



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA (CCMN)
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

**ANÁLISE DOS PADRÕES DEFORMACIONAIS NEOTECTÔNICOS E
RESTAURAÇÃO ESTRUTURAL EM AFLORAMENTOS DA FORMAÇÃO
BARREIRAS NA REGIÃO DE ICAPUÍ (CE) - PORÇÃO EMERSA DA BACIA
POTIGUAR**

Marcelle Tostes Manhães

**Trabalho de Conclusão de Curso
(Geologia)**

UFRJ
Rio de Janeiro
2025

Marcelle Tostes Manhães

**ANÁLISE DOS PADRÕES DEFORMACIONAIS NEOTECTÔNICOS E
RESTAURAÇÃO ESTRUTURAL EM AFLORAMENTOS DA FORMAÇÃO
BARREIRAS NA REGIÃO DE ICAPUÍ (CE) - PORÇÃO EMERSA DA BACIA
POTIGUAR**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em
Geologia do Instituto de Geociências, Universidade
Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado
como requisito necessário para obtenção do grau de
Geólogo.

Orientador:

Claudio Limeira Mello (IGEO/UFRJ)

Coorientadoras:

Aline Theophilo Silva (PETROBRAS)

Lethicia Carlos da Silva Ferreira (IGEO/UFRJ)

UFRJ

Rio de Janeiro

2025

- T716a Tostes Manhães, Marcelle
Análise dos Padrões Deformacionais Neotectônicos e Restauração Estrutural em afloramentos da Formação Barreiras na Região de Icapuí (CE) - Porção emersa da Bacia Potiguar / Marcelle Tostes Manhães. - - Rio de Janeiro, 2025.
68 f.
- Orientador: Claudio Limeira Mello.
Coorientadoras: Aline Theophilo Silva e Lethicia Carlos da Silva Ferreira
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) –
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Geologia, 2025.
1. Neotectônica. 2. Restauração Estrutural. 3. Formação Barreiras I. Limeira Mello, Claudio, orient. II. Theophilo Silva, Aline, coorient. III. Carlos da Silva Ferreira, Lethicia, coorient. IV. Título.

Marcelle Tostes Manhães

ANÁLISE DOS PADRÕES DEFORMACIONAIS NEOTECTÔNICOS E RESTAURAÇÃO
ESTRUTURAL EM AFLORAMENTOS DA FORMAÇÃO BARREIRAS NA REGIÃO DE
ICAPUÍ (CE) - PORÇÃO EMERSA DA BACIA POTIGUAR

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em
Geologia do Instituto de Geociências, Universidade
Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado
como requisito necessário para obtenção do grau de
Geólogo.

Orientador:
Claudio Limeira Mello (IGEO/UFRJ)

Coorientadoras:
Aline Theophilo Silva (PETROBRAS)
Lethicia Carlos da Silva Ferreira (IGEO/UFRJ)

Aprovada em: 28/01/2025

Por:

Orientador: Claudio Limeira Mello (IGEO/UFRJ)

Renata da Silva Schmitt (IGEO/UFRJ)

Anderson Moraes (PETROBRAS)

UFRJ
Rio de Janeiro
2025

À ciência, que nos ensina a questionar
e buscar as respostas escondidas nas camadas do
tempo, e às rochas que contam histórias.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro (IGEO - UFRJ), por toda a infraestrutura concedida para a realização de todo o trabalho.

À PETROBRAS e ao Instituto TecGraf da PUC-Rio, pela oportunidade de acesso ao Sistema RECON e pelo auxílio na utilização do programa.

Ao meu orientador Claudio Limeira Mello, pela dedicação à ciência e à amizade, por todos os ensinamentos e incentivos, e por sempre ter um bom conselho (ou piadinha) para me motivar. À Aline Theophilo Silva, pela paciência gigante, pelos conselhos preciosos e por nunca deixar o meu desespero ultrapassar o limite do aceitável. À Lethicia Carlos da Silva Ferreira, pela amizade, disponibilidade e risadas que tornaram essa jornada mais leve. Sou grata por compartilharem comigo a paixão pela geologia e pela vida.

Aos amigos do Grupo de Pesquisas CENOZOICO e do Projeto Barreiras-Icapuí, pelo apoio, parceria, discussões geológicas e pelo excelente trabalho em equipe; e em especial, a equipe de Geologia Estrutural: Bernardo Fiuza e Leonardo Santos, que tornou este trabalho possível.

À minha família, que sempre me apoiou e me incentivou a estudar aquilo que eu amo. Em especial, minha mãe Rosângela, meu pai Marcos, minha irmã Renata, minha madrinha Rosa e minha avó Thércia. Obrigada por tudo e por tanto.

Ao meu amor, Luís Felipe, por estar nessa comigo desde antes de eu descobrir a minha paixão pela geologia. Pelo amor, carinho, companheirismo e paciência ao longo desses anos, para me ouvir falar horas e horas sobre diversos assuntos geológicos, sempre com um sorriso no rosto. Obrigada por acreditar tanto em mim.

Às minhas três Jeans Viajantes: Clara Emoingt, por sempre me tirar boas gargalhadas em campo; Raphaela Mattos, pela animação e energia contagiante (até mesmo às 5h da manhã); e Marina Moesia, minha companheira de todas as horas, por estar sempre ao meu lado e por dividir momentos tão especiais, que eu gostaria de guardar em globos de neve na prateleira das minhas melhores memórias.

Aos amigos da Geologia, em especial Leonardo Vieira, David Machado, Alessandra Fazzi, João Victor Abreu e Davi Cardoso, por toda a companhia e amizade ao longo desses anos da graduação. Os campos e momentos em sala de aula (e fora dela) são memórias que vou guardar para sempre comigo. Foi uma honra aprender - e fazer - geologia com essa galera.

RESUMO

Manhães, Marcelle Tostes. **Análise dos padrões deformacionais neotectônicos e restauração estrutural em afloramentos da Formação Barreiras na região de Icapuí (CE) - porção emersa da Bacia Potiguar.** 2025, 68 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Geologia), Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

A Bacia Potiguar, localizada no leste da Margem Equatorial brasileira, registra uma complexa história tectônica desde a sua formação, no Cretáceo Inicial, com evidências de deformações que afetam até os depósitos mais recentes. De acordo com trabalhos anteriores, a deformação tectônica cenozoica na Bacia Potiguar engloba dois eventos distintos: o primeiro (SF1), do Albiano ao Mioceno médio, com tensão horizontal máxima (SH) N-S e tensão horizontal mínima (Sh) E-W; e o segundo evento (SF2), do Mioceno médio ao Recente, com SH variando de E-W a NW-SE e Sh variando de N-S a NE-SW. Na região de Icapuí (CE), área do presente estudo, na porção noroeste da Bacia Potiguar, extensas falésias expõem os depósitos da Formação Barreiras, caracterizados por sedimentos terrígenos, miocênicos, intensamente ferruginizados e deformados. O presente estudo tem como objetivo realizar uma análise dos padrões deformacionais em diferentes falésias da Formação Barreiras, na região de Icapuí (CE), e realizar a restauração estrutural 2D em uma seção estratigráfica-estrutural, para buscar estabelecer uma relação entre os padrões estruturais identificados e eventos distintos de deformação, a fim de contribuir para a interpretação da evolução tectônica cenozoica regional. Para o estudo foram utilizadas seções estratigráficas-estruturais e dados de paleotensões de três falésias, selecionadas por apresentarem graus variados de deformação. A análise dos padrões estruturais permitiu identificar uma trama deformacional complexa, sendo descrita como camadas arqueadas em geometrias sinformes e antiformes, controladas por falhas transcorrentes e oblíquas nas extremidades, e internamente seccionadas por falhas normais e oblíquas. Além de outros padrões, como falhas reversas, falhas normais e estruturas do tipo flor, nota-se, também, sobreposição de estruturas - dobras falhadas e planos de falha com mais de uma estria – o que sugere que um único evento deformacional não seria suficiente para explicar a geração de todas essas estruturas. A restauração estrutural mostrou-se eficaz para correlacionar os diferentes padrões com pulsos tectônicos distintos, sustentando a hipótese de que houve mais de um regime de esforços. Esse processo foi dividido em quatro momentos e, ao final da restauração, houve a permanência das feições arqueadas, após a restauração de todas as falhas que as seccionam, indicando que elas não estão associadas diretamente aos eventos responsáveis pela geração das falhas, mas sim a um estágio de deformação anterior. Além disso, observou-se a presença de rejeitos residuais que persistiram nas camadas após o processo de restauração. O modelo proposto para a evolução tectônica da região envolve: um estágio inicial transcorrente, com compressão variando de NW-SE a E-W, responsável pela formação das geometrias arqueadas e falhas predominantemente normais e oblíquas de orientação NW-SE a E-W, compatível com o evento SF2 descrito na literatura; e um estágio posterior, com distensão NW-SE a E-W, responsável pela geração das falhas NE-SW e N-S, implantado como um relaxamento dos esforços transcorrentes do primeiro estágio.

Palavras-chave: Neotectônica; Formação Barreiras; Restauração Estrutural

ABSTRACT

Manhães, Marcelle Tostes. **Análise dos padrões deformacionais neotectônicos e restauração estrutural em afloramentos da Formação Barreiras na região de Icapuí (CE) - porção emersa da Bacia Potiguar.** [*Analysis of Neotectonic Deformation Patterns and Structural Restoration in Outcrops of the Barreiras Formation in the Icapuí Region (CE) – Emerged Portion of the Potiguar Basin*] 2025, 68 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Geologia), Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

The Potiguar Basin is located in the eastern part of the Brazilian Equatorial Margin and records a complex tectonic history since its formation in the Early Cretaceous, with evidence of deformations affecting even the most recent deposits. According to previous studies, Cenozoic tectonic deformation in the Potiguar Basin encompasses two distinct events: the first one (SF1), from the Albian to the Middle Miocene, is characterized by a maximum horizontal stress (SH) oriented N-S and a minimum horizontal stress (Sh) oriented E-W; the second event (SF2), from the Middle Miocene to the Present, is characterized by a SH varying from E-W to NW-SE and a Sh from N-S to NE-SW. In the region of Icapuí (Ceará State, NE Brazil), which corresponds to the area of the present study, in the northwestern portion of the Potiguar Basin, extensive cliffs expose deposits of the Barreiras Formation, characterized by Miocene terrigenous sediments, intensely ferruginized and deformed. This study aims to analyze the deformation patterns in different cliffs of the Barreiras Formation in Icapuí (CE) region and perform a 2D structural restoration on a stratigraphic-structural section to establish correlations between the identified structural patterns and distinct deformation events, contributing to the interpretation of the Cenozoic regional tectonic evolution. The study involved stratigraphic-structural sections and paleostress data from three cliffs, selected for presenting varying degrees of deformation. The structural analysis revealed a complex deformational framework, characterized by folded layers in synformal and antiformal geometries, controlled by transcurrent and oblique faults at their boundaries and internally sectioned by normal and oblique faults. Additionally, other patterns such as reverse faults, normal faults, and flower-type structures were identified. The presence of superimposed structures, including faulted folds and fault planes with multiple striae, indicates that a single deformation event cannot explain the formation of all observed structures. The structural restoration proved effective in correlating the various patterns with distinct tectonic pulses, supporting the hypothesis of multiple stress regimes. This process was divided into four stages and, at the end of the restoration, the arcuate structures remained, after restoring all intersecting faults. This result indicates that these features are not directly related to the faulting events but instead correspond to an earlier stage of deformation. Furthermore, after the restoration process, residual offsets that remained in the layers were observed. The proposed model for regional tectonic evolution involves: an initial transcurrent stage, with compression varying from NW-SE to E-W, responsible for the formation of folds and predominantly normal and oblique faults oriented NW-SE to E-W, consistent with the SF2 event described in the literature; and a subsequent extensional stage, with NW-SE to E-W extension, responsible for generating NE-SW and N-S faults, interpreted as a relaxation phase following the transcurrent stress of the first stage.

Keywords: Neotectonics; Barreiras Formation; Structural Restoration

LISTA DE FIGURAS

- Figura 3.1:** Forças relacionadas à tectônica de placas (setas azuis) e regimes de tensões esperados. Espera-se que o eixo de tensão máxima na placa seja horizontal, exceto para a parte superior das zonas de rifte (rifte continental não mostrado), margens passivas e partes elevadas de cinturões orogênicos. Fonte: Modificado de Fossen (2017)4
- Figura 3.2:** (A) Elipsoide de tensão. (B) Relação entre a orientação das tensões principais e os regimes tectônicos, de acordo com o modelo de Anderson (1905). Os estereogramas indicam os campos de compressão (P) e tração (T). σ_1 : tensão máxima; σ_2 : tensão intermediária e σ_3 : tensão mínima. Fonte: Modificado de Fossen (2010)5
- Figura 3.3:** Modelo de fraturas de Riedel para uma situação de transcorrência dextral E-W. (A) R e R' são fraturas sintéticas e antitéticas de Riedel, respectivamente. P são fraturas sintéticas secundárias. (B) Outras estruturas de pequena dimensão que podem se formar em uma zona de falhas de rejeito direcional. (C) Estruturas de maior dimensão. Fonte: modificado de Fossen (2017)6
- Figura 3.4:** Falha em flor positiva e negativa, desenvolvidas em curvas de restrição e liberação, respectivamente. Fonte: Fossen (2017)7
- Figura 3.5:** Estruturas de falha em flor negativa em afloramentos das bacias do RCSB (Riccomini, 1989)8
- Figura 3.6:** Dobra de arrasto associada a movimentação transpressiva, relacionada a estrutura em flor positiva (evidenciada pela presença de falhas reversas), e falhas normais seccionando-a em afloramento no RCSB (Riccomini, 1989)8
- Figura 3.7:** Dobras formadas por movimento direcional em uma zona de deformação transcorrente dextral. Fonte: Fossen (2017)9
- Figura 3.8:** Dobras antiformes e sinformes em sedimentos da Formação Barreiras, no extremo norte da Bahia (Lima, 2010)9
- Figura 3.9:** Experimento realizado por Venâncio *et al.* (2017). A) Fraturas R e R' desenvolvidas nos primeiros estágios de deformacionais em uma zona de transcorrência dextral; B) Modelo experimental MV_15. Visão geral do topo do modelo com as principais estruturas. (B) Detalhe mostrando o desenvolvimento de bacias. Fonte: Modificado de Venâncio *et al.*, (2017)10
- Figura 3.10:** Experimento MV_ 17 (Venâncio *et al.*, 2017). Imagem superior com a visão de mapa e a localização dos cortes de perfil mostrados na parte inferior da imagem. Perfis B-B', C-C' e J-J' representam estruturas do tipo flor positiva, e os perfis G-G' e H-H' exibem estruturas do tipo flor negativa, sendo H-H' e J-J' a interpretação a partir das fotos.....11
- Figura 3.11:** Falha normal em sedimentos da Formação Barreiras no estado de Sergipe (Lima, 2010)12
- Figura 3.12:** Representação de *graben*, *horst* e *hemigtaben*. Fonte: Fossen (2010)13

Figura 3.13: Estrutura de <i>horst</i> no RCSB (Riccomini, 1989)	13
Figura 3.14: Sistema de falhas em dominó em sedimentos da Bacia de Volta Redonda. (Fonte: Gontijo, 1999)	13
Figura 3.15: Antiforme na capa da falha. As cores vermelha e amarela indicam bandas de cisalhamento sintéticas e antitéticas, respectivamente. Formação Matula, Sinai (Egito) - Fossen (2017)	14
Figura 3.16: (A) Restauração unidimensional com um marcador horizontal seccionado por falhas normais. (B) Nesse caso, os segmentos da linha podem ser movidos ao longo do traço das falhas até que eles formem uma linha contínua. A extensão é definida pela comparação entre os estados deformado e não deformado. Fonte: Fossen (2010)	15
Figura 4.1: Localização e acessos da área de estudo. Em 1, 2 e 3 estão indicados os afloramentos das praias de Redonda, Peroba e Picos, respectivamente	16
Figura 4.2: Mapa hipsométrico da porção oeste da Bacia Potiguar, com destaque para a Seção 1, transversal à região estudada, abrangendo a feição denominada de Alto de Icapuí e o Domo do Mel. (Elaborado por Gabriel Amon Silva). O polígono em vermelho indica a localização da área de estudo.....	17
Figura 5.1: Mapa geológico da porção principal da Bacia Potiguar. (Angelim <i>et al.</i> , 2006, Castro & Bezerra (2015), Pinéo <i>et al.</i> , 2020), com a localização da área de estudo (polígono vermelho)	18
Figura 5.2: Subdivisão da Subprovíncia Setentrional da Província Borborema em domínios tectonoestratigráficos. Fonte: Pinéo <i>et al.</i> (2020). O polígono com linhas vermelhas tracejadas indica a região de Icapuí-CE, onde está localizada a área de estudo.....	19
Figura 5.3: A) Estágio Sin-Rift II na evolução do SRNB. Nesse contexto, a Bacia Potiguar (P-PO) está localizada no extremo nordeste do Brasil, fazendo parte do <i>trend</i> Cariri-Potiguar. B) Estágio Sin-Rift III na evolução do SRNB. (modificado de Matos, 1992 <i>in</i> Araújo, 2023)	21
Figura 5.4: Comparação dos eventos reportados por Matos (1992), Matos (2000) e Pessoa Neto <i>et al.</i> (2007) para a evolução tectônica da Bacia Potiguar. Araújo (2023)	23
Figura 5.5: Coluna litoestratigráfica da Bacia Potiguar, com as fases tectônicas e os eventos magmáticos que ocorrem na bacia. Fonte: Pessoa Neto <i>et al.</i> (2007)	24
Figura 5.6: Campos de esforços tectônicos atuantes na região da Bacia Potiguar no Cenozoico e sumário das tensões principais. A) SF1; B) SF2; C) Campo de tensões atual. Bezerra <i>et al.</i> (2020)	26
Figura 5.7: Conjuntos de paleotensão indicando transcorrência, para quatro afloramentos estudados no projeto de cooperação entre a UFRJ e a PETROBRAS em que o presente estudo está inserido. Em azul, o conjunto com compressão NW-SE e distensão NE-SW; em vermelho, o conjunto com compressão E-W e distensão N-S.....	27

Figura 5.8: Conjuntos de paleotensão indicando distensão, para quatro afloramentos estudados no projeto de cooperação entre a UFRJ e a PETROBRAS em que o presente estudo está inserido. Em amarelo, o conjunto com distensão NW-SE; em verde, o conjunto com distensão E-W27

Figura 6.1: Seção estratigráfica-estrutural do afloramento da Praia de Picos, com os estereogramas referentes aos principais planos de falha medidos. Os diedros na cor cinza contêm σ_129

Figura 6.2: Seção estratigráfica-estrutural do afloramento Praia de Peroba, com os estereogramas referentes aos principais planos de falha medidos. Os diedros na cor cinza contêm σ_1 30

Figura 6.3: Seção estratigráfica-estrutural do afloramento da Praia de Redonda, com os estereogramas referentes aos principais planos de falhas medidos. Os diedros na cor cinza contêm σ_1 31

Figura 6.4: Seção estratigráfica-estrutural do afloramento Praia de Picos, com todas as falhas presentes na seção numeradas (número composto pelo setor em que a falha está localizada e a sua posição dentro desse setor, de Leste para Oeste)33

Figura 6.5: Subdivisão de uma seção dividida em módulos. (Santi, 2002)34

Figura 6.6: Exemplo de restauração com o “Move sobre falha geométrico” (Santi, 2002). P0 indica o ponto de referência sobre o módulo a ser movido e P1 é o ponto sobre a linha destino. Esses dois pontos definem o vetor que rege a parcela de translação35

Figura 6.7: Parte da seção estratigráfica-estrutural do afloramento Praia de Picos, nas versões pré e pós-simplificação, para exemplificar como a redução dos horizontes estratigráficos resultou na geração de intervalos que são tratados como camadas no *software* Recon37

Figura 7.1: Setor 1 do afloramento Praia de Picos, caracterizado por um padrão de antifforma suave. Em A) imagem não interpretada; em B) imagem com a interpretação estratigráfica e estrutural38

Figura 7.2: Setor 3 do afloramento Praia de Picos, caracterizado por um padrão de antifforma suave. Em A) imagem não interpretada; em B) imagem com a interpretação estratigráfica e estrutural39

Figura 7.3: Padrão de antifforma no afloramento Praia de Peroba. Em A) imagem não interpretada; em B) imagem com a interpretação estratigráfica e estrutural40

Figura 7.4: Padrão de antifforma no afloramento Praia de Redonda. Em A) imagem não interpretada; em B) imagem com a interpretação estratigráfica e estrutural41

Figura 7.5: Padrão de sinforma bastante suave nos setores 4 e 5 do afloramento Praia de Picos. Em A) imagem não interpretada; em B) imagem com a interpretação estratigráfica e estrutural.....43

- Figura 7.6:** Padrão de sinforma mais acentuada observada no afloramento Praia de Redonda. Em A) imagem não interpretada; em B) imagem com a interpretação estratigráfica e estrutural.....44
- Figura 7.7:** Seção Praia de Picos, com destaque para as falhas oblíquas nas extremidades das estruturas arqueadas. A) Falha E-W dextral normal. B) Falha N-S sinistral normal. C) Falha E-W sinistral normal. Os diedros na cinza contêm σ_1 45
- Figura 7.8:** Seção Praia de Redonda, com destaque para as falhas oblíquas nas extremidades das estruturas arqueadas. A) Falha NE-SW sinistral reversa; B) Falha N-S sinistral normal. Os diedros na cinza contêm σ_1 46
- Figura 7.9:** Seção estratigráfica-estrutural dos setores 1 e 2 do afloramento Praia de Picos, com estereogramas de falhas normais orientadas, predominantemente, nas direções NNE a NNW, e falhas oblíquas e transcorrentes de direção E-W e NW-SE e NE-SW. Os diedros na cor cinza contêm σ_1 47
- Figura 7.10:** Seção estratigráfica-estrutural dos setores 3, 4 e 5 do afloramento Praia de Picos, com estereogramas de falhas normais NE-SW identificadas no Setor 3. Os diedros na cor cinza contêm σ_1 47
- Figura 7.11:** Seção estratigráfica-estrutural dos setores 3, 4 e 5 do afloramento Praia de Picos, com estereogramas de falhas normais de orientação NE-SW a NW-SE, e falhas oblíquas dextrais NE-SW e NW-SE identificadas no Setor 4. Os diedros na cor cinza contêm σ_1 48
- Figura 7.12:** Seção estratigráfica-estrutural dos setores 3, 4 e 5 do afloramento Praia de Picos, com estereogramas de falhas normais NNE-SSW a NW-SE e E-W e falhas oblíquas E-W identificadas no Setor 5. Os diedros na cor cinza contêm σ_1 48
- Figura 7.13:** Seção estratigráfica-estrutural do afloramento Praia de Peroba, com estereogramas das falhas normais (A) e oblíquas (B). Nas falhas 5 e 8 foram identificadas estrias superpostas. Os diedros na cor cinza contêm σ_1 49
- Figura 7.14:** Seção estratigráfica-estrutural do afloramento Praia de Redonda, com estereogramas das falhas normais (A) e oblíquas (B). Nas falhas 8 e 11 foram identificadas estrias superpostas. Os diedros na cor cinza contêm σ_149
- Figura 7.15:** Em A) a imagem não interpretada; em B) a imagem com a interpretação estrutural.....50
- Figura 7.16:** Estrutura em flor negativa no afloramento Praia de Peroba. A foto ampliada contém o traçado dos planos de falhas e fraturas (linhas brancas cheias) e a sugestão das camadas sedimentares (linhas brancas tracejadas)51
- Figura 7.17:** Falha dextral reversa de orientação E-W identificada na porção noroeste do afloramento Praia de Peroba. Na foto ampliada a direita, interpretação com a superfície da falha e o sentido da movimentação da capa e da lapa51

- Figura 7.18:** Padrão de falhas normais em arranjo do tipo dominó em escala métrica no afloramento Praia de Redonda. Em A) imagem original; e em B) imagem com o traçado dos principais planos de falha52
- Figura 7.19:** Padrão de falhas normais em arranjo do tipo dominó em escala centimétrica identificado no afloramento Praia de Redonda52
- Figura 7.20:** Setor 3 do afloramento Praia de Picos, caracterizado como um *graben*, delimitado por falhas NE-SW nos limites a ESE e WNW53
- Figura 7.21:** Padrão de *grabens* e *horsts* em escala centimétrica no afloramento Praia de Redonda54
- Figura 7.22:** Seção estratigráfica-estrutural do afloramento Praia de Picos nas versões pré e pós simplificação56
- Figura 7.23:** Momentos A a D da restauração estrutural dos setores 3, 4 e 5 do afloramento Praia de Picos. Os polígonos numerados por 1, 2 e 3 no Momento B, correspondem à localização das Figuras 7.24, 7.25 e 7.26, respectivamente 58
- Figura 7.24:** Exemplo da restauração de uma falha secundária, no Setor 3 do afloramento Praia de Picos, onde a falha principal correlacionada é inteiramente ajustada. Essas falhas, de orientação NE-SW, pertencem ao conjunto de distensão NW-SE identificado pela equipe do projeto realizado em cooperação entre a UFRJ com a PETROBRAS, na região de Icapuí (CE).....59
- Figura 7.25:** Exemplo da restauração estrutural de uma falha secundária, no Setor 5 do afloramento Praia de Picos: onde a falha principal correlacionada é parcialmente ajustada, mantendo um rejeito contínuo e expressivo ao longo do plano de falha. Essas falhas, de orientação NW-SE, pertencem ao conjunto de compressão NW-SE identificado pela equipe do projeto realizado em cooperação entre a UFRJ e a PETROBRAS na região de Icapuí (CE).....60
- Figura 7.26:** Exemplo de dois momentos de restauração, no Setor 4 do afloramento Praia de Picos: 1) restauração da falha secundária, onde a falha principal correlacionada é parcialmente restaurada, mantendo um rejeito residual constante para todas as camadas; 2) restauração da falha principal, na qual, permanecendo rejeitos residuais, maiores nas camadas basais em relação as do topo. A falha principal, de orientação NE-SW, apresenta duas estrias, uma pertencente ao conjunto transcorrente com compressão E-W e distensão N-S, e a segunda ao conjunto distensivo com distensão NW-SE, identificadas pela equipe do projeto realizado em cooperação entre a UFRJ e a PETROBRAS na região de Icapuí (CE); e a falha secundária tem orientação N-W e pertence ao conjunto distensivo com distensão E-W.....61
- Figura 7.27:** Restauração estrutural do Setor 3 do afloramento Praia de Picos, com destaque em vermelho para as falhas que não puderam ser restauradas no Momento B, pois não afetavam o topo da camada mais jovem. Essas falhas foram restauradas no Momento C. Na base, os estereogramas para algumas das falhas desse setor, com os diedros com o campo compressivo em cinza, indicando a mesma cinemática e orientação (Normal NE-SW). Os diedros na cor cinza contêm σ_1 62

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	v
RESUMO.....	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	3
3. BASE CONCEITUAL	4
3.1. Regimes tectônicos e principais feições de deformação.....	4
3.1.1. Deformação associada a transcorrência.....	5
3.1.2. Deformação associada a distensão	11
3.2. Restauração estrutural	14
4. ÁREA DE ESTUDO.....	16
5. GEOLOGIA REGIONAL.....	18
5.1. Bacia Potiguar	18
5.1.1. Domínios litológicos e estruturais do embasamento da Bacia Potiguar.....	18
5.1.2. Evolução Tectônica e Estratigráfica da Bacia Potiguar.....	20
5.1.3. Tectônica Cenozoica.....	25
6. MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
6.1. Materiais	28
6.2. Métodos.....	32
7. RESULTADOS.....	38
7.1. Análise dos Padrões Geométricos Associado à Deformação Tectônica	38
7.2. Restauração estrutural	54
7.3. Modelo da Deformação Tectônica	63
8. CONCLUSÕES	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
APÊNDICE A	I

1. INTRODUÇÃO

A deformação tectônica é provocada pela aplicação de tensões nas rochas, resultando em uma ampla gama de estruturas geológicas, que dependem tanto da reologia das rochas como da orientação e intensidade dessas tensões, entre outros fatores. Segundo Fossen (2010), os esforços tectônicos em escala regional estão intrinsecamente ligados aos movimentos das placas tectônicas. As relações entre as tensões principais (σ_1 , σ_2 e σ_3) determinam diferentes regimes deformacionais, como distensivo, transcorrente e compressivo, conforme o modelo proposto por Anderson (1905). Alterações na cinemática das placas podem desencadear diferentes eventos tectônicos, gerando até mesmo sobreposições entre eles.

Em especial no regime transcorrente, as estruturas geradas são frequentemente complexas e envolvem, caracteristicamente, falhas transcorrentes e oblíquas. Experimentos clássicos, como os de Riedel, demonstram que o desenvolvimento de fraturas em zonas de cisalhamento é ordenado, resultando em fraturas R (fratura de cisalhamento sintética), P (fratura sintética secundária), R' (fratura de cisalhamento antitética), T (fratura distensiva), bem como falhas normais, dobras, falhas reversas e estruturas de falha em flor positiva e negativa. Em contraste, em regimes distensivos, onde a crosta é submetida a tração, o estiramento e afinamento crustal levam a formação, predominantemente, de sistemas de falhas normais.

A Bacia Potiguar, região em que este estudo foi desenvolvido, localiza-se no extremo leste da Margem Equatorial Brasileira e é considerada uma região propícia para se estudar a tectônica cenozoica brasileira. De acordo com Bezerra *et al.* (2020), foram registrados dois campos de paleotensões desde a fase Drifte da evolução da bacia: o primeiro (SF1), do Albiano ao Mioceno médio, com tensão horizontal máxima (SH) N-S e tensão horizontal mínima (Sh) E-W; e o segundo (SF2), do Mioceno médio ao Recente, que reorientou as tensões quase que ortogonalmente ao campo de esforços do evento SF1, com SH variando de E-W a NW-SE e Sh variando de N-S a NE-SW.

Um marco estratigráfico importante neste contexto é representado pela Formação Barreiras, de idade miocênica, amplamente distribuída na porção costeira da região nordeste do Brasil. Conforme Bezerra *et al.* (2020), a deposição desta unidade estaria condicionada pelo evento SF1 tardio e seus depósitos foram deformados pelo evento SF2.

O foco do presente estudo está na análise dos padrões deformacionais tectônicos observados em escala de afloramento de depósitos da Formação Barreiras na região de Icapuí (CE), porção noroeste da Bacia Potiguar, investigando-se as feições associadas à deformação cenozoica da Bacia Potiguar. Essas feições revelam a complexidade dos regimes tectônicos,

indicando a alternância e sobreposição entre esforços transcorrentes e distensivos.

Foi empregada a técnica de restauração estrutural 2D para se analisar os estágios deformacionais e validar a interpretação estrutural realizada. A restauração estrutural de seções geológicas tem se mostrado ao longo do tempo um método eficiente de auxílio na interpretação geológico-estrutural, e se apresenta como uma ferramenta valiosa especialmente para esse estudo, devido à escala detalhada e à complexidade estrutural da região. Esse método, de acordo com Fossen (2017), busca reconstituir, de maneira verossímil, a geometria original das rochas e camadas sedimentares no seu estado pré-deformacional, permitindo entender a história evolutiva da área e auxiliando na validação de interpretações estruturais.

Este trabalho está inserido no contexto das atividades do projeto de pesquisa “Relações estratigráficas e análise estrutural multiescalar da deformação tectônica em análogos de reservatórios areníticos pouco consolidados aflorantes na região de Icapuí (CE), área emersa da Bacia Potiguar”, desenvolvido em cooperação entre a UFRJ e a PETROBRAS.

2. OBJETIVO

O presente estudo tem como objetivo realizar uma análise dos padrões deformacionais tectônicos em diferentes falésias da Formação Barreiras, na região de Icapuí (CE), porção noroeste da Bacia Potiguar, e realizar a restauração estrutural 2D a partir da seção estratigráfica-estrutural de uma das falésias investigadas. Busca-se estabelecer uma relação entre os padrões estruturais identificados com eventos distintos de deformação tectônica, a fim de contribuir para a interpretação da evolução deformacional.

3. BASE CONCEITUAL

3.1. Regimes tectônicos e principais feições de deformação

As tensões responsáveis pela deformação têm origem na movimentação relativa entre as placas tectônicas, que ao interagir em suas bordas de forma convergente, divergente ou transformante produzem tensões que se propagam até o interior das placas envolvidas. O regime tectônico operante em uma área é responsável pela deformação causada nas rochas, em determinadas condições de temperatura e de pressão de confinamento, como uma resposta às tensões tectônicas aplicadas.

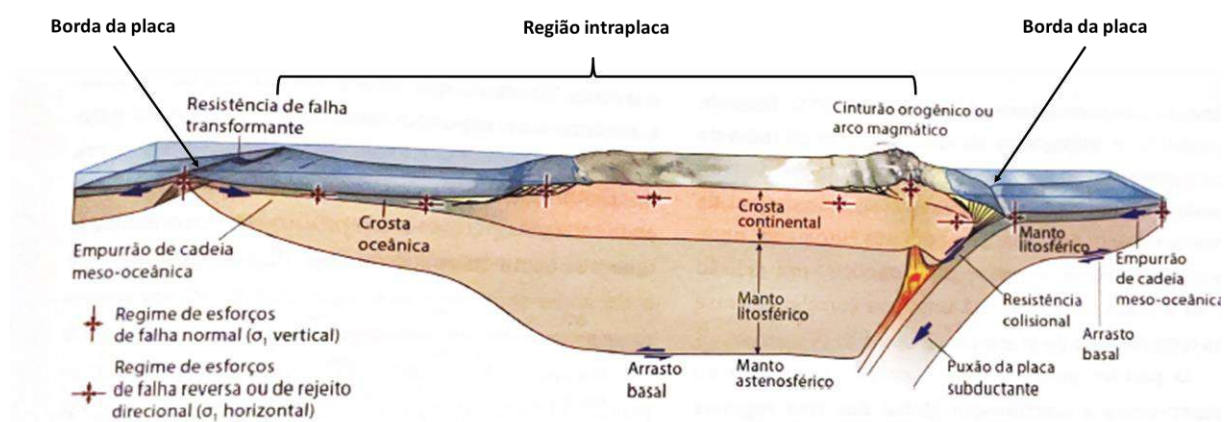


Figura 3.1: Forças relacionadas à tectônica de placas (setas azuis) e regimes de tensões esperados. Espera-se que o eixo de tensão máximo na placa seja horizontal, exceto para a parte superior das zonas de rifte (rifte continental não mostrado), margens passivas e partes elevadas de cinturões orogênicos. Fonte: Modificado de Fossen (2017).

As tensões tectônicas operando em um ponto da crosta terrestre podem ser descritas a partir de um elipsoide de tensões (Figura 3.2a). Este corresponde a uma representação geométrica para visualizar como um corpo sofre deformação sob diferentes tensões. É utilizado para se entender a orientação e a magnitude das tensões principais, chamadas de Sigma 1 (σ_1), Sigma 2 (σ_2) e Sigma 3 (σ_3), ortogonais entre si, onde σ_1 é o eixo maior do elipsoide e atua na direção de maior compressão, correspondendo à tensão máxima; σ_3 é o eixo menor, atua na direção de menor compressão e corresponde à tensão mínima; e, por fim, σ_2 é a tensão intermediária ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$).

De acordo com as variações da orientação deste elipsoide em relação à superfície da Terra, uma classificação para regime de esforços tectônicos foi proposta por Anderson (1905) definindo três regimes em função de qual das tensões principais está na vertical. Se a tensão

vertical for σ_1 , há um regime distensivo; se for σ_2 , há um regime transcorrente; e, se for σ_3 , há um regime compressivo (Figura 3.2b).

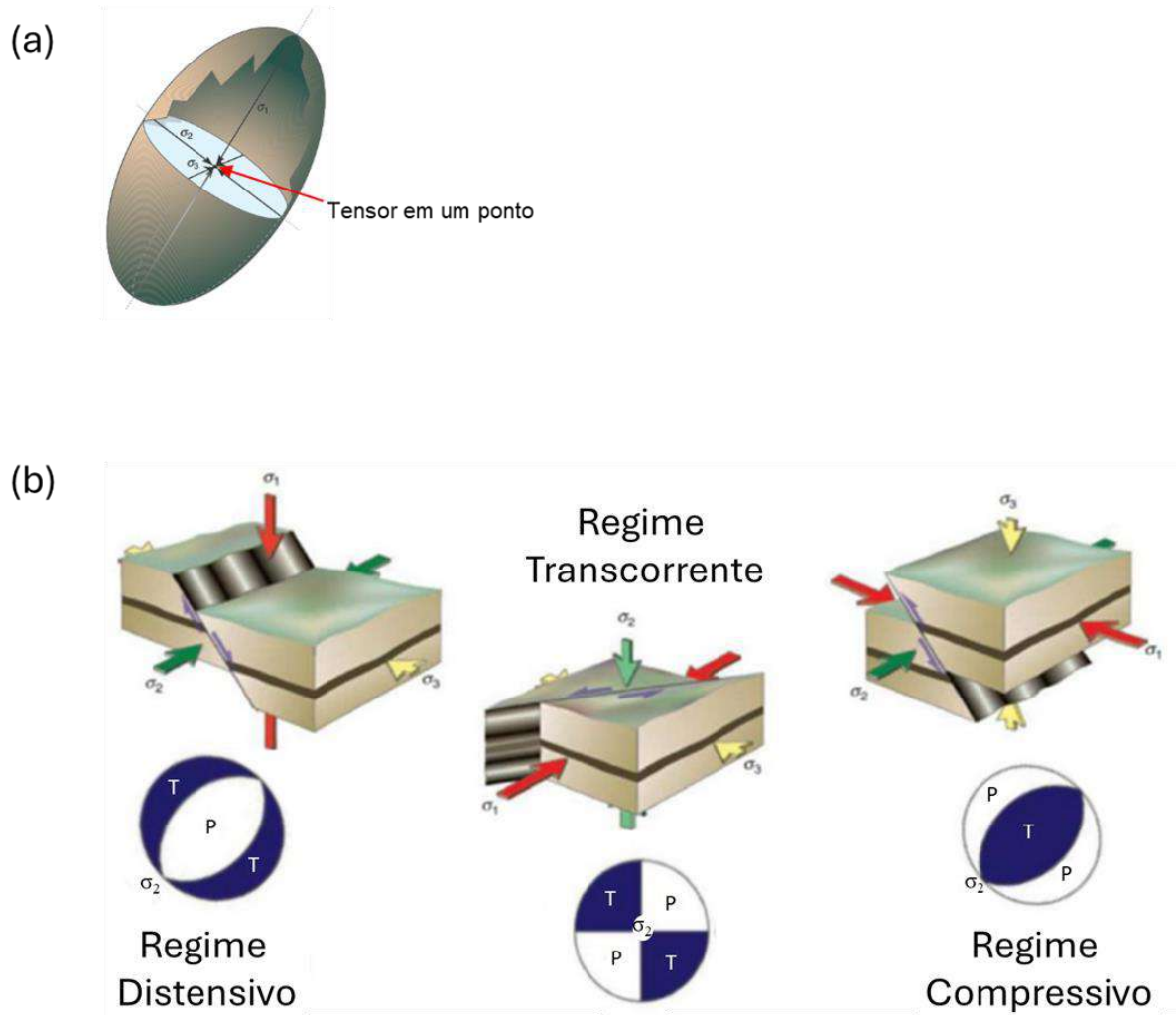


Figura 3.2: (A) Elipsoide de tensão. (B) Relação entre a orientação das tensões principais e os regimes tectônicos, de acordo com o modelo de Anderson (1905). Os estereogramas indicam os campos de compressão (P) e tração (T). σ_1 : tensão máxima; σ_2 : tensão intermediária e σ_3 : tensão mínima. Fonte: Modificado de Fossen (2010).

Em volumes rochosos afetados por regimes tectônicos distensivo ou compressivo, as principais estruturas de deformação produzidas são, respectivamente falhas normais e reversas. Onde predomina o regime transcorrentes, os principais elementos são falhas com movimentação horizontal (falhas transcorrentes), porém também são encontradas falhas normais e reversas, como estruturas secundárias.

3.1.1. Deformação associada a transcorrência

O regime transcorrente é caracterizado por apresentar falhas cujos blocos se deslocam paralelamente entre si com movimento horizontal ao longo de um plano vertical ou subvertical

– falhas transcorrentes (ou de rejeito direcional). Segundo Fossen (2010), diversas estruturas secundárias podem ser associadas a falhas de rejeito direcional, sendo essa tese sustentada por trabalhos experimentais, como o realizado por Riedel no início do século XX (Figura 3.3).

No experimento, o primeiro conjunto de fraturas a se formar são as Fraturas R que são sintéticas ao sentido do deslizamento e de baixo ângulo com a zona de transcorrência. Em seguida, são geradas as Fraturas P, cujo desenvolvimento está, provavelmente, relacionado à variação de esforço local. O terceiro conjunto são as Fraturas R', antitéticas e de alto ângulo com a zona de transcorrência, porém menos desenvolvidas. Também podem ocorrer fraturas extensionais (Fraturas T), que se formam perpendicularmente ao eixo máximo de estiramento (σ_3), bem como pode ocorrer a geração de falhas normais. Perpendicularmente ao eixo de encurtamento máximo (σ_1), vão se formar estruturas compressivas, como dobras e falhas reversas. No entanto, vale ressaltar que há uma variedade de “ordens de geração” para as estruturas secundárias, a depender dos experimentos e das condições aplicadas.

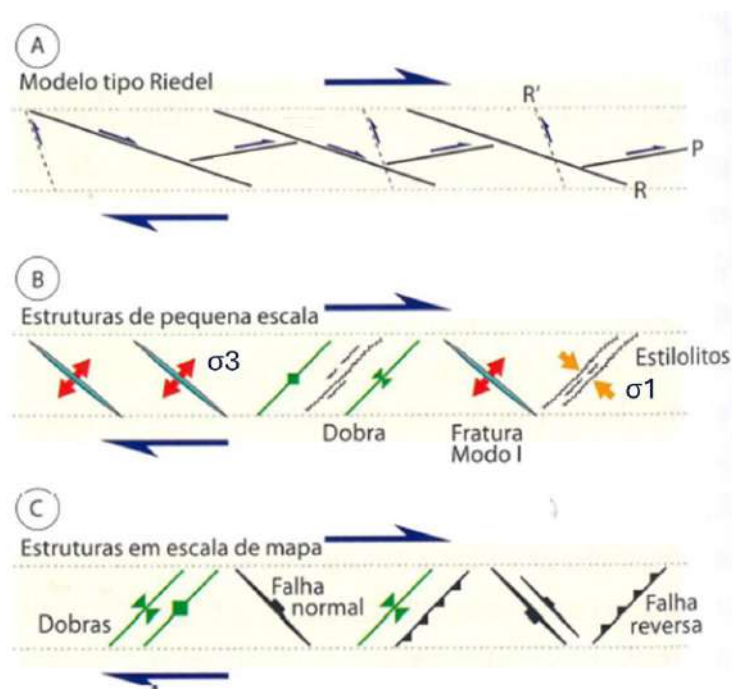


Figura 3.3: Modelo de fraturas de Riedel para uma situação de transcorrência dextral E-W. (A) R e R' são fraturas sintéticas e antitéticas de Riedel, respectivamente. P são fraturas sintéticas secundárias. (B) Outras estruturas de pequena dimensão que podem se formar em uma zona de falhas de rejeito direcional. (C) Estruturas de maior dimensão. Fonte: modificado de Fossen (2017).

As falhas direcionais normalmente tendem a ser retilíneas, entretanto, quando segmentos individuais de falhas se sobrepõem e se conectam, podem ocorrer curvaturas, caracterizadas como curvas de liberação/*releasing bends* ou restrição/*restraining bends* (Fossen, 2017). Nessas curvas, estruturas extensionais e compressivas podem ser geradas,

dependendo do rejeito da falha em relação à curva. No caso das curvas de liberação, ocorre extensão associada a transcorrência, possibilitando a geração de falhas normais e fraturas extensionais; já no caso de curvas de restrição, ocorre compressão associada a transcorrência, com geração de estruturas como dobras e falhas reversas.

O tipo de deformação que ocorre nessas curvas é denominado de transtração e transpressão, e não é restrito às curvas de falhas, podendo ser atuante em todo o comprimento de uma falha, se esta não for de rejeito direcional puro. Consiste em movimentos verticais associados a falhas normais ou reversas, que podem ser evidenciados, próximo à superfície, em uma estruturação típica de estruturas em flor, caracterizadas por falhas com planos curvos nas extremidades e uma série de falhas menores e ramificadas que se conectam à principal em um único caule (Figura 3.4)

Em um regime de transpressão, parte da deformação é absorvida por estiramento vertical, criando as condições para o desenvolvimento de falhas reversas, além de estruturas em flor positiva. O movimento gera elevação e empilhamento de blocos, resultando em feições de relevo positivo. Em regimes transtrativos, haverá uma componente tracional associada à transcorrência, e parte da deformação vai ser absorvida em um encurtamento vertical, formando uma flor negativa. Nesse caso, são geradas falhas normais, que se ramificam a partir da falha principal, formando uma depressão que gera feições de relevo negativo.

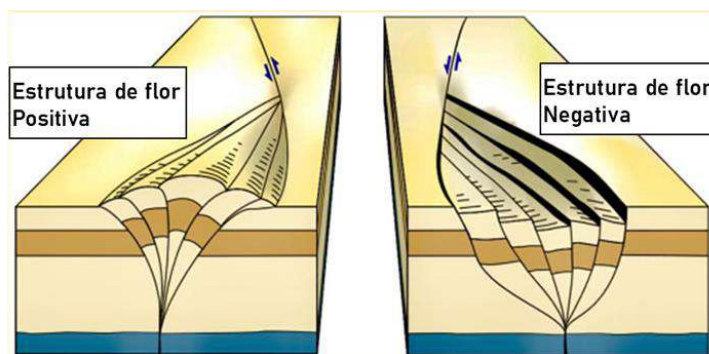


Figura 3.4: Falha em flor positiva e negativa, desenvolvidas em curvas de restrição e liberação, respectivamente. Fonte: Fossen (2017)

Riccomini (1989) descreveu estruturas de falhas em flor negativa neotectônicas na região do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (RCSB), (Figura 3.5), assim como estruturas de falhas reversas e dobras de arrasto associadas a ramos de estruturas em flor positiva, seccionadas por falhas normais (Figura 3.6), evidenciando uma série dessas estruturas em um mesmo contexto local.



Figura 3.5: Estruturas de falha em flor negativa em afloramentos das bacias do RCSB (Riccomini, 1989).

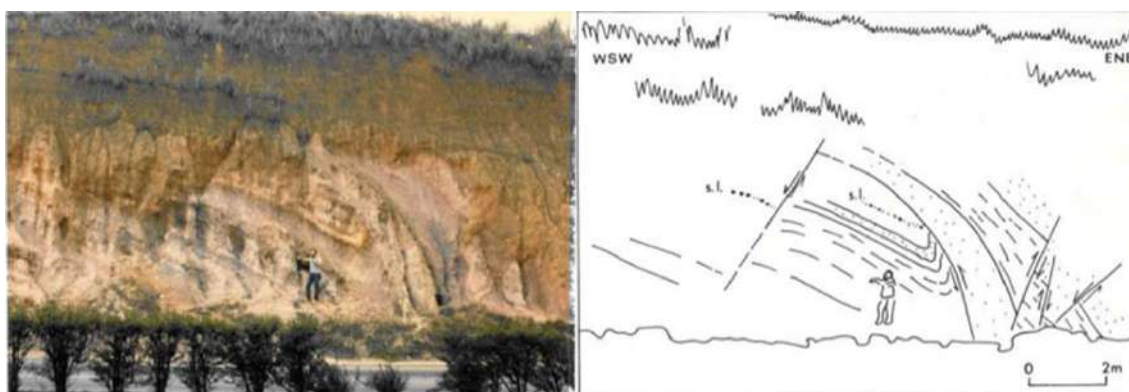


Figura 3.6: Dobra de arrasto associada a movimentação transpressiva, relacionada a estrutura em flor positiva (evidenciada pela presença de falhas reversas), e falhas normais seccionando-a em afloramento no RCSB (Riccomini, 1989).

É comum, em zonas de cisalhamento, a formação de dobras durante a deformação, especialmente em zonas de transpressão, onde há uma combinação de cisalhamento lateral com compressão oblíqua. Essa compressão causa encurtamento que pode gerar dobras (Figura 3.7). Lima (2010) apresentou estruturas sinformes e antiformes, decorrentes da ação neotectônica após a deposição da Formação Barreiras nos estados de Sergipe e Bahia (Figura 3.8).

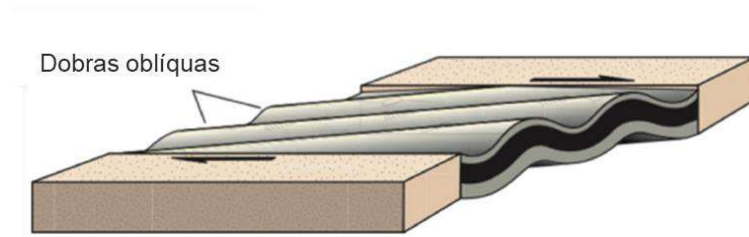


Figura 3.7: Dobras formadas por movimento direcional em uma zona de deformação transcorrente dextral. Fonte: Fossen (2017).



Figura 3.8: Dobras antiformes e sinformes em sedimentos da Formação Barreiras, no extremo norte da Bahia (Lima, 2010).

Trabalhos como o de Venâncio *et al.* (2017) buscam contribuir para o melhor entendimento das estruturas deformacionais relacionadas a transcorrência. Os experimentos realizados por estes autores analisam o desenvolvimento de feições estruturais (R, R', P, bacias *pull-apart*, etc.), em uma zona de cisalhamento com cinemática dextral (Figura 3.9).

Durante os primeiros estágios de deformação, as fraturas do tipo R foram as primeiras estruturas a se formarem, sintéticas e em um ângulo baixo com a zona de transcorrência. Em segundas, como segmentos menores e discretos, desenvolveram-se as fraturas R', em ângulo alto com a zona de falha principal. Em outro modelo, com adição de sedimentação sintectônica, houve também a formação de fraturas do tipo P, e durante estágios finais de deformação desenvolveram-se pequenas bacias do tipo *pull apart*.

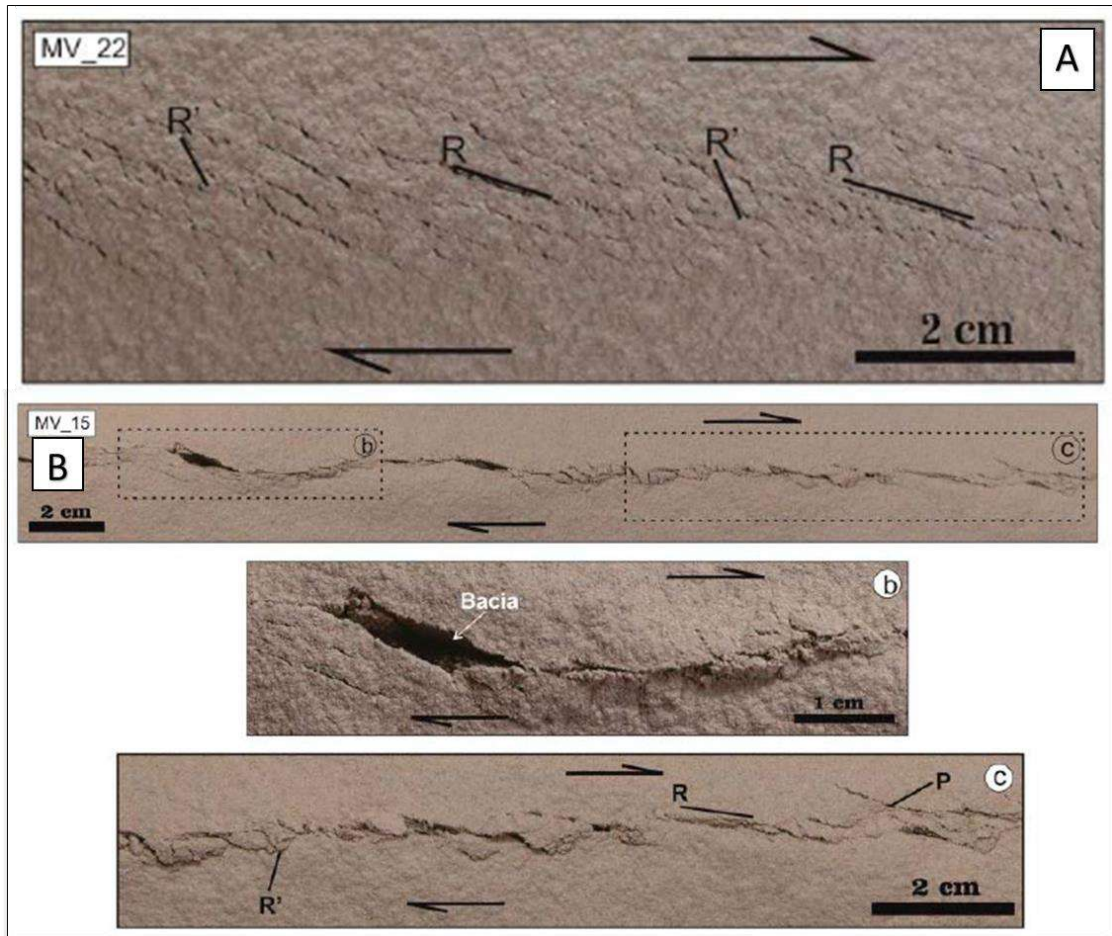


Figura 3.9: Experimento realizado por Venâncio *et al.* (2017). A) Fraturas R e R' desenvolvidas nos primeiros estágios deformacionais em uma zona de transcorrência dextral; B) Modelo experimental MV_15. Visão geral do topo do modelo com as principais estruturas, com detalhe mostrando o desenvolvimento de bacias. Fonte: Modificado de Venâncio *et al.*, (2017).

Ao término dos experimentos, os modelos foram solidificados e cortados em seções perpendiculares à zona de cisalhamento, resultando em perfis que revelaram o comportamento das estruturas na subsuperfície. Em alguns pontos, foram identificados domínios transpressionais, responsáveis pela formação de estruturas do tipo flor positiva, enquanto em outros foram observados comportamentos transtracionais, evidenciados pela presença de estruturas com padrão de flor negativa (Figura 3.10).

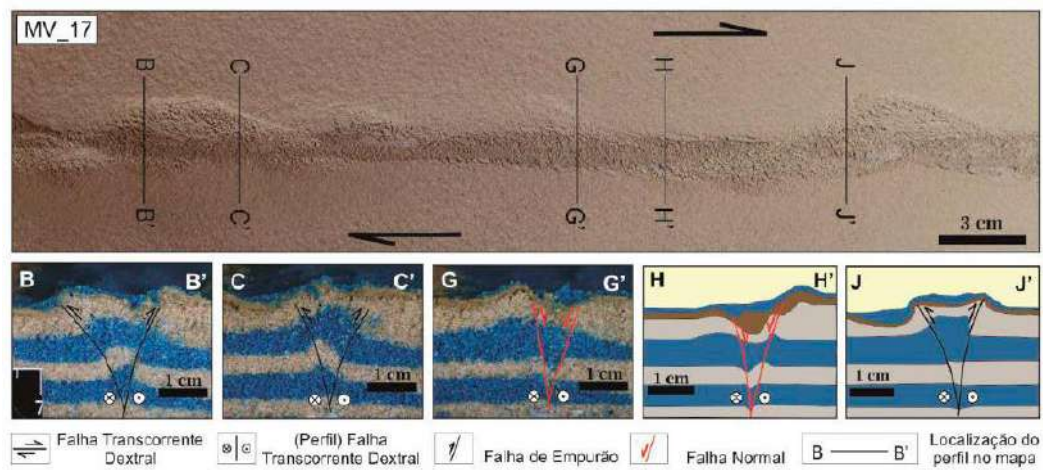


Figura 3.10: Experimento MV_17 (Venâncio *et al.*, 2017). Imagem superior com a visão de mapa e a localização dos cortes de perfil mostrados na parte inferior da imagem. Perfis B-B', C-C' e J-J' representam estruturas do tipo flor positiva, e os perfis G-G' e H-H' exibem estruturas do tipo flor negativa, sendo H-H' e J-J' a interpretação a partir das fotos.

3.1.2. Deformação associada a distensão

Os regimes extensionais caracterizam-se como porções da crosta submetidas a tração, envolvendo áreas abatidas e elevadas lado a lado. Estão relacionados a processos de estiramento e afinamento da crosta (Fossen, 2010), que levam à formação, predominantemente, de sistemas de falhas normais.

As falhas normais (Figura 3.11) geralmente estão inseridas em zonas onde ocorre alívio de tensão, resultando em abatimento de blocos, onde a capa (bloco que se situa acima do plano de falha) se desloca para baixo em relação à lapa (bloco que se situa abaixo do plano de falha). São as principais componentes estruturais de muitas das bacias riftes, onde possuem maior significado para a exploração de hidrocarbonetos. Deve-se ressaltar, porém, que as falhas normais não são exclusivas de regimes distensivos, pois, como visto anteriormente, também podem ser geradas em contextos de regimes transcorrentes.



Figura 3.11: Falha normal em sedimentos da Formação Barreiras no estado de Sergipe (Lima, 2010).

As falhas normais podem se desenvolver de formas variadas, resultando em diferentes configurações estruturais. Durante a evolução dessas falhas, são observados padrões geométricos específicos que refletem o comportamento da dinâmica e da reologia local. Diante disso, diferentes modelos estruturais podem surgir, cada um com suas particularidades e implicações geológicas.

Para Twiss & Moores (2007), em sistemas de falhas normais, as falhas podem ser separadas em dois grupos de “orientações conjugadas”, que possuem ângulos de mergulho (*dip angle*) similares, porém com sentidos de mergulho (*dip direction*) opostos. Nesses sistemas, algumas falhas apresentam maiores deslocamentos e acomodam deformação mais expressiva, sendo consideradas “falhas principais”, enquanto outras, de menor amplitude, apresentam menor deslocamento e deformação. Se essas falhas de menor amplitude são paralelas à falha principal, elas são denominadas sintéticas; se forem da orientação conjugada à falha principal, ou seja, com sentido de mergulho oposto, antitéticas. Caso estejam ligadas à falha principal, são chamadas de “falhas secundárias”

Grabens, *horsts* e *hemigrabens* são típicas estruturas regionais desenvolvidas em sistemas extensionais (Figura 3.12). Segundo Fossen (2010), um *graben* é caracterizado por um bloco rebaixado, limitado por duas falhas normais conjugadas, que mergulham uma em direção a outra. Essas falhas normais criam, nas porções adjacentes, blocos soerguidos, denominados de *horsts*. Pode acontecer de ter apenas uma falha, ao invés de duas, gerando um bloco abatido

e basculado, caracterizado como um *hemigraben*. Riccomini (1989) também observou esse tipo de estrutura no RCSB (Figura 3.13).

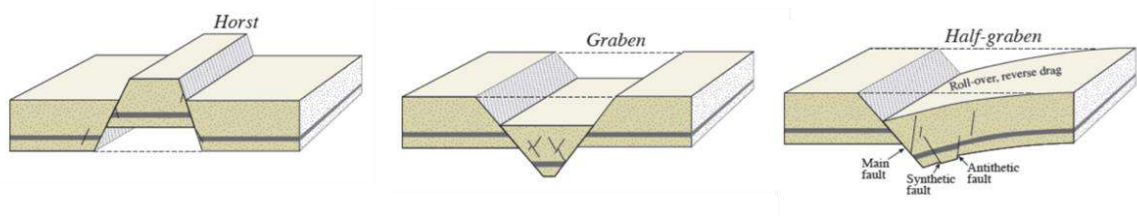


Figura 3.12: Representação de *graben*, *horst* e *hemigraben*. Fonte: Fossen (2010)



Figura 3.13: Estrutura de *horst* no RCSB (Riccomini, 1989).

O modelo de falhas em dominó (Figura 3.14) é utilizado para caracterizar uma seção da crosta que mostra uma série de blocos rotacionados e arranjados de modo semelhante ao de peças de dominó (Fossen, 2010). Parte do pressuposto de que falhas extensionais com mergulhos entre 30° e 60°, em planos paralelos, separam porções de rocha, delimitando blocos, que são rotacionados e abatidos, em relação aos blocos adjacentes.



Figura 3.14: Sistema de falhas em dominó em sedimentos da Bacia de Volta Redonda. (Fonte: Gontijo, 1999).

Pode ocorrer ainda, porém não exclusivamente em regimes distensivos, a geração de dobras de arrasto (Figura 3.15), que frequentemente são confundidas com dobras geradas em zonas com regimes com componente compressiva. Arrasto é um dobramento de camadas em torno de uma falha, causado por deformação rúptil diretamente relacionada à formação e/ou crescimento da falha (Fossen, 2017). É comum em camadas pouco competentes, que se deformam de modo dúctil mesmo na parte mais superficial da crosta, sendo mais recorrentes em rochas sedimentares.

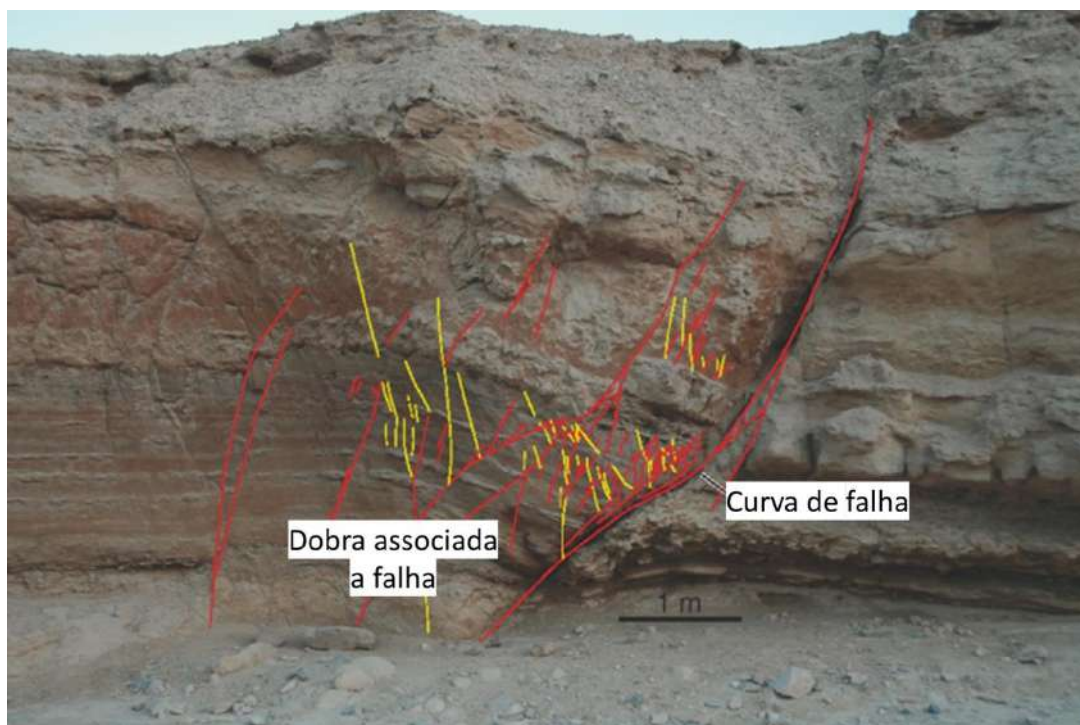


Figura 3.15: Antiforme na capa da falha. As cores vermelha e amarela indicam bandas de cisalhamento sintéticas e antitéticas, respectivamente. Formação Matula, Sinai (Egito) - Fossen (2017).

3.2. Restauração estrutural

A restauração de seções geológicas é um recurso utilizado na análise estrutural, consistindo na reconstrução da geometria pré-deformacional das camadas sedimentares. Esse processo utiliza técnicas e ferramentas computacionais baseadas em premissas geológicas, aplicadas no sentido contrário ao tempo, produzindo uma retrodeformação. O objetivo principal é revelar as condições geológicas anteriores à deformação, como espessuras originais das camadas e sua distribuição espacial, garantindo a compatibilidade entre os diferentes elementos da seção. Isso significa que, na seção restaurada, não deve haver sobreposições, hiatos, rejeitos de falhas e dobras, apenas se estes forem associados a eventos de deformação anteriores (Fossen, 2017).

A restauração pode ser aplicada em uma, duas ou três dimensões. No caso da restauração bidimensional, que é amplamente aplicada a seções, o procedimento baseia-se no princípio da restauração unidimensional mais simples, que é reconstituir marcadores estratigráficos em seções geológicas (uma linha horizontal que pode ser mapeada ao seu estado antes do início da deformação – Figura 3.16). Considerando a geometria das falhas e integrando dois ou mais marcadores estratigráficos, o procedimento de restauração unidimensional se transforma em bidimensional (Fossen, 2010).

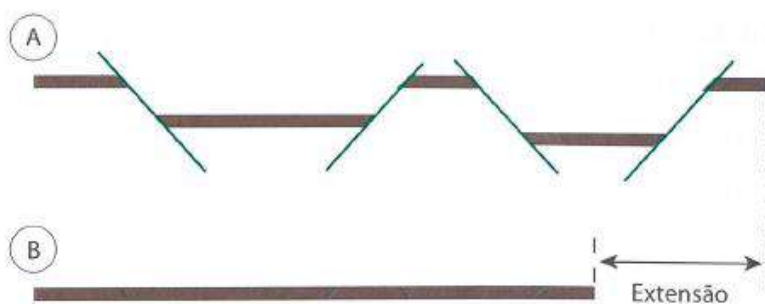


Figura 3.16: (A) Restauração unidimensional com um marcador horizontal seccionado por falhas normais. (B) Nesse caso, os segmentos da linha podem ser movidos ao longo do traço das falhas até que eles formem uma linha contínua. A extensão é definida pela comparação entre os estados deformado e não deformado. Fonte: Fossen (2010)

Na literatura, o conceito de restauração é relacionado, mas não igual ao conceito de balanceamento, que consiste em ajustar a construção de uma seção geológica para que ela não apenas seja geologicamente razoável, mas também restaurável ao seu estado pré-deformacional (Fossen, 2017). Segundo Dahlstrom (1969) e Elliott (1983), uma seção balanceada deve ser (1) precisa; (2) admissível, ou seja, deve estar em conformidade com as geometrias estruturais considerando o contexto tectônico regional; (3) restaurável, ou seja, pode ser retornada a uma geometria pré-deformacional e (4) equilibrada, seja em comprimento, ou área.

Há uma série de motivos para o balanceamento e a restauração serem cada vez mais utilizados na Geologia Estrutural, uma vez que auxiliam na avaliação se uma interpretação é realista da história evolutiva da deformação. De acordo com Santi (2002), o balanceamento e a restauração de seções geológicas são exercícios para testar a geometria e a interpretação estrutural propostas para uma determinada seção transversal, definindo a qualidade do seu produto final, quer seja uma seção viável ou admissível, ou a identificação de alguma imperfeição geométrica ou erro de interpretação da seção.

4. ÁREA DE ESTUDO

A área na qual o estudo está inserido situa-se no litoral sul do estado do Ceará, no município de Icapuí, a cerca de 200 km a sudeste de Fortaleza, na porção emersa da Bacia Potiguar (Figura 4.1). A principal via de acesso a partir de Fortaleza (CE) é a rodovia CE-040, até Aracati (CE), seguindo-se pela BR-304 e depois pela CE-261 até Icapuí (CE), onde estradas municipais e ruas permitem acesso ao litoral. Foram selecionados para o estudo três afloramentos, correspondentes às falésias nas praias de Picos, Redonda e Peroba.

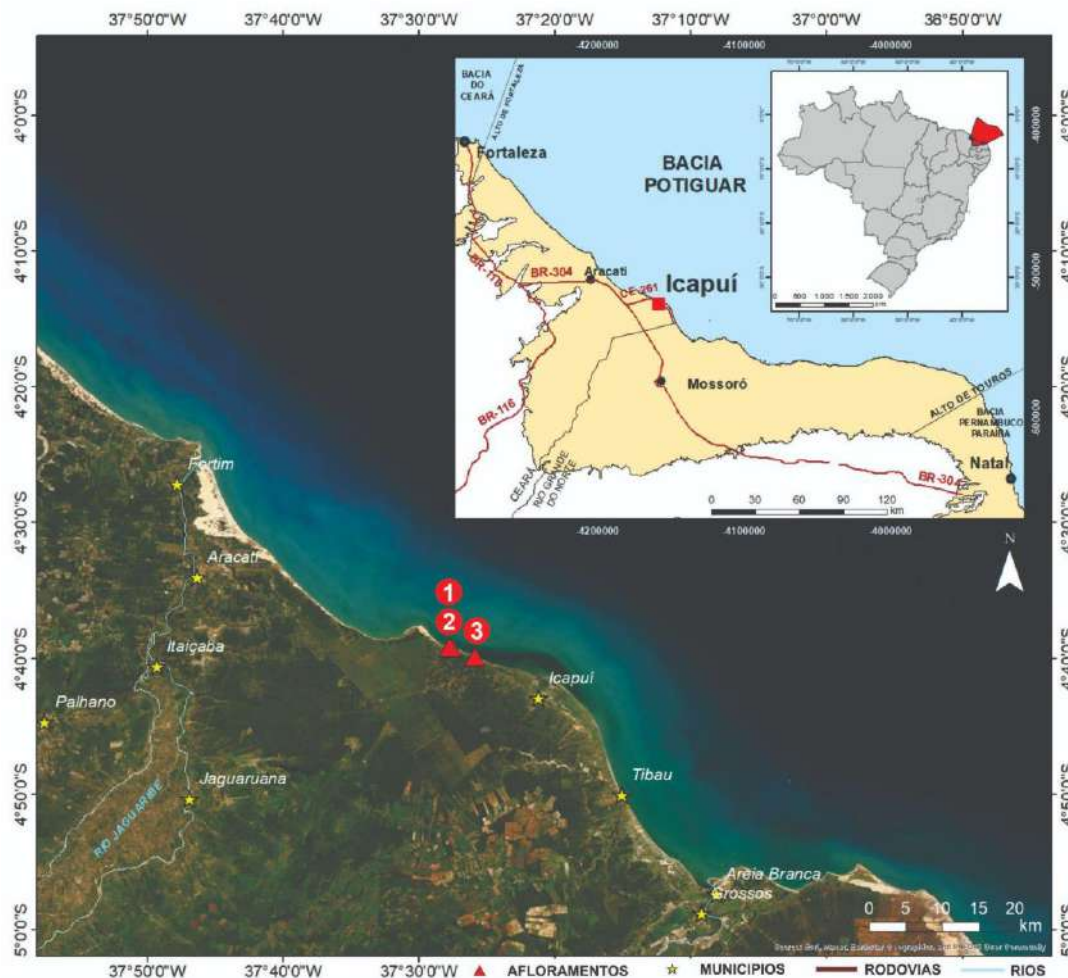


Figura 4.1: Localização e acessos da área de estudo. Em 1, 2 e 3 estão indicados os afloramentos das praias de Redonda, Peroba e Picos, respectivamente.

A região de estudo está posicionada em um alto estrutural (Alto de Icapuí), (Figura 4.2), muito semelhante a uma importante feição geomorfológica da Bacia Potiguar, que é o alto estrutural, chamado de “Domo do Mel”. Essas feições estão limitadas pelos principais vales fluviais da região, como o dos rios Rio Jaguaribe, Apodi-Mossoró e Piranhas-Açu, que seguem um *trend* NE-SW.

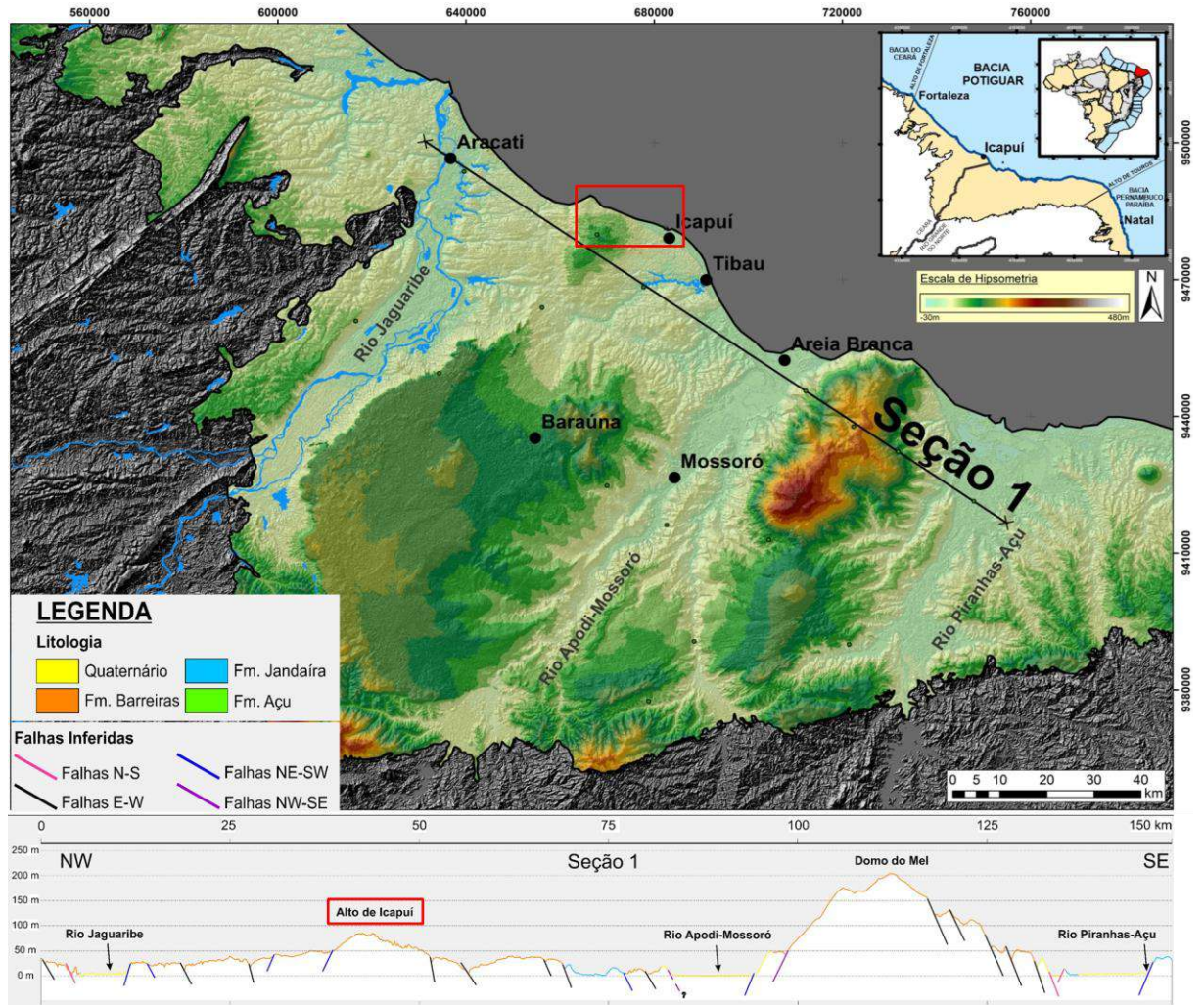


Figura 4.2: Mapa hipsométrico da porção oeste da Bacia Potiguar, com destaque para a Seção 1, transversal à região estudada, abrangendo a feição denominada de Alto de Icapuí e o Domo do Mel. (Elaborado por Gabriel Amon Silva). O polígono em vermelho indica a localização da área de estudo.

5. GEOLOGIA REGIONAL

5.1. Bacia Potiguar

A Bacia Potiguar localiza-se na região nordeste do Brasil, na porção leste da Margem Equatorial Brasileira. Sua área é de aproximadamente 48.000 km² e subdivide-se em uma porção emersa, que corresponde a 45% da área total da bacia, nos estados do Rio Grande do Norte (RN) e Ceará (CE), e uma porção submersa, que compõe 55% da área total, limitada pela isóbata de 2.000 metros. Seu limite a sul é o embasamento cristalino da Província Borborema; a leste é limitada pelo Alto de Touros; e a oeste pelo Alto de Fortaleza (Pessoa Neto *et al.*, 2007). Na região de estudo afloram rochas mesozoicas e cenozoicas, além de sedimentos quaternários (Figura 5.1).

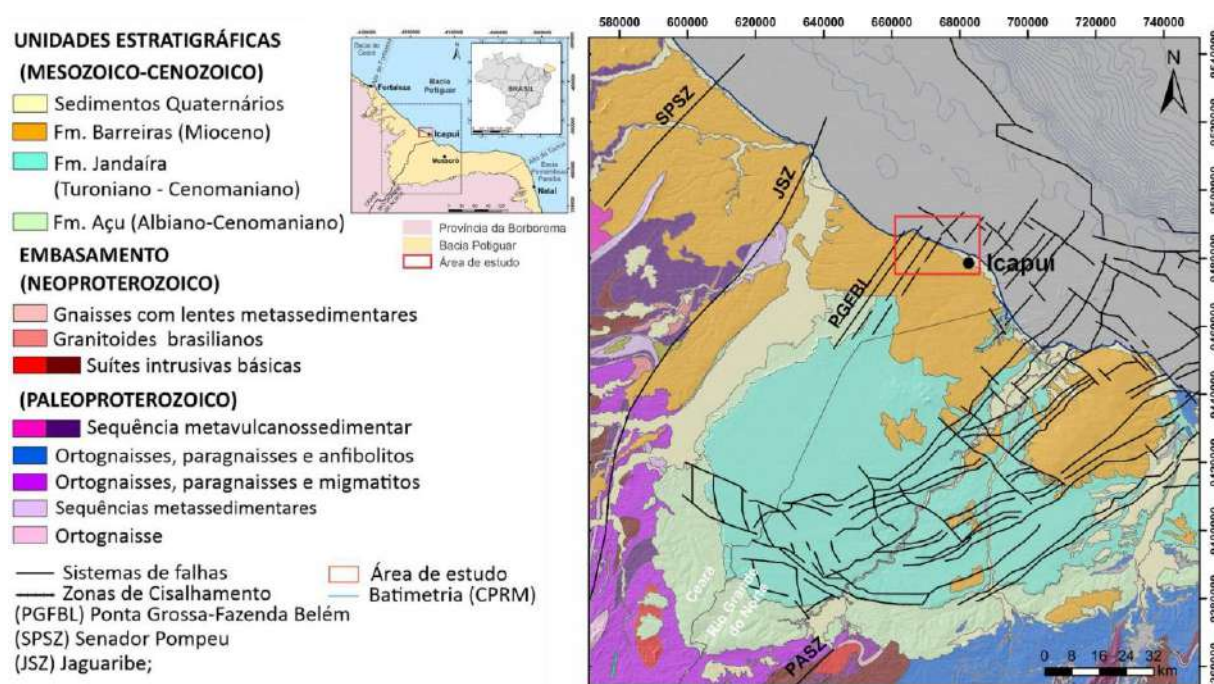


Figura 5.1: Mapa geológico da porção principal da Bacia Potiguar. (Angelim *et al.*, 2006, Castro & Bezerra (2015), Pinéo *et al.*, 2020), com a localização da área de estudo (polígono vermelho).

5.1.1. Domínios litológicos e estruturais do embasamento da Bacia Potiguar

O embasamento da Bacia Potiguar está relacionado à Província Borborema, que corresponde a um domínio geotectônico com aproximadamente 400.000 km², limitado ao sul pelo Cráton São Francisco, a oeste pela Bacia do Parnaíba e ao norte e leste pelas bacias da

margem continental. Representa um sistema orogênico complexo que foi afetado por deformação, metamorfismo e episódios magmáticos durante os eventos tectônicos do Brasileiro/Panafricano, no final do Neoproterozoico e início do Paleozoico. Consiste em unidades do Arqueano ao Proterozoico, amalgamadas ao longo de cinturões vulcanossedimentares, e entrecortadas por corpos graníticos neoproterozoicos (Castro *et al.*, 2012). Na região, estão presentes expressivas zonas de cisalhamento transcorrentes, que caracterizam os *trends* principais E-W e NE-SW, como os lineamentos de Patos e Pernambuco, que dividem a Província Borborema em três subprovíncias principais: Meridional, Transversal e Setentrional (Vauchez *et al.*, 1995; Castro *et al.*, 2012; Souza *et al.*, 2016).

A região de estudo está inserida na Subprovíncia Setentrional (Figura 5.2), que é dividida em cinco domínios tectônicos, de oeste para leste: Médio Coreau; Ceará Central; Jaguaribeano; Rio Piranhas-Seridó; e São José do Campestre (Medeiros *et al.*, 2017), compartimentados a partir de zonas de cisalhamento NE-SW, dentre elas: Sobral-Pedro II, Senador Pompeu, Portalegre e outras.

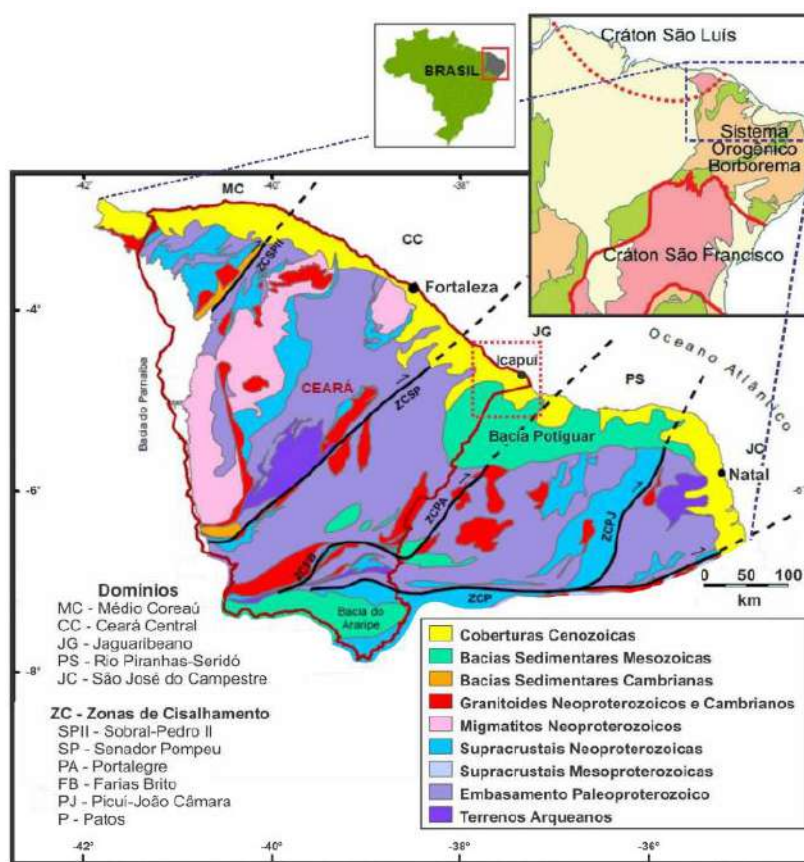


Figura 5.2: Subdivisão da Subprovíncia Setentrional da Província Borborema em domínios tectonoestratigráficos. Fonte: Pinéo *et al.* (2020). O polígono com linhas vermelhas tracejadas indica a região de Icapuí-CE, onde está localizada a área de estudo.

O embasamento da Bacia Potiguar abrange três destes domínios: Jaguaribeano, no extremo oeste; Rio Piranhas–Seridó, na porção central; e São José do Campestre, a leste (Angelim *et al.* 2006). Além das principais zonas de cisalhamento destacadas, na área de estudo estão presentes também outras de menor expressão: Jaguaribe e Ponta Grossa-Fazenda Belém, região onde se concentram os afloramentos estudados (Figura 5.1). O embasamento é composto por rochas paleoproterozicas e neoproterozoicas, constituídas predominante por gnaisses e migmatitos, além de anfibolitos, rochas calcissilicáticas, quartzitos, filitos e xistos.

5.1.2. Evolução Tectônica e Estratigráfica da Bacia Potiguar

A origem da Bacia Potiguar está relacionada à evolução da Margem Equatorial Brasileira e, portanto, à fragmentação do Gondwana Oeste, a partir do Jurássico Inicial (Matos, 1992, Matos 2000), que levou à formação do Atlântico Sul e Equatorial.

Como uma resposta aos esforços associados ao início da ruptura do supercontinente Gondwana, desenvolveu-se o Sistema de Riftes do Nordeste Brasileiro (SRNB), localizado na interseção entre as margens Leste e Equatorial atlânticas, no qual a Bacia Potiguar está inserida (Matos, 1992). Além desta, outras bacias compõem as bacias de interior cratônico do SRNB: Recôncavo, Tucano-Jatobá, Rio do Peixe, Araripe, Sergipe-Alagoas, Iguatu, Lima Campos. A evolução do SRNB é considerada complexa, uma vez que esse sistema se localiza na região onde ocorre a mudança de orientação da linha de costa e, portanto, durante o evento de abertura do oceano Atlântico, comportou esforços relacionados a esses dois contextos tectônicos.

A geometria da Bacia Potiguar é controlada pela reativação de antigas zonas de cisalhamento e estruturação pretérita do embasamento, com direção predominantemente NE-SW e E-W (Matos, 1992), que na porção emersa condiciona os *hemigrabens*, altos internos e *grabens* assimétricos que compõem o Rifte Potiguar.

Segundo Matos (1992), ocorreram três importantes estágios tectônicos na evolução da fase rifte do SRNB, denominados de Sin-Rift I, Sin-Rift II e Sin-Rift III. Destes, apenas os dois últimos estariam relacionados com a evolução do Rifte Potiguar, uma vez que o Sin-Rift I, do final do Jurássico, não tem registro sedimentar na Bacia Potiguar, sendo considerado como uma fase inicial do estiramento crustal (Chang *et al.*, 1988; Conceição *et al.*, 1988). Associado a esse estágio, há apenas a intrusão de diques máficos E-W no embasamento Pré-Cambriano, que registra o magmatismo Rio Ceará-Mirim.

O estágio Sin-Rift II, do Neocomiano ao Eobarremiano, é considerado aquele com a configuração mais importante do SRNB e com preenchimento mais expressivo, relacionado ao início da abertura do Atlântico Sul, por meio de esforços distensivos de direção NW-SE (Figura 5.3a). Toda a evolução da porção emersa do Rifte Potiguar se desenvolveu durante essa fase, com a formação das principais feições de *hemigrabens* assimétricos NE-SW, separados por altos internos do embasamento por meio de zonas de transferência NW-SE (Matos, 1992).

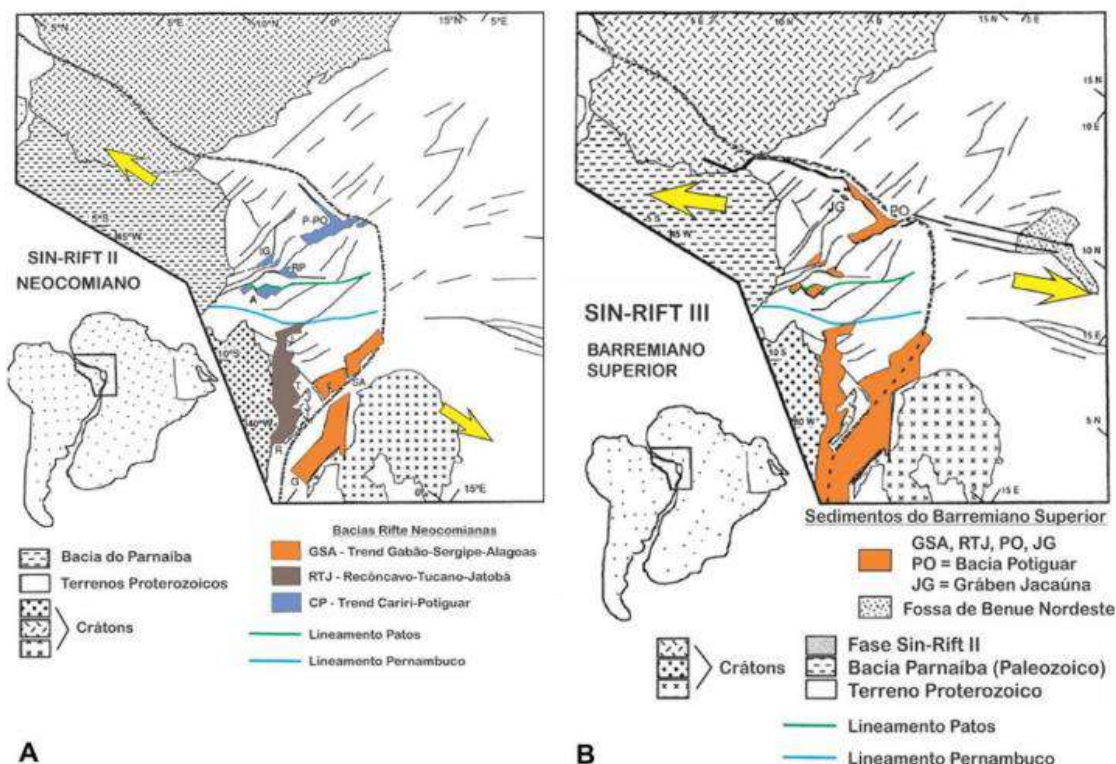


Figura 5.3: A) Estágio Sin-Rift II na evolução do SRNB. Nesse contexto, a Bacia Potiguar (P-PO) está localizada no extremo nordeste do Brasil, fazendo parte do *trend* Cariri-Potiguar. B) Estágio Sin-Rift III na evolução do SRNB. (modificado de Matos, 1992 in Araújo, 2023).

O Sin-Rift III, do Neobarremiano, representa o principal estágio de estiramento na Margem Leste (Chang *et al.*, 1988), onde o processo de ruptura crustal na porção emersa da Bacia Potiguar é abortado e a deformação principal se inicia na Margem Equatorial (Figura 5.3b). Essa fase marca uma mudança na cinemática do rifteamento, reorientando de NW-SE para E-W os esforços distensivos, e introduzindo os esforços transtrativos dextrais na bacia.

Para Matos (2000), os processos extensionais convencionais não conseguem explicar a cinemática e a geometria do rifte das bacias equatoriais do Atlântico Sul. O autor propõe, então, uma nova concepção sobre a evolução da Bacia Potiguar, associando-a à evolução da Margem Equatorial Atlântica. Enquanto a Margem Oriental Brasileira e a porção central da África mostram um estágio rifte mais longo (Neocomiano-Barremiano), na Margem Equatorial esse estiramento foi mais curto. E, embora a evolução polifásica tenha ocorrido ao longo do Aptiano-

Cenomaniano, somente no Aptiano um estágio de distensão oblíqua é responsável por uma ruptura generalizada do Atlântico Equatorial. O autor propõe que a evolução tectônica da Margem Equatorial é melhor compreendida considerando três estágios: Pré-Transformante; Sin-Transformante e Pós-Transformante.

O estágio Pré-Transformante pode ser subdividido em dois ciclos, Pré-Transtração (pré-Barremiano tardio) e Sin- Transtração (do Barremiano tardio ao Aptiano), que gerou uma série de bacias *en echelon* com *trend* NW-SE ao longo da Margem Equatorial. O estágio Sin-Transformante, do Albiano ao Cenomaniano, marca a formação de núcleos de espalhamento oceânico e o processo de separação, conforme aumentava o afinamento crustal causado pela transtração. Isto definiu uma fronteira litosférica entre a África e a América do Sul. E, por fim, o estágio Pós-Transformante, do Cenomaniano ao Recente, caracterizado por um típico contexto de margem passiva, alcançado após o término dos efeitos termiais de zonas de espalhamento e da influência tectônica de zonas transformantes.

Para Pessoa Neto *et al.* (2007), a evolução tectônica da Bacia Potiguar pode ser sintetizada em quatro fases: Rifte I, Rifte II, Pós-Rifte e Drifte. A fase Rifte I, do Neoberriasiano ao Eobarremiano, é marcada por um regime de estiramento crustal, formando *hemigrabens* assimétricos e altos internos de direção geral NE-SW, e um transporte tectônico predominante na direção NNW. A fase Rifte II, do Neobarremiano ao Eoaptiano, é marcada por uma grande mudança na cinemática do rifte, causada pela implantação de um sistema transcorrente na Margem Equatorial. A direção de transporte muda de NNW para E-W, a partir de movimentos transtrativos dextrais, o que causou um deslocamento do eixo de rifteamento da porção emersa para a porção submersa. A fase Pós-Rifte, do Neoaptiano ao Eoalbiano, corresponde ao momento que sucede o processo de afinamento litosférico e crustal (fases Rifte I e Rifte II), caracterizando-se por uma subsidência termal e pela mudança gradativa dos depósitos sedimentares, de continentais para marinhos. A fase Drifte, do Albiano ao Recente, é marcada por taxas mais lentas de subsidência, compreendendo toda a sedimentação marinha ocorrida a partir do Albiano inicial.

Araújo (2023) apresentou uma correlação entre os eventos de evolução tectônica da Bacia Potiguar de acordo com as fases propostas por Matos (1992), Matos (2000) e Pessoa Neto *et al.* (2007), apresentada na figura 5.4

TEMPO GEOLÓGICO	MATOS (1992)	MATOS (2000)	PESSOA NETO ET AL. (2007)	PRINCIPAIS EVENTOS NA BACIA POTIGUAR
Cenozoico				
Mesozoico Cretáceo Final Maastrichtiano Campaniano Santoniano Coniaciano Turoniano Cenomaniano Inicial Albiano Aptiano Barremiano Hauteriviano Valanginiano Berriasiano Jurássico Final		PÓS-TRANSFORMANTE	DRIFTE	Subsidência térmica e deriva continental. Sequência marinha transgressiva seguida de sequência regressiva
		SIN-TRANSFORMANTE		
		SIN-TRANSFORMANTE	PÓS-RIFTE	Início da subsidência termal. Passagem gradativa de depósitos continentais para marinhos
	SIN-RIFT III	SIN-TRANSTRAÇÃO	RIFTE II	Estiramento E-W, deformação transtraccional dextral, formação de grábens NW. Sedimentação na porção submersa
	SIN-RIFT II	PRÉ-TRANSTRAÇÃO	RIFTE I	Estiramento NNW, formação de estruturas distensivas NE, estruturas de transferência NW e magmatismo correlacionado ao Evento Rio Ceará-Mirim. Sedimentação na porção emersa
	SIN-RIFT I			Magmatismo Rio Ceará-Mirim

Figura 5.4: Comparação dos eventos reportados por Matos (1992), Matos (2000) e Pessoa Neto *et al.* (2007) para a evolução tectônica da Bacia Potiguar. Araújo (2023).

De acordo com Pessoa Neto *et al.* (2007), o registro estratigráfico da Bacia Potiguar pode ser subdividido em três supersequências, diretamente ligadas às fases de evolução tectônica (Figura 5.5): Rifte, do Eocretáceo; Pós-Rifte, de idade Alagoas e Drifte, do Albiano ao Recente.

O preenchimento da bacia se inicia com a supersequência Rifte (associada às fases Rifte I e Rifte II), formada por depósitos lacustres, flúvio-deltaicos, leques deltaicos e flúvio-lacustres da Formação Pendência (porção emersa) e Formação Pescada (porção submersa ou em *grabens* isolados sobre a porção *onshore*).

A supersequência Pós-rifte, composta por unidades sedimentares flúvio-deltaicas e lacustres, leques aluviais e fandelas da Formação Alagamar, registra a passagem gradativa de um contexto deposicional continental para marinho, correspondendo à fase tectônica de mesmo nome.

A supersequências Drifte, depositada durante a fase tectônica de mesmo nome, associa-se a um ambiente dominado por subsidência térmica e deriva continental. É caracterizada por duas sequências: uma flúvio-marinha transgressiva (Eoalbiano ao Eocampaniano) e uma marinha regressiva (Neocampaniano ao Holoceno). A sequência transgressiva é representada pelas formações Açu, Ponta do Mel, Quebradas e Jandaíra, compostas por unidades

siliciclásticas e carbonáticas. Essas unidades foram cobertas pela sequência regressiva, representada pelas formações Ubarana (restrita à porção submersa da bacia), que se interliga lateralmente à sequência de carbonatos da Formação Guamaré. Na porção emersa é representada por leques costeiros e sistemas fluviais com influência marinha das formações Barreiras e Tibau e por sedimentos quaternários.

A Formação Barreiras é uma unidade litoestratigráfica terrígena encontrada em uma ampla faixa ao longo do litoral brasileiro, desde o Rio de Janeiro até o Amapá (Suguio & Nogueira, 1999), sendo considerada um importante marco estratigráfico e estrutural do Cenozoico no Brasil. Esta unidade é caracterizada predominantemente por arenitos quartzosos, intercalados com conglomerados e, em menor quantidade, pelitos. Os depósitos desta unidade, além de serem bastante pedogenizados e ferruginizados, apresentam coloração variável de esbranquiçado/amarelado até tons de vermelho e roxo. No nordeste brasileiro, essa unidade é interpretada como depósitos de sistemas fluviais (Sousa, 2002; Araujo *et al.*, 2006; Sousa *et al.*, 2014) ou como depósitos de origem marinha (Rossetti *et al.*, 2013).

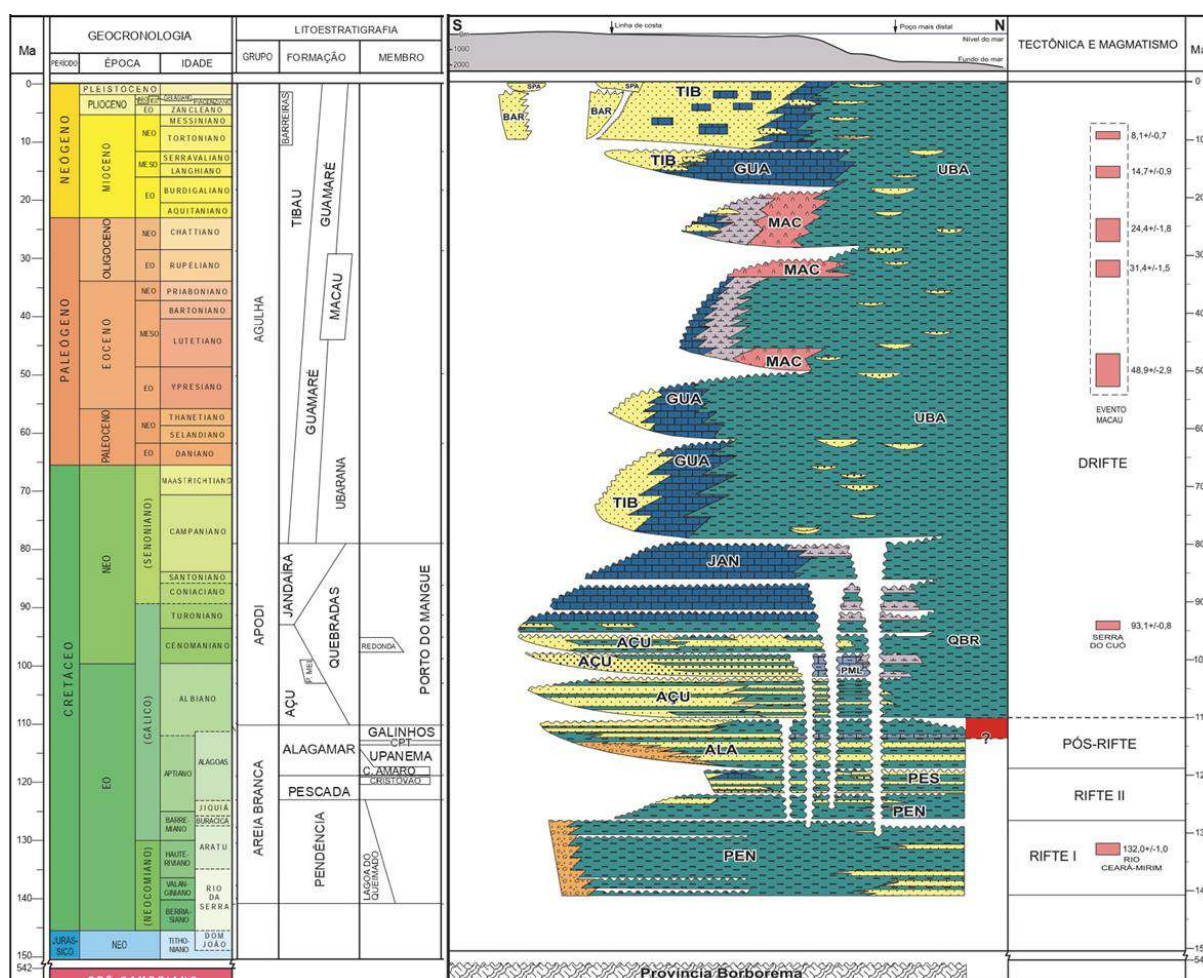


Figura 5.5: Coluna litoestratigráfica da Bacia Potiguar, com as fases tectônicas e os eventos magmáticos que ocorrem na bacia. Fonte: Pessoa Neto *et al.* (2007)

Com base em datação (U-Th)/He, Lima (2008) atribuiu à Formação Barreiras uma idade do Mioceno Médio, com idade máxima de 22 Ma e mínima de 17 Ma. Dessa forma, se a Formação Barreiras estiver afetada por deformações tectônicas, pode-se aferir que se trata de uma deformação miocênica à pós-miocênica, como é visto em estudos na Bacia Potiguar (Bezerra & Vita-Finzi, 2000; Nogueira *et al.*, 2006; Moura-Lima *et al.*, 2011; Bezerra *et al.*, 2020) e será discutido no item a seguir.

5.1.3. Tectônica Cenozoica

Os estágios pós-rifte das bacias da Margem Atlântica Brasileira são tradicionalmente considerados períodos de quiescência tectônica (Moura-Lima *et al.*, 2011; Bezerra *et al.*, 2020). Contudo, muitos estudos têm apresentado evidências de atividade tectônica após o estágio rifte da margem continental, como os desenvolvidos por Bezerra & Vita-Finzi (2000), Lima (2010), Bezerra *et al.* (2020) e Rossetti *et al.* (2022), por exemplo, para bacias sedimentares das regiões nordeste e norte do Brasil. Esses estudos indicam que muitas áreas de margens passivas ou supostamente estáveis apresentam evidências de estruturas deformacionais desde o Cretáceo Final até o Quaternário, que podem ser relacionadas à inversão tectônica nos estágios pós-rifte.

Esse contexto de reativação é impulsionado por mecanismos tectônicos em escala de placa, resultantes dos esforços atuantes na Cordilheira dos Andes, bem como do espalhamento oceânico da Dorsal Meso-Atlântica. Esses processos geram tensões compressivas que se propagam para o interior da placa Sul-Americana, provocando a reativação de estruturas preexistentes, que pode ocasionar soerguimentos e a formação de relevos dômicos em diversas bacias, dentre elas, a Bacia Potiguar. Maia & Bezerra (2014), por exemplo, apontam a inversão tectônica na porção emersa da Bacia Potiguar como o processo que originou altos topográficos como a Serra do Mel e a Serra de Mossoró, que influenciam a migração dos canais fluviais.

Para a Bacia Potiguar, de acordo com Bezerra *et al.* (2020), são considerados dois campos de paleotensões atuantes a partir da fase pós-rifte (Figura 5.6): o primeiro campo (SF1), do Albiano ao Mioceno médio, é associado a uma tensão horizontal máxima (S_H) N-S e tensão horizontal mínima (S_h) E-W, correspondendo a um campo de tensões *strike-slip* (podendo localmente ocorrer um regime compressivo); e o segundo campo (SF2), do Mioceno médio ao Recente, reorientou as tensões quase que ortogonalmente ao campo de esforços do evento SF1, com S_H variando de E-W a NW-SE e S_h variando de N-S a NE-SW. Neste contexto, os depósitos da Formação Barreiras, de idade miocênica, seriam condicionados pelo evento SF1 tardio e

deformados pelo evento SF2. O evento SF2 também coincide com o campo de tensões atual na região. Na porção leste da bacia, o SF2 apresenta um S_H com tendência E-W e S_h com uma tendência N-S; nas partes central e ocidental da bacia, esses eixos de tensão giram no sentido horário, onde S_H tende para WNW-ESE e S_h tende para NNE-SSW (Bezerra *et al.*, 2023).

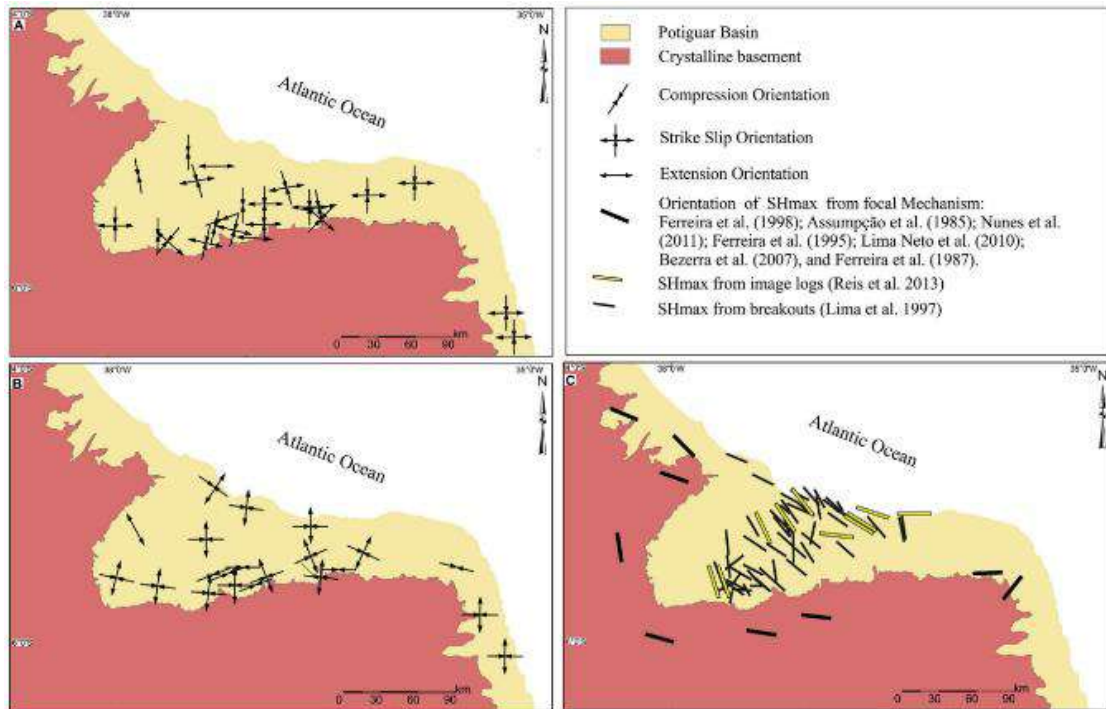


Figura 5.6: Campos de esforços tectônicos atuantes na região da Bacia Potiguar no Cenozoico e sumário das tensões principais. A) SF1; B) SF2; C) Campo de tensões atual. Bezerra *et al.* (2020).

Na região de Icapuí (CE), têm sido reconhecidos, como parte dos resultados obtidos pelo projeto realizado em cooperação entre a UFRJ e a PETROBRAS, no qual o presente estudo está inserido, quatro conjuntos de dados de paleotensão. Dois conjuntos indicam transcorrência (Figura 5.7): o primeiro com uma compressão NW-SE e distensão NE-SW, sendo descritas falhas normais NW-SE, falhas oblíquas normais dextrais NW-SE a E-W, falhas sinistrais NNW-SSE a NNE-SSW, e falhas dextrais reversas NE-SW a E-W; o segundo conjunto com uma compressão E-W e distensão N-S, associado a falhas normais E-W, falhas oblíquas sinistrais normais E-W a NW-SE, e falhas normais dextrais NE-SW a E-W. Dois conjuntos indicam distensão (Figura 5.8): um caracterizado por uma distensão NW-SE, com falhas normais NE-SW; e outro por uma distensão E-W, com falhas normais N-S.

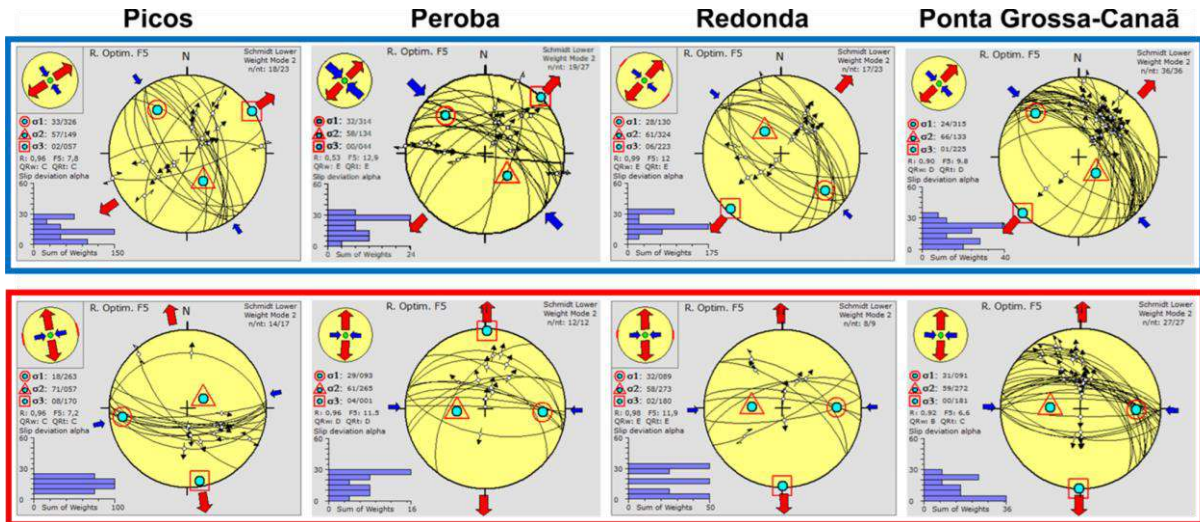


Figura 5.7: Conjuntos de paleotensão indicando transcorrência, para quatro afloramentos estudados no projeto de cooperação entre a UFRJ e a PETROBRAS em que o presente estudo está inserido. Em azul, o conjunto com compressão NW-SE e distensão NE-SW; em vermelho, o conjunto com compressão E-W e distensão N-S.

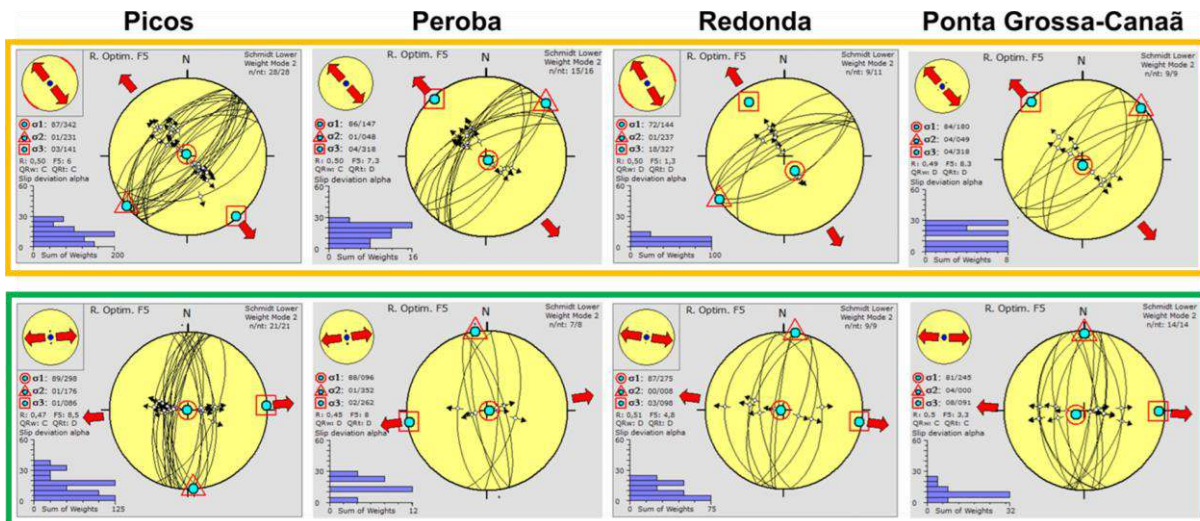


Figura 5.8: Conjuntos de paleotensão indicando distensão, para quatro afloramentos estudados no projeto de cooperação entre a UFRJ e a PETROBRAS em que o presente estudo está inserido. Em amarelo, o conjunto com distensão NW-SE; em verde, o conjunto com distensão E-W.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

6.1. Materiais

Os materiais utilizados para a elaboração deste trabalho foram produzidos no âmbito do projeto de pesquisa realizado em cooperação entre a UFRJ e a PETROBRAS, sendo:

- seções estratigráficas-estruturais de três afloramentos da Formação Barreiras em falésias na região costeira de Icapuí (CE), elaboradas a partir da interpretação de fotomosaicos (cuas fotografias foram obtidas a partir da base do afloramento) no software *CorelDraw*, com posterior controle estratigráficos e estrutural em trabalho de campo, e selecionadas por apresentarem graus variados de deformação tectônica;
- dados estruturais e de paleotensão para cada um dos afloramentos.

Os afloramentos estudados estão localizados nas praias de Picos, Peroba e Redonda. O afloramento Praia de Picos (Figura 6.1) possui orientação S60E-N60W, com aproximadamente 370 metros de comprimento e altura variando de 16 a 20 metros (por conta da sua extensão, a seção será dividida em cinco setores, para melhor descrição das estruturas). O afloramento Praia de Peroba (Figura 6.2) apresenta-se intensamente deformado, com aproximadamente 100 metros de comprimento e 17 metros de altura, orientado na direção S70E-N70W. Por fim, o afloramento Praia de Redonda (Figura 6.3) é caracterizado por uma falésia também intensamente deformada, de orientação N80E-S80W, com dimensões aproximadas de 100 metros de comprimento e 20 metros de altura. Este afloramento está localizado em continuidade ao afloramento da Praia de Peroba, sendo separado deste por uma porção intensamente ferruginizada e fraturada.

Os diagramas de paleotensão foram produzidos pela equipe do projeto a partir de pares de falha/estria, tratados pelo método dos diedros retos (Angelier & Mechler, 1977).

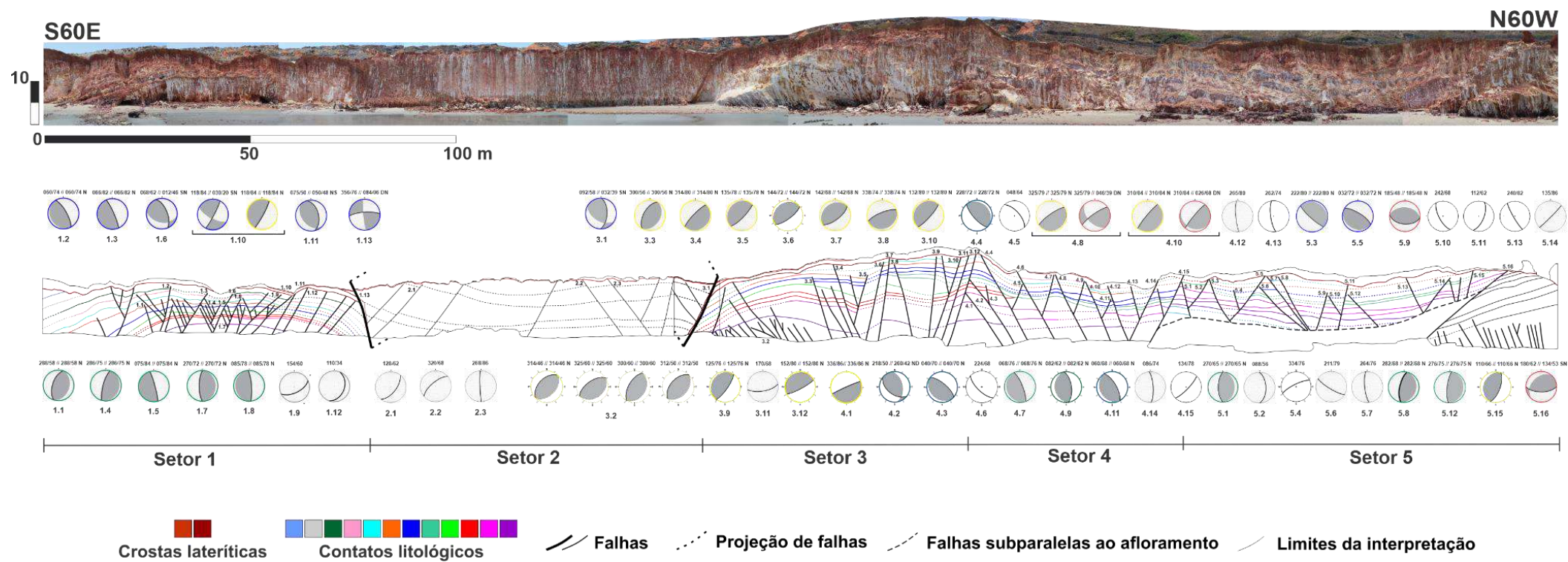


Figura 6.1: Seção estratigráfica-estrutural do afloramento Praia de Picos, com os estereogramas referentes aos principais planos de falha medidos. Os diedros na cor cinza contêm σ_1 .

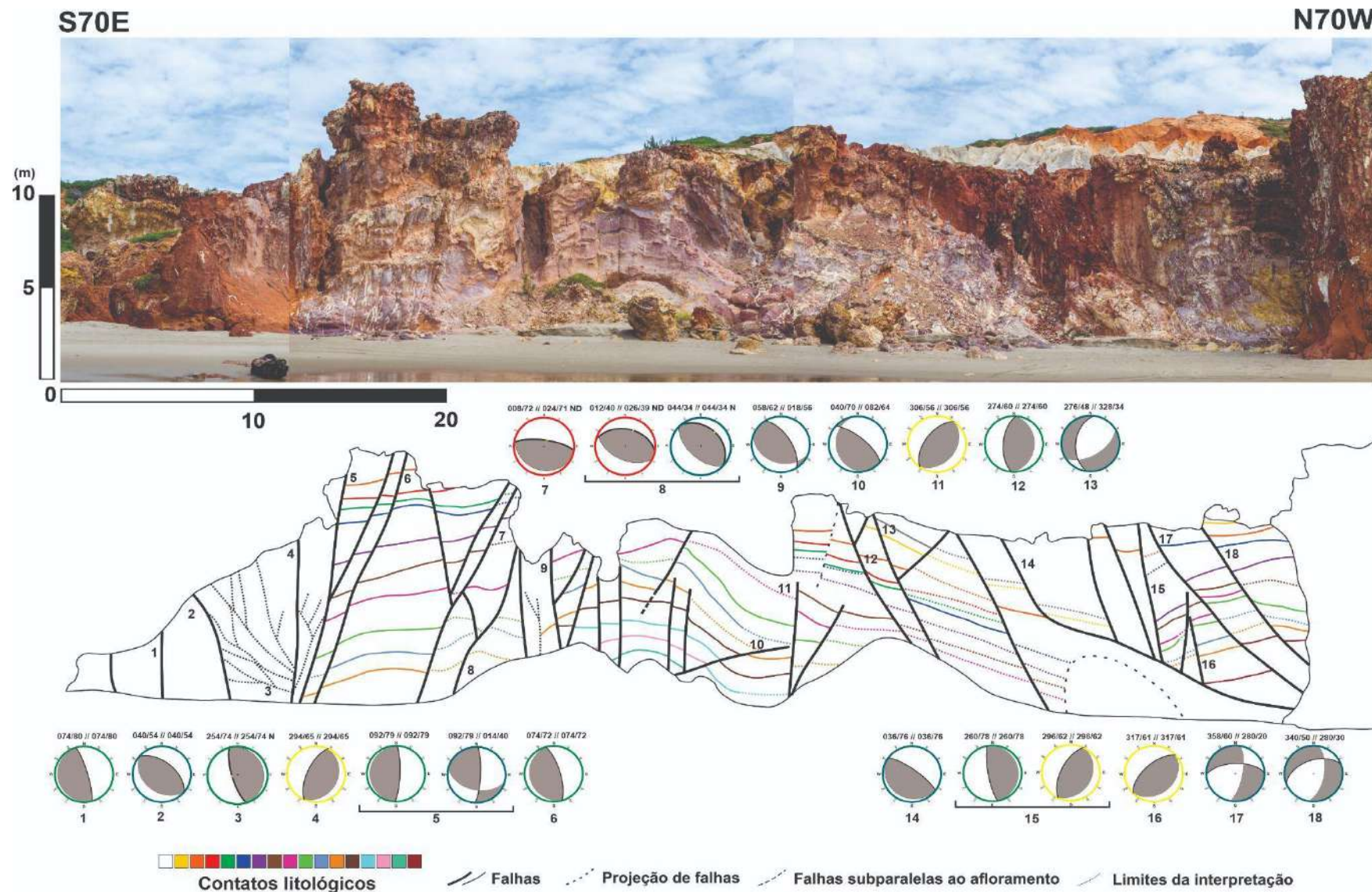


Figura 6.2: Seção estratigráfica-estrutural do afloramento Praia de Peroba, com os estereogramas referentes aos principais planos de falha medidos. Os diedros na cor cinza contêm σ_1 .

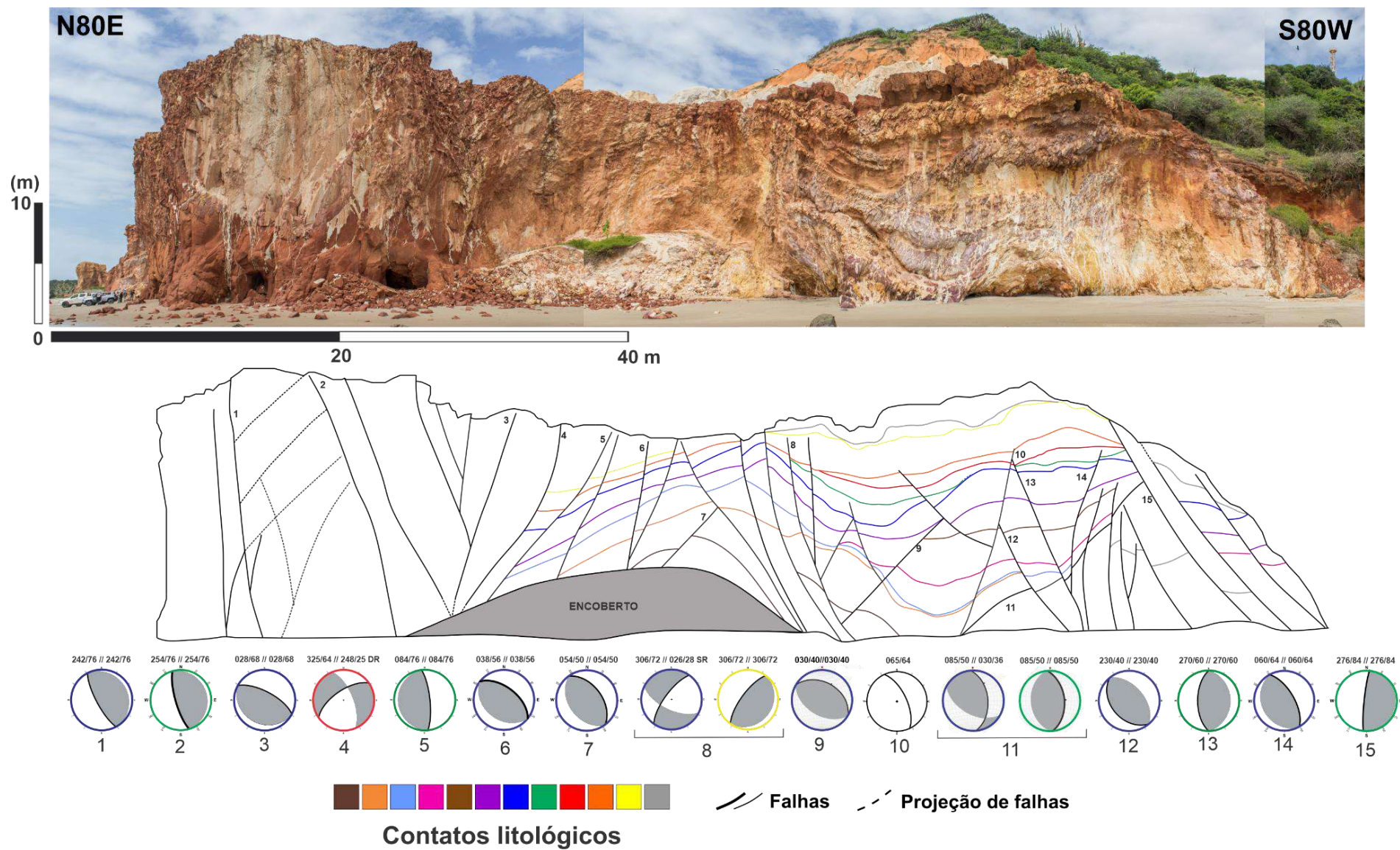


Figura 6.3: Seção estratigráfica-estrutural do afloramento Praia de Redonda, com os estereogramas referentes aos principais planos de falhas medidos. Os diedros na cor cinza contêm σ_1 .

6.2. Métodos

A partir dos dados mencionados no item anterior foi realizada uma análise dos padrões deformacionais observados nos afloramentos investigados. Foram utilizados critérios como a geometria dos corpos sedimentares, tipos de estruturas de deformação, e a orientação e a cinemática dos planos de falha. Os dados de paleotensão foram importantes para organizar as estruturas de deformação com relação aos eventos tectônicos geradores. Buscou-se correlacionar os padrões observados com aqueles descritos no capítulo de “Base Conceitual”, além de realizar uma correlação com o contexto neotectônico da Bacia Potiguar.

Posteriormente, foi realizada a restauração estrutural 2D da seção estratigráfica-estrutural Praia de Picos, por ser um dos afloramentos com melhores exposições de camadas e estruturas tectônicas, bem como por sua grande extensão lateral. Buscou-se analisar os estágios deformacionais e validar a interpretação estrutural proposta no presente estudo.

Antes da restauração ser iniciada, todas as falhas identificadas na seção foram numeradas (Figura 6.4), sendo este número composto pelo setor em que a falha está localizada e a sua posição dentro desse setor, de Leste para Oeste (por exemplo: a falha 4.1, é a primeira falha localizada no Setor 4, de Leste para Oeste). Os horizontes estratigráficos foram nomeados de acordo com a cor pela qual eles estão representados na seção estratigráfica-estrutural, com exceção do horizonte que marca o topo da seção, que é um limite importante para a interpretação, nomeado como “Crosta Ferruginosa”.

Para a etapa de restauração estrutural foi utilizado o *software* Recon, desenvolvido pela parceria entre o Tecgraf/PUC-Rio e a PETROBRAS, adotando-se uma abordagem com a preservação geométrica da área e a utilização dos horizontes estratigráficos como marcadores temporais para identificar pulsos tectônicos distintos. Esse sistema utiliza-se da modelagem cinemática e geométrica baseada em estrutura de dados topológicos e oferece ferramentas essenciais para a restauração estrutural, permitindo a reconstrução da geometria original das camadas sedimentares e proporcionando uma compreensão mais precisa dos mecanismos tectônicos envolvidos em eventos deformacionais (Santi, 2002).

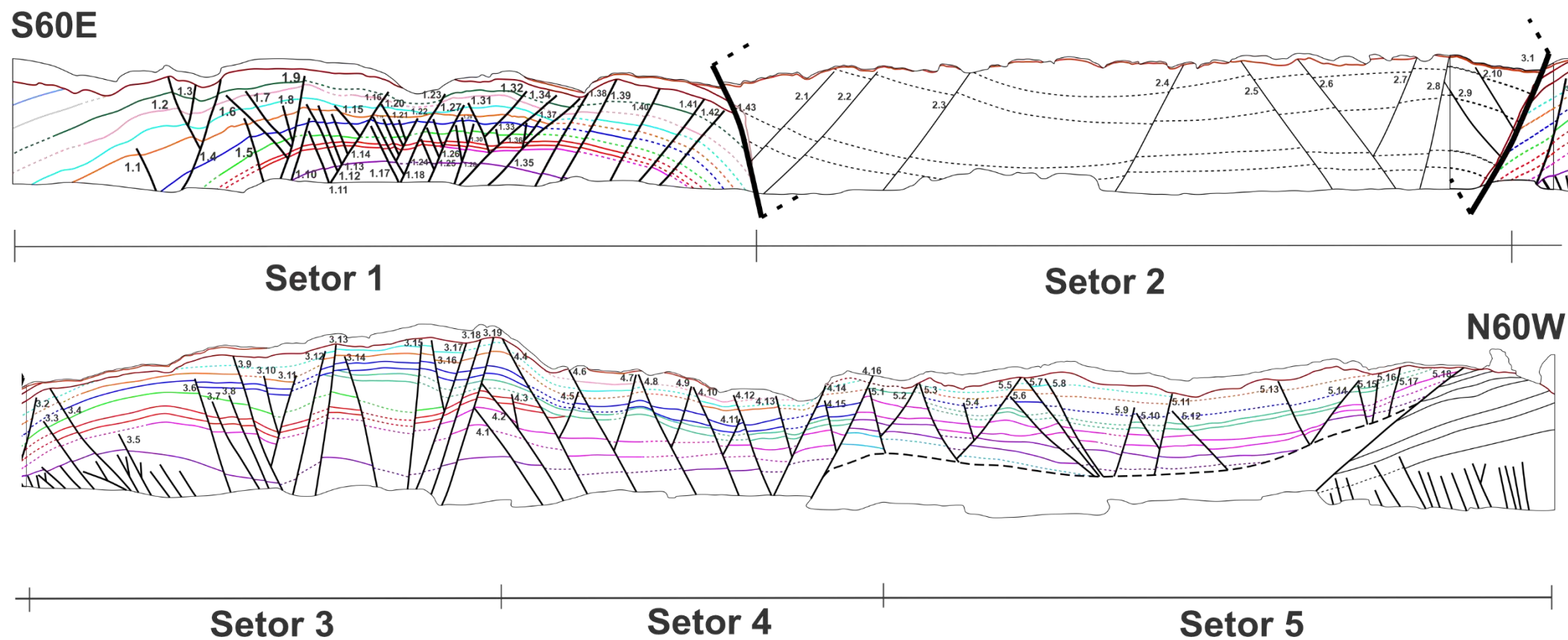


Figura 6.4: Seção estratigráfica-estrutural do afloramento Praia de Picos, com todas as falhas presentes na seção numeradas (número composto pelo setor em que a falha está localizada e a sua posição dentro desse setor, de Leste para Oeste).

O *software* Recon conta com uma série de ferramentas e abas. A aba “Projeto” representa o módulo do programa onde são realizadas as operações iniciais para a criação do modelo, tais como: criação de um projeto, com uma ou mais seções geológicas; definição do sentido cronológico (restauração ou simulação) e das unidades do modelo (metros ou quilômetros), dentre outros parâmetros. Na aba “Atributo” são inseridos e modificados os atributos do modelo que serão usados na restauração, como a tabela geológica com os horizontes e suas idades relativas. Na aba “Modelo” está o conjunto de ferramentas para manipular a seção geológica, desde a digitalização e edição das informações que a definem geometricamente até georreferenciamento, alteração de dados de entrada, troca de cores das camadas etc. Na aba “Malha” é feita a discretização do modelo geológico baseada em subdivisão planar, que divide um plano em arestas, vértices e faces, criando, então, uma malha. Na aba “Controles”, estão as ferramentas que irão ajudar a mensurar e ajustar deslocamentos, posição de falhas e horizontes. Na aba “Transformações” estão todas as ferramentas para realizar as restaurações e simulações no programa.

A criação da seção foi feita a partir da importação daquela elaborada inicialmente no *software CorelDraw*. A partir do editor gráfico, foram identificados os atributos contidos na seção (falhas, limites de seção, horizontes estratigráficos, etc.) e aos horizontes foi associada uma tabela com suas idades geológicas relativas. A partir do reconhecimento das regiões que são formadas pela inserção das linhas, são definidas camadas de forma automática (Santi, 2002). Além disso, o sistema permite a geração de módulos (Figura 6.5), que são agrupamentos de faces, arestas e vértices, que se tornam uma subdivisão planar à parte, e passam pelo mesmo movimento ou deformação em conjunto, podendo se realizar operações entre módulos.

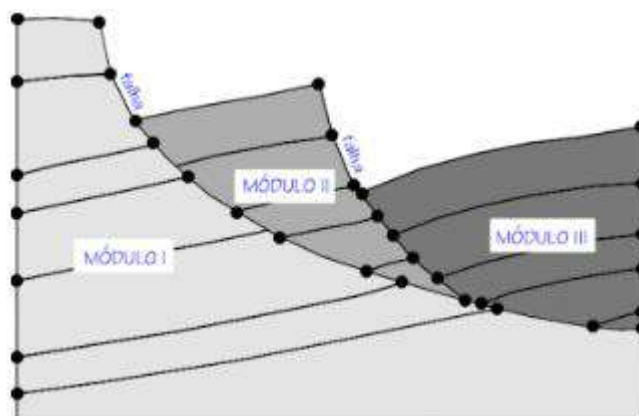


Figura 6.5: Subdivisão de uma seção dividida em módulos (Santi, 2002).

Para a aplicação das transformações geométricas, é necessário que os módulos sejam definidos, sobre os quais as transformações serão aplicadas. Dentre as diversas ferramentas de transformação que o programa disponibiliza, para este trabalho foi utilizada predominantemente a “Move Sobre Falha (MSF)” (Figura 6.6), que se destina a restaurar falhas geradas por movimentações verticais dos blocos, podendo ser falha normal ou falha reversa. É requerida apenas a geometria da falha sobre a qual haverá a movimentação, um ponto origem (P_0) de referência sobre o módulo a ser movido, um ponto destino (P_1) sobre a linha de destino (falha) e o ângulo de cisalhamento. Essa ferramenta não é a mais indicada para restaurar falhas transcorrentes, por conta da movimentação lateral dos blocos que ocorre nesse tipo de estrutura, podendo implicar em uma variação de espessura das camadas. Mesmo com essa limitação, a ferramenta realça elementos geométricos que podem ser associadas a deformação transcorrente.

Para realizar a restauração, os horizontes estratigráficos foram utilizados como marcadores temporais para identificar pulsos tectônicos. O processo de restauração considerou o rejeito no topo das camadas (um horizonte estratigráfico), respeitando a ordem cronológica delas, iniciando pelas mais jovens, localizadas no topo, e avançando para as mais antigas, posicionadas em direção à base da seção. Além disso, o processo de restauração foi realizado para cada falha de forma individual, ou seja, para cada camada foram ajustados os rejeitos do seu topo unitariamente para cada uma das falhas que afetam esse horizonte. Somente após o topo de determinada camada estar completamente restaurado, ou seja, não estar deslocado, a camada imediatamente abaixo pode ser restaurada.

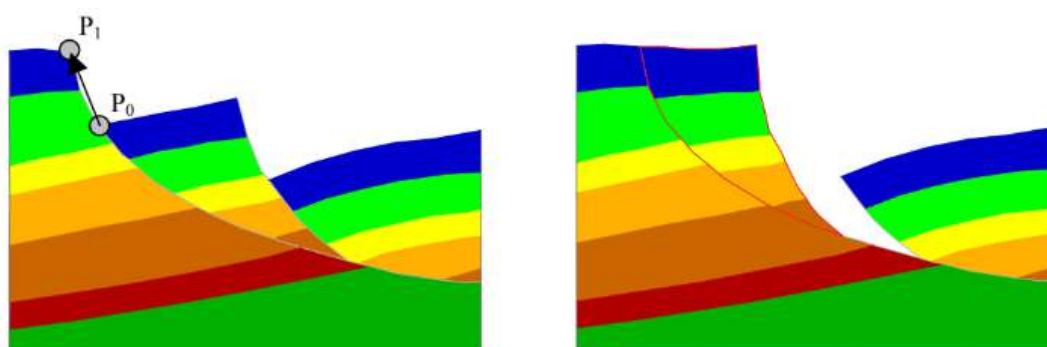


Figura 6.6: Exemplo de restauração com o “Move sobre falha geométrico” (Santi, 2002). P_0 indica o ponto de referência sobre o módulo a ser movido e P_1 é o ponto sobre a linha destino. Esses dois pontos definem o vetor que rege a parcela de translação.

Para ser mais ágil e precisa, a restauração estrutural contou com uma etapa preparatória, por conta do elevado número de informações contidas na seção original. Essa etapa consistiu em um tratamento estatístico para realizar uma simplificação da seção estratigráfica-estrutural,

considerando-se as principais falhas, ou seja, aquelas que afetam a maior parte dos horizontes estratigráficos e que apresentam maior rejeito, bem como os horizontes estratigráficos mais afetados pelas falhas e contínuos lateralmente ao longo da seção, visando identificar os mais representativos dos tempos-chave da história evolutiva da deformação.

Essa simplificação foi realizada através de um *software* de planilhas eletrônicas (Excel), utilizando-se da ferramenta de tabela dinâmica, que permite fazer comparações e identificar padrões e tendências. Foi realizada a análise separadamente para os setores 1, 3, 4 e 5 do afloramento Praia de Picos, enquanto o Setor 2 foi excluído dessa análise por apresentar poucas informações estratigráficas e estruturais, não demandando simplificação.

No software Excel, foram criadas duas abas para cada um dos setores analisados, uma destinada à inserção dos dados e outra ao tratamento e análise das informações.

Na aba da entrada de dados, as falhas foram dispostas nas linhas da planilha, enquanto os horizontes estratigráficos nas colunas. Sempre que uma falha afetava determinado horizonte, era registrado “SIM” na célula corresponde à interseção da falha com o horizonte em questão. A partir dessa organização, foi possível identificar os principais horizontes afetados por falhas, bastando observar em quais colunas havia o maior número de células preenchidas com “SIM”.

A segunda aba foi utilizada para tratamento dos dados e para a identificação das principais falhas da seção. Para isso, utilizou-se a ferramenta de “filtros” da tabela dinâmica do Excel. A partir dos principais horizontes afetados, reconhecidos no momento anterior, foi gerada uma nova planilha, contendo apenas as falhas que afetassem esses horizontes concomitantemente. Esse processo foi repetido para todos os setores analisados e, com sucessivas aplicações deste filtro, foi possível estabelecer uma hierarquia das falhas. As planilhas do Excel estão apresentadas no Apêndice A.

Durante essa etapa, foram necessários ajustes, uma vez que apenas a tabela gerada não se mostrou suficientemente eficiente para determinar a permanência de um horizonte estratigráfico, gerando exceções aos critérios estabelecidos anteriormente. Essa análise será mais bem detalhada no capítulo “Resultados”.

Com a seção simplificada, o número de horizontes foi reduzido e os intervalos entre os horizontes que foram mantidos resultaram na geração de camadas para tratamento no Recon (Figura 6.7). Por exemplo, o intervalo entre os horizontes azul escuro e rosa, que continha os horizontes verde água, verde claro e vermelho, se tornou uma única camada, denominada azul escuro (o nome dessa “nova camada” foi dado com base no nome do horizonte do topo dela).

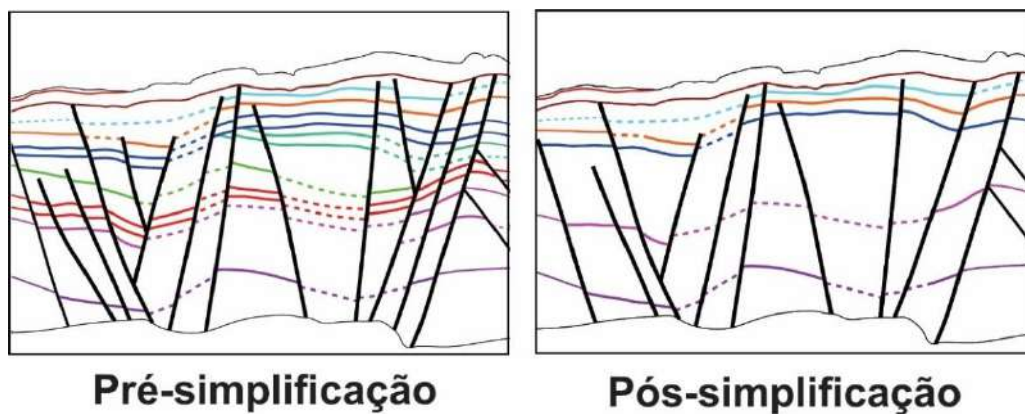


Figura 6.7: Parte da seção estratigráfica-estrutural do afloramento Praia de Picos, nas versões pré e pós-simplificação, para exemplificar como a redução dos horizontes estratigráficos resultou na geração de intervalos que são tratados como camadas no *software* Recon.

7. RESULTADOS

7.1. Análise dos Padrões Geométricos Associado à Deformação Tectônica

- Padrão 1: Antiformas

Foi observado um padrão de antiformas que, muitas vezes, apresentam conformação suave (antiformas mais abertas), deformando as camadas em um longo comprimento de onda, como observado no Setor 1 (Figura 7.1) e no Setor 3 (Figura 7.2) do afloramento Praia de Picos. Por vezes, o padrão é mais acentuado, com comprimento de onda menor, como no caso dos afloramentos Praia de Peroba (Figura 7.3) e Praia de Redonda (Figura 7.4).

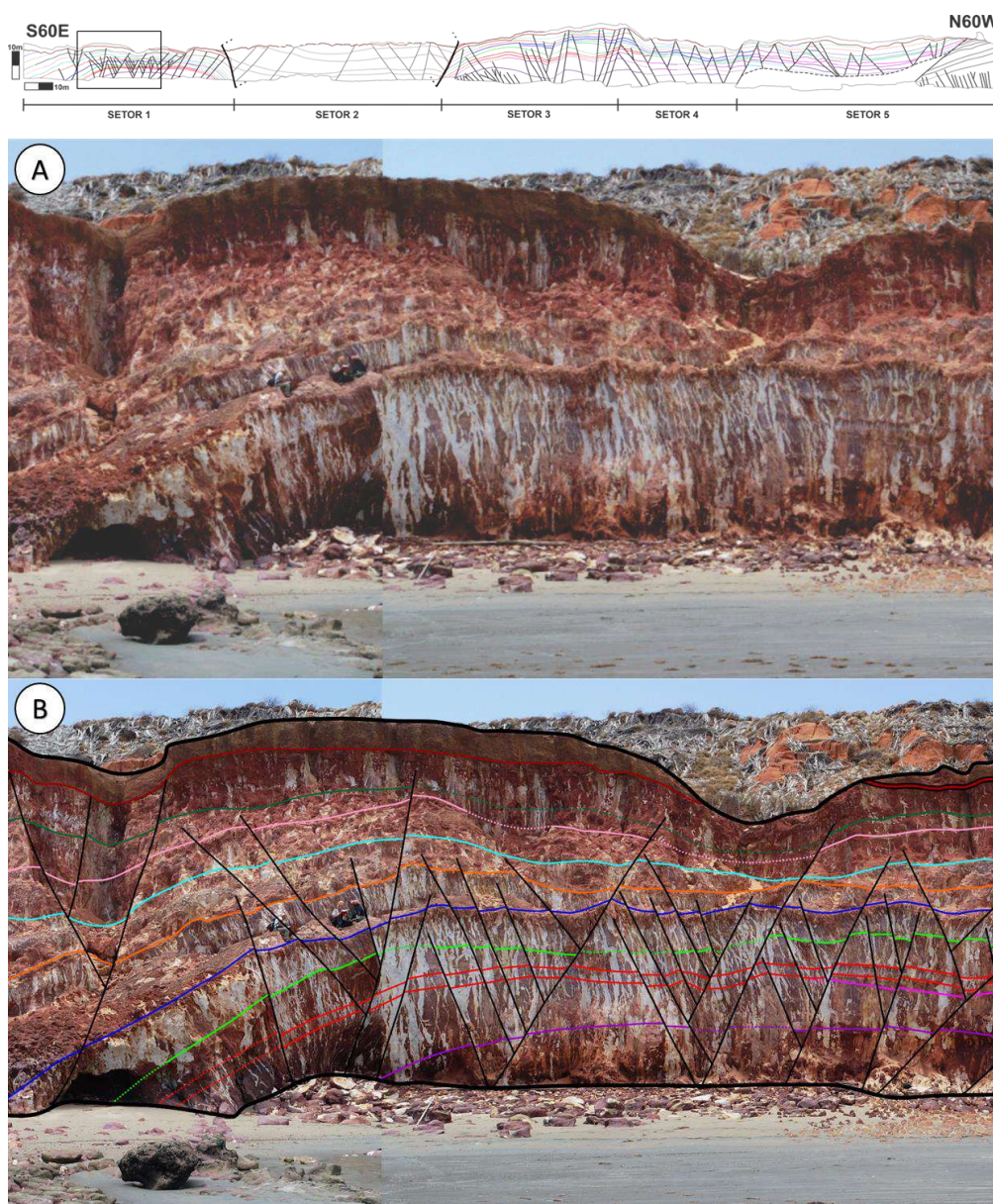


Figura 7.1: Setor 1 do afloramento Praia de Picos, caracterizado por um padrão de antiforma suave. Em A) imagem não interpretada; em B) imagem com a interpretação estratigráfica e estrutural.

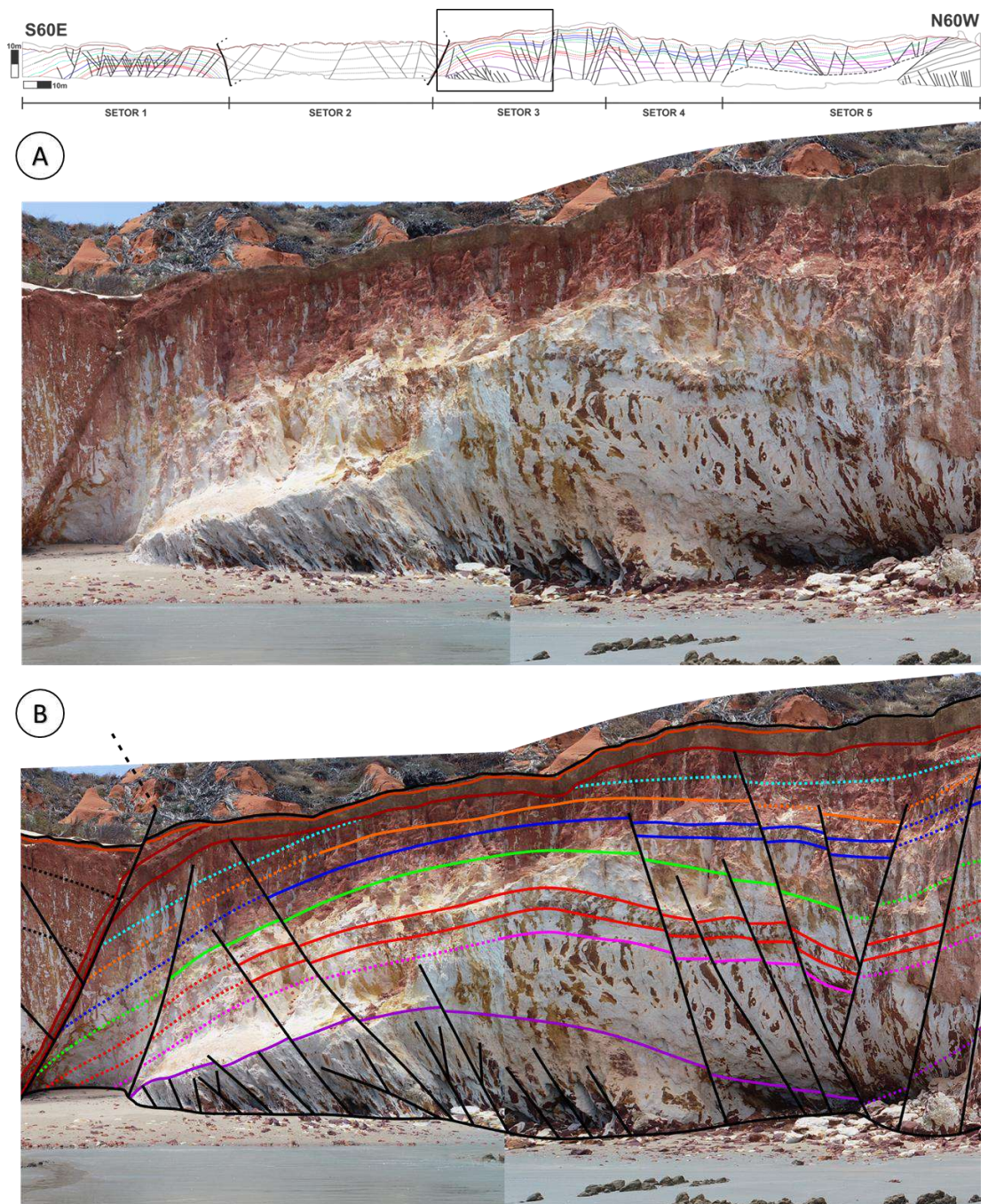


Figura 7.2: Setor 3 do afloramento Praia de Picos, caracterizado por um padrão de antiforma suave. Em A) imagem não interpretada; em B) imagem com a interpretação estratigráfica e estrutural.

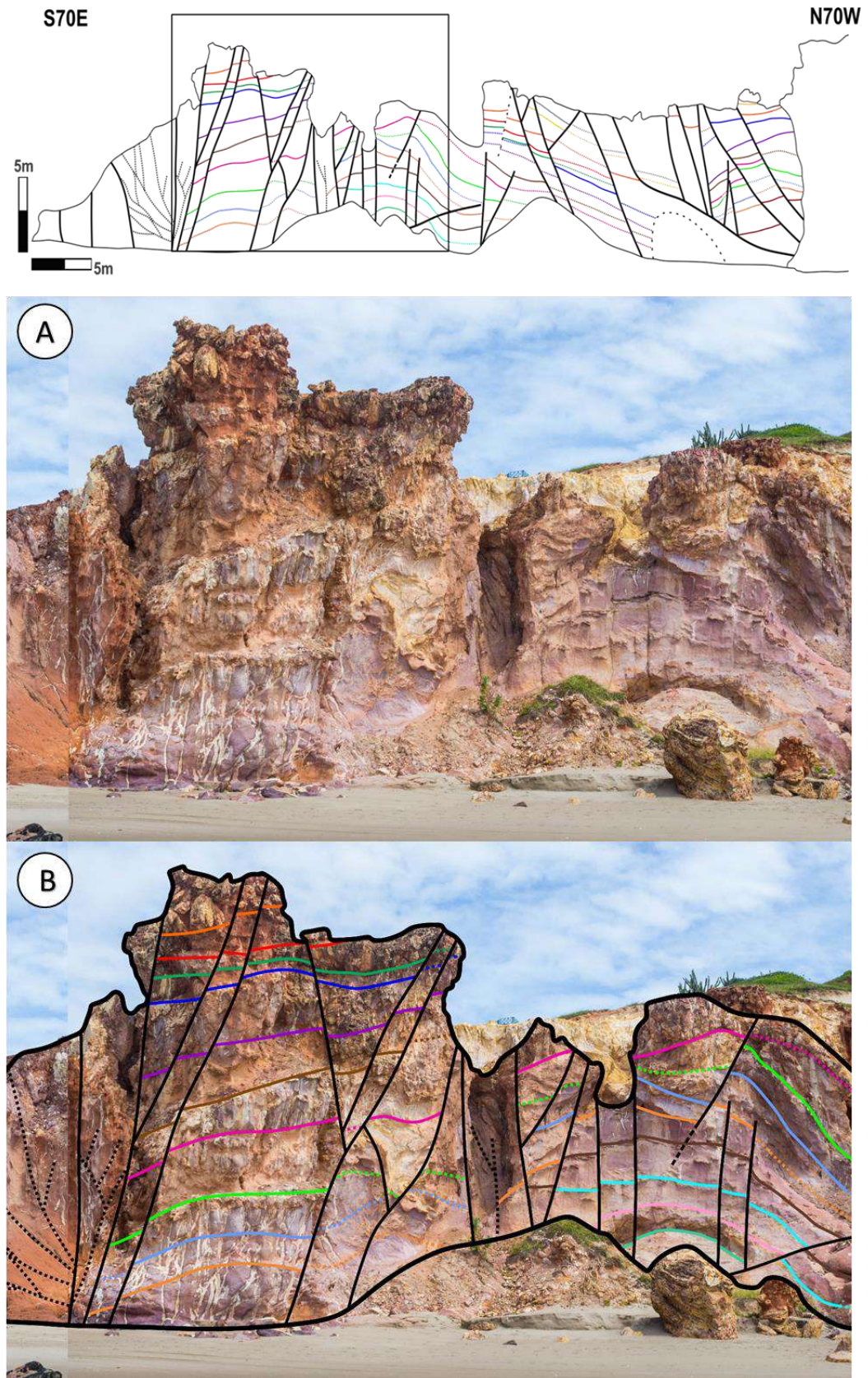


Figura 7.3: Padrão de antiforma no afloramento Praia de Peroba. Em A) imagem não interpretada; em B) imagem com a interpretação estratigráfica e estrutural.

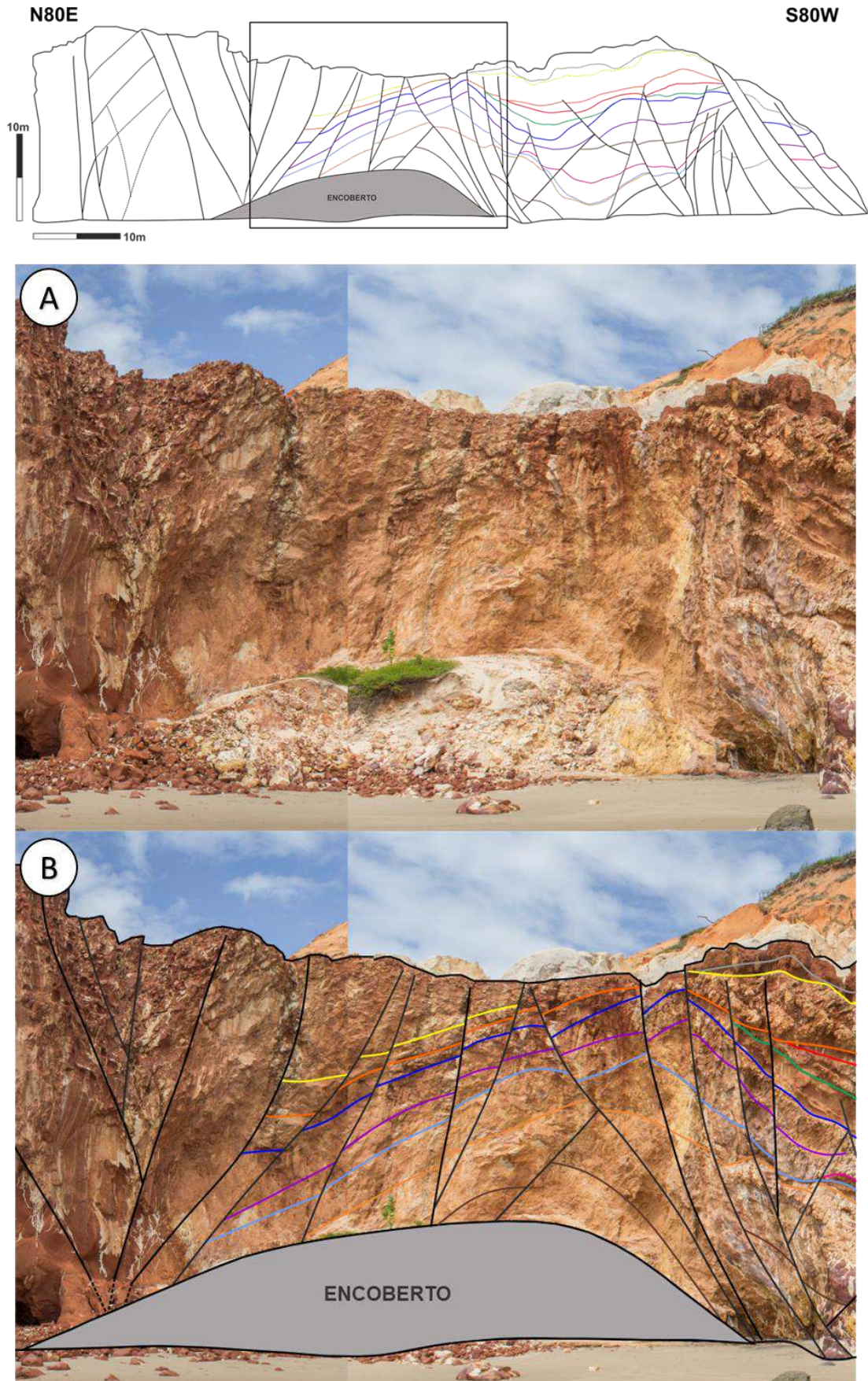


Figura 7.4: Padrão de antiforma no afloramento Praia de Redonda. Em A) imagem não interpretada; em B) imagem com a interpretação estratigráfica e estrutural.

As antifformas ocorrem intercaladas com sinformas nos afloramentos Praia de Picos e Praia de Redonda. Ocorrem comumente limitadas por falhas transcorrentes e oblíquas, assim como apresentam-se seccionadas por falhas normais e oblíquas, em padrões que serão descritos adiante (padrões 3 e 4, respectivamente).

- **Padrão 2: Sinformas**

Um padrão de sinforma bastante suave está presente nos setores 4 e 5 do afloramento Praia de Picos (Figura 7.5). Este padrão também é admitido para o Setor 2 deste afloramento. No entanto, neste setor, as feições sedimentares, incluindo o acamamento, estão muito obliteradas por processos pós-deposicionais, o que dificulta a confirmação se está, de fato, associado a um padrão sinformal.

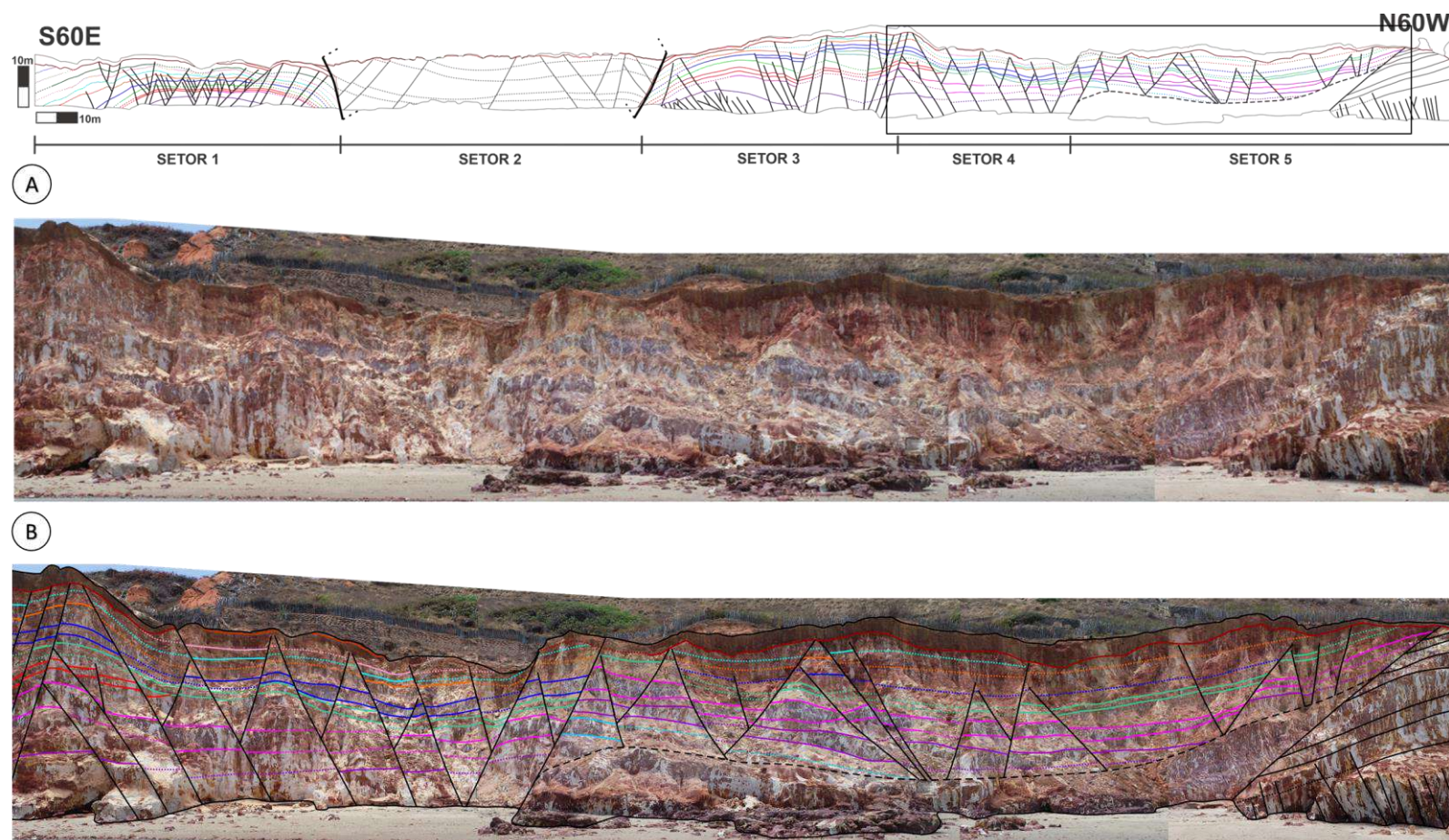


Figura 7.5: Padrão de sinforma bastante suave nos setores 4 e 5 do afloramento Praia de Picos. Em A) imagem não interpretada; em B) imagem com a interpretação estratigráfica e estrutural.

O padrão de sinforma também foi observado no afloramento Praia de Redonda (Figura 7.6), intercalado às antiformas, com um arqueamento mais acentuado.

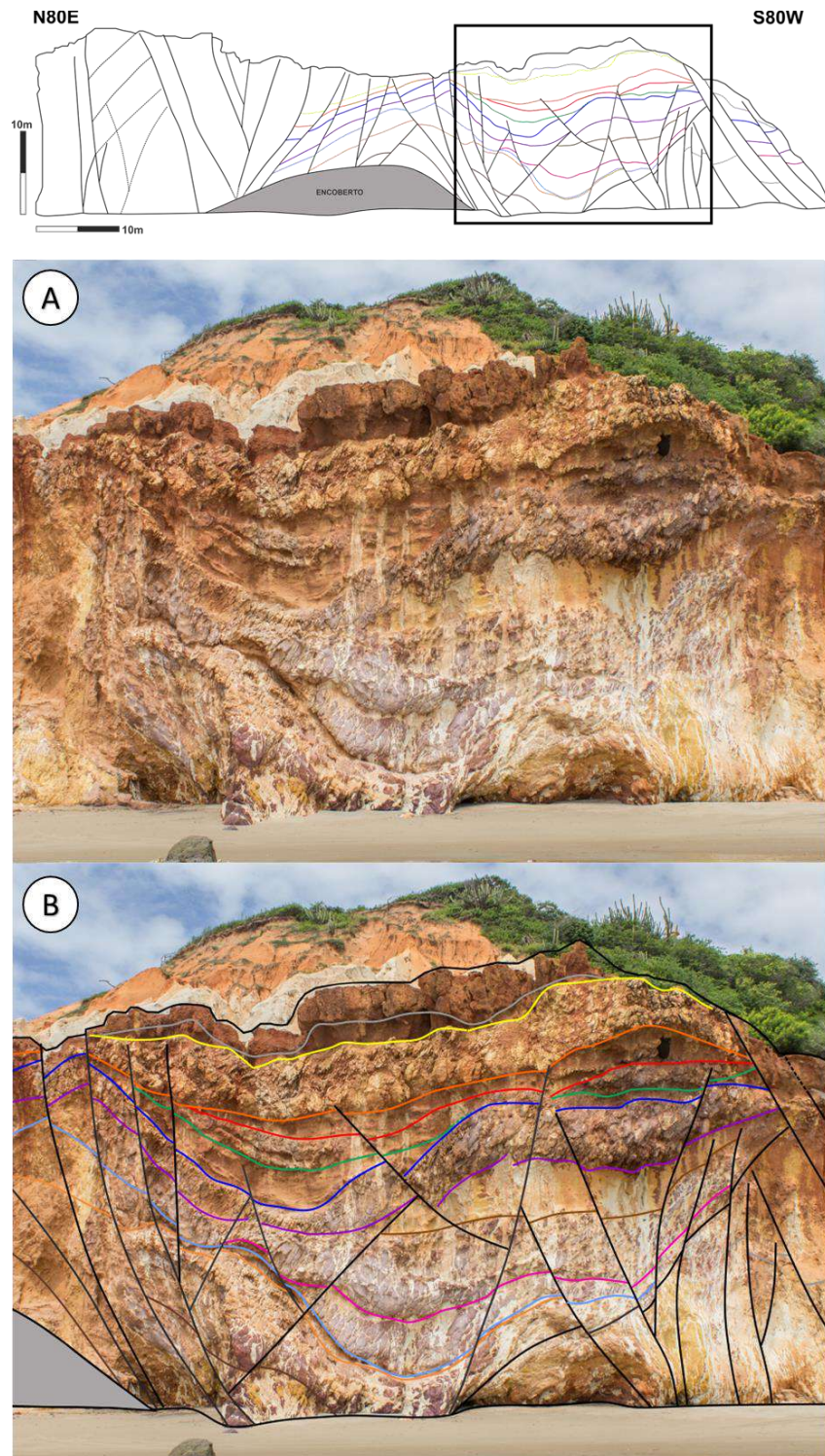


Figura 7.6: Padrão de sinforma mais acentuada observada no afloramento Praia de Redonda. Em A) imagem não interpretada; em B) imagem com a interpretação estratigráfica e estrutural.

Assim como o padrão de antiformas, as sinformas ocorrem comumente limitadas por falhas transcorrentes e oblíquas, e apresentam-se seccionadas por falhas normais e oblíquas, em padrões que serão descritos a seguir (padrões 3 e 4, respectivamente).

- Padrão 3: Falhas oblíquas associadas aos padrões de antiformas e sinformas

Um aspecto normalmente associado às antiformas e sinformas, é a presença de falhas transcorrentes e oblíquas nas extremidades dessas feições de arqueamento, parecendo controlar e limitar essas estruturas, muitas vezes ditando a intercalação entre antiformas e sinformas. O Setor 1 de Picos é limitado a WNW por uma falha oblíqua, dextral normal, de orientação E-W (Figura 7.7A), enquanto o limite ESE do Setor 3 é controlado por uma falha de orientação N-S oblíqua, sinistral normal (Figura 7.7B). O arqueamento das camadas é mais acentuado nas proximidades destas falhas. No Setor 5, o limite WNW da feição sinformal é marcado por uma falha oblíqua, sinistral normal, E-W (Figura 7.7C).

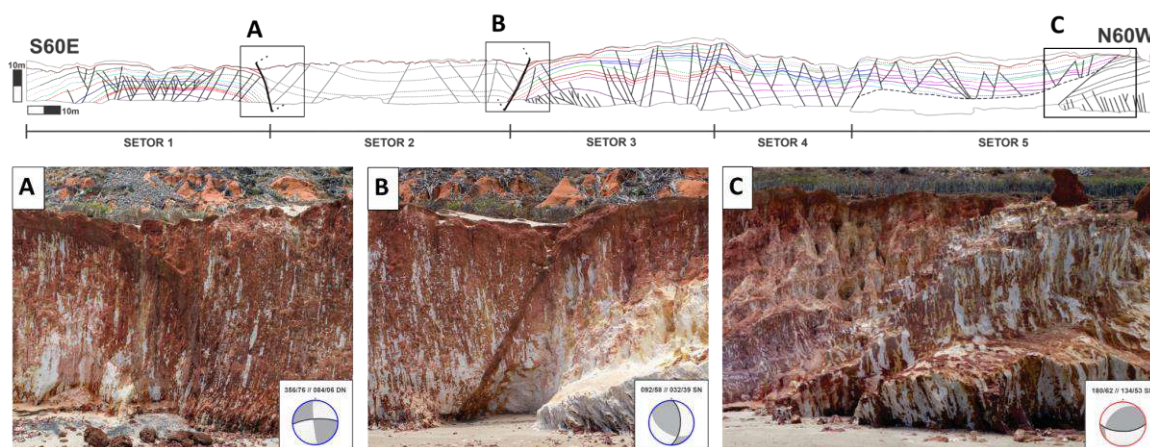


Figura 7.7: Seção Praia de Picos, com destaque para as falhas oblíquas nas extremidades das estruturas arqueadas. A) Falha E-W dextral normal. B) Falha N-S sinistral normal. C) Falha E-W sinistral normal. Os diedros na cinza contêm σ_1 .

Esse padrão também é observado no afloramento Praia de Redonda, onde a antiforma é limitada a SW por uma falha oblíqua NE-SW sinistral reversa (Figura 7.8A), que coloca essa estrutura ao lado de uma sinforma controlada a SW por uma falha N-S sinistral normal (Figura 7.8B).

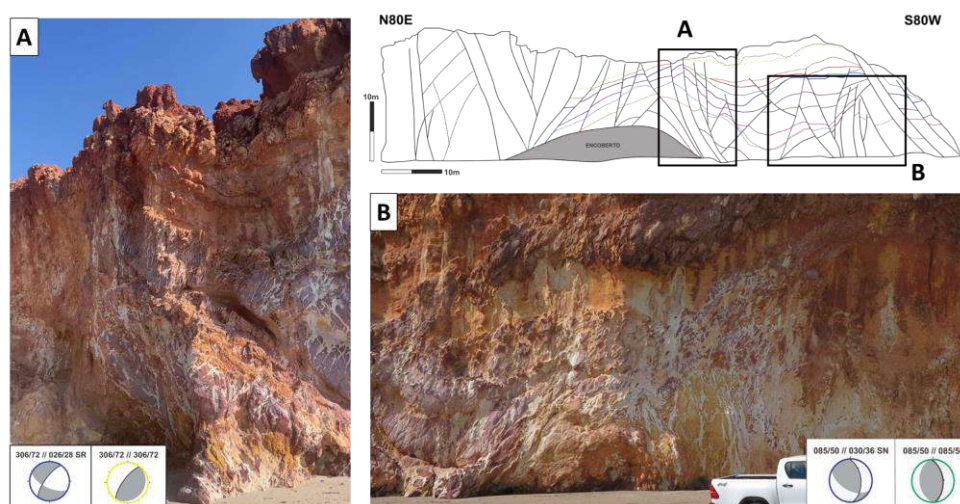


Figura 7.8: Seção Praia de Redonda, com destaque para as falhas oblíquas nas extremidades das estruturas arqueadas. A) Falha NE-SW sinistral reversa; B) Falha N-S sinistral normal. Os diedros na cinza contêm σ_1 .

Nota-se nessas falhas limitadoras, mas também em outras falhas ao longo dos afloramentos, a presença de mais de uma estria em um mesmo plano de falha. Em muitos casos, foram identificadas estrias associadas tanto a movimentos direcionais como a movimentos normais. Esta última está geralmente mais bem preservada, o que sugere uma fase tectônica mais recente de distensão, sobrepondo-se a uma fase anterior de movimentação direcional.

- Padrão 4: Falhas seccionando os padrões de antiformal e sinformas

Uma característica marcante nos afloramentos estudados, são as feições antiformais e sinformais estarem seccionadas por falhas normais e oblíquas.

No Setor 1 do afloramento Praia de Picos, ocorre uma alta densidade de falhas normais e oblíquas (dextrais e sinistrais, com componente normal), onde as falhas normais são orientadas, principalmente, nas direções NNE-SSW a NNW-SSE, e as falhas oblíquas apresentam direção E-W e NW-SE e NE-SW (Figura 7.9). No Setor 3, há um amplo predomínio de falhas normais NE-SW (Figura 7.10). No Setor 4, são observadas falhas normais de orientação NE-SW a NW-SE, bem como falhas oblíquas dextrais NE-SW e NW-SE (Figura 7.11). Por fim, o Setor 5 apresenta falhas normais NNE-SSW a NW-SE e E-W, e falhas oblíquas E-W (Figura 7.12).

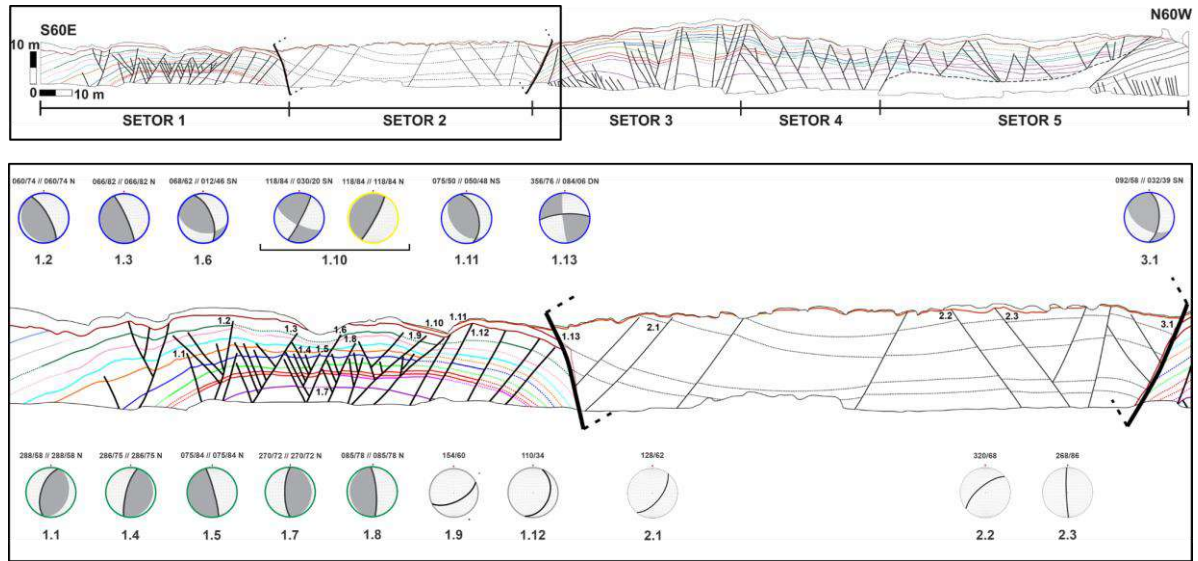


Figura 7.9: Seção estratigráfica-estrutural dos setores 1 e 2 do afloramento Praia de Picos, com estereogramas de falhas normais orientadas, predominantemente, nas direções NNE a NNW, e falhas oblíquas e transcorrentes de direção E-W e NW-SE e NE-SW. Os diedros na cor cinza contêm σ_1 .

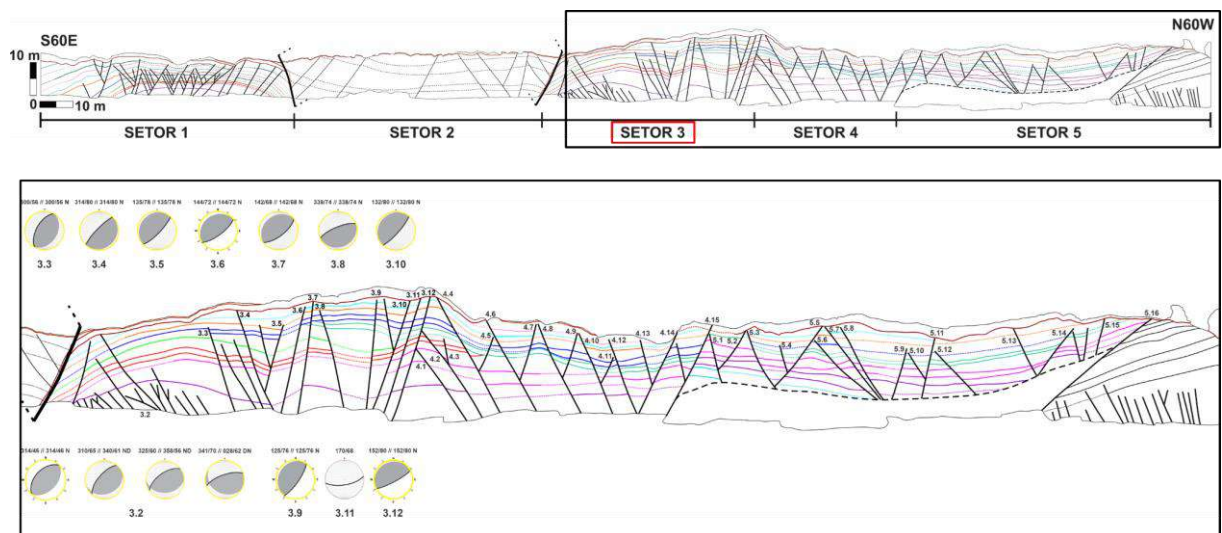


Figura 7.10: Seção estratigráfica-estrutural dos setores 3, 4 e 5 do afloramento Praia de Picos, com estereogramas de falhas normais NE-SW identificadas no Setor 3. Os diedros na cor cinza contêm σ_1 .

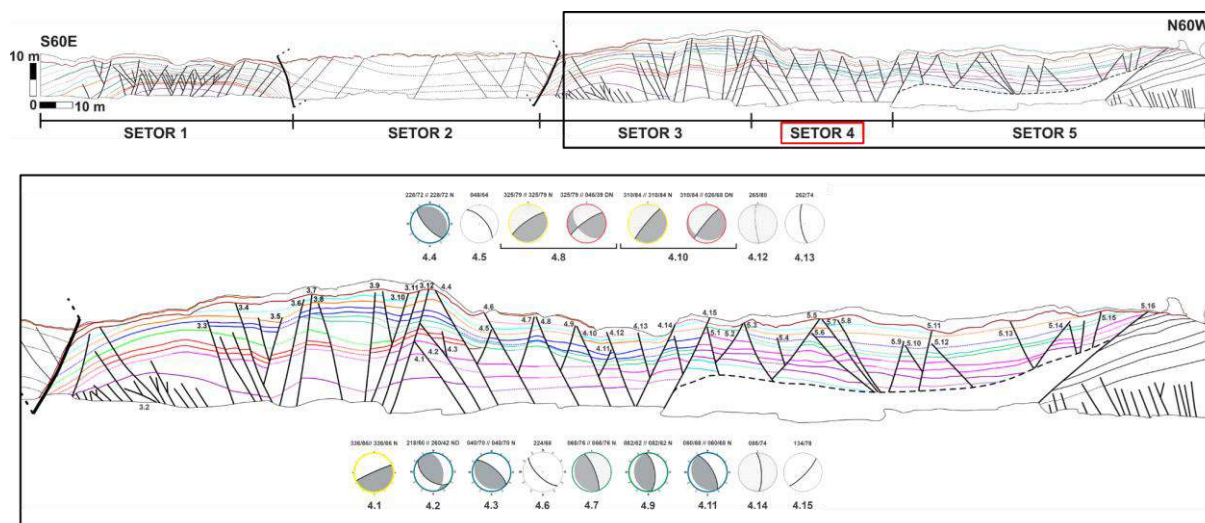


Figura 7.11: Seção estratigráfica-estrutural dos setores 3, 4 e 5 do afloramento Praia de Picos, com estereogramas de falhas normais de orientação NE-SW a NW-SE, e falhas oblíquas dextrais NE-SW e NW-SE identificadas no Setor 4. Os diedros na cor cinza contêm σ_1 .

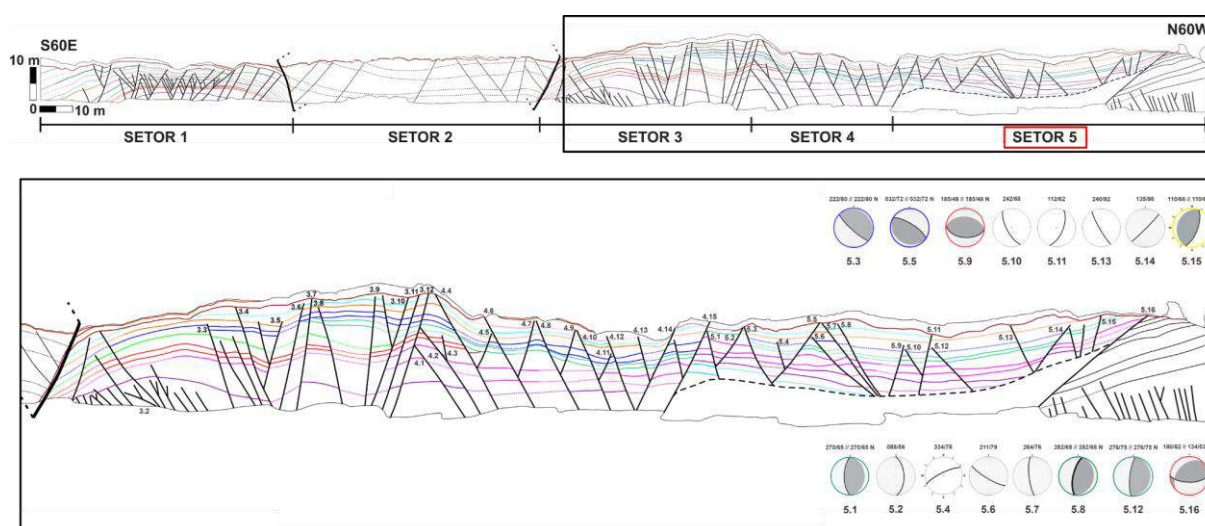


Figura 7.12: Seção estratigráfica-estrutural dos setores 3, 4 e 5 do afloramento Praia de Picos, com estereogramas de falhas normais NNE-SSW a NW-SE e E-W e falhas oblíquas E-W identificadas no Setor 5. Os diedros na cor cinza contêm σ_1 .

No afloramento Praia de Peroba, os arqueamentos são predominantemente cortados por falhas normais NW-SE a NE-SW e falhas oblíquas, sinistrais e dextrais, E-W a N-S (Figura 7.13). No afloramento Praia de Redonda, as feições antiformais e sinformais são seccionadas por falhas normais orientadas nas direções NW-SE, N-S e NE-SW, e falhas oblíquas sinistrais e dextrais NE-SW a N-S (Figura 7.14).

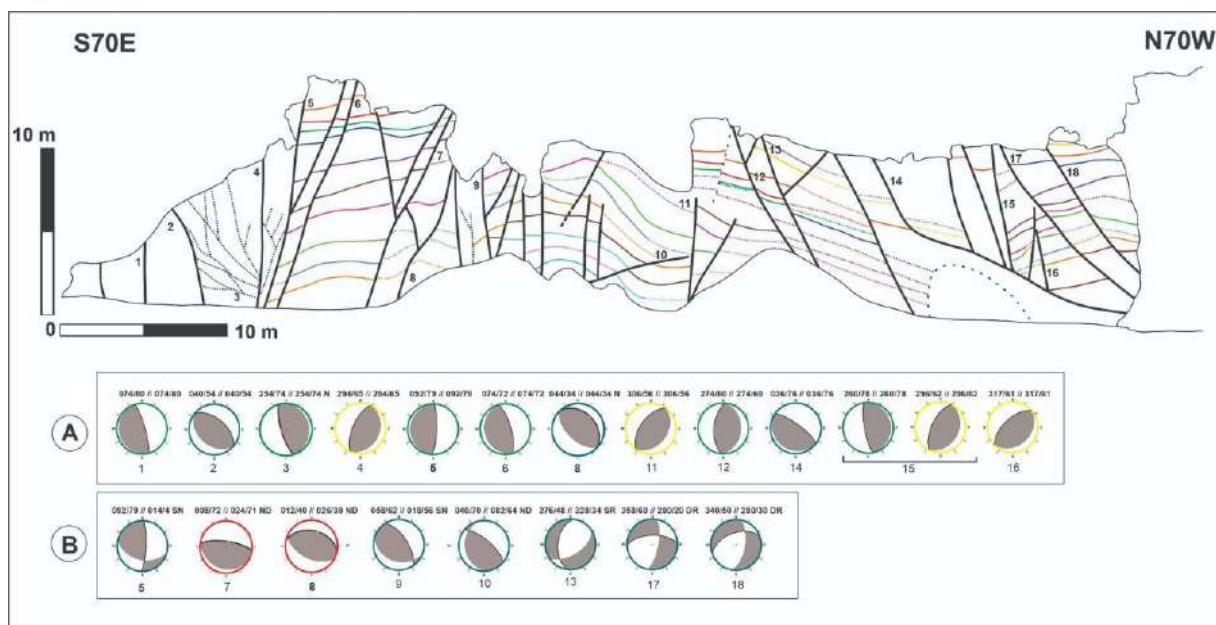


Figura 7.13: Seção estratigráfica-estrutural do afloramento Praia de Peroba, com estereogramas das falhas normais (A) e oblíquas (B). Nas falhas 5 e 8 foram identificadas estrias superpostas. Os diedros na cor cinza contêm σ_1 .

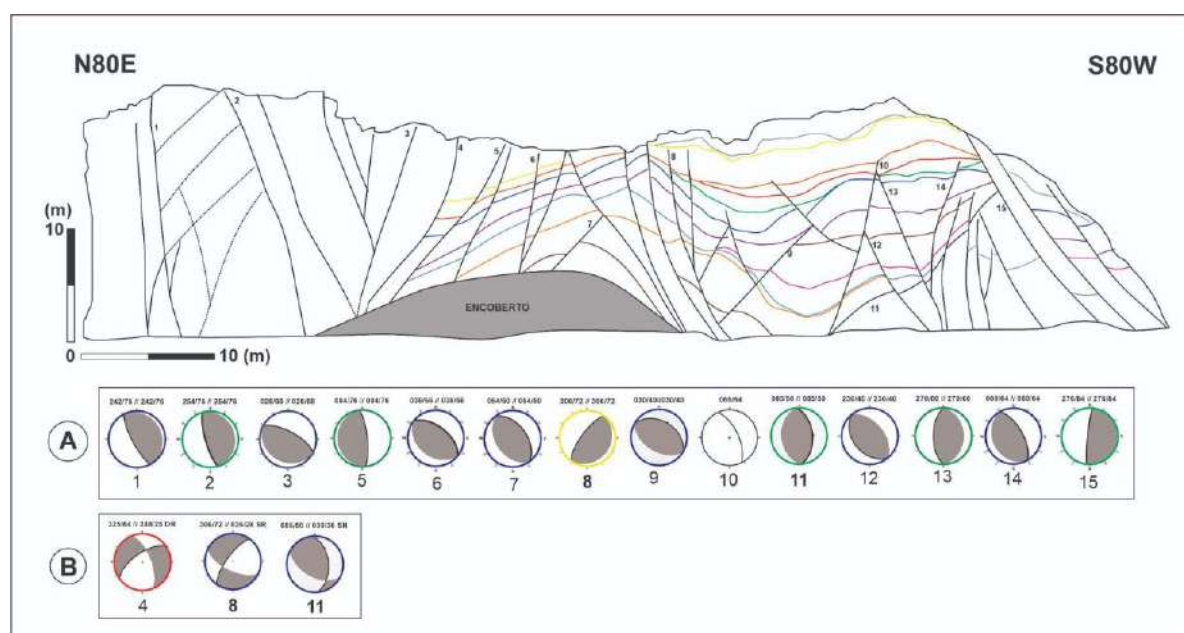


Figura 7.14: Seção estratigráfica-estrutural do afloramento Praia de Redonda, com estereogramas das falhas normais (A) e oblíquas (B). Nas falhas 8 e 11 foram identificadas estrias superpostas. Os diedros na cor cinza contêm σ_1 .

- Padrão 5: Falhas em Flor

A partir da geometria das falhas, foi possível reconhecer um padrão de falha em flor negativa na porção NE do afloramento Praia de Redonda (Figura 7.15), no limite com o

afloramento Praia de Peroba. Essa estrutura é caracterizada por falhas com planos curvos nas extremidades e uma série de falhas menores e ramificadas que se conectam à principal em um único caule. Não foi possível, no entanto, distinguir claramente as “pétalas” da flor.

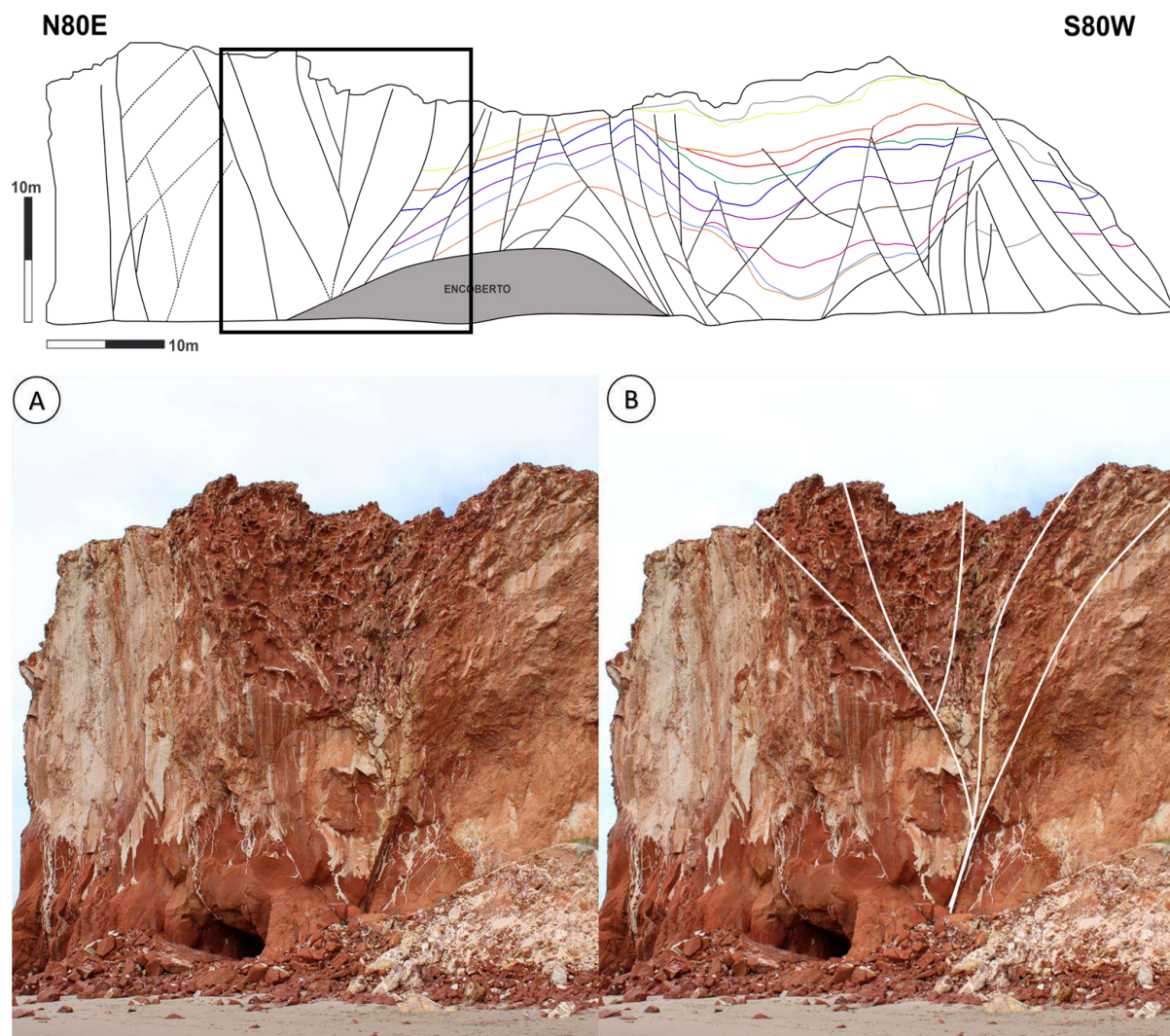


Figura 7.15: Padrão de falha em flor negativa, no afloramento Praia de Redonda. Em A) a imagem não interpretada; em B) a imagem com a interpretação estrutural.

Também foi possível reconhecer uma estrutura em flor negativa no afloramento Praia de Peroba (Figura 7.16), que é quase que perpendicular ao afloramento Praia de Redonda, sendo separados por uma porção intensamente ferruginizada, que é onde se encontram as estruturas em flor.

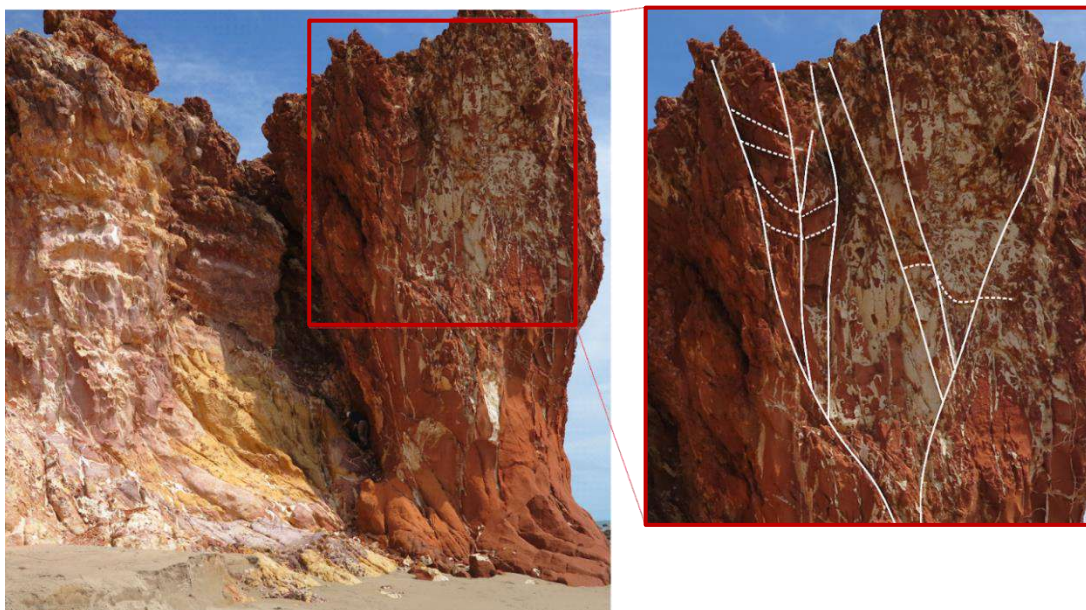


Figura 7.16: Estrutura em flor negativa no afloramento Praia de Peroba. A foto ampliada contém o traçado dos planos de falhas e fraturas (linhas brancas cheias) e a sugestão das camadas sedimentares (linhas brancas tracejadas)

- Padrão 6: Falhas reversas

Falhas reversas também foram identificadas nos afloramentos estudados, como a estrutura descrita no afloramento Praia de Peroba (Figura 7.17), com direção E-W. A análise cinemática dessa estrutura revelou pequenos degraus e estrias preservadas, indicando um movimento de empurrão para ESE.

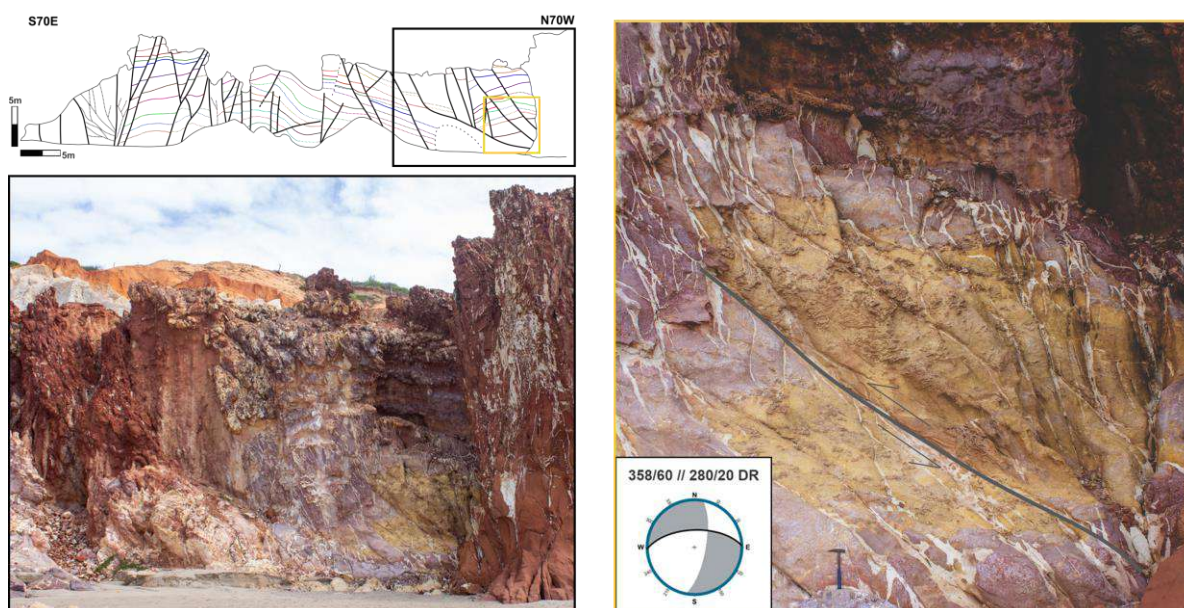


Figura 7.17: Falha dextral reversa de orientação E-W identificada na porção noroeste do afloramento Praia de Peroba. Na foto ampliada a direita, interpretação com a superfície da falha e o sentido da movimentação da capa e da lapa.

- **Padrão 7: Falhas em dominó**

Outro padrão geométrico observado nos afloramentos estudados é o de falhas normais organizadas em um arranjo tipo dominó. Esse padrão é caracterizado por blocos inclinados que rotacionam em torno de eixos sub-horizontais, separados por falhas normais de mergulho similares. Nos afloramentos analisados, esse arranjo foi identificado tanto em escala métrica, envolvendo blocos maiores (Figura 7.18), quanto em escala centimétrica (Figura 7.19), onde pequenos fragmentos rotacionados refletem o mesmo padrão deformacional.

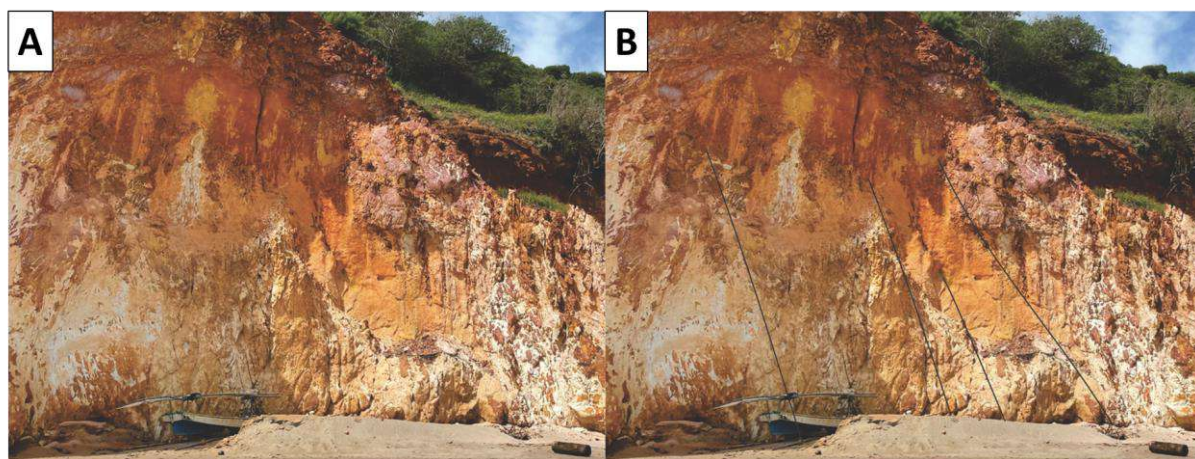


Figura 7.18: Padrão de falhas normais em arranjo do tipo dominó em escala métrica no afloramento Praia de Redonda. Em A) imagem original; e em B) imagem com o traçado dos principais planos de falha.

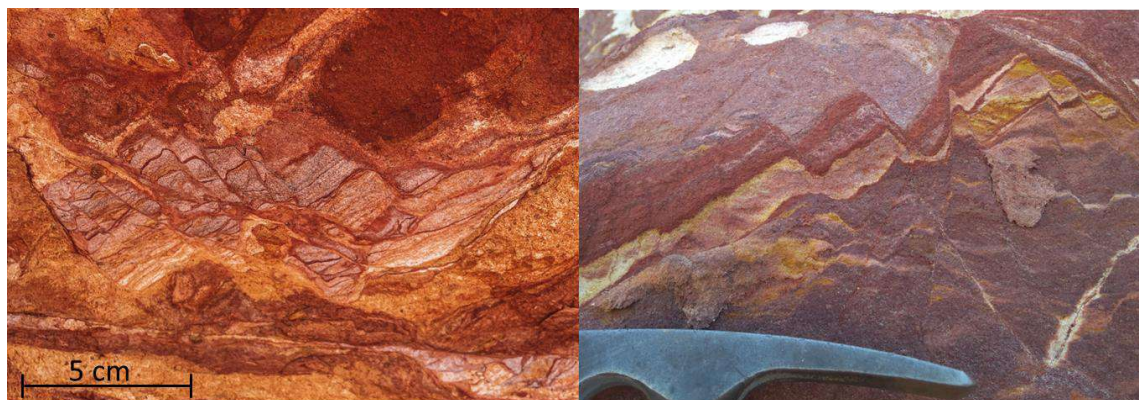


Figura 7.19: Padrão de falhas normais em arranjo do tipo dominó em escala centimétrica identificado no afloramento Praia de Redonda.

- **Padrão 8: *Grabens* e *horsts***

O padrão de *grabens* e *horsts* também foi observado nos afloramentos analisados, sendo um exemplo característico uma porção do Setor 3 do afloramento Praia de Picos (Figura 7.20), onde esta estruturação é evidenciada por falhas normais NE-SW (uma com mergulho para NW e a outra com mergulho para SE) nas extremidades, que abatem os blocos internos com

pequenos rejeitos. Observa-se, ainda, a presença de um pequeno *horst* interno a esse padrão de *graben*. No entanto, o arqueamento das camadas dificulta a visualização do padrão, sugerindo que o seu desenvolvimento ocorreu após a formação dos arqueamentos e que a magnitude da distensão não superou a do evento gerador das dobras. Esse padrão também foi observado em escala centimétrica no afloramento Praia de Redonda (Figura 7.21).

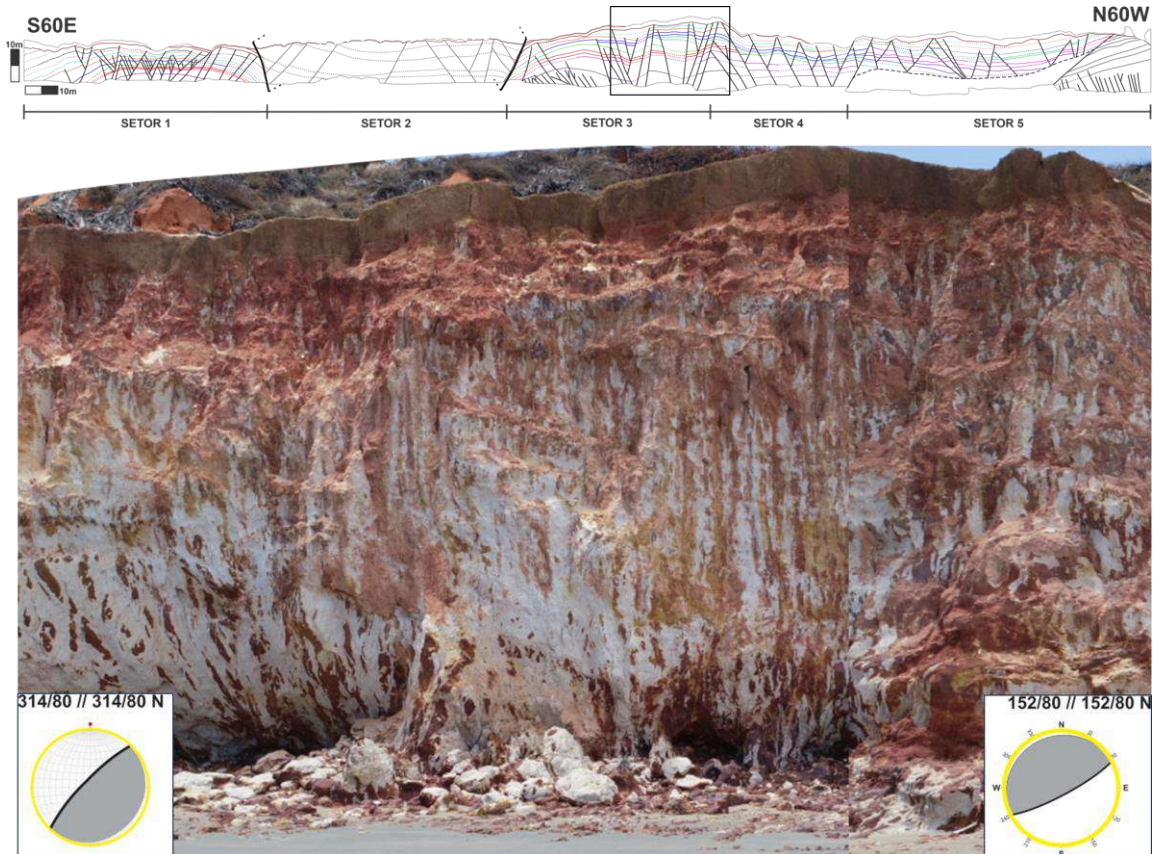


Figura 7.20: Setor 3 do afloramento Praia de Picos, caracterizado como um *graben*, delimitado por falhas NE-SW nos limites a ESE e WNW.



Figura 7.21: Padrão de *grabens* e *horsts* em escala centimétrica no afloramento Praia de Redonda.

7.2. Restauração estrutural

Como resultado da etapa preparatória à restauração estrutural, foi produzida uma seção menos complexa (Figura 7.22) a partir da elaboração da tabela para simplificação da seção estratigráfica-estrutural do afloramento Praia de Picos. Do total de cento e cinco falhas identificadas no afloramento, trinta foram mantidas com base em sua hierarquia (apenas falhas principais e suas sintéticas e antitéticas de maior magnitude). Além disso, dos vinte horizontes inicialmente observados, oito foram mantidos.

Para a simplificação das falhas, a tabela elaborada mostrou-se efetiva para selecionar as que afetam a maior parte dos horizontes, ao estabelecer uma hierarquia de falhas com base na sua representatividade. No entanto, para determinar a permanência de um horizonte estratigráfico na seção simplificada, apenas as informações obtidas na tabela não foram suficientes. Durante essa etapa, foram necessários alguns ajustes: o horizonte “Vermelho”, apesar de ser um dos mais afetados pelas falhas, não está presente lateralmente em toda a seção e, portanto, não foi mantido; em contrapartida, foi incluído o horizonte “Crosta Ferruginosa”, que, embora não esteja deslocado na seção, é contínuo e persiste lateralmente ao longo de quase toda a seção, sendo um elemento importante para o estudo.

Para o presente trabalho, foram escolhidos os setores 3, 4 e 5 do afloramento Praia de Picos para serem restaurados (Figura 6.1). A seção não foi restaurada por completo por conta da falta no Setor 2 de informações estratigráficas e estruturais que pudessem ser correlacionadas com os setores adjacentes. A porção restaurada pode ser descrita como uma sucessão de arenitos estratificados e bioturbados, intercalados a conglomerados estratificados, em menor proporção. As camadas, possuem em sua maioria, geometrias tabulares a lenticulares extensas, sendo localmente encontradas camadas lenticulares de arenitos grossos e conglomerados em contato erosivo com as camadas subjacentes. Nesses setores as camadas sedimentares mostram-se deformadas em arqueamentos suaves, seccionados por falhas normais e obliquas.

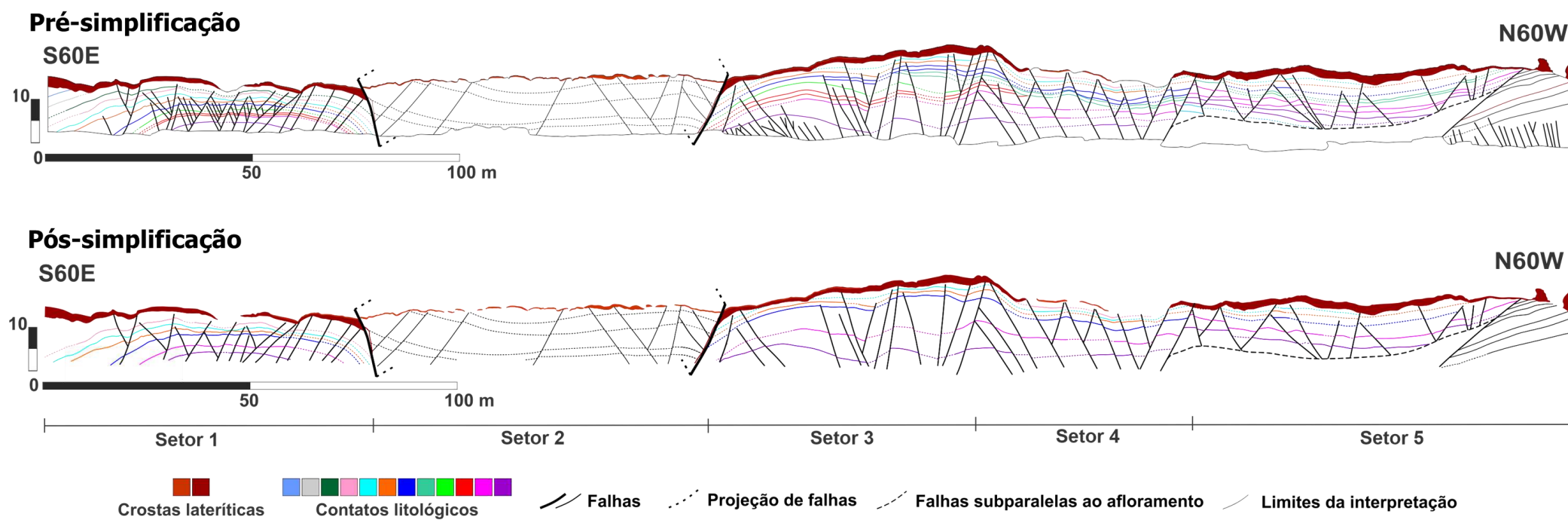


Figura 7.22: Seção estratigráfica-estrutural do afloramento Praia de Picos nas versões pré e pós simplificação.

A redução do número de horizontes estratigráficos, pela simplificação da seção, resultou em oito camadas estratigráficas no Recon, para o trecho escolhido da seção estudada, ordenadas da mais jovem para a mais antiga da seguinte forma: crosta ferruginosa; verde escuro; rosa claro; azul claro; laranja; azul escuro; rosa; e roxo. A crosta ferruginosa atua como um limite de propagação das falhas a partir das camadas subjacentes.

Os resultados da restauração estrutural podem ser divididos em quatro momentos distintos (Figura 7.23), cada um representando uma etapa importante no processo de reconstrução dos estágios deformacionais.

O Momento A corresponde à primeira etapa do processo e foca nos intervalos mais jovens, representados pelas camadas verde escuro e rosa claro, que, ao longo da seção, são as que ocorrem em contato direto com a crosta ferruginosa (esta não aparece deslocada na seção do afloramento). Nessa fase inicial, como a crosta está condicionando a propagação das falhas, não foram identificados deslocamentos nos topos das camadas verde escuro e rosa claro ao longo de grande parte da seção e, portanto, não puderam ser restauradas integralmente. A camada verde escuro, em particular, não apresentou condições para restauração em nenhum setor, e a camada rosa claro foi restaurada apenas no Setor 4 (será abordada no Momento B).

No Momento B foi restaurada a camada azul claro, a primeira a ser restaurada de forma contínua ao longo de toda a seção, e a única porção da camada rosa claro possível de ser restaurada (no Setor 4). Durante esse processo, observou-se que algumas falhas ainda não podiam ser restauradas, pois não atingiam o topo dessa camada. Essas falhas foram, então, tratadas em etapas posteriores. Constatou-se que a maioria das falhas teve seus rejeitos completamente ajustados durante esse momento, i.e., ao reconstituir uma falha com base no rejeito do topo desta camada, os rejeitos das camadas subjacentes foram inteiramente removidos.

Essa mesma restauração única ocorreu em situações de falhas secundárias ramificadas a uma falha principal, ou seja, ao restaurar uma a outra era inteiramente ajustada, indicando que ambas compartilhavam os mesmos rejeitos e que uma única restauração era suficiente para levá-las à posição pré-deformacional. Para a maioria desses casos em que uma única restauração ajustou todos os rejeitos, tanto para a falha principal quanto para a falha secundária a ela associada, observou-se que as falhas são correlacionadas ao mesmo conjunto de paleotensões (daqueles definidos pelo projeto realizado em colaboração entre a UFRJ e a PETROBRAS). A Figura 7.24 exemplifica um desses cenários, que sugerem falhas geradas em um único movimento tectônico.

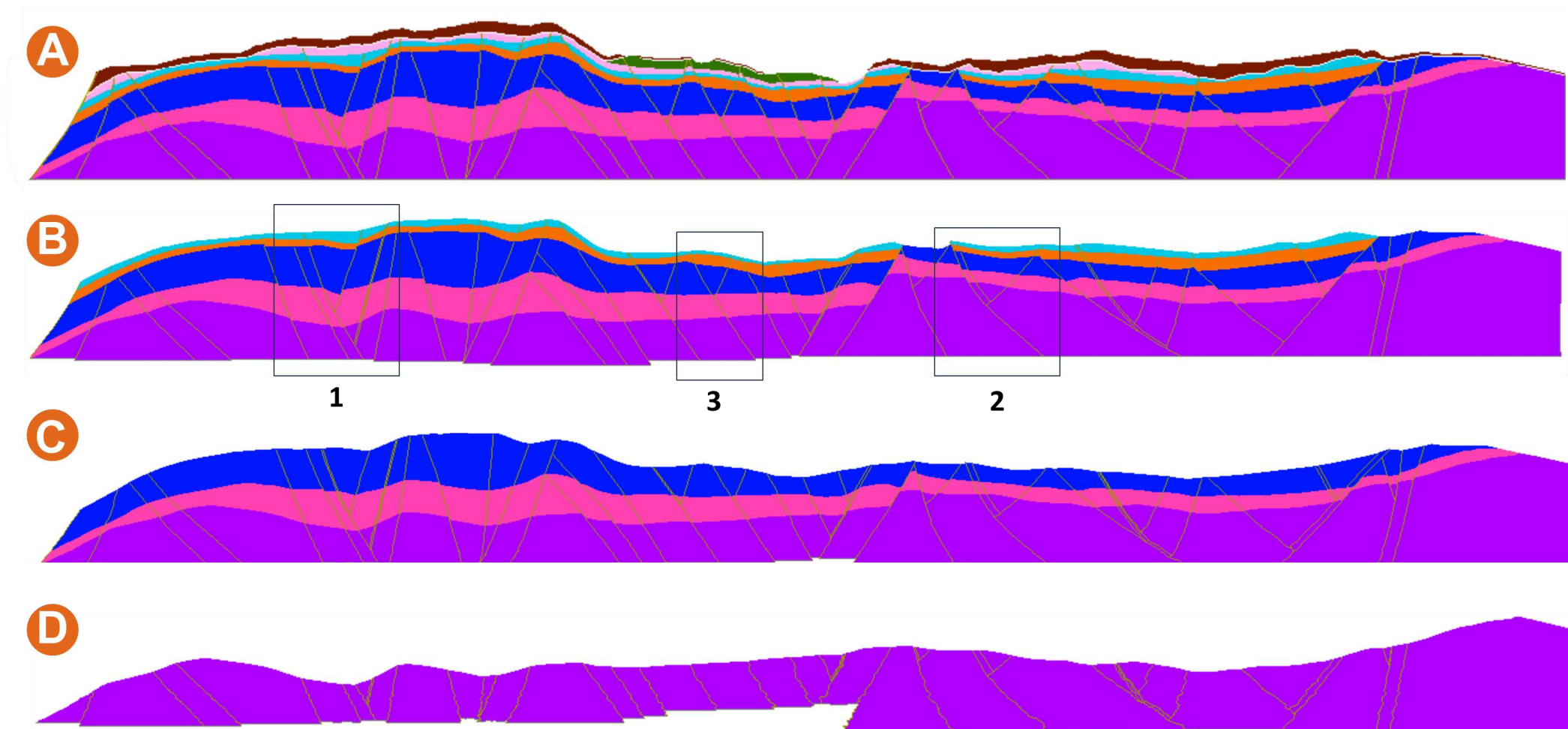


Figura 7.23: Momentos A a D da restauração estrutural dos setores 3, 4 e 5 do afloramento Praia de Picos. Os polígonos numerados por 1, 2 e 3 no Momento B correspondem à localização das Figuras 7.24, 7.25 e 7.26, respectivamente.

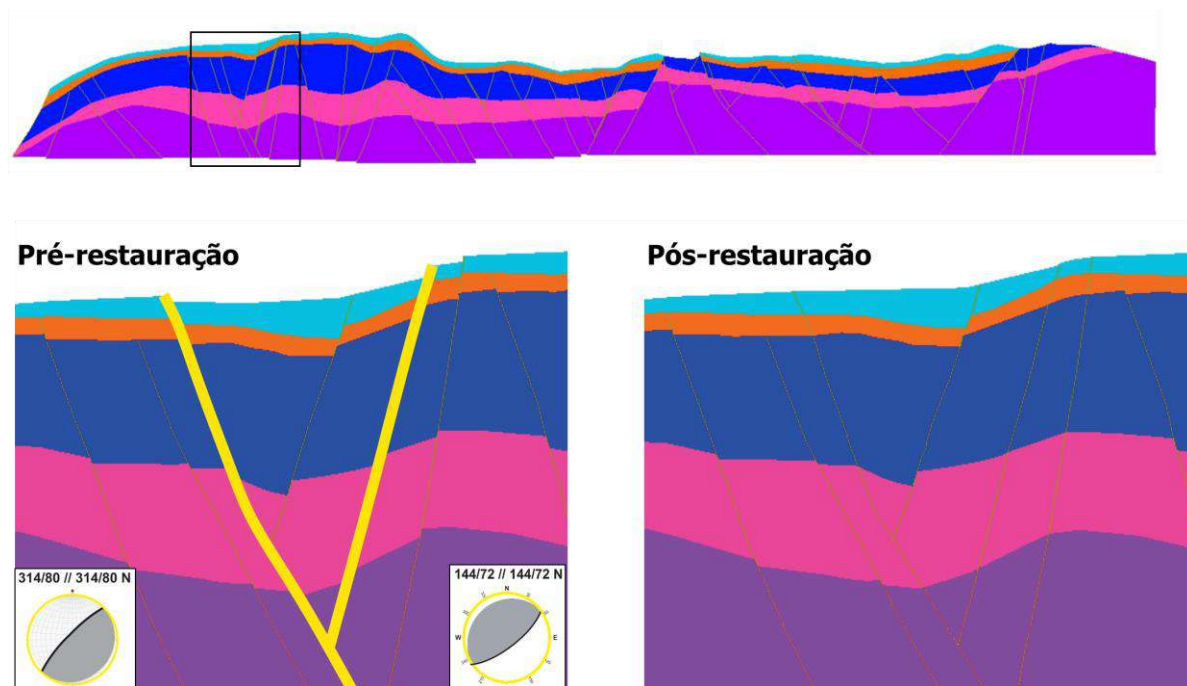


Figura 7.24: Exemplo da restauração de uma falha secundária, no Setor 3 do afloramento Praia de Picos, onde a falha principal correlacionada é inteiramente ajustada. Essas falhas, de orientação NE-SW, pertencem ao conjunto de distensão NW-SE identificado pela equipe do projeto realizado em cooperação entre a UFRJ e a PETROBRAS na região de Icapuí (CE).

Em outros casos, permaneceram rejeitos residuais após um primeiro movimento de restauração, correspondendo a pequenos deslocamentos que persistiram nas camadas, indicando que um único movimento não foi suficiente para levar as camadas ao estado pré-deformacional. Foi observado que grande parte desses rejeitos residuais se concentravam nas camadas basais da seção, que são as mais antigas e, portanto, podem ter sido afetadas por pulsos tectônicos anteriores àqueles que afetaram também as camadas mais novas no topo da seção. Em algumas relações entre as falhas principais e suas ramificações secundárias, ao restaurar a falha secundária a falha principal correlacionada foi apenas parcialmente ajustada, mantendo um rejeito contínuo e expressivo ao longo do plano de falha (Figura 7.25). Diferentemente dos casos em que ambas as falhas foram completamente ajustadas em uma única restauração, essa nova situação pode-se associar simplesmente a rejeitos diferentes entre falhas principais e secundárias ou, até mesmo, uma dinâmica mais complexa entre essas estruturas, envolvendo múltiplos eventos deformacionais.

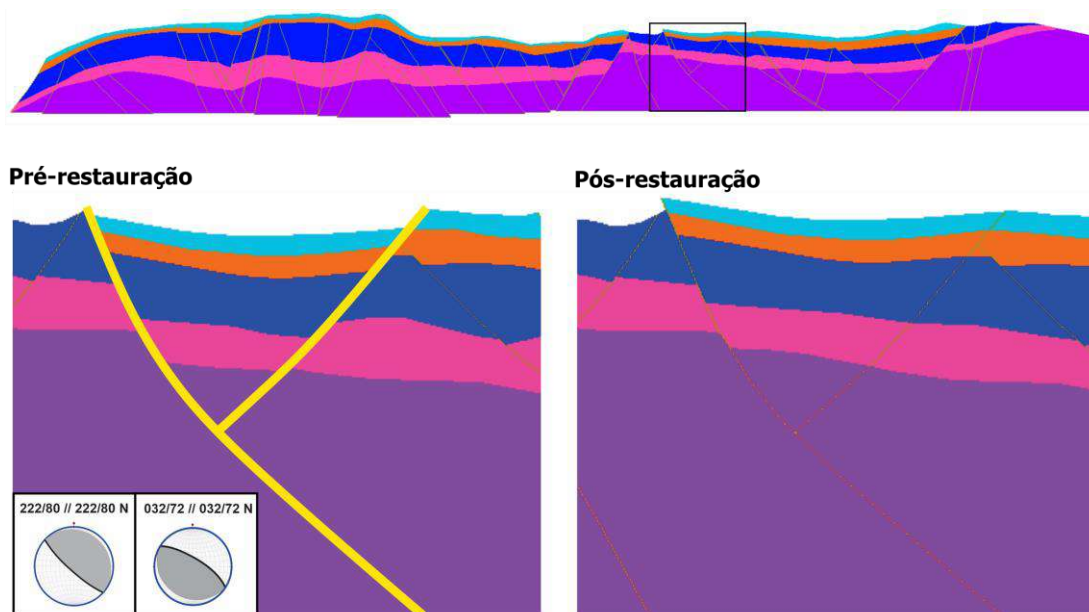


Figura 7.25: Exemplo da restauração estrutural de uma falha secundária, no Setor 5 do afloramento Praia de Picos: onde a falha principal correlacionada é parcialmente ajustada, mantendo um rejeito contínuo e expressivo ao longo do plano de falha. Essas falhas, de orientação NW-SE, pertencem ao conjunto de compressão NW-SE identificado pela equipe do projeto realizado em cooperação entre a UFRJ e a PETROBRAS na região de Icapuí (CE).

Em alguns desses casos, o rejeito residual afetava até as camadas do topo e a restauração foi realizada em dois passos dentro do Momento B (Figura 7.26). No primeiro passo, foi restaurada a falha secundária e a falha principal a qual ela está ligada foi apenas parcialmente restaurada, mantendo um rejeito residual constante para todas as camadas. No segundo passo, foi feita a restauração da falha principal com relação as camadas do topo, permanecendo rejeitos residuais, maiores nas camadas basais em relação as do topo.

Vale a pena destacar que, em alguns desses casos de falhas principais e secundárias em que permanecem rejeitos residuais após a restauração, nota-se que elas podem ser de diferentes conjuntos de paleotensões e, inclusive, apresentar estrias superpostas, sendo uma indicativa de movimento direcional e outra de movimento distensivo, reforçando a hipótese de múltiplos eventos deformacionais, como é o caso exemplificado na Figura 7.26. Porém, eventualmente, são encontradas falhas correlacionadas a um mesmo conjunto de paleotensão (exemplo na figura 7.25), o que sugere serem apenas rejeitos diferentes entres falhas principais e secundárias.

Após esse primeiro momento de restauração, algumas falhas apresentaram rejeitos residuais variáveis ao longo dos seus planos, não uniformes, inclusive, com relação ao sentido de deslocamento, ou seja, deslocamentos que se alternam entre rejeitos residuais normais e reversos em diferentes níveis estratigráficos. Tais inconsistências foram atribuídas a problemas de interpretação na construção da seção estratigráfica-estrutural original.

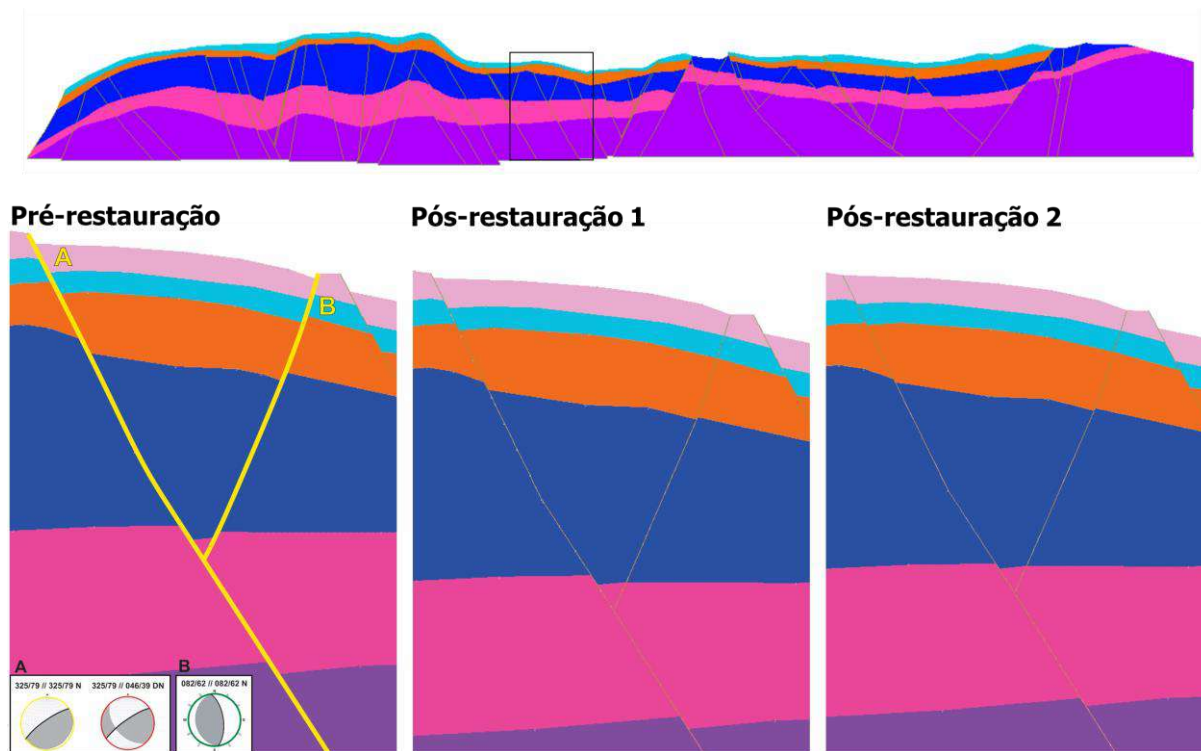


Figura 7.26: Exemplo de dois momentos de restauração, no Setor 4 do afloramento Praia de Picos: 1) restauração da falha secundária, onde a falha principal correlacionada é parcialmente restaurada, mantendo um rejeito residual constante para todas as camadas; 2) restauração da falha principal, na qual, permanecendo rejeitos residuais, maiores nas camadas basais em relação as do topo. A falha principal, de orientação NE-SW, apresenta duas estrias, uma pertencente ao conjunto transcorrente com compressão E-W e distensão N-S, e a segunda ao conjunto distensivo com distensão NW-SE, identificadas pela equipe do projeto realizado em cooperação entre a UFRJ e a PETROBRAS na região de Icapuí (CE); e a falha secundária tem orientação N-W e pertence ao conjunto distensivo com distensão E-W.

O Momento C corresponde à restauração do topo da camada azul escuro, etapa em que a maioria das falhas já havia sido restaurada. Contudo, restavam falhas que, durante o Momento B, não puderam ser ajustadas, pois mesmo apresentando a mesma cinemática e sentido de movimento, não puderam ser restauradas simultaneamente no início do processo por não afetarem o topo das camadas mais jovens. Essas falhas foram finalmente tratadas a partir do Momento C (Figura 7.27).

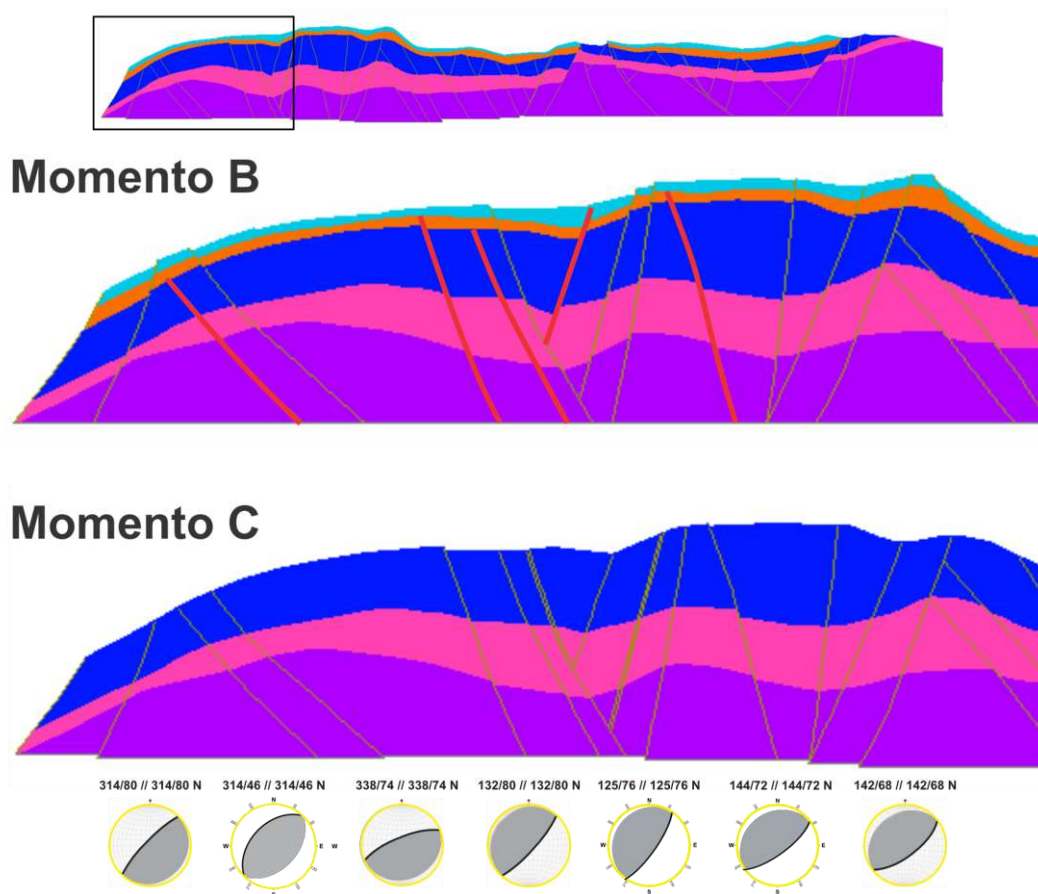


Figura 7.27: Restauração estrutural do Setor 3 do afloramento Praia de Picos, com destaque em vermelho para as falhas que não puderam ser restauradas no Momento B, pois não afetavam o topo da camada mais jovem. Essas falhas foram restauradas no Momento C. Na base, os estereogramas para algumas das falhas desse setor, com os diedros com o campo compressivo em cinza, indicando a mesma cinemática e orientação (Normal NE-SW). Os diedros na cor cinza contêm σ_1 .

Por fim, o Momento D marcou a etapa final do processo de restauração, na qual todas as falhas foram completamente ajustadas ao longo de todos os horizontes estratigráficos da seção. Essa fase representou a conclusão do modelo restaurado, permitindo analisar com mais detalhe, as geometrias e estruturas preservadas após a restauração total. Foi possível observar que as feições arqueadas, caracterizadas por dobras antiformais no Setor 3 e sinformais nos setores 4 e 5, permaneceram preservadas na seção, sugerindo que essas estruturas podem ter sido geradas em um pulso tectônico anterior aos da geração das falhas restauradas na seção.

7.3. Modelo da Deformação Tectônica

O padrão básico de deformação identificado nos afloramentos estudados envolve camadas arqueadas controladas por falhas transcorrentes e oblíquas nas extremidades, e internamente seccionadas por falhas normais e oblíquas. As evidências de deformação transcorrente incluem dobras, falhas oblíquas NW-SE a E-W, falhas reversas, falhas normais NW-SE e estruturas do tipo falha em flor. Enquanto a deformação distensiva é caracterizada por falhas normais predominantemente de orientação NE-SW a N-S, que ocorrem em diversos arranjos (*dominó*, *grabens* e *horsts*). Muitas vezes, as falhas normais se sobrepõem às feições transcorrentes, como observado nos casos de dobras seccionadas internamente por falhas, e em planos de falha com duas estrias, uma direcional e uma normal. No presente trabalho, essas características foram interpretadas como resultado de uma histórica tectônica multifásica, em que há uma superposição de eventos distintos.

Os resultados da restauração estrutural sustentam a hipótese desse modelo, tendo em vista que, após terem sido restauradas todas as falhas para todos os horizontes estratigráficos contidos na seção, a geometria de camadas arqueadas foi preservada, sugerindo um episódio compressivo anterior ao da geração das falhas restauradas. Além disso, as falhas que mantiveram rejeitos residuais e que não puderam ser levadas a posição pré-deformacional com apenas um passo da restauração e, portanto, precisaram de mais uma etapa, corroboram ainda mais para essa hipótese.

Todas essas evidências confirmam que houve um padrão de compressão anterior a uma distensão. Então, o modelo proposto para a evolução tectônica da região envolve: um regime transcorrente inicial, com compressão variando de NW-SE a E-W, responsável pela formação das geometrias arqueadas e falhas predominantemente NW-SE a E-W; e um regime de distensão NW-SE a E-W posterior, responsável pela geração das falhas NE-SW e N-S como um relaxamento dos esforços transcorrentes do primeiro estágio.

8. CONCLUSÕES

A análise dos padrões geométricos estruturais permitiu reconhecer uma evolução multifásica para a deformação neotectônica na região estudada, sustentada pela restauração estrutural. No presente trabalho, essas evidências foram interpretadas como resultado de uma superposição de eventos distintos: um mais antigo, marcado por cinemática transcorrente; e outro mais jovem, dominado por uma cinemática distensiva, que modificou as estruturas previamente formadas.

Para Bezerra *et al.* (2020), apenas o evento SF2 afeta os depósitos da Formação Barreiras, sendo caracterizado por SH variando de E-W a NW-SE e Sh variando de N-S a NE-SW. Os resultados que têm sido levantados pelo projeto em cooperação da UFRJ com a PETROBRAS têm indicado quatro conjuntos de paleotensão: dois campos de tensão transcorrentes (um com compressão NW-SE e outro com compressão E-W) e dois distensivos (um com distensão NW-SE e outro com distensão E-W). Nesse contexto, apenas os conjuntos transcorrentes podem ser correlacionados com o evento SF2, sugerindo, porém, uma história evolutiva mais complexa. O presente estudo confirma a hipótese de que, de fato, há um evento distensivo posterior ao evento transcorrente, responsável por gerar falhas normais NE-SW e N-S, que seccionam as estruturas geradas nesse primeiro evento.

A aplicação da restauração estrutural 2D mostrou-se eficaz para analisar não apenas os diferentes estágios deformacionais e a relação dos padrões estruturais com pulsos tectônicos distintos, mas também para verificar a eficiência da escolha do método utilizado para essa etapa. A ferramenta de transformação “Move Sobre Falha (MSF)” predominantemente utilizada nos processos de restauração, foi bastante eficiente para ajustar os rejeitos verticais ao longo dos planos de falha, porém sua aplicação em falhas transcorrentes não permitiu justificar completamente a movimentação direcional nessas falhas, podendo ser o caso de alguns dos rejeitos residuais que persistiram na restauração. Ressalta-se, então, a necessidade de serem aplicadas outras transformações disponibilizadas pelo *software* Recon, que envolvam movimentações horizontais nos planos de falha e que, até mesmo, possam restaurar as dobras que se mantiveram na seção.

A restauração também se mostrou extremamente útil para validar e levantar questões importantes quanto à interpretação estrutural proposta, inclusive a respeito da elaboração da seção estratigráfica-estrutural original. Um aspecto a se destacar nesses casos são os rejeitos residuais que se concentram nas camadas basais da seção, que, ao mesmo tempo que podem indicar movimentos sucessivos, pode ser resultado apenas da forma como esses dados foram

obtidos, tendo em vista que as fotografias utilizadas para elaboração do fotomosaico (que serviu de base para construção da seção) foram tiradas do nível da base do afloramento, podendo ter causado certa distorção visual com relação ao ângulo com que a imagem foi obtida e o afloramento. Essa questão chama atenção para a necessidade de realizar uma cobertura de imagens que evitem ou minimizem distorções.

Pesquisas subsequentes poderão aprofundar a compreensão da relação entre as estruturas observadas em afloramentos e os distintos eventos de deformação registrados na região de Icapuí (CE), ao expandir essa análise para outros afloramentos. Esse feito permitirá uma comparação mais ampla e detalhada das hipóteses contempladas nesse estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, E. M. 1905. The Dynamics of Faulting. *Transactions of the Edinburgh Geological Society*, v.8, n. 3, p. 387-402.
- Angelier, J. T.; Mechler, P. 1977. Sur une methode graphique de recherche des contraintes principales egalemt utilisables en tectonique et en seismologie: la methode des diedres droits. *Bulletin de la Société géologique de France*, 7(6), 1309-1318.
- Angelim, L. A.; Nezi, J.R.; Torres, H.H.F.; Medeiros, V.C.; Santos, C.A.; Veiga Junior, J.P.; Mendes, V.; 2006. Geologia e recursos minerais do Estado do Rio Grande do Norte - Escala 1:500.000. Recife, PE: CPRM. Serviço Geológico do Brasil. 119 p.
- Araújo, L.N. 2023. Modelagem numérica dos eventos tectônicos cenozoicos na porção noroeste da Bacia Potiguar. eDissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 100p.
- Araujo, V.D.; Reyes-Peres, Y.A.; Lima, R.O; Pelosi, A.P.M.R.; Menezes, L.; Córdoba, V.C.; Lima-Filho, F.P. 2006. Fácies e Sistema Depositional da Formação Barreiras na Região da Barreira do Inferno, Litoral Oriental do Rio Grande do Norte. *Revista do Instituto de Geociências, Série Científica, USP*, v.6. n.2., p. 43-49.
- Bezerra, H.F.R & Vita-Finzi, C., Saadi, A., 2000. How active is a passive margin? Paleoseismicity in northeastern Brazil. *Geology* 2000;; 28 (7): 591–594.
- Bezerra, F.H.R., Castro, D.L., Maia, R.P., Sousa, M.O.L., Moura-Lima, E.N., Rossetti, D.F. Bertotti, G., Souza, Z.S., Nogueira F.C.C. 2020. Postrift stress field inversion in the Potiguar Basin, Brazil – Implications for petroleum systems and evolution of the Equatorial Margin of South America. *Marine and Petroleum Geology* 111, p. 88-104.
- Bezerra, F. H., Marques, F. O., Vasconcelos, D. L., Rossetti, D. F., Tavares, A. C., Maia, R. P., ... & Medeiros, W. E. 2023. Review of tectonic inversion of sedimentary basins in NE and N Brazil: Analysis of mechanisms, timing and effects on structures and relief. *Journal of South American Earth Sciences*, 126, 104356.
- Castro, D.L; Bezerra, F.H.R., 2015. Fault Evolution in the Potiguar rift termination, Equatorial Margin of Brazil. *Solid Earth*, 6, 185-196.
- Castro, D.L., Bezerra, F.H.R., Sousa, M.O.L., Fuck, R.A., 2012. Influence of Neoproterozoic tectonic fabric on the origin of the Potiguar Basin, Northeastern Brazil and its links with West Africa based on gravity and magnetic data. *J. Geodyn.* 54, 29–42.
- Chang H.K.; Koswmann R.O.; Figueredo A.M.F. 1988. New Concepts on the Development of East-Brazilian Marginal Basins. *Episodes*, 11(3): 194-202.
- Conceição, J.C.J., P. V. Zalan, and S. Wolff. 1988. Mecanismo, evolução e cronologia do *Rift* Sul-Atlântico, *Boletim de Geociências. PETROBRAS*, 2(2/4), 255-265.
- Dahlstrom, C.D.A., 1969. Balanced cross sections. *Canadian Journal of Earth Sciences* 6, 743–757.

- Elliott, D., 1983. The construction of balanced cross sections. *Journal of Structural Geology* 5, 101.
- Fossen, H. 2010. *Structural Geology*. Cambridge University Press. 463p.
- Fossen, H. 2017. *Structural Geology*. Cambridge University Press, 463 p.
- Gontijo, A.H.F. 1999. Morfotectônica do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul: Região da Serra da Bocaina, Estados de São Paulo e Rio de Janeiro. Rio Claro (Tese de Doutorado-Geologia/UNESP), 259 p
- Lima, C. C. U. D. 2010. Evidências da ação tectônica nos sedimentos da Formação Barreiras presentes do litoral de Sergipe e ao norte da Bahia. *Revista de Geografia (Recife)*, 27(1), 140-151.
- Lima, M. G. 2008. A história do intemperismo na Província Borborema Oriental, Nordeste do Brasil: implicações paleoclimáticas e tectônicas. Tese (Doutorado em Geodinâmica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte. 251 p.
- Maia, R. P., & Bezerra, F. H. R. 2014. Inversão neotectônica do relevo na Bacia Potiguar, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 15(1), 61-74.
- Matos, R.M.D. 1992. The northeast Brazilian Rift System. *Tectonics*, 11: p. 766-791.
- Matos, R.M.D.; 2000. Tectonic Evolution of the Equatorial South Atlantic. In: Mohriak, W. & Talwani, M. (eds.). *Atlantic Rifts and Continental Margins*. Geophysical Monograph, 115: 331-354.
- Medeiros, V. C.; Cavalcante, R.; Cunha, A. L. C.; Dantas, A. R.; Costa, A. P.; Brito, A. A.; Rodrigues, J. B.; Silva M. A. 2017. O furo estratigráfico de Riacho Fechado (Currais Novos/RN), Domínio Rio Piranhas-Seridó (Província Borborema, NE do Brasil): procedimentos e resultados. *Estudos Geológicos*. 27(3), 3-44.
- Moore, E. M., & Twiss, R. J. 2007. *Structural Geology*. Segunda edição. W. H. Freeman and Company.
- Moura-Lima, E. N. 2011. Tectônica pós-rifte na Bacia Potiguar. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 165 p
- Nogueira, F. C. C., Bezerra, F. H. R., & Castro, D. L. de. 2006. Deformação rúptil em depósitos da Formação Barreiras na porção leste da Bacia Potiguar. *Geologia USP. Série Científica*, 6(2), 51-59.
- Pessoa Neto, O.C.; Soares, U.M.; Silva, J.G.F.; Roesner, E.H.; Florencio, C.P.; Souza, C.A.V. 2007. Bacia Potiguar. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 15, n. 2, p. 357-369, maio/nov.
- Pinó, T. R. G.; Palheta, E. S. M.; Costa, F. G.; Vasconcelos, A. M.; Gomes, I. P.; Gomes, F. E. M.; Bessa, M. D. M. R.; Lima, A. F.; Holanda, J. L. R.; Freire, D. P. Mapa Geológico

- do Estado do Ceará – Escala 1:500.000. Projeto Geologia e Recursos Minerais do Estado do Ceará. Fortaleza | CE: CPRM, 2020, 1 mapa.
- Riccomini, C. 1989. O Rift Continental do Sudeste do Brasil. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo, 256 p.
- Rossetti, D.F.; Bezerra, F.H.; Dominguez, J.M.L. 2013. Late Oligocene–Miocene transgressions along the Equatorial and Eastern Margins of Brazil. *Earth-Science Reviews* 123, p. 87-112.
- Rossetti, D. F., Vasconcelos, D. L., Bezerra, F. H., Valeriano, M. M., Alves, F. C., & Molina, E. C. 2022. A large-scale domal relief due to intraplate neotectonic compression in entral Amazonia. *Geomorphology*, 407, 108218.
- Santi, M. R. 2002. Procedimentos computacionais para o balanceamento de seções geológicas. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro Rio de Janeiro.
- Sousa, D.C.; 2002. Litoestratigrafia e deformação Cenozóica na região de Icapuí, Ceará, e implicações para a estruturação de campos de Petróleo na borda ocidental da Bacia Potiguar (NE do Brasil). Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN. 192p.
- Sousa D.C.; Jardim de Sá, E.F.; Vital, H.; Nascimento, N.A.L. 2014. Falésias na Praia de Ponta Grossa, Icapuí, CE. In: Winge, M. Schobbenhaus, C.; Souza, C.R.G.; Fernandes, A.C.S.; Berbert-Born, M.; Queiroz, E.T.; Campos, D.A. Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil. Sítios Tectônicos (12). 503-514.
- Souza, S. F.; Castro, D. L.; Bezerra, F. H. R.; Barbosa, J. A. 2016. Relações do arcabouço tectônico do Rifte Potiguar com as estruturas do embasamento adjacente: análise de dados gravimétricos e magnéticos. *Revista do Instituto de Geociências - USP*. 16(1), 43-60. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v16i1p43-60>.
- Suguio, K.; Nogueira, A. C. R. 1999. Revisão crítica dos conhecimentos geológicos sobre a Formação (ou Grupo?) Barreiras do Neógeno e o seu possível significado como testemunho de alguns eventos geológicos mundiais. *Geociências*, São Paulo, (18)2: 439-460.
- Vauchez, A.; Neves, S.; Caby, R.; Corsini, M.; Egydio-Silva, M.; Arthaud, M.; Amaro, V. 1995. The Borborema Shear Zone System, NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*. 8(3-4), 247-266.
- Venâncio, M. B., Da Silva, F. C. A., Rodrigues, R. S., 2017. Desenvolvimento de fraturas Riedel durante cisalhamento dextral: a visão da modelagem física estrutural. *Resumo Expandido. Anais do XVI Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos*, p. 440-443.

APÊNDICE A

	A	B	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
5	Setor	Falha	Quantidade Horizontes	Azul	Roxa	Rosa	Verde água	Vermelha	Verde Claro	Azul escuro	Laranja	Azul Claro	Rosa claro	Verde escuro	Cinza	Azul bebe	Marrom
6	1	1.1	1								SIM						
7	1	1.2	4								SIM	SIM	SIM	SIM			
8	1	1.3	2										SIM	SIM			
9	1	1.4	5							SIM	SIM	SIM	SIM	SIM			
10	1	1.5	4					SIM	SIM	SIM	SIM						
11	1	1.6	6					SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM				
12	1	1.7	5						SIM	SIM	SIM	SIM	SIM				
13	1	1.8	2							SIM	SIM						
14	1	1.9	7					SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM			
15	1	1.10	3					SIM	SIM	SIM							
16	1	1.11	3		SIM			SIM	SIM								
17	1	1.12	5		SIM			SIM	SIM	SIM	SIM						
18	1	1.13	4					SIM	SIM	SIM	SIM						
19	1	1.14	3					SIM	SIM	SIM							
20	1	1.15	2							SIM	SIM						
21	1	1.16	8		SIM			SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM			
22	1	1.17	3		SIM			SIM	SIM	SIM							
23	1	1.18	4		SIM			SIM	SIM	SIM							
24	1	1.19	3					SIM	SIM	SIM							
25	1	1.20	4						SIM	SIM	SIM	SIM					
26	1	1.21	2						SIM	SIM	SIM						
27	1	1.22	3					SIM	SIM	SIM							
28	1	1.23	8		SIM			SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM			
29	1	1.24	2		SIM			SIM									
30	1	1.25	2					SIM	SIM								
31	1	1.26	3					SIM	SIM	SIM							
32	1	1.27	7		SIM	SIM		SIM	SIM	SIM	SIM	SIM					
33	1	1.28	3			SIM		SIM	SIM								
34	1	1.29	2						SIM	SIM							
35	1	1.30	4		SIM	SIM		SIM	SIM								
36	1	1.31	5					SIM	SIM	SIM	SIM	SIM					
37	1	1.32	6						SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM			
38	1	1.33	1						SIM								
39	1	1.34	9		SIM	SIM		SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM			
40	1	1.35	9		SIM	SIM		SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM			
41	1	1.36	3					SIM	SIM	SIM							
42	1	1.37	3						SIM	SIM	SIM						
43	1	1.38	9		SIM	SIM		SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM			
44	1	1.39	9		SIM	SIM		SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM			
45	1	1.40	8			SIM		SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM			
46	1	1.41	8			SIM		SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM			
47	1	1.42	8			SIM		SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM			
48	1	1.43	3										SIM	SIM			SIM
	Setor 1	Análise 1	Setor 3	Análise 3	Setor 4	Análise 4	Setor 5	Análise 5									

Figura A.1) Primeira aba do Excel para a simplificação do Setor 1 da seção estratigráfica-estrutural do afloramento Praia de Picos, contendo as informações das falhas (dispostas nas linhas) e horizontes estratigráficos (dispostos nas colunas). As células preenchidas por “SIM” correspondem à interseção entre um horizonte e uma falha que desloca este horizonte.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2	1	Horizonte	Situação	Quantas cortam	2	Melhores Horizontes	4	Melhores Falhas	
3		Marrom	(Tudo)	0		Verde Claro		1.2	
4		Azul bebe	(Tudo)	0		Azul Escuro		1.4	
5		Cinza	(Tudo)	0		Vermelha		1.5	
6		Verde escuro	(Tudo)	14		Laranja		1.6	
7		Rosa claro	(Tudo)	16		Azul Claro		1.9	
8		Azul Claro	(Tudo)	18		Rosa Claro		1.12	
9		Laranja	SIM	25		Verde Escuro		1.13	
10		Azul escuro	SIM	32		Roxa		1.16	
11		Verde Claro	SIM	35		Rosa Claro		1.23	
12		Vermelha	SIM	29				1.27	
13		Verde água	(Tudo)	0				1.31	
14		Rosa	(Tudo)	10				1.34	
15		Roxa	(Tudo)	13				1.35	
16		Azul	(Tudo)	0				1.38	
17								1.39	
18	3	Falhas	Quantidade Horizontes					1.40	
19		1.5	5					1.41	
20		1.6	6					1.42	
21		1.9	7					1.43	
22		1.12	6						
23		1.13	5						
24		1.16	9						
25		1.23	9						
26		1.27	7						
27		1.31	6						
28		1.34	10						
29		1.35	10						
30		1.38	10						
31		1.39	10						
32		1.40	9						
33		1.41	9						
34		1.42	9						
35		Total Geral	127						
36									
37									
		Setor 1	Análise 1	Setor 3	Análise 3	Setor 4	Análise 4	Setor 5	Análise 5

Figura A.2) Segunda aba do Excel para a simplificação do Setor 1 da seção estratigráfica-estrutural do afloramento Praia de Picos, contendo o tratamento e aplicação do filtro na tabela dinâmica. Em (1) está ativado o filtro na coluna “Situação” com a opção “SIM” para alguns dos horizontes mais importantes, identificados em (2). A partir disso foi gerada uma segunda planilha (3) contendo as falhas que seccionam os horizontes selecionados concomitantemente. Em (4) estão as principais falhas escolhidas, após sucessivas aplicações desse filtro.

	A	B	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	Setor	Falha	Quantidade Horizontes	Azul	Roxa	Rosa	Verde água	Vermelha	Verde Claro	Azul escuro	Laranja	Azul Claro	Rosa claro	Verde escuro	Cinza	Azul bebe	Marrom
2	3	3.1	5						SIM	SIM	SIM	SIM					SIM
3	3	3.2	6			SIM		SIM	SIM	SIM	SIM	SIM					
4	3	3.3	4		SIM	SIM		SIM	SIM								
5	3	3.4	7		SIM	SIM		SIM	SIM	SIM	SIM	SIM					
6	3	3.5	1		SIM												
7	3	3.6	5		SIM	SIM		SIM	SIM	SIM							
8	3	3.7	3		SIM	SIM		SIM									
9	3	3.8	4		SIM	SIM		SIM	SIM								
10	3	3.9	7		SIM	SIM		SIM	SIM	SIM	SIM	SIM					
11	3	3.10	3						SIM	SIM	SIM						
12	3	3.11	3						SIM	SIM	SIM						
13	3	3.12	7		SIM	SIM		SIM	SIM	SIM	SIM	SIM					
14	3	3.13	8		SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM					
15	3	3.14	6		SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM							
16	3	3.15	8		SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM					
17	3	3.16	4				SIM			SIM	SIM	SIM					
18	3	3.17	7		SIM	SIM	SIM	SIM		SIM	SIM	SIM					
19	3	3.18	7		SIM	SIM	SIM	SIM		SIM	SIM	SIM					
20	3	3.19	7		SIM	SIM	SIM	SIM		SIM	SIM	SIM					

Figura A.3) Primeira aba do Excel para a simplificação do Setor 3 da seção estratigráfica-estrutural do afloramento Praia de Picos, contendo as informações das falhas (dispostas nas linhas) e horizontes estratigráficos (dispostos nas colunas). As células preenchidas por “SIM” correspondem à interseção entre um horizonte e uma falha que desloca este horizonte.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2	1	Horizonte	Situação	Quantas Cortam	2	Melhores Horizontes	4	Melhores Falhas
3		Marrom	(Tudo)	0		Azul Escuro		3.2
4		Azul bebe	(Tudo)	0		Vermelho		3.3
5		Cinza	(Tudo)	0		Roxa		3.4
6		Verde escuro	(Tudo)	0		Rosa		3.6
7		Rosa claro	(Tudo)	0		Verde Claro		3.8
8		Azul Claro	(Tudo)	11		Laranja		3.9
9		Laranja	(Tudo)	13		Azul Claro		3.11
10		Azul escuro	SIM	15		Verde água		3.12
11		Verde Claro	(Tudo)	13				3.13
12		Vermelho	SIM	14				3.14
13		Verde água	(Tudo)	7				3.15
14		Rosa	SIM	14				3.17
15		Roxa	SIM	14				3.18
16		Azul	(Tudo)	0				3.19
17								
18		Falhas	Quantidade Horizontes					
19		3.4	7					
20		3.6	5					
21		3.9	7					
22		3.12	7					
23		3.13	8					
24		3.14	6					
25		3.15	8					
26		3.17	7					
27		3.18	7					
28		3.19	7					
29		Total Geral	69					
30								

Figura A.4) Segunda aba do Excel para a simplificação do Setor 3 da seção estratigráfica-estrutural do afloramento Praia de Picos, contendo o tratamento e aplicação do filtro na tabela dinâmica. Em (1) está ativado o filtro na coluna “Situação” com a opção “SIM” para alguns dos horizontes mais importantes, identificados em (2). A partir disso foi gerada uma segunda planilha (3) contendo as falhas que seccionam os horizontes selecionados concomitantemente. Em (4) estão as principais falhas escolhidas, após sucessivas aplicações desse filtro.

	A	B	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	Setor	Falha	Quantidade Horizontes	Azul	Roxa	Rosa	Verde água	Vermelha	Verde Claro	Azul escuro	Laranja	Azul Claro	Rosa claro	Verde escuro	Cinza	Azul bebe	Marrom
2	4	4.1	1		SIM												
3	4	4.2	3		SIM	SIM		SIM									
4	4	4.3	2			SIM		SIM									
5	4	4.4	7		SIM	SIM	SIM	SIM		SIM	SIM	SIM					
6	4	4.5	3				SIM			SIM	SIM						
7	4	4.6	7		SIM	SIM	SIM			SIM	SIM	SIM	SIM				
8	4	4.7	6			SIM	SIM			SIM	SIM	SIM	SIM				
9	4	4.8	7		SIM	SIM	SIM			SIM	SIM	SIM	SIM				
10	4	4.9	6			SIM	SIM			SIM	SIM	SIM	SIM				
11	4	4.10	7		SIM	SIM	SIM			SIM	SIM	SIM	SIM				
12	4	4.11	3			SIM	SIM			SIM							
13	4	4.12	7		SIM	SIM	SIM			SIM	SIM	SIM	SIM				
14	4	4.13	6			SIM	SIM			SIM	SIM	SIM	SIM				
15	4	4.14	6		SIM	SIM	SIM			SIM	SIM	SIM					
16	4	4.15	3			SIM	SIM			SIM							
17	4	4.16	6		SIM	SIM	SIM			SIM	SIM	SIM					

Figura A.5) Primeira aba do Excel para a simplificação do Setor 4 da seção estratigráfica-estrutural do afloramento Praia de Picos, contendo as informações das falhas (dispostas nas linhas) e horizontes estratigráficos (dispostos nas colunas). As células preenchidas por “SIM” correspondem à interseção entre um horizonte e uma falha que desloca este horizonte.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2	1	Horizonte	Situação	Quantas Cortam	2	Melhores Horizontes	4	Melhores Falhas
3		Marrom	(Tudo)	0		Rosa		4.4
4		Azul bebe	(Tudo)	0		Verde água		4.6
5		Cinza	(Tudo)	0		Azul Escuro		4.7
6		Verde escuro	(Tudo)	0		Laranja		4.8
7		Rosa claro	(Tudo)	7		Azul Claro		4.9
8		Azul Claro	(Tudo)	10		Roxa		4.10
9		Laranja	SIM	11		Rosa Claro		4.12
10		Azul escuro	(Tudo)	13		Vermelho		4.13
11		Verde Claro	(Tudo)	0				4.14
12		Vermelha	(Tudo)	3				4.16
13		Verde água	SIM	13				
14		Rosa	SIM	14				
15		Roxa	(Tudo)	9				
16		Azul	(Tudo)	0				
17								
18	3	Falhas	Quantidade Horizontes					
19		4.4	7					
20		4.6	7					
21		4.7	6					
22		4.8	7					
23		4.9	6					
24		4.10	7					
25		4.12	7					
26		4.13	6					
27		4.14	6					
28		4.16	6					
29		Total Geral	65					
30								
		Setor 1	Análise 1	Setor 3	Análise 3	Setor 4	Análise 4	Setor 5

Figura A.6) Segunda aba do Excel para a simplificação do Setor 4 da seção estratigráfica-estrutural do afloramento Praia de Picos, contendo o tratamento e aplicação do filtro na tabela dinâmica. Em (1) está ativado o filtro na coluna “Situação” com a opção “SIM” para alguns dos horizontes mais importantes, identificados em (2). A partir disso foi gerada uma segunda planilha (3) contendo as falhas que seccionam os horizontes selecionados concomitantemente. Em (4) estão as principais falhas escolhidas, após sucessivas aplicações desse filtro.

	A	B	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	Setor	Falha	Quantidade Horizontes	Azul	Roxa	Rosa	Verde água	Vermelha	Verde Claro	Azul escuro	Laranja	Azul Claro	Rosa claro	Verde escuro	Cinza	Azul bebe	Marrom
2	5	5.1	3	SIM	SIM	SIM											
3	5	5.2	3		SIM	SIM	SIM										
4	5	5.3	7	SIM	SIM	SIM	SIM			SIM	SIM	SIM					
5	5	5.4	3			SIM	SIM			SIM							
6	5	5.5	7	SIM	SIM	SIM	SIM			SIM	SIM	SIM					
7	5	5.6	4		SIM	SIM	SIM			SIM							
8	5	5.7	6		SIM	SIM	SIM			SIM	SIM	SIM					
9	5	5.8	6		SIM	SIM	SIM			SIM	SIM	SIM					
10	5	5.9	4		SIM	SIM	SIM			SIM							
11	5	5.10	3			SIM	SIM			SIM							
12	5	5.11	6		SIM	SIM	SIM			SIM	SIM	SIM					
13	5	5.12	4		SIM	SIM	SIM			SIM							
14	5	5.13	4			SIM	SIM			SIM	SIM						
15	5	5.14	3		SIM	SIM	SIM										
16	5	5.15	3		SIM	SIM	SIM										
17	5	5.16	3		SIM	SIM	SIM										
18	5	5.17	3		SIM	SIM	SIM										
19	5	5.18	2		SIM	SIM											

Figura A.7) Primeira aba do Excel para a simplificação do Setor 5 da seção estratigráfica-estrutural do afloramento Praia de Picos, contendo as informações das falhas (dispostas nas linhas) e horizontes estratigráficos (dispostos nas colunas). As células preenchidas por “SIM” correspondem à interseção entre um horizonte e uma falha que desloca este horizonte.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2	1	Horizonte	Situação	Quantas Cortam	2	Melhores Horizontes	4	Melhores Falhas
3		Marrom	(Tudo)	0		Rosa		5.1
4		Azul bebe	(Tudo)	0		Verde Água		5.3
5		Cinza	(Tudo)	0		Roxa		5.5
6		Verde escuro	(Tudo)	0		Azul escuro		5.6
7		Rosa claro	(Tudo)	0		Laranja		5.7
8		Azul Claro	(Tudo)	5		Azul Claro		5.8
9		Laranja	(Tudo)	6		Azul		5.9
10		Azul escuro	(Tudo)	11				5.11
11		Verde Claro	(Tudo)	0				5.12
12		Vermelha	(Tudo)	0				5.14
13		Verde água	SIM	16				5.15
14		Rosa	SIM	18				5.16
15		Roxa	SIM	15				5.17
16		Azul	(Tudo)	3				
17								
18	3	Falhas	Quantidade Horizontes					
19		5.2	3					
20		5.3	7					
21		5.5	7					
22		5.6	4					
23		5.7	6					
24		5.8	6					
25		5.9	4					
26		5.11	6					
27		5.12	4					
28		5.14	3					
29		5.15	3					
30		5.16	3					
31		5.17	3					
32		Total Geral	59					
33								
		Setor 1	Análise 1	Setor 3	Análise 3	Setor 4	Análise 4	Setor 5
							Análise 5	

Figura A.8) Segunda aba do Excel para a simplificação do Setor 5 da seção estratigráfica-estrutural do afloramento Praia de Picos, contendo o tratamento e aplicação do filtro na tabela dinâmica. Em (1) está ativado o filtro na coluna “Situação” com a opção “SIM” para alguns dos horizontes mais importantes, identificados em (2). A partir disso foi gerada uma segunda planilha (3) contendo as falhas que seccionam os horizontes selecionados concomitantemente. Em (4) estão as principais falhas escolhidas, após sucessivas aplicações desse filtro.