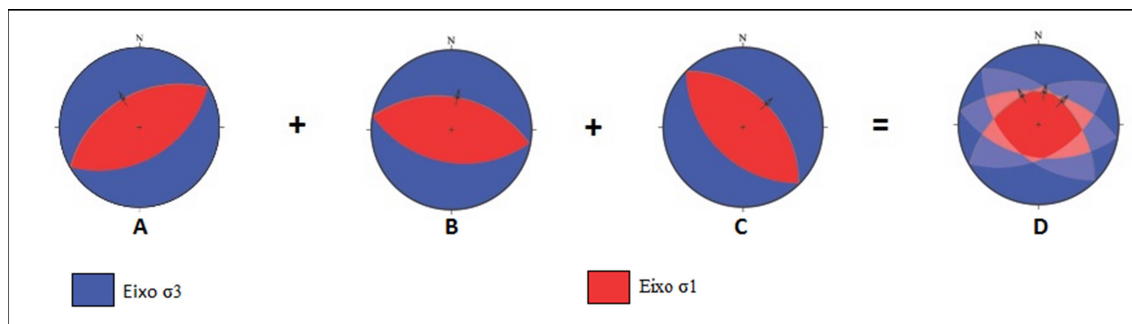


Figura 7: Princípio dos diedros retos, projeção de Schmidt, hemisfério inferior de referência. A figura D representa a somatória das falhas A, B e C, com ênfase na área vermelha no centro representando o eixo σ_1 comum à população de falhas e a porção azul que representa o eixo σ_3 comum à esta população.

5.1. Falhas como indicadores de esforços tectônicos

O termo falha (Figura 8) diz respeito à uma descontinuidade rúptil, na qual é possível determinar o deslocamento relativo entre blocos adjacentes fazendo uso de informações estratigráficas e indicadores cinemáticos. Estes indicadores cinemáticos podem ser: 1) separação estratigráfica - deslocamento de vários marcadores anteriores a movimentação da falha; 2) dobras de arrasto; 3) feições assimétricas presentes nos planos de falhas (Angelier, 1994) (Figura 9). A determinação dos paleocampos de tensões é feita a partir dos dados pareados de falhas e estrias.

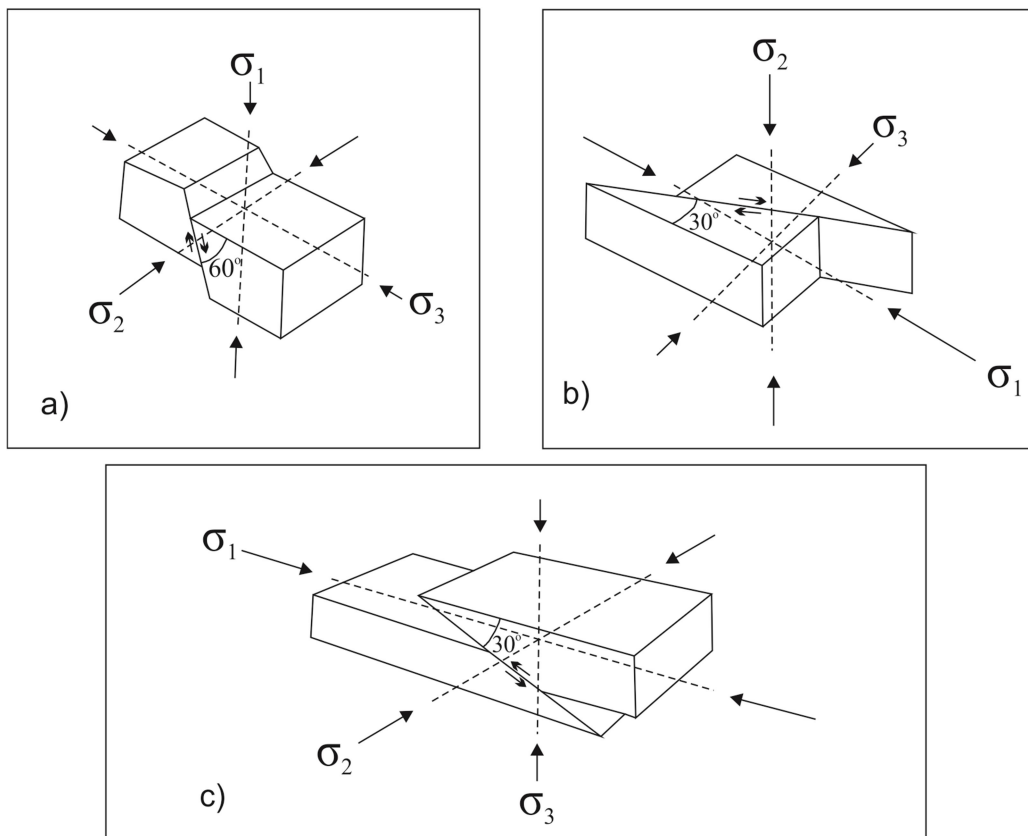


Figura 8: Classificação dos principais tipos de falhas: a) falha normal; b) falha transcorrente; c) falha inversa.

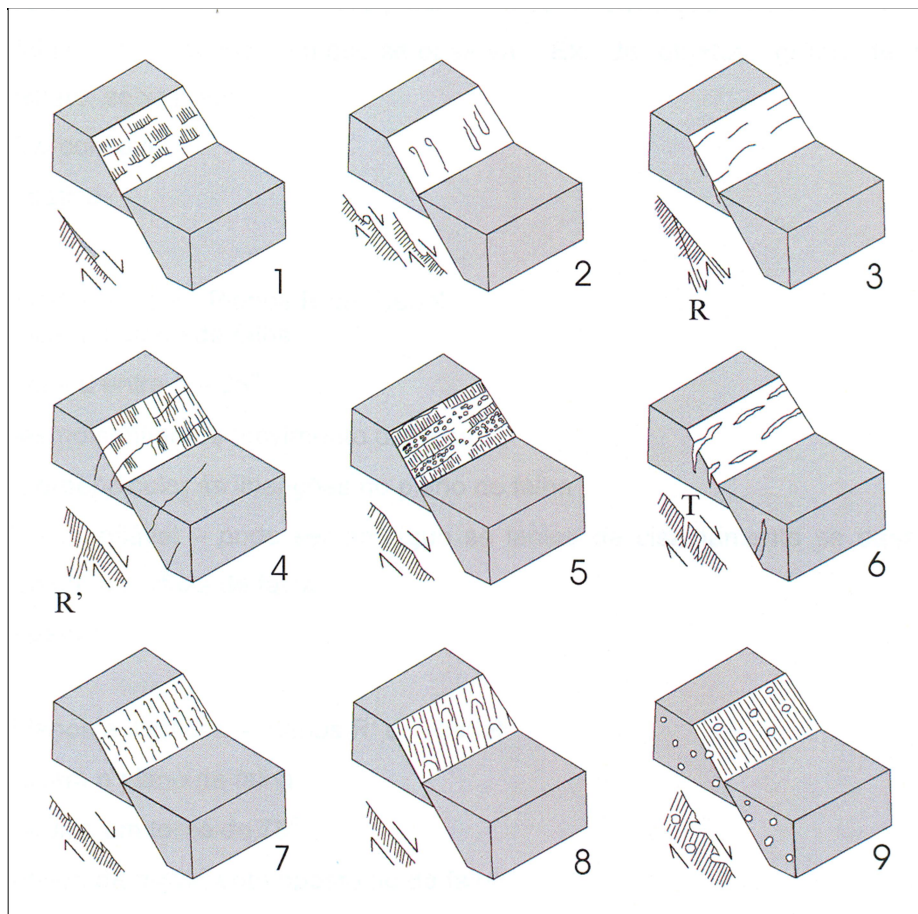


Figura 9: Feições assimétricas observáveis em planos de falhas: 1) degraus de minerais acrescionários em função do crescimento de cristais fibrosos ou de outros cristais durante o movimento da falha (neoformados); 2)

marcas de objetos tectônicos, ocorrem tanto como relevo positivo ou cavidades assimétricas na superfície de falha, em função do lado em observação; 3) fraturas conjugadas de Riedel (*Riedelshears* - R); 4) superfícies antitéticas (planos R' de Riedel); 5) facetas polidas e rugosas; 6) *tensiongashes* (fraturas T de Riedel); 7) picos ou lineações estilolíticas, produzidos por dissolução em facetas friccionais; 8) marcas parabólicas formas em meia-lua com concavidade voltada no sentido do movimento do bloco abatido; 9) vesículas deformadas em lavas. Extraído de Angelier (1994).

6. Geologia local

Na Bacia de São Paulo são encontradas rochas sedimentares cenozoicas que guardam os registros dos diferentes estágios da evolução tectônica da BSP. As rochas sedimentares presentes na BSP pertencem ao Grupo Taubaté (Paleógeno), e à Formação Itaquaquecetuba (Mioceno). Há também ocorrências de depósitos aluviais mais recentes (Pleistoceno a Holoceno) (Figura 10 e Figura 11).

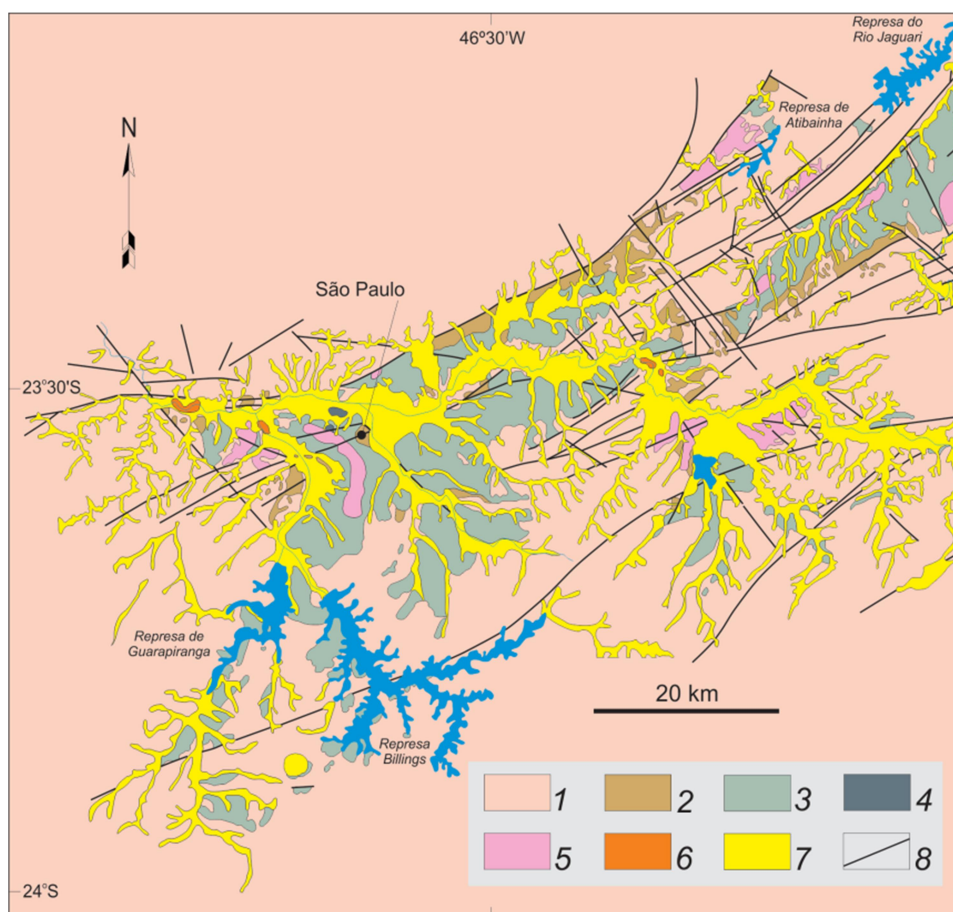


Figura 10: Mapa geológico da Bacia de São Paulo e porção sudoeste da Bacia de Taubaté – 1) embasamento Pré-Cambriano; 2) Formação Resende (sistema de leques aluviais proximais); 3) Formação Resende (sistema de leques aluviais medianos a distais associados a planícies aluviais de rios entrelaçados); 4) Formação Tremembé; 5) Formação São Paulo; 6) Formação Itaquaquecetuba; 7) sedimentos quaternários 8) falhas cenozoicas, em parte reativadas do embasamento pré-cambriano. Fonte: Riccomini & Coimbra (1992), Riccomini et al. (2004)

O Grupo Taubaté é subdividido nas formações Resende, Tremembé e São Paulo (Riccomini 1989). A Formação Resende (Eoceno-Oligoceno) ocupa posição basal e lateral no Grupo Taubaté e apresenta a maior distribuição na Bacia de São Paulo. É formada por orto e paraconglomerados nas porções proximais e lamitos nas porções medianas e distais

dos leques aluviais, além de arenitos fluviais de rios entrelaçados. A porção proximal desta formação é encontrada na borda norte da BSP. São pacotes com espessuras decamétricas, com gradação normal ou inversa, constituídos por rochas conglomeráticas polimíticas e localmente oligomíticas com seixos a matacões, angulosos a subarredondados de gnaisses e milonitos, em matriz lamítica a arcoseana. A porção mediada e distal, encontrada de forma interdigitada com as porções proximais, é representada por lamitos e lamitos arenosos maciços, sendo que na parcela mais distal podem ocorrer acumulações de matéria orgânica em camadas centimétricas a decimétricas. Os arenitos fluviais de rios entrelaçados ocorrem sob a forma de pequenos corpos de extensão métrica e espessura decimétrica. São maciços, grossos a médios, mal selecionados, localmente conglomeráticos e geralmente subarcoseanos a arcoseanos.

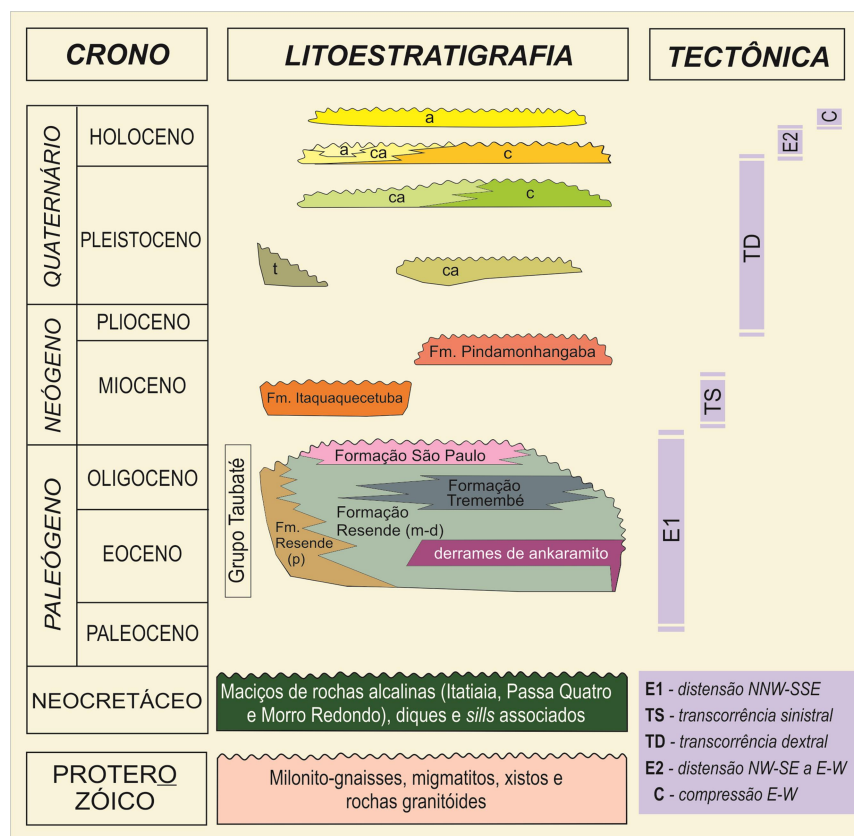


Figura 11: Quadro litoestratigráfico e evolução tectono-sedimentar do segmento central do RCSB – Letras: p – leques aluviais proximais; m-d – leques aluviais medianos a distais associados a planície aluvial de rios entrelaçados; t – depósitos de tálus; c – depósitos coluviais; ca – depósitos colúvio-aluviais; a – depósitos aluviais. Fontes: modificado de Riccomini (1989), Mancini (1995), Salvador & Riccomini (1995).

Gradando lateralmente e verticalmente, a Formação Resende passa para um sistema lacustre do tipo *playa-lake*, representada pela Formação Tremembé, presente na porção centro norte da BSP, a Formação Tremembé (Oligoceno) foi reconhecida em escavações para a construção da estação Barra Funda do Metrô de São Paulo. A unidade compreende corpos tabulares métricos de argilitos maciços verdes intercalados com argilitos

cinza escuro a preto, ricos em matéria orgânica. Na seção de direção NW-SE (Figura 12) é possível observar que o paleolago se desenvolveu na borda tectonicamente ativa do *rift* e tinha pelo menos 5 km de extensão.

No topo do Grupo Taubaté encontra-se a Formação São Paulo (Oligoceno), representada por arenitos grossos conglomeráticos com estratificações cruzadas e presença de clastos argilosos de depósitos relacionados a sistemas fluviais meandantes. A unidade ainda inclui siltitos e argilitos laminados, às vezes fossilíferos, representando os meandros abandonados; arenitos médios a grossos, relacionados ao rompimento de diques marginais; e sedimentos mais finos, rítmicos e laminados, compreendendo as pretéritas planícies de inundação.

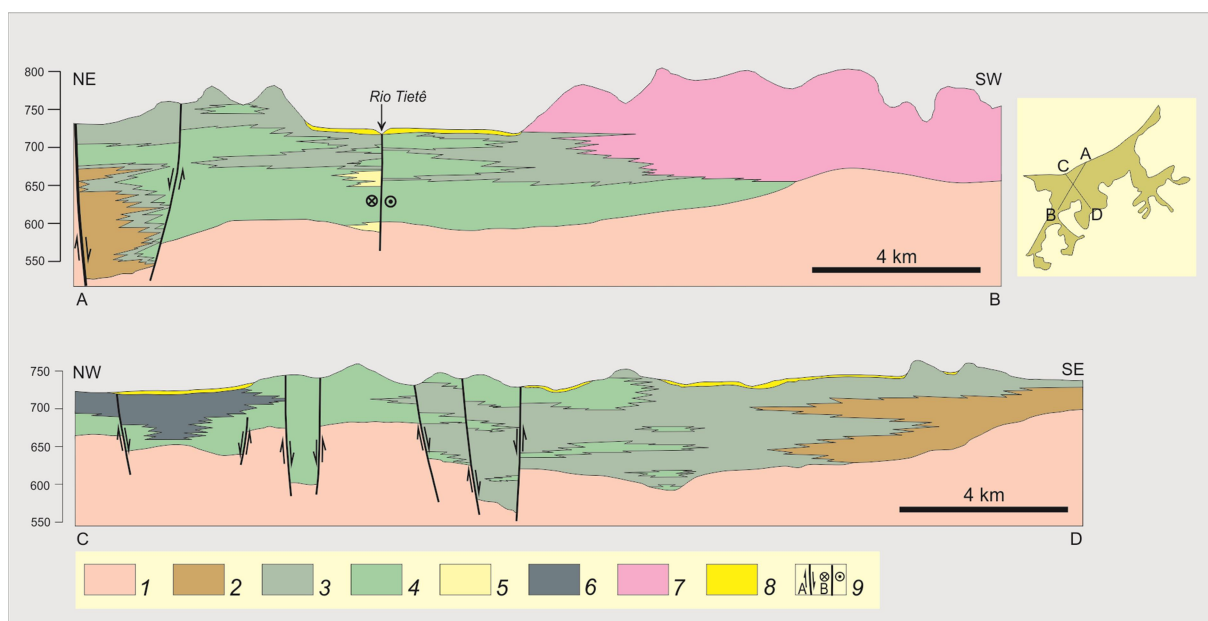


Figura 12: Seções geológicas na BSP construída a partir de dados de sondagens para água subterrânea e observações de superfície – 1) embasamento Pré-Cambriano; 2) orto e paraconglomerados de leques aluviais proximais da Formação Resende; 3) lamitos de leques aluviais medianos a distais da Formação Resende; 4) lamitos de leques aluviais distais e, principalmente, areias e conglomerados de sistema fluvial entrelaçado da Formação Resende; 5) predominância de areias grossas e conglomerados da Formação Resende; 6) sistema lacustre da Formação Tremembé; 7) sistema fluvial meandrante da Formação São Paulo; 8) aluviões Quaternários; 9) falha normal (A) e falha transcorrente dextral (B). Fonte: Riccomini *et al.* (2004).

A Formação Itaquaquecetuba (Mioceno) representa um sistema fluvial entrelaçado, representada somente na BSP. Esta formação se assenta diretamente sobre o embasamento pré-cambriano e sua deposição foi controlada por falhas de direção ENE e NNW (Coimbra *et al.*, 1983; Almeida *et al.*, 1984). Estas falhas geraram cunhas clásticas, contendo brechas polimíticas com blocos decimétricos a métricos de rochas do embasamento, assim como megaclastos de siltitos arenosos e folhelhos cinza, ricos em matéria orgânica. Esta formação foi reconhecida primeiramente em portos de areia na cidade homônima e, posteriormente, na porção oeste da Bacia de São Paulo, em portos de areia

em Carapicuíba e na Cidade Universitária. É formada por dunas subaquosas de arenito com estratificações cruzadas acanaladas e tabulares de grande porte, com conglomerados basais com seixos de quartzito e quartzo com grande persistência lateral. São encontrados com frequência troncos vegetais fossilizados nas camadas frontais dos estratos cruzados. As litofácies presentes na Formação Itaquaquetuba são características dos depósitos fluviais entrelaçados.

Os depósitos sedimentares quaternários da região da BSP são de natureza coluvial ou colúvio-aluvial e cobrem indiscriminadamente os sedimentos acima descritos. Estes depósitos em função de sua idade e posição estratigráfica têm sido alvo de inúmeros estudos geomorfológicos e como balizadores de eventos neotectônicos.

7.Resultados obtidos

O quadro tectônico disponível para a evolução da Bacia de São Paulo compreende quatro regimes superimpostos reconhecidos por Riccomini (1989), e um quinto regime de esforços mais novo, reconhecido por Salvador & Riccomini (1995) que, correspondem à estruturas pré-cambrianas reativadas no Mesozoico-Cenozóico, constituindo assim elementos importantes para compreensões das fases de embaciamento e posterior deformação dos sedimentos.

Para a elaboração deste trabalho foram analisados dados prévios coletados pelo orientador e novos dados de campo referentes à fase de instalação e às três últimas fases deformacionais que agiram nas bacias: 1) distensão inicial NNW-SSE, responsável pela instalação das bacias do RCSB 2) transcorrência dextral, de orientação geral E-W, gerando encurtamento NW-SE e estiramento NE-SW, ambas horizontais, durante o Pleistoceno; 3) distensão de direção NW-SE, do Holoceno, que compreende falhas com caráter predominantemente normal e localmente com movimentação sinistral e 4) compressão de direção geral E-W, com falhas de direção WNW e NNW, relacionadas à última fase de evolução da bacia (Figura 13).

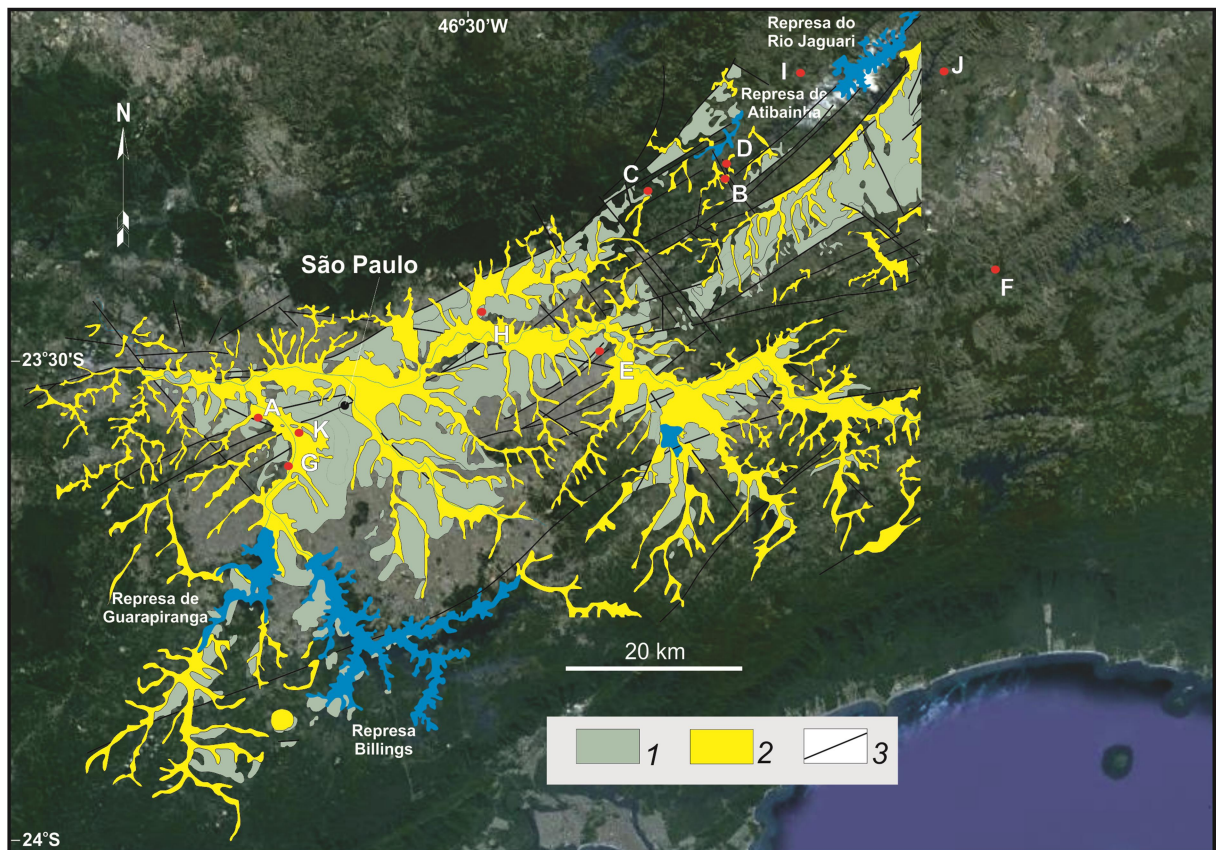


Figura 13: Localidades estudadas: A- Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU); B- Rio Jaguari; C- Arujá; D- Santa Isabel; E- Itaquaquecetuba; F- Jacareí; G- Rio Pinheiros; H- Guarulhos; I- Santa Isabel 2; J- Rio Jaguari 2; K- Largo da Batata; 1) sedimentos cenozoicos; 2) sedimentos quaternários; 3) falhas.

8.Resultados obtidos

A análise estrutural teve como objetivo a caracterização das estruturas rúpteis cenozoicas bem como de seus condicionantes estruturais antigos, tendo como objetivo a identificação e a hierarquização dos campos de esforços que agiram sobre a BSP. Os dados foram coletados tanto em rochas do embasamento pré-cambriano como sedimentos cenozoicos que preenchem a BSP.

8.1.Distensão inicial NNW-SSE, eocena-oligocena

Riccomini (1989) relacionou a fase distensiva de direção NNW-SSE à abertura do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil. Esta fase, de idade Eocena-Oligocena, teria sido a responsável pela instalação da depressão inicial, que posteriormente viria a constituir a Bacia de São Paulo. Ela é caracterizada por falhas reativadas do embasamento pré-cambriano, com direção preferencial ENE e caráter normal. Essas falhas acompanham a direção estrutural das antigas zonas de cisalhamento do embasamento, configurando o formato alongado das bacias. Estão presentes principalmente no limite da borda norte da

BSP, e apresentam movimentação de caráter normal ou reverso, transcorrente dextral ou sinistral e são truncadas por falhas de mais recentes.

Essas falhas (Figura 14) estariam relacionadas a um campo de esforços distensivo, com eixo de tensão principal mínima, σ_3 , de direção NNW-SSE, horizontal, e o eixo de tensão principal máxima, σ_1 , na posição vertical. Este regime é bem exemplificado pelos dados obtidos na região de Santa Isabel (Local D) (Figura 15), Jacareí (Local F) (Figura 16) e do Largo da Batata (Local K), no Bairro de Pinheiros, em São Paulo.

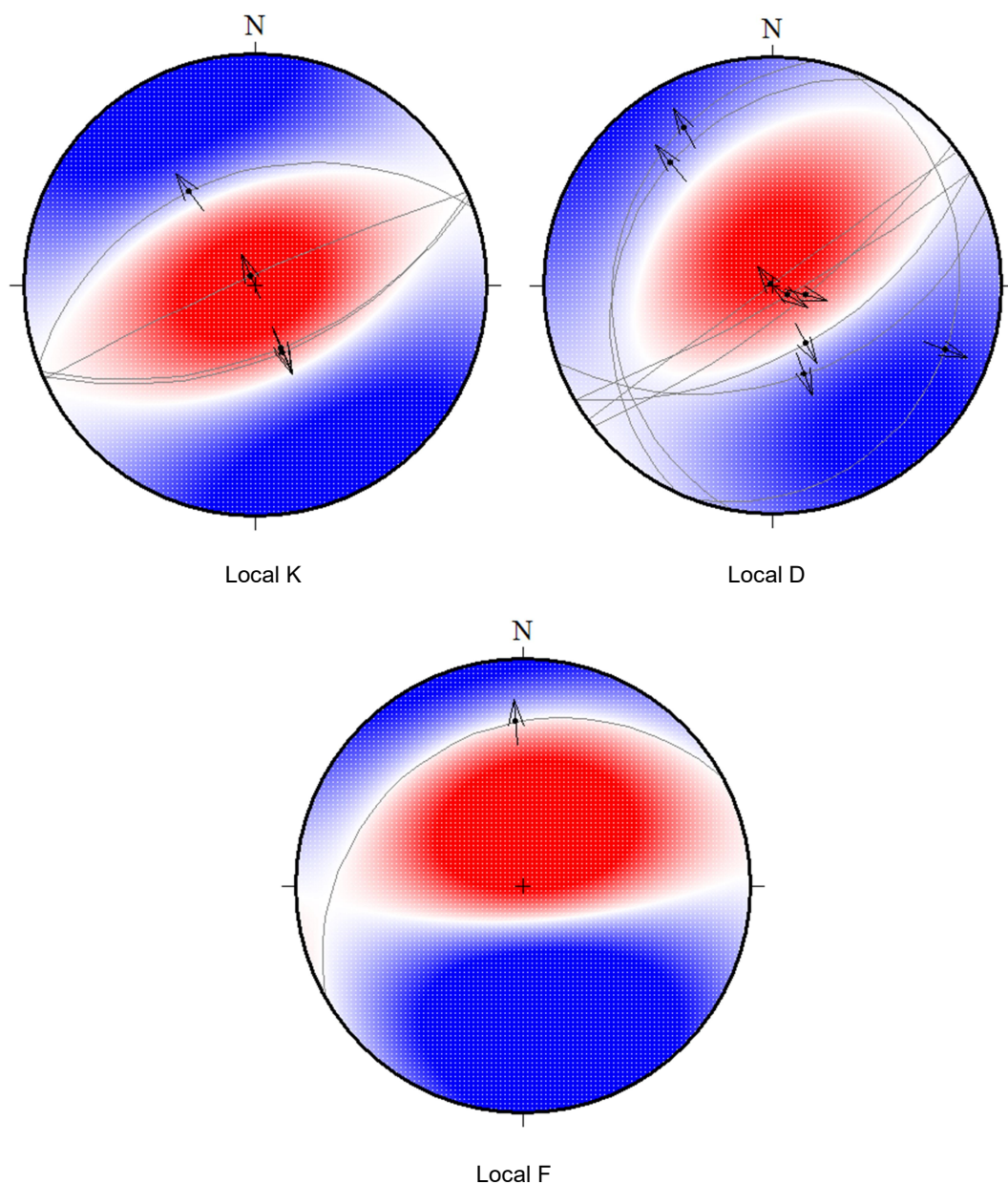


Figura 14: População de falhas e estrias analisadas no local K (Largo da Batata), Local D (Santa Isabel) e Local F (Jacareí), indicando distensão de direção NW-SE, relacionada à instalação da BSP.

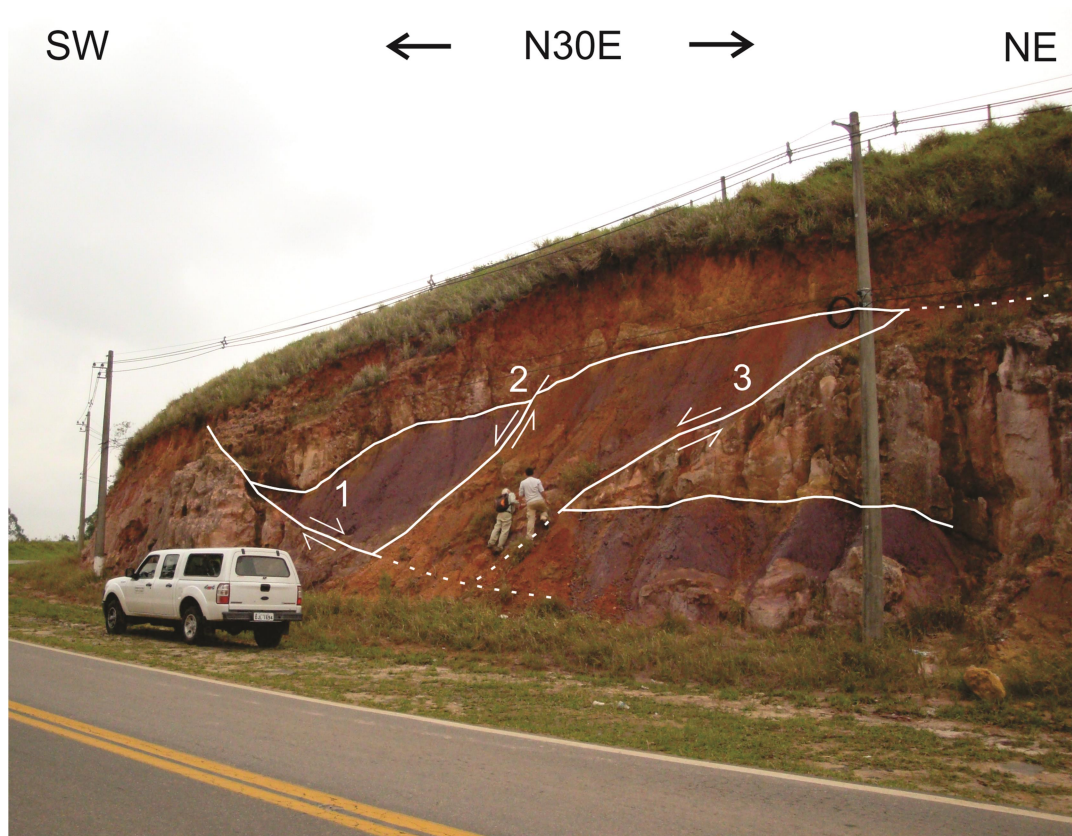


Figura 15: Falha normal lística, sin-sedimentar, local D, indicando distensão de direção NW-SE, relacionada à instalação da BSP. Medida das falhas principais observadas: 1 – 148/47//150/47 normal; 2 – 295/25//293/25 normal; 3 – 055/68 normal.

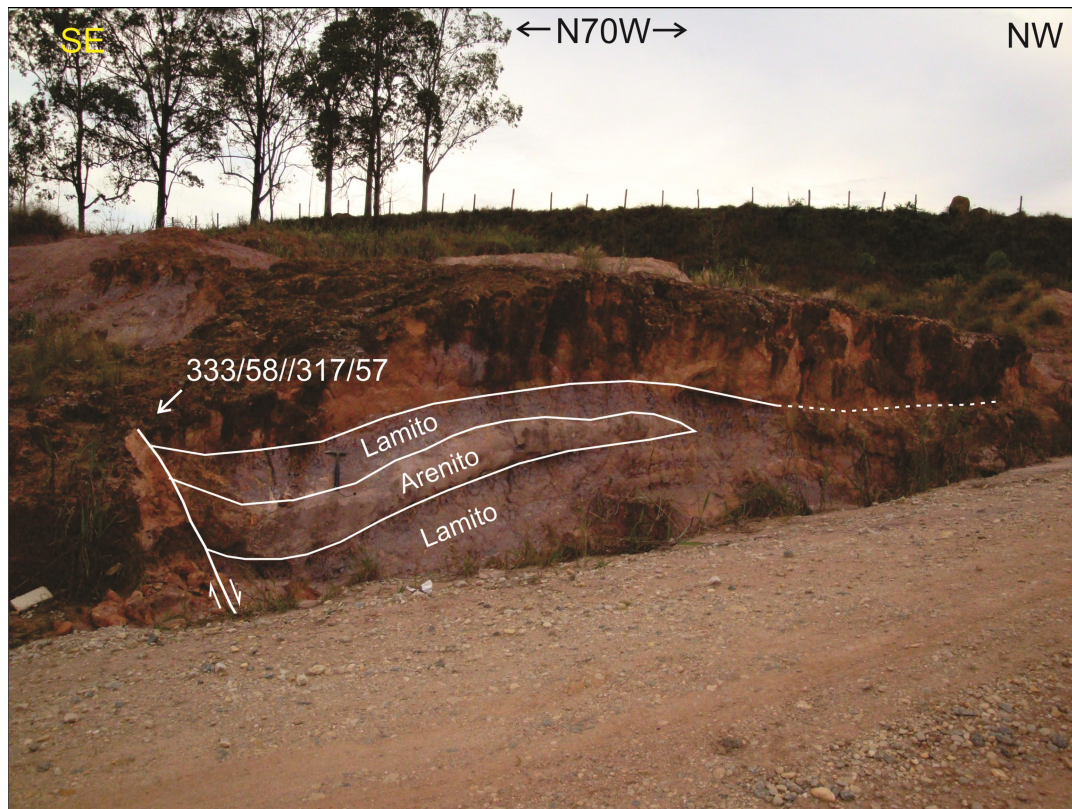
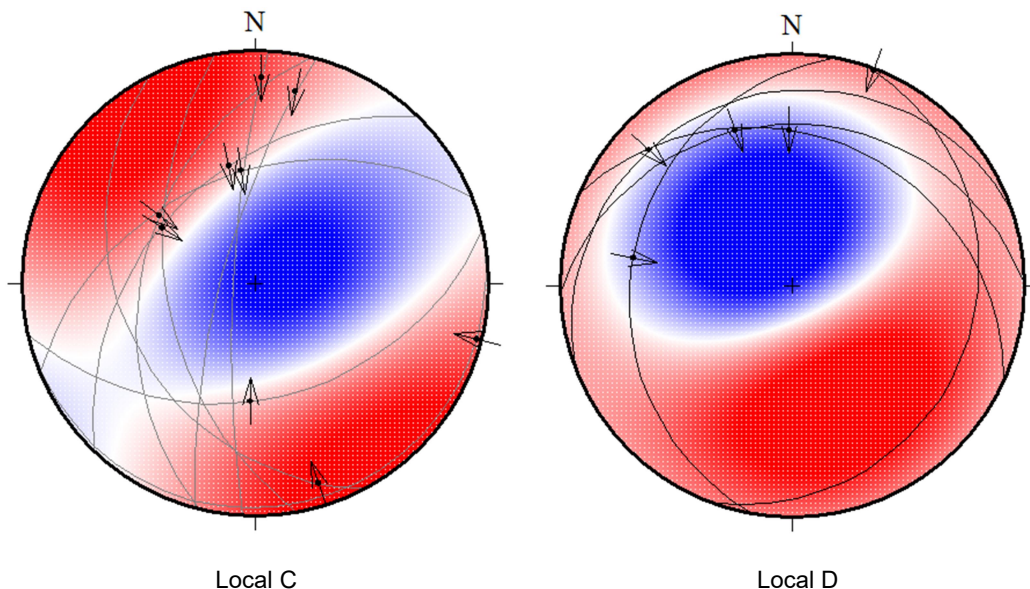


Figura 16: Falha normal, sin-sedimentar, provavelmente lística pela presença da anticlinal de volteio, Local F indicando distensão NW-SE relacionada à instalação do RCSB.

8.2.Compressão NW-SE,pleistocena

A fase deformadora da BSP, com compressão de direção NW-SE, é caracterizada por falhas de direção NE-SW, com componentes inversas e caráter predominantemente transcorrente dextral (Local B, Rio Jaguari). Ao longo de estruturas de direção N-S a NNW-SSE as movimentações são predominantemente de caráter transcorrente sinistral (Local C, Arujá) e componente inversa. Estas estruturas se apresentam em forma de falhas aproximadamente ortogonais ao eixo da bacia.

Com a análise dos planos de falhas e respectivas estrias por métodos gráficos foi possível determinar os campos de esforços, com eixo de tensão principal máximo, σ_1 , segundo a direção NW-SE, horizontal, e eixo de tensão principal mínima, σ_3 , NE-SW na horizontal. Considerando-se que estas falhas apresentam componentes de deslocamentos direcionais, este campo de tensões foi relacionado à ação de um binário transcorrente dextral, de orientação geral E-W, ao qual pode ser relacionada uma direção de encurtamento NW-SE e de estiramento NE-SW, ambas horizontais. Este regime de esforços corresponde à segunda fase de deformação da BSP, de idade pleistocena, e encontra-se bem representado nos afloramentos estudados nos arredores do Rio Jaguari (Local B), Arujá (Local C), Santa Isabel (Local D) e Guarulhos (Local H) (Figura 17).



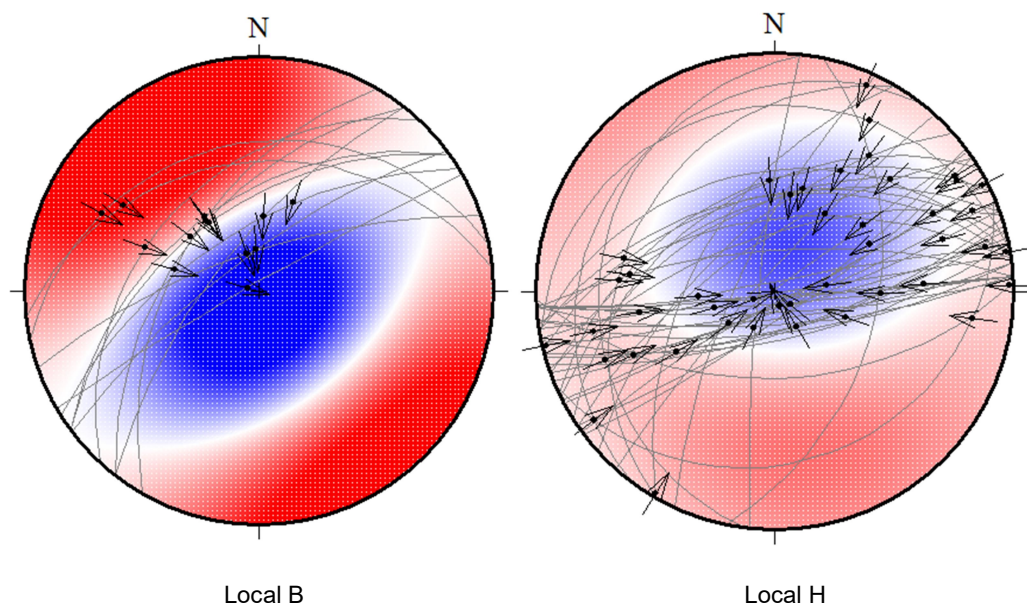
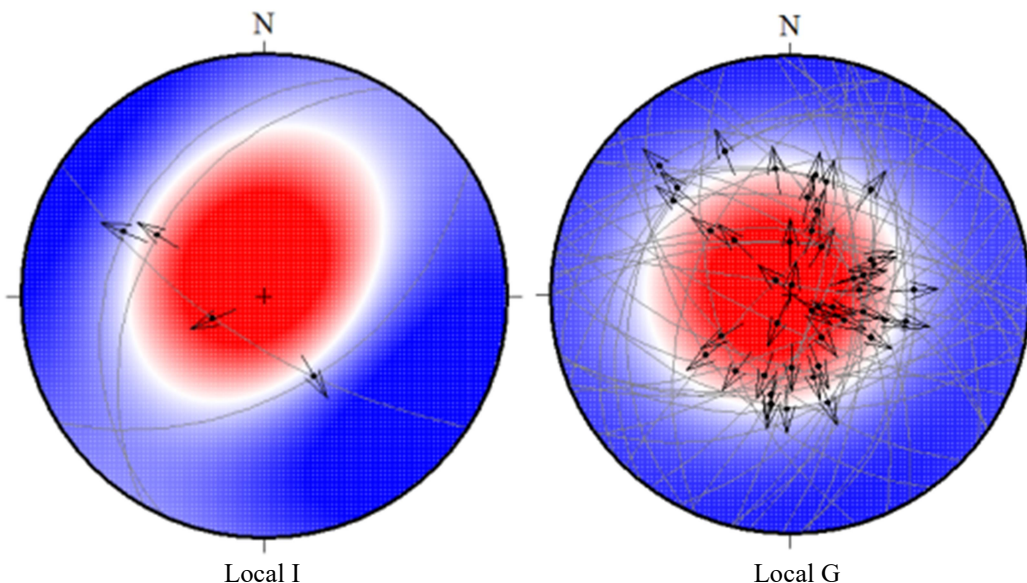


Figura 17: População de falhas e estrias analisadas no Rio Jaguari (Local B), Arujá (Local C), Santa Isabel (Local D) e Guarulhos (Local H), indicando compressão NW-SE e distensão NE-SW.

8.3. Distensão NW-SE a E-W, pleistocena a holocena

A geração e reativação de estruturas com direção geral ENE, com movimentação sinistral normal, e estruturas com direção NNW, com caráter predominantemente normal, indicam a vigência de um campo de esforços distensivo, segundo a direção NW-SE.

A análise de superfícies de falhas (Figura 18) e respectivas estrias forneceram um eixo de tensão principal mínima, σ_3 , com direção geral NW-SE, variando para E-W e NNW-SSE, horizontal, e eixo de tensão principal máximo, σ_1 , vertical. Este regime encontra-se bem representado nas exposições de Santa Isabel (Local I), Rio Pinheiros (Local G), Itaquaquecetuba (Local E) (Figura 19), Rio Jaguari (Local J), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo FAU - USP (Local A).



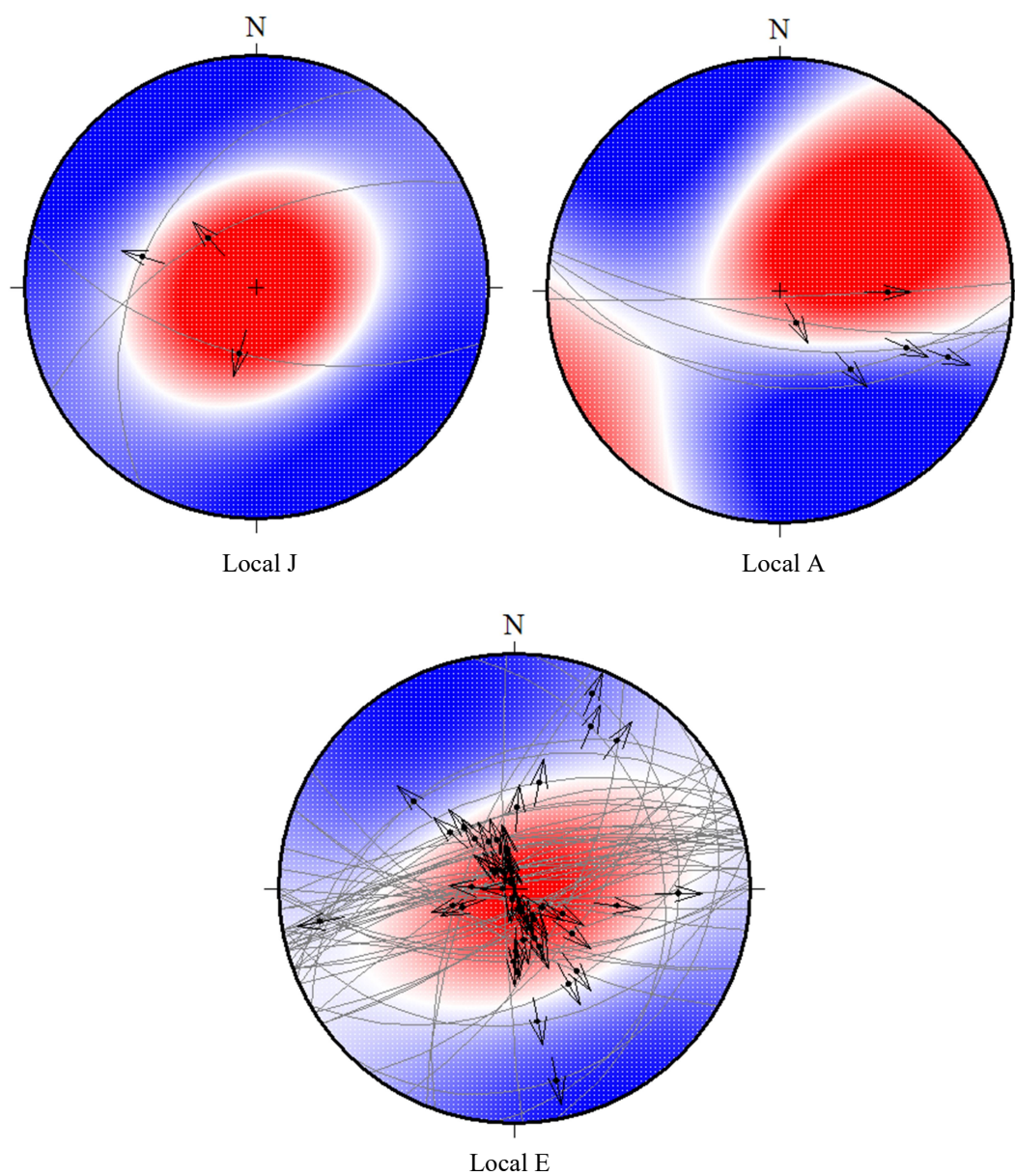


Figura 18: População de falhas e estrias analisadas em Santa Isabel (Local I), Rio Pinheiros (Local G), Itaquaquecetuba (Local E), Rio Jaguari (Local J), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU – USP) (Local A).



Figura 19: Figura 19: Falha normal em Itaquaquecetuba (Local E).

8.4. Compressão E-W, atual

Falhas de direção WNW e NNW, com componente predominantemente sinistral e caráter inverso, apontam para um regime tectônico compressivo E-W, relacionado à última fase de evolução da bacia e as forças que agem atualmente na BSP. Elas foram geradas a partir de reativações de estruturas mais antigas. Falhas e estrias analisadas graficamente apontam para um eixo de compressão máxima, σ_1 , E-W horizontal e eixo de tensão principal mínima, σ_3 , de direção N(NNW)-S(SSE). Esteregime deformacional é bem representado nos afloramentos da FAU (Local A) e RioJaguari (Local B) (Figura 20).

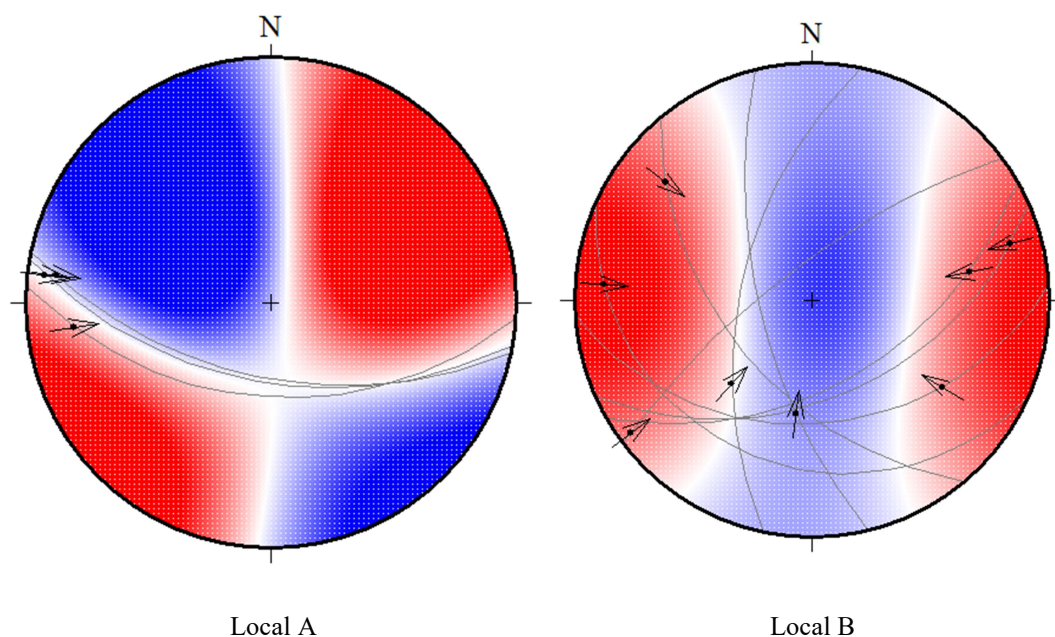


Figura 20: População de falhas e estrias analisadas na Faculdade de Arquitetura e Urbanismo FAU – USP (Local A), Rio Jaguari (Local B), Indicando uma compressão E-W

9. Discussão e conclusões

Foram coletadas e analisadas 264 falhas e suas respectivas estrias, o que pode ser considerado um número de dados adequado ao estudo proposto. Para a compreensão da evolução dos eventos geradores da BSP as estruturas tectônicas rúpteis, falhas e suas respectivas estrias, foram hierarquizadas de acordo com as relações de campo e principalmente pelas suas relações estratigráficas.

Os dados obtidos em campo foram analisados graficamente com vistas à determinação dos paleocampos de tensões, pelo método dos diedros retos (Angelier&Mechler 1977), permitindo a elaboração do quadro dos campos de esforços que geraram e deformaram o RCSB e a BSP.

Dos cinco eventos tectônicos cenozoicos descritos na literatura, quatro estão presentes na área da BSP. Eles compreendem: 1) distensão inicial NNW-SSE, responsável pela instalação das bacias do RCSB, uma depressão alongada e extensa, impostos pelo basculamento termomecânico da Bacia de Santos, com σ_1 vertical e σ_3 orientado segundo NNW-SSE, entre o Eoceno e Oligoceno, causando reativação em falhas mestras normais de zonas de cisalhamento proterozóicas com direção entre NE e ENE; 2) encurtamento NW-SE, horizontal, ativo durante o Pleistoceno, correlacionável à fase detranscorrência dextral, de orientação geral E-W; 3) distensão de direção NW-SE, do Holoceno, que compreende falhas com caráter predominantemente normal e localmente com movimentação sinistral; e 4) compressão de direção geral E-W, com falhas de direção WNW e NNW, com componente

predominantemente sinistral e caráter inverso, relacionadas à última fase de evolução da bacia.

A população de falhas analisadas permitiu reconhecer, pela primeira vez, registros do evento gerador e do último evento deformador do RCSB na BSP. Este último evento deformador havia sido reconhecido regionalmente por Salvador & Riccomini (1995), e corresponde ao campo de tensões atualmente vigente na região.

Até o presente momento não foram bem caracterizadas falhas relacionadas ao episódio de deformação inicial, de idade miocena a pliocena, mas alguns dados obtidos na região de Guarulhos, nas proximidades do Aeroporto Internacional, parecem relacionar-se a este evento. Levantamentos de campo adicionais serão necessários para verificar esta hipótese.

Apesar das limitações existentes na BSP quanto à disponibilidade de exposições de rochas sedimentares passíveis de análise estrutural, os dados compilados e aqueles obtidos para o presente trabalho permitiram verificar que os eventos tectônicos reconhecidos regionalmente estão também representados na área da bacia. As superposições de campos de deformação determinadas na BSP a partir de relações estratigráficas confirmam, até o presente momento, a validade dos modelos evolutivos propostos regionalmente (Riccomini *et al.* 2004).

A atividade neotectônica constatada no presente trabalho reforça a importância desse tipo de estudo para grandes obras de engenharia, como barragens e túneis.

10. Referências bibliográficas

- Almeida, F.F.M. 1953. Considerações sobre a geomorfogênese da Serra de Cubatão. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia*, 4:23-40.
- Almeida, F.F.M. 1955. As camadas de São Paulo e a tectônica da Serra da Cantareira. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia*, 4:23-40.
- Almeida, F.F.M. 1976. The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 4:15-26.
- Almeida, F.F.M.; Riccomini, C.; Dehira, L.K.; Campanha, G.A.C., 1984. Tectônica da Formação Itaquaquecetuba na Grande São Paulo. In: XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia, *Anais*, v.4, p. 1794-1808, Rio de Janeiro.
- Angelier, J. & Mechler, P., 1977. Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en séismologie: la méthode des dièdres droits. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 7:1309–1318.
- Assumpção, M. 1992. The regional intraplate stress field in South America. *Journal of Geophysical Research*, 97:11889-11903.
- Assumpção, M. 1998. Focal mechanism of small earthquakes in the southeastern Brazilian shield: a test of stress models of the South American plate. *Geophysical Journal International*, 133:490-498.
- Coimbra, A.M.; Riccomini, C.; Melo, M.S., 1983. A Formação Itaquaquecetuba: evidências de tectonismo no quaternário paulista. In: IV Simpósio Regional de Geologia, *Atas*, p.253-266, São Paulo.
- Meijer, P.T., 1995. *Dynamics of active continental margins: the Andes and the Aegean region*. Ph.D. thesis, Utrecht University, The Netherlands, 218pp.
- Melo, M.S.; Coimbra, A.M.; Riccomini, C., 1989. Evolução dos conhecimentos sobre a geologia da Bacia de São Paulo na década de 80. In: Workshop Geologia da Bacia de São Paulo, *Coletânea das comunicações*, p. 1-11, São Paulo.

Riccomini, C., 1989. *O Rift Continental de Sudeste do Brasil*. São Paulo, 256 p. Tese de doutoramento, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Riccomini, C. & Assumpção, M. 1999. *Quaternary tectonics in Brazil*. Episodes, 22:221-225.

Riccomini, C.; Sant'Anna, L.G.; Ferrari, A.L., 2004. Evolução geológica do *Rift Continental* do Sudeste do Brasil. In: Mantesso Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C.D.R.; Brito Neves, B.B. (Org.). *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Beca, p. 383-405.

Salvador, E. D. 1994. *Análise neotectônica da região do Vale do Rio Paraíba do Sul compreendida entre Cruzeiro (SP) e Itatiaia (RJ)*. São Paulo, 129 p. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Salvador, E. D. & Riccomini, C. 1995. Neotectônica do Alto Estrutural de Queluz (SP-RJ, Brasil). *Revista Brasileira de Geociências*, 25:151-164.

Žalohar, J. & Vrabec, M., 2007. Paleostress analysis of heterogeneous fault-slip data: the Gauss method. *Journal of Structural Geology*, 29:1798-1810.