

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS *CAMPUS* DE RIO CLARO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS E MEIO AMBIENTE

**MODELO DE TRAPA ESTRUTURAL EM CARBONATOS FRATURADOS COM
FALHAS SELANTES: EXEMPLO DA FORMAÇÃO IRATI EM SALTINHO - SP**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

SAUL HARTMANN RIFFEL

ORIENTADOR: PROF. DR. NORBERTO MORALES
CO-ORIENTADOR: DR. IATA ANDERSON DE SOUZA

Rio Claro - SP
2020

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

SAUL HARTMANN RIFFEL

**MODELO DE TRAPA ESTRUTURAL EM CARBONATOS FRATURADOS COM
FALHAS SELANTES: EXEMPLO DA FORMAÇÃO IRATI EM SALTINHO - SP**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Norberto Morales

Co-orientador: Dr. Iata Anderson de Souza

Rio Claro – SP

2020

R564m

Riffel, Saul Hartmann

Modelo de trapa estrutural em carbonatos fraturados com falhas selantes: Exemplo da Formação Irati em Saltinho - SP / Saul Hartmann Riffel. -- Rio Claro, 2020

110 p. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Norberto Morales

Coorientador: Iata Anderson de Souza

1. Geologia Estrutural. 2. Trapas Estruturais. 3. Petróleo. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

SAUL HARTMANN RIFFEL

**MODELO DE TRAPA ESTRUTURAL EM CARBONATOS FRATURADOS COM
FALHAS SELANTES: EXEMPLO DA FORMAÇÃO IRATI EM SALTINHO - SP**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Norberto Morales

Prof. Dr. George Luiz Luvizotto

Dr. Marcos Roberto Fetter Lopes

Conceito: Aprovado

Rio Claro – SP

09 de Setembro de 2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Ester Maria Hartmann Riffel e Silmar Aloísio Riffel que apoiaram a minha decisão de ingressar no mestrado, com um objetivo de seguir a carreira acadêmica.

Ao auxílio, orientação e paciência do Prof. Dr. Norberto Morales e do Dr. Iata Anderson de Souza para a elaboração deste trabalho.

À Renata Sampaio Paes pelo apoio durante todo o mestrado e ajuda com formatação e português neste trabalho e aos amigos da Unesp que faziam parte do dia a dia com discussões durante o chimarrão pós almoço, Murilo, Mariza, Milena e Carioca.

Ao Prof. Dr. Adilson Viana Soares Júnior, Priscila Rodrigues e João Porcel pela ajuda durante os trabalhos de campo.

À M&G Mineração de Calcário Ltda. e ao engenheiro Marcelo Lopes Dall' Antônia por permitirem a realização do estudo nas cavas da mina e compartilhar informações a respeito das estruturas que eram identificadas à medida que a lavra avançava.

À parceria Unesp/Petrobrás e ao projeto LINEAS, do qual faço parte que, via Fundunesp, financia este trabalho e minha bolsa de mestrado.

Ao UNESPetro e seus funcionários, Márcia, Carlos e Hermes. Que direta e indiretamente ajudaram neste trabalho.

Ao Programa de Pós Graduação em Geociências e Meio Ambiente, principalmente a Rosângela e a Lauren.

À banca avaliadora composta pelo Prof. Dr. Norberto Morales, Prof. Dr. George Luiz Luvizotto e Dr. Marcos Roberto Fetter Lopes com correções e discussões necessárias para o aprofundamento e melhor entendimento do tema estudado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

Estudos estruturais realizados em rochas da Formação Irati permitiram a caracterização do controle das falhas e das fraturas na acumulação de hidrocarbonetos. A Mineração Amaral Machado está localizada na região de Saltinho - SP, onde é explorado o calcário dolomítico em uma camada homogênea de cerca de 3 metros de espessura, recoberta por folhelhos ricos em matéria orgânica e intercalados com camadas centimétricas de calcários e de silexitos. A estrutura local é representada por bancos de calcário falhados, formando dois blocos abatidos para SW, desnivelados por zonas de falhas normais de rejeito de mergulho bem acentuado, isoladas ou anastomosadas em arranjo multi-nucleado, com falhas paralelas a subparalelas, com rejeitos entre 3m (primeiro conjunto de falhas) e 10m (estimado pelo desnivelamento do banco calcário, não aflorante). As zonas de falhas se organizam nos limites dos blocos deslocados e as zonas de dano alcançam entre 1,5m a 0,5m de largura, nas quais são reconhecidos dúplexes distensivos, horstes e grábens alternados, zonas brechadas, leques distensivos, entre outras feições nas mais variadas escalas, desde centimétricas até métricas. Zonas brechadas ocorrem em contatos ora bruscos ora irregulares, balizados por rochas afaníticas pretas, foliadas, que não permitiram a passagem do óleo, servindo de selantes. Nas camadas heterolíticas, devido à plasticidade dos folhelhos, ocorrem dobras de arrasto associadas aos planos de falhas, indicando também o sentido de movimento nos planos de falha. Nos carbonatos, as falhas são representadas por contatos bruscos entre as camadas. As zonas de fraturas no banco principal de calcário apresentam juntas com mergulhos mais altos que as falhas, são abertas preenchidas com calcita ou com sinais de dissolução e de precipitação (drusas de calcita) e, como feição de destaque, apresentam forte exsudação de petróleo ao longo de seus planos. As falhas têm orientação preferencial NW-SE, cujas zonas principais mergulham 60° para SW, acompanhadas de feições antitéticas inclinadas 70° para NE. As juntas com indicação de abertura e forte exsudação têm também orientação preferencial NW-SE, subverticais. Em termos regionais, as zonas de falhas estão associadas aos altos e baixos estruturais reconhecidos na região, servindo de limite para o Horste de Pau D'Alho e a estrutura de Jibóia, estruturas estas associadas ao chamado Lineamento Tietê. O conjunto de falhas normais e de juntas abertas indica sistema local distensivo, com projeção do eixo mínimo de paleotensões em NE-SW, sub-horizontal. O quadro reconhecido representa interessante objeto de investigação do ponto de vista das fraturas como vias de migração de hidrocarbonetos e do material da zona de falha servindo de selante, aprisionando o óleo na camada de calcário confinada no bloco alto, definindo modelo de trapa estrutural.

Palavras Chave: Análise Estrutural, Trapa Estrutural, Carbonatos, Falha Selante.

ABSTRACT

The Irati Formation is of great importance in various contexts, such as the stratigraphic landmark of the Paraná Basin in the correlation between the pre-rupture continents of Gondwana by fossils, and the amount of organic matter present in their strata. The proximity with intrusive Mesozoic basic rocks is seen as responsible for the maturation of organic matter, leading to oil generation. Amaral Machado Mining is located in the region of Saltinho - SP. Dolomitic limestone is explored in a homogeneous layer about 3m thick, covered by shales rich in organic matter interbedded with centimetric layers of limestone and silexite. The local structure is represented by displaced limestone layers forming two SW-faulted blocks, uneven by fault zones, isolated or anastomosed in multi-nucleated fault arrangement, parallel to sub-parallel, with total displacement between 3m (first set of faults) and 10m (estimated by non-outcropping limestone bank unevenness). Fault zones (or damage zones) are organized within the boundaries of displaced blocks, and damage zones range from 1.5m to 0.5m wide, in which distensive duplexes, alternating horsts and grabens, breccia zones, distensive splays are recognized, among other features in the most varied scales, from centimetric to metric. Breccia zones occur in abrupt or irregular contacts, marked out by black, foliated aphanitic rocks, which restrain the passage of oil, served as sealants. In the heterolytic layers, due to the plasticity of the shales, there are drag folds associated with the fault planes, also indicating the sense of movement in the fault planes. In carbonates, the faults are represented by sudden contacts between the layers. The fracture zones in the limestone main bank have joints with dips steeper than the faults, are open filled with calcite or with signs of dissolution and precipitation (calcite druses) and, as a prominent feature, have strong oil exudation when throughout their plans. The faults have NW-SE preferred orientation, the main zones dip 60° to SW, accompanied by antithetical features inclined 70° to NE. Opening and strong exuding joints also have preferred NW-SE sub-vertical orientation. In regional terms, the fault zones are associated with the recognized structural highs and downs in the region, serving as a limit for the Pau D'Alho Horst and the Jibóia Structure, structures associated with the so-called Tietê Lineament. The set of normal faults and open joint indicates a distensive local system, with a projection of the minimum axis of paleostress in NE-SW, sub-horizontal. The recognized framework represents an interesting object of investigation from the point of view of fractures as migration routes of hydrocarbons and failure zone material as a sealant, trapping the oil in the limestone layer confined in the high block, defining a structural trap model.

Keywords: Structural analysis. Structural Trap. Carbonates. Fault-Rock Seal.

SUMÁRIO

| | | |
|--------|--|-----|
| 1. | INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1. | Objetivos e Justificativa..... | 13 |
| 1.2. | Localização da Área | 13 |
| 2. | CONTEXTO REGIONAL | 15 |
| 2.1. | O embasamento pré-cambriano | 15 |
| 2.2. | Bacia do Paraná | 16 |
| 2.3. | Contexto Estrutural Regional | 20 |
| 3. | MÉTODOS E ATIVIDADES | 25 |
| 4. | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 27 |
| 5. | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 44 |
| 5.1. | Mapa de lineamentos | 44 |
| 5.2. | Estruturas Observadas em Campo | 47 |
| 5.3. | Zonas de Falhas | 49 |
| 5.3.1. | Relação espessura do núcleo de falha / rejeito | 64 |
| 5.4. | Zonas Brechadas e Cataclásticas – rochas das zonas de falhas | 64 |
| 5.5. | Estilólitos | 70 |
| 5.6. | Zona de Dano..... | 73 |
| 5.6.1. | Relação entre estruturas e hidrocarboneto nas zonas de dano | 75 |
| 5.6.2. | Propagação do fraturamento | 80 |
| 5.7. | Análise estrutural: o quadro geométrico e cinemático..... | 84 |
| 5.8. | Eixos de Paleotensões: o quadro dinâmico..... | 88 |
| 5.9. | Modelo de trapa estrutural | 90 |
| 5.10. | Análise integrada dos dados | 94 |
| 6. | CONCLUSÕES | 95 |
| 7. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 97 |
| 8. | ANEXO I – TABELA DE TERMOS ASSOCIADOS A FRATURAS..... | 107 |

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 Localização da área na região. | 14 |
| Figura 2.1 Mapa geológico da região da borda da Bacia do Paraná (CPRM, 2006)..... | 15 |
| Figura 2.2 Coluna estratigráfica da Bacia do Paraná (PERINOTTO & ZAINI, 2008). | 17 |
| Figura 2.3 Estruturas da região leste da Bacia do Paraná, Fries (2008)..... | 21 |
| Figura 2.4 Mapa geológico da estrutura de Jibóia. (FRIES, 2008, adaptado de SOUSA, 2002). | 22 |
| Figura 2.5 Mapa com localização dos principais lineamentos do estado de São Paulo, Adaptado de Riccomini (1995, 1997). | 24 |
| Figura 4.1 Ilustração esquemática dos tipos de falhas principais e fraturas associadas (modificado de PEACOCK et al. 2016). | 28 |
| Figura 4.2 Evolução de zona de falha (WIBBERLEY & SHIPTON, 2010). | 30 |
| Figura 4.3 Classificação clássica de rochas de falha (BRODIE et al., 2007)..... | 31 |
| Figura 4.4 Fácies de preenchimento de núcleo de falha (adaptado de BASTESEN & BRAATHEN, 2010)..... | 32 |
| Figura 4.5 Geometrias de falhas, adaptado de Bastesen & Braathen (2010). | 33 |
| Figura 4.6 Evolução de rampas de falha. (BASTESEN & BRAATHEN, 2010)..... | 34 |
| Figura 4.7 Classificação de tipologia de zonas de dano (PEACOCK et al., 2017, adaptado de KIM et al., 2004). | 36 |
| Figura 4.8 a) Zona de dano para um núcleo de falha; b) Zona de dano extensa para zona de falha multinucleada (FAULKNER et al., 2010)..... | 37 |
| Figura 4.9 Permeabilidade e densidade de fraturamento em zonas de falha (FAULKNER et al., 2010)..... | 37 |
| Figura 4.10 A: Unidades e Interfaces mecânicas. B) Propagação de fraturas. (modificado por COOKE et al., 2006 de GROSS et al., 1995; UNDERWOOD et al., 2003)..... | 39 |
| Figura 4.11 Modelos numéricos de diferentes formatos de estilólitos a partir de diferentes condições (TOUSSAINT et al., 2018 adaptado de KOHEN et al., 2007, 2012)..... | 41 |
| Figura 4.12 Fraturas de abertura e de cisalhamento gerando abertura e canal de passagem de fluidos, com cimentação parcial | 43 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.13 Efeitos diagenéticos nas propriedades de abertura da fratura (WENNBERG et al., 2016)..... | 43 |
| Figura 5.1 Mapa de lineamentos interpretado na escala 1:100.000.. | 45 |
| Figura 5.2 Mapa de lineamento interpretado na escala 1:50.000..... | 46 |
| Figura 5.3 Localização das cavas Monte Olimpo e Bernardino..... | 47 |
| Figura 5.4 Frente Monte Olimpo, com principais falhas e pontos levantados em destaque (Base: Google Earth). | 48 |
| Figura 5.5 Bloco diagrama esquemático representativo da frente de lavra Monte Olimpo. | 49 |
| Figura 5.6 Rampa da falha principal, estriada com ondulações, degraus e ramificações. | 50 |
| Figura 5.7 Dúplex distensivo em plano de falha principal com dobras de arrasto..... | 51 |
| Figura 5.8 Falha antitética principal..... | 52 |
| Figura 5.9 Falhas observadas em diferentes escalas, associadas a uma zona de falha antitética principal..... | 53 |
| Figura 5.10 Pequenas falhas associadas à falha antitética principal com ramificações e curta zona brechada. | 54 |
| Figura 5.11 Rampa de falha principal em calcário dolomítico, com a ramificação da falha ao afetar o folhelho..... | 55 |
| Figura 5.12 Ramificação do plano principal de falha nas variações litológicas. | 56 |
| Figura 5.13 Visão geral da porção sudeste da cava Monte Olimpo (Cota 14)..... | 58 |
| Figura 5.14 Detalhe da porção central da figura 5.11 incluindo as falhas principais com exceção da maior, permitindo observar uma complexidade maior das estruturas com mais variações, ramificações e geometrias. | 58 |
| Figura 5.15 Detalhe de uma falha sintética secundária, com ramificação dos planos de falha. | 59 |
| Figura 5.16 Plano principal de falha com falhas secundárias. | 61 |
| Figura 5.17 Detalhe das estruturas relacionadas a falhas secundárias no calcário dolomítico. | 62 |
| Figura 5.18 Detalhe de falhas secundárias no calcário dolomítico, com preenchimento de brecha no plano sintético R subvertical..... | 63 |
| Figura 5.19 Gráfico gerado a partir das medidas de espessura do núcleo de falha e seus respectivos rejeitos. | 64 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.20 Folhelho cominuído (tectonito) estriado com lentes de calcita estriadas e calcita secundária..... | 65 |
| Figura 5.21 Localização das amostras de brecha carbonática 7A, 7B e 7C..... | 66 |
| Figura 5.22 Amostra 7A, com ambos materiais de brecha descritos. | 67 |
| Figura 5.23 Amostra 7B com blocos e fragmentos rotacionados..... | 68 |
| Figura 5.24 Amostra 7C com blocos e fragmentos rotacionados e dissolução de pressão, formando estilólitos..... | 69 |
| Figura 5.25 Estilólitos com ruído bimodal e eslicólitos em planos da falha (Amostra 7C).... | 70 |
| Figura 5.26 Estilólitos e eslicólitos em planos de falha com trecho com transição de estilólito para eslicólito (Amostra 7A). | 72 |
| Figura 5.27 Eslicólito com alto ângulo (Amostra 7B). | 72 |
| Figura 5.28 Zona de dano entre dois núcleos de falha. | 74 |
| Figura 5.29 Bandas de deformação em camada de calcário dolomítico. | 74 |
| Figura 5.30 Exsudação de hidrocarboneto em juntas na zona de dano..... | 77 |
| Figura 5.31 Rocha encaixante do gráben da figura 5.9C. | 78 |
| Figura 5.32 Plano de falha na porção NE de rejeito milimétrico porém com grande espaço gerado pela dissolução e remoção da brecha carbonática do núcleo de falha..... | 79 |
| Figura 5.33 Propagação de falha antitética em uma intercalação de carbonatos e folhelhos.. | 81 |
| Figura 5.34 Fatia interna do gráben presente na figura 5.9C. | 82 |
| Figura 5.35 Fatia externa do gráben presente na figura 5.9C..... | 83 |
| Figura 5.36 Estereograma com planos de falhas do tipo normal e respectivas estrias..... | 84 |
| Figura 5.37 Estereograma com planos de falhas e estrias da cava Monte Olimpo. | 85 |
| Figura 5.38 Estereograma com planos de falhas da cota 14 e respectivas estrias..... | 86 |
| Figura 5.39 Estereograma com planos de falhas da cava Bernardino e respectivas estrias. | 86 |
| Figura 5.40 Estereograma de contorno dos polos das juntas com destaque em verde para os polos das juntas com preenchimento de hidrocarboneto..... | 87 |
| Figura 5.41 Diagrama de reconstrução dos eixos de paleotensão para falhas normais NW-SE. | 88 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.42 Diagrama de reconstrução de eixos de paleotensão para falhas associadas a reativação transcorrente dextral NW-SE. | 89 |
| Figura 5.43 Diagrama de reconstrução de eixos de paleotensão para falhas associadas a transcorrência sinistral NW-SE. | 89 |
| Figura 5.44 Modelo de trapa estrutural reconhecido para ocorrência de hidrocarbonetos na área de estudo, Saltinho – SP. | 93 |
| Figura 5.45 Bloco diagrama representativo da área de estudo. | 94 |

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos terrenos do substrato rochoso do Sudeste do Brasil, é muito comum encontrar forte influência de traços de fraturas controlando a rede de drenagem e o quadro geomorfológico regional. Talvez o exemplo mais clássico seja o controle dos principais rios que cruzam o Planalto Ocidental no território paulista, fortemente direcionados NW-SE até encontrarem o flanco esquerdo do Rio Paraná. Porém, mesmo onde os traços principais do substrato rochoso são reconhecidamente marcados por estruturas NE-SW, como por exemplo, nos terrenos pré-cambrianos das regiões Sudeste e Sul do Brasil, os afluentes das drenagens principais se ajustam ao longo de pequenos traços de fratura, fortemente orientados NW-SE.

A estruturação presente na região dos municípios de Rio Claro, Piracicaba, Saltinho, Ipeúna, Charqueada e Limeira apresenta traços principais seguindo as direções NW-SE e NE-SW abordados acima e também E-W, além da presença de diversos altos e baixos estruturais limitados por falhas com estas direções e com variações de mergulho de camadas. Tais estruturas, associadas à presença de diques de diabásio mesozoicos e de rochas paleozoicas ricas matéria orgânica são quadros ideais para o estudo da relação estrutura/rocha/intrusões/hidrocarbonetos. Uma vez reconhecidas tais tipos de situações, sua investigação possibilita o detalhamento e melhor compreensão da geometria e dinâmica de trapas estruturais.

No Município de Saltinho – SP, a Mineração Amaral Machado explora calcário dolomítico da Formação Irati, em uma camada homogênea de cerca de 3m de espessura, recoberta por pacote heterolítico, constituído por folhelhos ricos em matéria orgânica e intercalações centimétricas de calcários e silexitos. Próximo à cava da mineração, há presença de rochas mesozoicas intrusivas, interpretadas como responsáveis pela maturação da matéria orgânica e consequente geração de petróleo. Na área da cava, foi identificada uma zona de falha com um intenso fraturamento e presença de um hidrocarboneto (que pode ser um Betume, Piche ou *Tar* na observação em amostras, que para uma padronização será chamado de betume neste trabalho) impregnado nos planos de fratura, o que configura um quadro geológico ideal para o estudo da associação entre a Formação Irati e as fraturas e permite uma caracterização de detalhe dos padrões em diferentes escalas e sua relação com o betume presente na área.

1.1. Objetivos e Justificativa

O objetivo do estudo é a caracterização de uma zona de falha que afeta a Formação Irati e a elaboração de um modelo de trapa estrutural para carbonatos fraturados com falhas selantes, com fraturas abertas e interconectadas criando porosidade e permeabilidade na rocha originalmente compacta e impermeável, com observações em multi-escalas, nas escalas de mapa, afloramento e amostras de mão.

Com este trabalho de análise estrutural do fraturamento de maciços rochosos aplicada é estabelecida uma caracterização das feições estruturais associadas aos lineamentos regionais, buscando analisar o quadro geométrico (planos de fraturas e falhas), cinemático (estrias e sentido de movimento) e dinâmico (determinação de eixos de paleotensão), verificando também o quadro das estruturas nas diferentes escalas.

O objeto de estudo, rochas carbonáticas da Formação Irati, com camadas de calcário e de folhelho rico em matéria orgânica intercalados, direciona para um entendimento de estruturas associadas aos processos de migração e acumulação de hidrocarbonetos. Assim, a elaboração de um modelo de trapa estrutural apresentado neste trabalho tem relevância para a indústria do petróleo, permitindo fazer o paralelo com depósitos importantes de hidrocarbonetos, uma vez que raramente há informações detalhadas e de fácil acesso neste contexto.

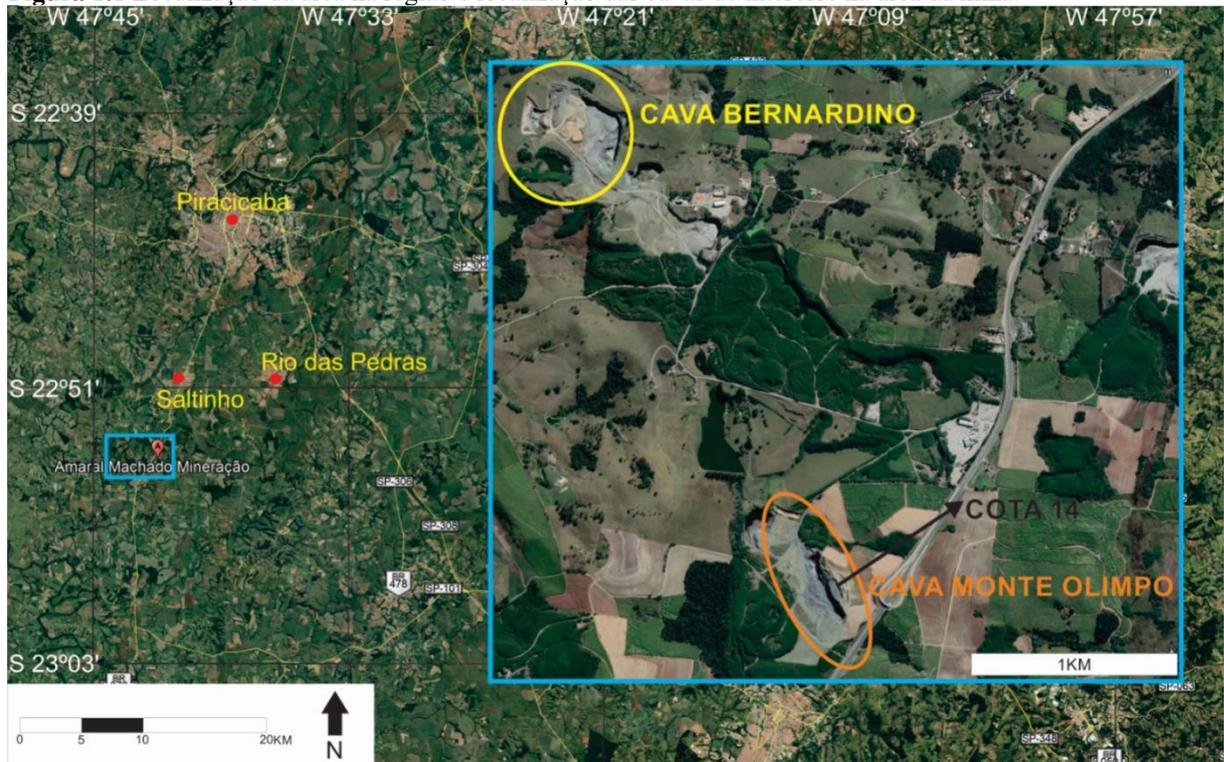
1.2. Localização da Área

A área está localizada na zona rural sul da Cidade de Saltinho - SP, na Mineração Amaral Machado. A via de acesso é a Rodovia Cornélio Pires (SP-127; BR-373), altura do quilometro 57, no sentido Piracicaba – Tietê (Figura 1.1). O estudo foi realizado em duas cavas, Monte Olimpo e Bernardino.

Na área ocorre o Membro Assistência da Formação Irati (CPRM, 2006), composto por calcários dolomíticos e folhelhos, em contato com siltitos da Formação Corumbataí, ambas unidades abatidas por falhas normais em arranjo de gráben e encaixadas na Formação Tatuí, além de um dique de diabásio correlato a Formação Serra Geral (FRIES, 2008).

Considerando os lineamentos conhecidos na região, as feições da área de estudo estão associadas com o Lineamento Tietê de direção NW/SE (RICCOMINI, 1997), alinhado com as estruturas de falhas locais, intrusões, segmentos retilíneos de drenagens e estruturas observadas no embasamento a sudeste (Figura 2.1).

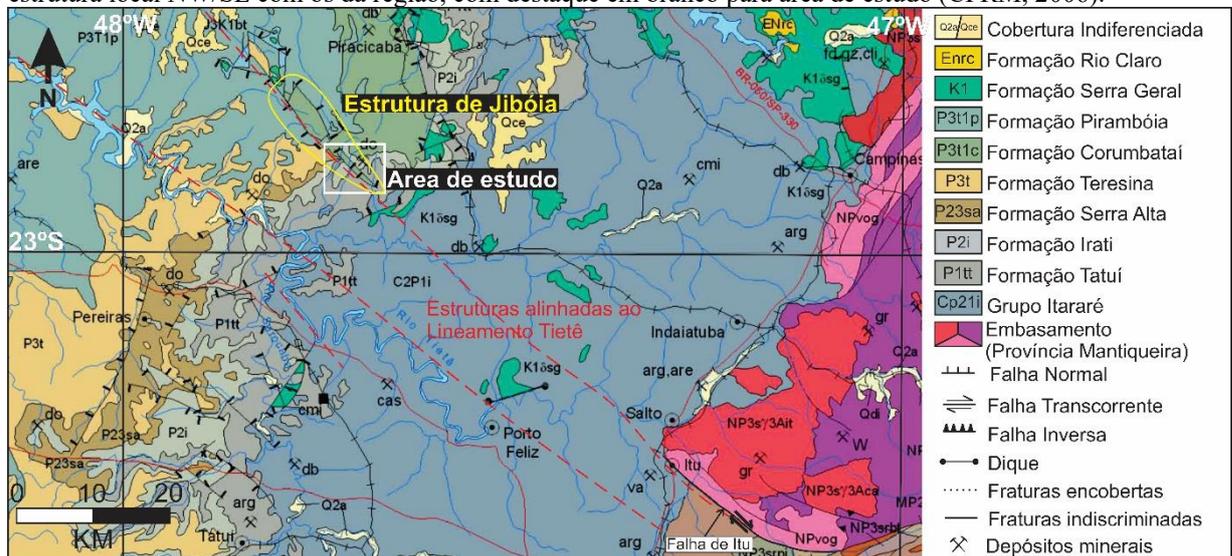
Figura 1.1 Localização da área na região e localização das cavas de interesse na área da mina.



2. CONTEXTO REGIONAL

Inserida na porção nordeste da Bacia do Paraná, a área de estudo está localizada em uma região caracterizada pela presença de diversos altos estruturais, como Pitanga, Pau d'Alho, Artemis e Jiboia (SOARES, 1974), sendo este último onde a área propriamente está inserida. Seus traços estruturais estão alinhados segundo a direção NW-SE, associados ao Lineamento Tietê, sendo possível reconhecer esta associação desde as falhas e zonas de falhas presentes em rochas do embasamento na região de Itu (Figura 2.1).

Figura 2.1 Mapa geológico da região da borda da Bacia do Paraná, permitindo a visualização do alinhamento da estrutura local NW/SE com os da região, com destaque em branco para área de estudo (CPRM, 2006).



2.1. O embasamento pré-cambriano

O embasamento está localizado a sudeste da área de estudo e apresenta importantes traços estruturais que se prolongam ao longo da bacia e que definem o Lineamento Tietê. Na porção sudeste do mapa acima o embasamento é caracterizado pela ocorrência dos blocos tectônicos Jundiá e São Roque (HASUI et al., 1969), com rochas idade neoproterozoica representadas pelos granitos Itu, Cachoeira e Terra Nova, e granodioritos, granitos, granitos gnáissicos e monzonitos do Complexo Varginha-Guaxupé no Bloco Jundiá (CPRM, 2006) e rochas metassedimentares de baixo grau metamórfico no Bloco São Roque.

Os grandes traços estruturais presentes são formados pelas falhas Itu, Piraí, Cururu e Cachoeira, associadas à Zona de Cisalhamento Jundiuvira, formando uma ramificação em um

sistema rabo de cavalo que se prolonga na direção NW. Estes traços avançam adentro da Bacia do Paraná após cruzar a Zona de Falha Campinas (NEVES, 2002). Os traços ficam evidenciados na rede de drenagem, especificamente nos alinhamentos do Rio Capivari Mirim prolongando-se até as cidades de Saltinho e Piracicaba com estruturação também alinhada com o Lineamento Tietê.

2.2. Bacia do Paraná

Na região são reconhecidas rochas da Supersequência Gondwana I (MILANI 1997), com idades mais recentes que o Carbonífero Médio. Estão presentes o Grupo Itararé e as formações Tatuí, Irati e Corumbataí. De acordo com o mapa geológico da CPRM (2006, Figura 2.1), ocorrem ainda as formações Teresina e Serra Alta que, no rumo nordeste, são agrupadas na Formação Corumbataí. As unidades estratigráficas mesozoicas são representadas pelas rochas areníticas da Formação Piramboia e pelos basaltos da Formação Serra Geral, com diversos diques associados. Os depósitos cenozoicos são representados pela Formação Rio Claro e por depósitos aluvionares (CPRM, 2006).

O Grupo Itararé é indiviso no estado de São Paulo, apresenta grande complexidade faciológica e é composto principalmente por conglomerados, arenitos, argilitos, folhelhos e diamictitos (SOARES, 1972). A sua espessura chega até 900m e a deposição se deu em um paleoambiente flúvio-deltaico a marinho plataformal com influência da glaciação permocarbonífera (MATTOS, 2012).

A Formação Tatuí, de idade eo-permiana, recobre o Grupo Itararé e é composta predominantemente de siltitos e siltitos arenosos, com intercalações pouco expressivas de rochas carbonáticas, sílexitos e arenitos. A Formação Tatuí é exclusiva do estado de São Paulo, sendo o único representante do Grupo Guatá na região. Segundo Chahud (2011), podem ser classificadas quatro fácies sedimentares principais nessa unidade: a inferior de arenitos finos e paleoambiente incerto; duas refletindo contexto não marinho compostas respectivamente por siltitos arenosos com fósseis de água doce e arenitos grossos ou conglomeráticos, denominadas fácies Ibicatu com caules fossilizados localmente; e a de topo com influência marinha onde são encontradas grandes estratificações cruzadas.

A subdivisão do Grupo Passa Dois por Schneider et al. (1974) nas formações Irati, Serra Alta, Teresina e Rio do Rasto é considerada nas porções central e sul do Lineamento Tietê,

enquanto que a norte, nos estados de São Paulo, Mato Grosso e Goiás, o Grupo Passa Dois se constitui das formações Irati e Corumbataí, subdivisão presente na área de estudo.

Figura 2.2 Coluna estratigráfica da Bacia do Paraná (modificada de PERINOTTO & ZAINÉ, 2008).

| ERA | PERÍODOS | GRUPO | FORMAÇÃO | LITOLOGIA | Espes. Aprox. (metros) | DESCRIÇÃO SUCINTA | AMBIENTE DE DEPOSIÇÃO |
|------------|-------------|-------------|---|-----------|------------------------|--|---|
| CENOZOICA | QUATERNÁRIO | PASSA DOIS | RIO CLARO | | 30 | Arenito pouco consolidado com lentes de argilas e níveis conglomeráticos na base (Arenitos = reservatório de água subterrânea em poços rasos da região de Rio Claro) | Continental: Planície aluvial e lacustre, Coluviões. |
| | NEÓGENO | | ITAQUERI | | 100 | Arenito conglomeráticos e Arenitos silicificados / ferricretes | Continental: Leques Aluviais, Fluvial e Lacustre. |
| | PALEÓGENO | | SERRA GERAL | | 100 | Derrames de basaltos com lentes de arenito na base. Diques e soleiras de diabásio (Basalto e diabásio = matéria prima para brita). | Magmatismo Fissural |
| MESOZOICA | CRETÁCEO | SÃO BENTO | BOTUCATU | | 100 | Arenito bem selecionados com grão bem arredondados e bem esféricos, pouca argila. | Continental: Desértico |
| | JURÁSSICO | | PIRAMBÓIA | | 150 | Arenito com grãos arredondados e esféricos. Diversos níveis de lamitos. <i>Aqüífero Guarani</i> | Continental: Fluvial e Desértico |
| | TRIÁSSICO | | CORUMBATAÍ | | 100 | Siltito contendo lentes de arenitos finos. Argilitos, siltitos, arenitos finos, níveis de calcário dolomíticos e coquinas. (Argilitos = matéria prima para indústria de cerâmica da região de Rio Claro) | Continental: Lacustre. Transicional: Planície de Maré |
| | | | IRATI | | 40 | Folhelhos, siltitos, folhelhos pirobetuminosos, calcários dolomíticos (pedreiras de calcário na região de Assistência, Ipeúna e Piracicaba / Saltinho) | Transicional: Laguna Marinho Raso: Plataforma |
| PALEOZOICA | PERMIANO | PASSA DOIS | TATUÍ | | 50 | Siltitos e siltitos arenosos | Transicional: Planície Costeira Marinho Raso: Plataforma |
| | | | Grupo ITARARÉ (indiviso no Estado de São Paulo) | | 100 | Arenitos, siltitos, varvitos e diamictitos (alguns verdadeiros tilitos) (Arenitos = reservatórios de água subterrânea Siltitos e siltitos arenosos em poços profundos da região) | Continental (Glacial): Aluvial - Leques e Fluvial; Lacustre. Transicional: Deltas. Marinho (glácio-marinho): Plataforma |
| | | CARBONÍFERO | EMBASAMENTO | | | Granitos, migmatitos, gnaisses, xistos, quartzitos, | |

A Formação Irati, definida em 1908 por I.C. White, foi subdividida em Membro Taquaral (base) e Membro Assistência (topo) por Barbosa & Almeida (1949). Esta formação é a que apresenta maior identidade e homogeneidade dentre as demais unidades da bacia, e sua deposição está associada a um período de grande estabilidade tectônica (GAMA JR, 1979). O Membro Taquaral é representado por siltito cinza e folhelho cinza-esverdeado escuro, com espessura que varia de 3 a 15 metros. O Membro Assistência apresenta folhelhos escuros pirobetuminosos intercalados com calcários dolomíticos e pelitos subordinados, com presença de nódulos de sílica e estromatólitos. A ocorrência de camadas mais espessas de calcário dolomítico na base do Membro Assistência promoveu a implantação de várias mineradoras desde meados do século passado na região. Em Schneider et al. (1974) foi proposto ambiente de águas marinhas calmas para o Membro Taquaral, e marinho plataformal de águas rasas para

o Membro Assistência. Para Perinotto & Zaine (2008), os sedimentos da Formação Irati foram depositados em ambiente misto lagunar e/ou marinho raso, com espessuras na ordem de 40 m. A idade da Formação Irati foi estabelecida por Daemon & Quadros (1970) como Permiano Superior (Kanzaniano) por meio de análises palinológicas, porém o trabalho de Santos et al. (2006) com datação geocronológica de zircões em cinzas vulcânicas na formação identificou idade neo-Artinskiana para a unidade (Permiano Inferior).

Há diversos fósseis característicos e descritos nesta unidade, como os répteis *Mesosaurus brasiliensis* e *Stereosternum tumidum*, crustáceos *Paulocaris* e *Clarkecaris*, além de fragmentos vegetais, palinomorfos e restos de peixes. Tal assembleia fóssilífera e a estabilidade tectônica durante a deposição torna a Formação Irati um horizonte-guia no contexto estratigráfico da Bacia do Paraná (SIMÕES & FITIPALDI, 1992).

A Formação Irati é notável pela presença de hidrocarbonetos associados aos folhelhos. Na região dos municípios de Rio Claro e Piracicaba, onde há proximidade com rochas básicas da Formação Serra Geral, foi reconhecida geração hidrocarbonetos, cenário em que a presença dos chamados altos estruturais tem influência na formação de trapas estruturais (GIMENEZ, 2015; AQUAROLI, 2013). Moraes Rego (1930 apud AMARAL, 1967) descreveu a Formação Irati como rocha geradora de hidrocarbonetos, que mais tarde foi comprovado nos trabalhos de Lisboa (2006), Araújo et al. (2008), Mateus et al. (2014) e Cerri et al. (2020).

Em Milani (2007) é constatado que há teores de matéria orgânica que chegam até 23%, um dos maiores teores do mundo. O óleo gerado foi definido como “imaturo e pesado” por Araújo et al. (2000) e a maturação desse óleo se deve a energia térmica fornecida pelas intrusões do Eocretáceo correlatas à Formação Serra Geral (THOMAZ FILHO et al., 2008). Milani (2007) ao descrever a presença de hidrocarbonetos na fazenda Betumita na estrutura de Anhemi (uma estrutura próxima da área de estudo, porém não presente no trabalho) caracterizou o local como um sistema petrolífero atípico onde houve condições de maturação, migração e acumulação de hidrocarbonetos na região. O hidrocarboneto é corriqueiramente identificado em arenitos, migrando a partir da Formação Irati (THOMAZ FILHO, 1982), geralmente retidos na Formação Piramboia, porém com hidrocarboneto identificado também na própria Formação Irati e até em camadas inferiores em locais próximos a falhas, como a Formação Tatuí (AQUAROLI, 2013, MORALES et al., 2014).

A Formação Corumbataí é composta principalmente por siltitos e argilitos, cuja cor varia desde cinza-avermelhados/esverdeados até arroxeados. Entre as fácies de granulação mais finas ocorrem lentes e camadas de arenito muito finos. A unidade composta pelos siltitos maciços da base é representada no mapa como Formação Serra Alta, enquanto que os pacotes

superiores de siltitos acamadados intercalados com arenito, no geral mais avermelhados, representariam a Formação Teresina. O ambiente de deposição proposto para essa unidade é de um ambiente marinho costeiro e pantanoso (principalmente dominado por marés), eventualmente lacustre (PERINOTTO & ZAINÉ, 2008). Na região, esta unidade pode chegar até 100 metros de espessura-

As formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral são as três representantes do Grupo São Bento, correspondentes aos três períodos da Era Mesozoica. Como descrito anteriormente, na área de estudo são destacadas intrusões correlatas a Formação Serra Geral.

A Formação Pirambóia é composta por arenitos e, segundo Assine & Soares (1995) há duas fácies principais. A primeira, de arenitos finos a médios, com estratificações cruzadas tangenciais na base e acanaladas e a outra de arenitos finos a grossos, conglomeráticos ou não, com estratificações cruzadas tabulares e acanaladas, com granodecrescência ascendente. O ambiente deposicional da formação se deu em ambiente flúvio-eólico (ASSINE et al., 2004).

A Formação Botucatu é composta por arenito médio a fino bem selecionado com grãos arredondados a sub-arredondados, cujo sistema deposicional foi eólico, em um ambiente desértico (PERINOTTO & ZAINÉ, 2008).

A Formação Serra Geral, do Cretáceo, é composta por derrames basálticos, diques e soleiras de diabásio, de coloração cinza escuro a preto com intercalações de camadas arenosas na porção basal (na região sul há registros também de magmatismo ácido). Segundo Soares & Landim (1975), trata-se de um magmatismo fissural que ocorreu nas condições desérticas da Formação Botucatu. A grande importância desta unidade estratigráfica é ter fornecido calor suficiente para a maturação da matéria orgânica presente na Formação Irati, a partir das intrusões na forma de diques ou soleiras.

A Formação Itaqueri (ALMEIDA & BARBOSA, 1953) é representante do Grupo Bauru na região e é composta por depósitos areno-conglomeráticos que se estendem a partir das encostas do Planalto Ocidental paulista para o oeste, estando presente no topo das serras de Itaqueri, Santana, São Carlos e Cuscuzeiro, portanto não ocorrendo na área de estudo.

Os depósitos cenozoicos são representados pela Formação Rio Claro e demais unidades de cobertura sedimentar indiferenciadas, principalmente as coberturas aluvionares. A Formação Rio Claro é constituída por sedimentos mal consolidados, arenito de granulação fina a média, maciço e mal selecionado, arenito conglomerático e argilito, com espessuras que podem atingir 40 metros (SCHNEIDER et al., 1974, ZAINÉ, 1994, 2000). Segundo Melo et al. (1997) o sistema deposicional da Formação Rio Claro foi fluvial meandrante.

2.3. Contexto Estrutural Regional

A área de estudo está inserida no contexto tectônico da borda leste da Bacia do Paraná, cuja evolução está relacionada à estabilização da Plataforma Sul Americana inserida no Supercontinente Gondwana, ao final do Ciclo Brasileiro. No interior da bacia, há uma série de lineamentos regionais nas direções NE-SW, NW-SE e E-W (ZALAN et al., 1990b).

Há um sistema de horstes e grábens presente na área, caracterizado por um conjunto de falhas de direção predominante N40–50W. O grande número de falhas nessa região faz com que cada setor apresente seu próprio mergulho, graças às diferenças de rejeito nas diferentes falhas (SOARES, 1974) ou ao basculamento associado às proximidades das falhas (SOUSA 2002).

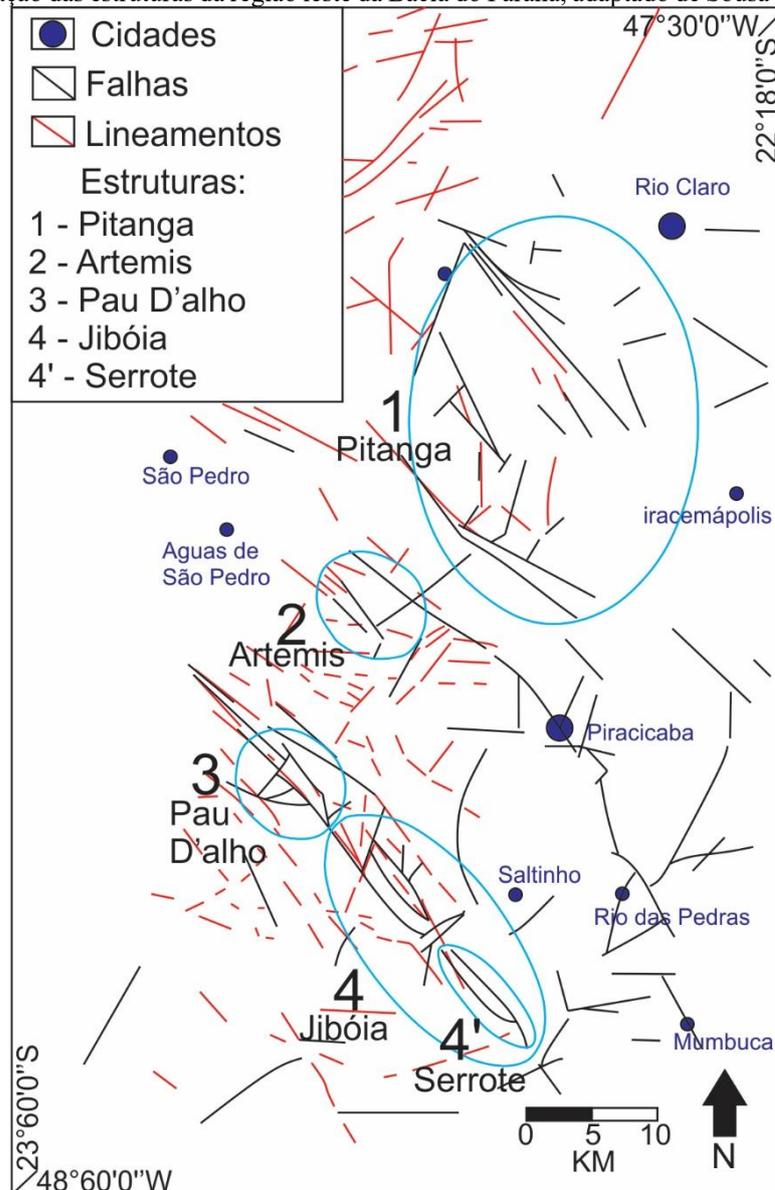
O lineamento NW-SE, ou Rio das Pedras-Piracicaba-Ipeúna, tem falhas secundárias N-S e E-W concordantes com os diques intrusivos de diabásio relacionados à Formação Serra Geral. Já o sistema Passa Cinco-Cabeça, apresenta falhas normais com direção preferencial NW-SE e falhas isoladas NNE-SSW (SOUSA & MORALES, 1999).

Segundo Zalan et al. (1990a), as zonas de falhas de direção NE-SW e NW-SE são as mais importantes e caracterizam antigos eventos já com registro no embasamento e que foram ativos ao longo da evolução da bacia. A presença de grandes diques e deformação está associada as zonas de falhas de direção NW-SE.

Os sistemas de falhas estão associados à subsidência da bacia, concordantes com a estrutura regional, alinhadas aos principais lineamentos que cortam o Estado de São Paulo.

A parte estrutural também tem importância na geomorfologia da região, principalmente no que diz respeito às drenagens, boa parte delas segue as direções dos lineamentos estruturais com direções NE-SW, E-W e NW-SE, além de quebras de relevo. Tais feições auxiliam na identificação das estruturas presentes na região: Pitanga, Anhembi, Artemis, Pau d'Alho e Jibóia. A denominação estrutura no lugar de alto estrutural segue a nomenclatura utilizada por Sousa (2002) por considerar que não se tratam exclusivamente de altos (Figura 2.3).

Figura 2.3 Localização das estruturas da região leste da Bacia do Paraná, adaptado de Sousa (2002) e Fries (2008).



A área de estudo, propriamente dita, está inserida na estrutura de Jibóia, descrita detalhadamente a seguir.

Estrutura de Jibóia

A estrutura de Jibóia está inserida no mesmo contexto das demais feições regionais (Pitanga, Anhembi, Artemis e Pau d'Alho), estudadas desde 1930 por Washburne, vinculadas ao interesse econômico pela propensão de armazenamento de hidrocarbonetos.

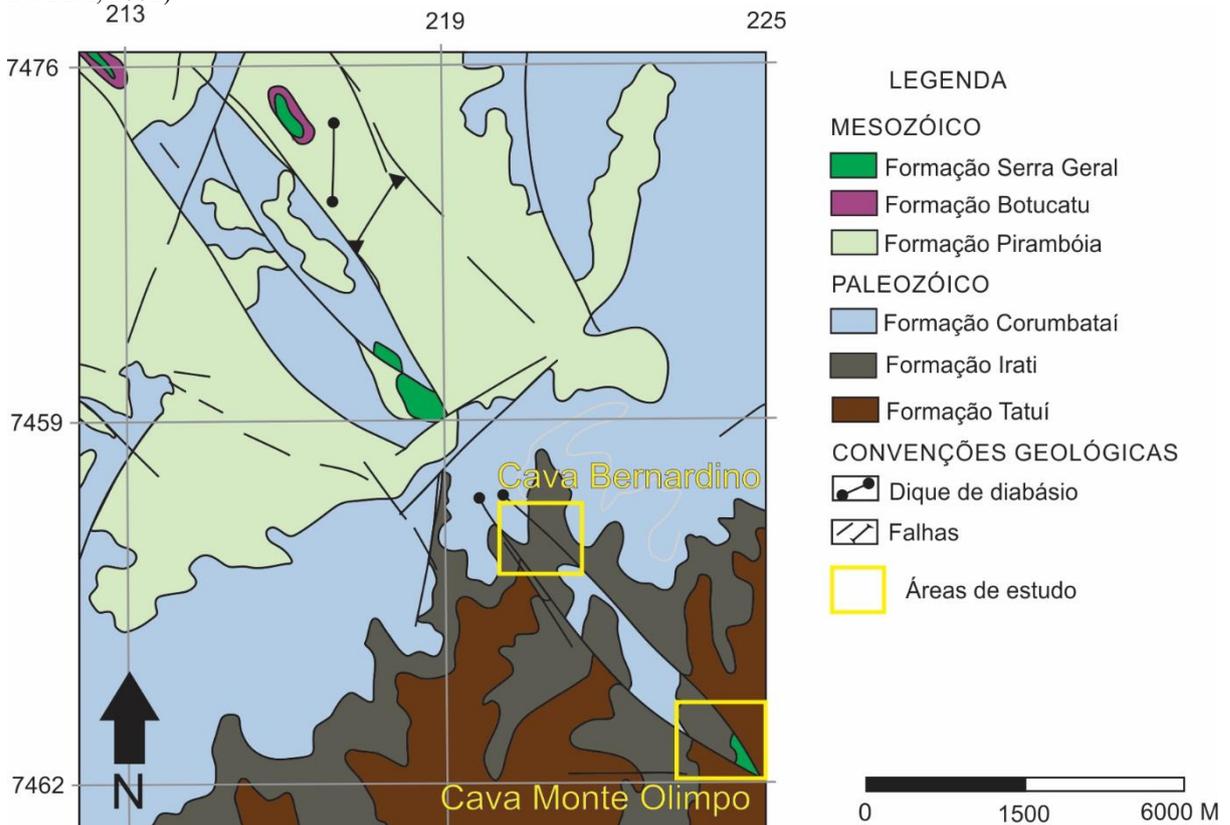
O Alto da Jibóia foi caracterizado por Soares (1974) como um alto estrutural limitado por falhas paralelas de direção N45W, concordante com a estrutura Pau d'Alho, localizada a noroeste. Tais estruturas são limitadas a sudoeste pela Falha Monte Branco. As falhas limítrofes

principais são do tipo normal, com mergulhos divergentes configurando horstes. No centro da estrutura ocorre a Formação Corumbataí, na mesma cota da Formação Pirambóia.

No prolongamento desta estrutura para SE ocorre uma estrutura em forma de gráben, responsável colocar a Formação Corumbataí no centro, em mesma cota da Formação Irati (mais antiga). Este gráben apresenta extensão aproximada de sete quilômetros, com menos de um quilometro de largura, limitado por duas falhas principais de direção N40W. A sua terminação na extremidade SE é marcada pelo encontro das falhas principais, em formato de cunha. Há presença de intrusões de diabásio do Cretáceo aproveitando as direções destas falhas (BATISTA, 2002 – Figura 2.4). Ainda segundo este autor, as falhas são de alto ângulo e a falha limitante a SW apresenta um basculamento das camadas do bloco alto, cujo acamamento chega a ter um mergulho de até 75°, e no limite NE foram reconhecidas dobras simétricas, com amplitude de até 4 metros, na Formação Irati.

Este gráben foi nomeado de “Serrote” por Soares (1974). Os trabalhos de Sousa (2002) e Fries (2008) consideraram este gráben como parte da estrutura Jibóia, enquanto Batista (2002) não o posiciona junto à estrutura e não utiliza nenhum nome próprio para a mesma, se referindo apenas como “Graben” a sudeste da estrutura de Jibóia.

Figura 2.4 Mapa geológico da estrutura de Jibóia e seu entorno, com destaque para o Gráben Serrote na porção sudeste. Os retângulos amarelos representam o enfoque principal deste trabalho. (FRIES, 2008, adaptado de SOUSA, 2002).



Lineamento Tietê

As feições estruturais associadas ao Lineamento Guapiara (FERREIRA et al.,1981) Cenozoicos, sua orientação é associada aos traços NS do litoral catarinense e NE-SW dos diques mesozoicos do litoral Paulista. Tais feições são agrupadas em um arranjo de fraturamento distensivo do tipo junção tríplice, cujas fraturas teriam sido então preenchidas pelo magma basáltico da Formação Serra Geral (COUTINHO, 2008).

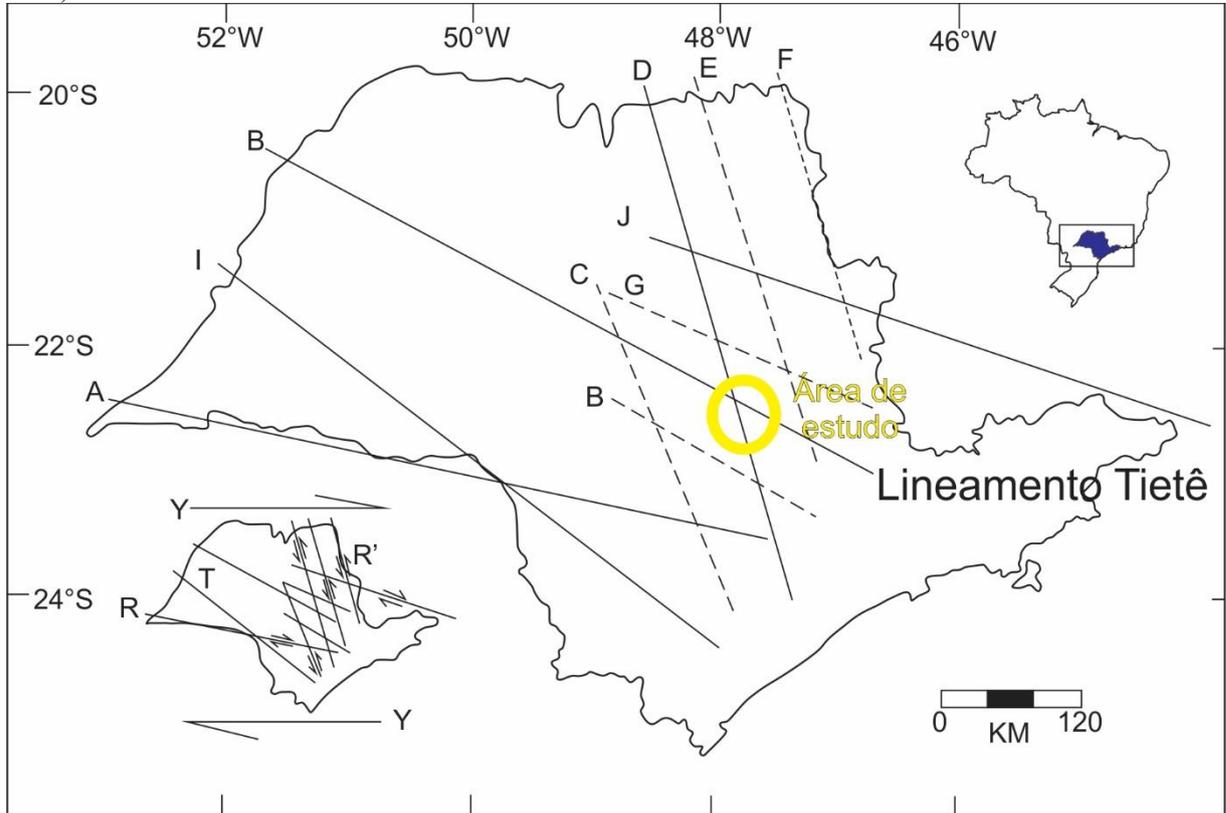
A área de estudo se encontra em uma região associada com o Lineamento Tietê, caracterizado por Saad (1977) como uma feição estrutural de direção NW, alinhada com o baixo curso do Rio Tietê, passando pela região dos municípios de Ibitinga, Rio Claro, São Carlos e Piracicaba, finalizando na Ilha de São Sebastião (COIMBRA, 1977).

Em Riccomini (1995, 1997) e Montanheiro (2015) é interpretado que o encontro do Lineamento Tietê com o Alinhamento do Rio Mogi-Guaçu estaria associado aos domos de Pitanga, Artemis, Pau D'Alho e Jibóia.

Em Cavallaro (2013), a partir de dados magnetométricos levantados na região do Alto Estrutural de Anhembi, foi identificada uma anomalia positiva de direção NW-SE associada ao Lineamento Tietê, reconhecendo um alto estrutural na região, demonstrando a atuação de eventos tectônicos ao longo do tempo, resultando em soerguimento e abatimento da faixa de influência deste lineamento.

Os trabalhos de Riccomini (1995, 1997) destacam que em uma deformação pós magmatismo do Serra Geral, houve uma transcorrência dextral no estado de São Paulo, onde as estruturas dos grandes lineamentos do estado, de origem pré-cambriana e já reativadas diversas vezes, passaram a se comportar como fraturas de Riedel, onde o Lineamento Tietê teve comportamento de R, atuando como falha sintética dextral (Figura 2.5).

Figura 2.5 Mapa com localização dos principais lineamentos do estado de São Paulo, sendo A- Rio Paranapanema; B – Tietê; C- Ibitinga-Botucatu; D - Rio Moji-Guaçu; E – Ribeirão Preto-Campinas; F – Rifaina-São João da Boa Vista; G – São Carlos-Leme; I – Guapiara; J – Jaboticabal. Com destaque para a letra B (lineamento tietê), e mapa menor com relações dos alinhamentos com o Modelo de Riedel com falhas sintéticas (R), Antitéticas (R') e de tração (T), em relação a um binário transcorrente dextral de direção E-W (Y), Adaptado de Riccomini (1995, 1997).



3. MÉTODOS E ATIVIDADES

A pesquisa foi conduzida de acordo com as seguintes atividades:

1. Trabalhos iniciais, envolvendo a aquisição e análise da documentação existente, com atividades de revisão bibliográfica, aquisição e interpretação de mapas temáticos e de imagens aéreas. Considerou-se também a aquisição de documentação para a fundamentação teórica a respeito de falhas, zonas de falhas e zonas de dano e sua importância no controle das ocorrências de hidrocarbonetos;

2. Preparação de mapas de drenagem, mapas geológicos e mapas de relevo, a partir das cartas topográficas, com vistas à preparação de análise macroscópica dos lineamentos estruturais a partir da rede de drenagem (padrão e anomalias) e do relevo (mapas hipsométricos e perfis topográficos, mapas SRTM);

3. Trabalhos de campo, com levantamento litoestrutural, coleta de amostras e obtenção de documentação fotográfica. Foi dedicada ênfase à obtenção de dados associados às zonas de dano associadas às falhas;

4. Trabalhos de escritório, com realização de:

- homogeneização de conceitos e forma de obtenção dos dados multidisciplinares, enfatizando aqueles mais importantes do ponto de vista de caracterização e de reativação de falhas;
- Tratamento, integração e interpretação dos dados levantados, com vistas à elaboração de mapas, perfis e estereogramas;
- Descrição e elaboração de esquemas dos padrões de fraturamento, nas escalas de mapa, afloramento, amostras, e imagens escaneadas de seções polidas de amostras;

5. Integração e interpretação dos resultados obtidos, de modo a permitir o conhecimento associado aos diversos temas e a sua integração;

6. Trabalhos finais, elaboração da monografia contendo a integração dos resultados alcançados, um modelo interpretativo do arranjo das zonas de falhas e sua associação com o betume confinado e da evolução tectônica associada.

A etapa de revisão bibliográfica teve dois focos separados, o primeiro e mais usual, foi o de contextualização geológica da área, comparando informações da geologia local de diferentes fontes e idades com a finalidade de compreender e elaborar o quadro da geologia regional. A segunda parte da revisão se deu para a atualização e nivelamento do conhecimento

de deformações rúpteis em termos de estruturas regionais e estruturas de maior detalhe, tendo em vista a caracterização das chamadas zonas de dano em falhas e zonas de falhas.

Para a elaboração e armazenamento dos mapas foi utilizado *software* ArcGIS 10.6 (ESRI, 2015), ideal para a representação e posterior integração e interpretação dos dados. O mapa elaborado para a interpretação de lineamentos foi gerado a partir da integração de imagens *ALOS* (*Advanced Land Observing Satellite*) obtidas online da NASA com resolução de 12,5 metros e *SRTM* (*Shuttle Radar Topography Mission*) obtidas online do USGS, com resolução de 30 metros. Foram geradas imagens de sombreamento com variações de azimute a cada 45° para uma elevação fixa de 45°, simulando a posição do sol em diferentes posições. As rosetas de direções dos lineamentos interpretadas a partir das imagens aéreas foram geradas no *AutoCad* ou *Rockworks* e apresentam duas informações: direções com maior frequência e direções com comprimento acumulado, o que possibilita uma interpretação mais completa dos dados.

Para o reconhecimento do padrão de fraturamento proposto, foram trabalhados os dados das falhas e das juntas. As medidas coletadas foram utilizadas para gerar os estereogramas de populações de juntas e falhas através do *software* Stereonet. Os diagramas estruturais foram construídos em diagrama equi-área projetado no Hemisfério Inferior. Para as falhas, foram representadas as projeções ciclográficas dos seus planos e as respectivas estrias. As medidas de planos de falha, estrias e sentido de movimento foram utilizadas para elaborar diagramas de reconstrução dos eixos de paleotensões, onde foi utilizado o *software* *Wintensor* (DELVAUX & SPERNER, 2003).

O tratamento das amostras coletadas, com vistas à descrição das feições microscópicas, consistiu de cortes perpendiculares a direção das fraturas principais, polimento e escaneamento no digitalizador fotográfico *professional Epson Perfection V700*, gerando imagens de alta resolução e grau de detalhe.

Após a descrição das estruturas foram realizadas classificações seguindo a metodologia do trabalho de Bastesen & Braathen (2010), segundo a geometria, composição e evolução das falhas, para a caracterização da zona de falha, enquanto as zonas de dano foram classificadas de acordo com a metodologia de Peacock et al. (2017) e Kim et al. (2004). As classificações estão descritas no capítulo a seguir.

Os resultados estão divididos de acordo com a compartimentação das estruturas e conceitos aplicados na área de estudo, além da integração e interpretação dos dados (mapas e estereogramas). A apresentação destes dados e sua discussão começam por uma visão geral, passando por cada tópico com aprofundamento no tema, e por fim uma análise geral sob um ponto de vista macroscópico, visando à relação das estruturas com o contexto regional.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Ao elaborar este trabalho, foi realizada uma densa revisão bibliográfica no tema falhas e zonas de falhas, com a finalidade de realizar uma atualização dos conceitos básicos e termos da Geologia Estrutural de acordo com os trabalhos publicados nos principais periódicos da área nos últimos anos. Com esta revisão, foi notada a necessidade de trazer estas informações neste capítulo, para permitir a compreensão dos termos atuais e específicos para o entendimento da análise estrutural do padrão de fraturamento de maciços rochosos de uma maneira aprofundada e avançada, buscando ser ortodoxo na utilização correta dos termos.

Panorama geral

As fraturas são quebras isoladas do maciço rochoso, onde a coesão das rochas é perdida, representando verdadeiras descontinuidades. Incluem as falhas e as zonas de falhas, ao longo das quais os blocos apresentam movimento relativo, as juntas, sem deslocamento, as juntas seladas, escondidas dentro do maciço rochoso, os veios, preenchidos com material tardio, os eslicólitos e os estilólitos, entre outros

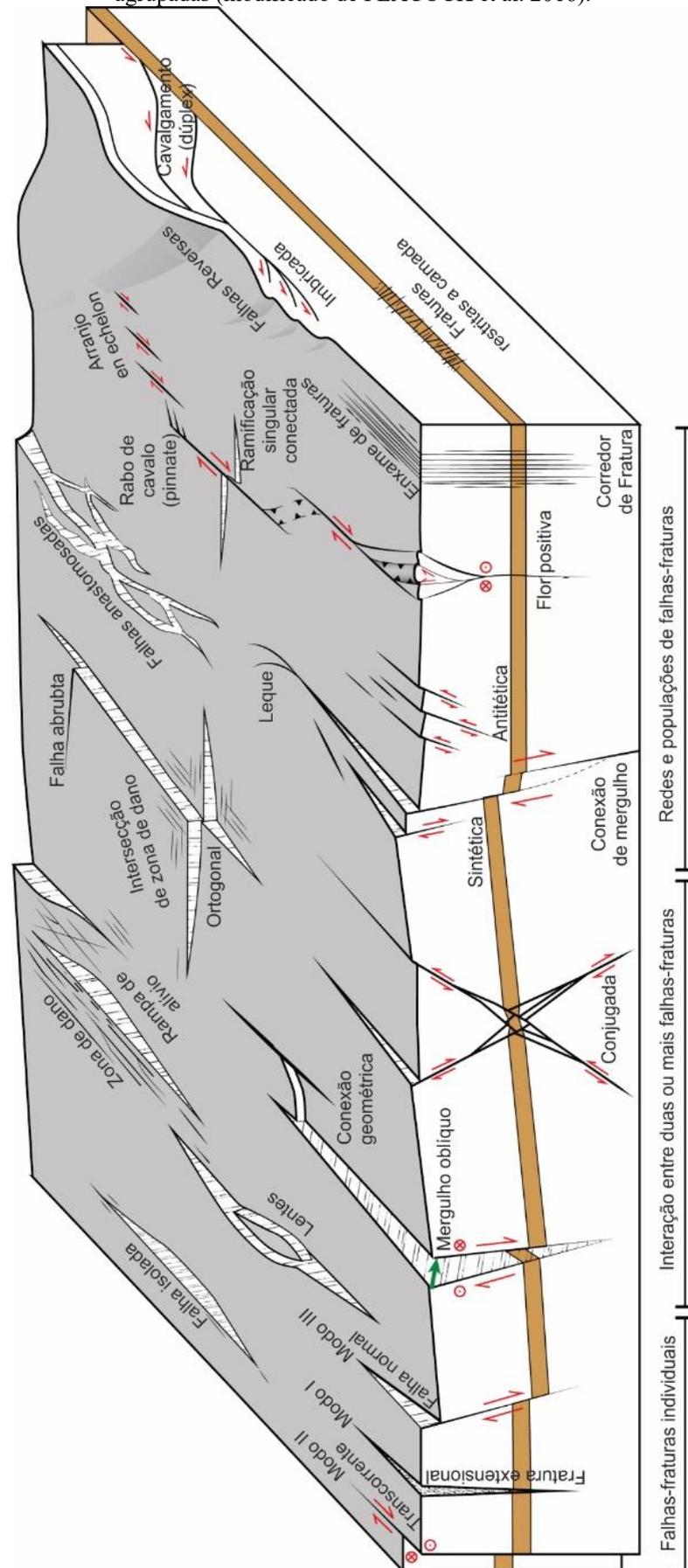
Peacock et al. (2016) elaboraram um glossário, estabelecendo uma relação de termos ligados a fraturas, onde deixam claro que comumente são utilizados termos genéricos nos trabalhos, mas acentuando como exemplo o termo fratura, que engloba falhas, juntas e veios.

A terminologia utilizada para o meio rúptil pode ser dividida em termos geológicos, geométricos, topológicos, cinemáticos e mecânicos (Anexo I).

Além das subdivisões dos termos, estes são agrupados em zonas de fraturas individuais, associações entre duas ou mais fraturas ou uma rede/população de fraturas, com suas respectivas estruturas associadas. O quadro geral apresentado por Peacock et al. (2016, Figura 4.1) mostra os termos principais para diferentes tipos de falhas (transcorrentes, normais e inversas) e fraturas associadas, considerando também sua ocorrência de forma isolada ou em conjuntos. As terminologias ali expostas são as utilizadas nesta dissertação a fim de manter uma nomenclatura atualizada e amplamente aceita pela sociedade científica da área em escala global.

Considerando a investigação proposta nesta pesquisa, a conceituação revisada tem ênfase na caracterização de falhas e zonas de falhas, com estruturas a elas associadas, as zonas de dano (*damage zones*), a refração e ramificação de fraturas em pacotes heterolíticos, os estilólitos e as fraturas abertas.

Figura 4.1 Ilustração esquemática dos tipos de falhas principais e fraturas associadas, em arranjos individuais ou agrupadas (modificado de PEACOCK et al. 2016).



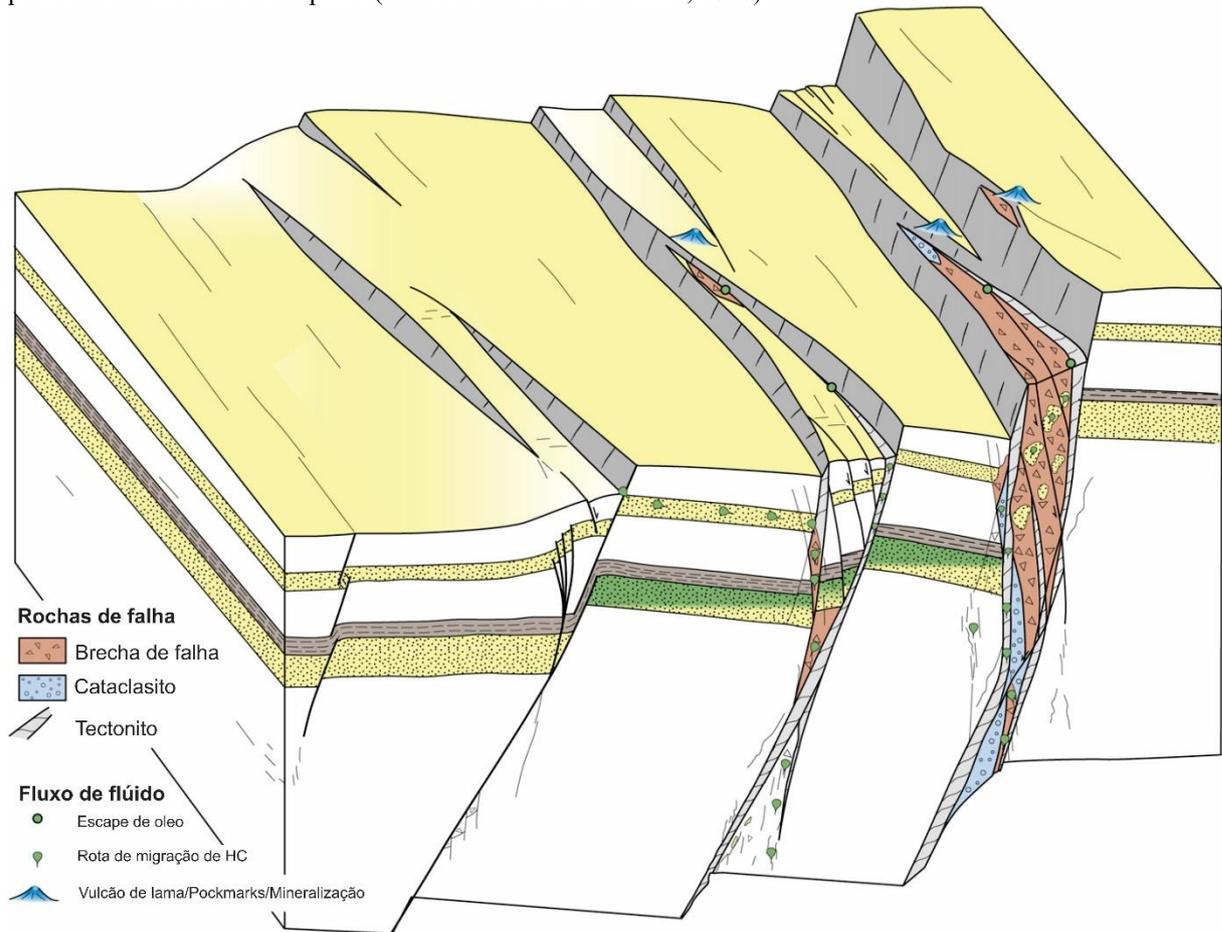
Zonas de falha

O termo zona de falha foi utilizado inicialmente por Hills (1940) para descrever uma zona com perturbações nas rochas entre blocos falhados. Hoje é utilizado para sistemas de segmentos de falhas que têm relação de paralelismo ou de conexão entre si ou que apresentam uma interação em uma extensão relativamente estreita (PEACOCK et al., 2000).

Segundo Ben-Zion & Sammis (2003), em uma revisão a respeito de zonas de falha, a classificação de uma área como zona de falha depende da escala, aplicando escala na grandeza de placas tectônicas, com, por exemplo, a costa oeste do estado da Califórnia. Os autores trazem à tona os três principais pontos de vista quanto às naturezas matemáticas, geométricas e mecânicas das falhas. A evolução das zonas é o resultado da sobreposição de diversas fases de deformação, o que resulta em rejeitos acumulativos e sua complexidade é definida já nos estágios iniciais de deformação. No entanto, a aplicação usual do termo se aplica para conjunto de planos de falhas paralelos ou sub-paralelos, anastomosados ou não, ou até mesmo convergentes, relacionados à escala de observação, normalmente macroscópica (em mapas) ou mesoscópica (em afloramentos).

O *Journal of Structural Geology* publicou uma edição especial sobre zonas de falha em 2010, com muitos artigos citados neste trabalho e em cuja nota editorial de Wibberley & Shipton (2010) apresentaram um bloco diagrama representativo de uma evolução de uma zona de falha em um sistema distensivo. Neste modelo teórico, uma rede de núcleos individuais de falhas se une progressivamente em uma grande e complexa zona de falha. O crescimento das falhas gera conexão entre elas, incorporando pedaços da rocha hospedeira em lentes ou cunhas, gerando uma zona de dano no entorno da falha, que eventualmente acaba sendo englobada no sistema, aumentando a dimensão da zona de falha. A ruptura e a geração de fragmentos de dimensões diversas geram caminhos, pelos quais os fluidos associados passam por esta zona de dano, que podem ser eventualmente retidos nestas áreas formando reservatórios (Figura 4.2).

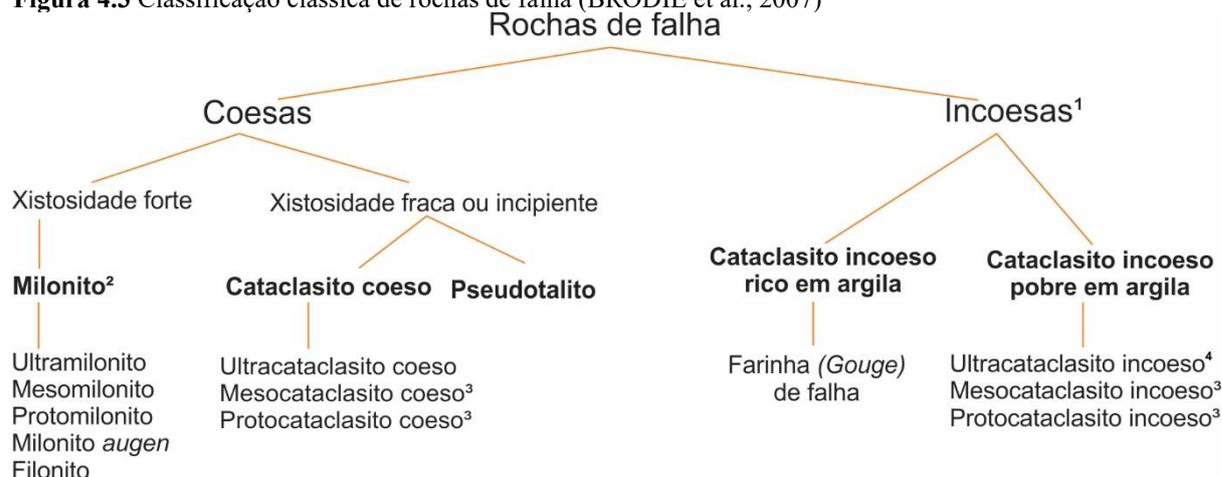
Figura 4.2 Evolução de zona de falha, com progressão da esquerda para direita, onde falhas individuais progridem para uma zona de falha complexa (WIBBERLEY & SHIPTON, 2010).



Classificação de rochas de falhas em carbonatos

Há uma classificação clássica de rochas em zonas de falhas, decorrente de processos que as originaram (p.e. HIGGINS, 1971) ou mais preocupada com as características descritivas (p.e. SIBSON, 1977; SNOKE et al. 1998). Principalmente relacionadas à deformação dútil, as rochas constituem a série cataclástica (Figura 4.3, BRODIE et al. 2007). Além da classificação em função de rochas coesas ou incoesas, ainda é possível classifica-las em função da presença ou não de foliação (milonitos e cataclasitos), com variação em função da proporção entre matriz e clastos (ultra-, meso- e proto-) ou das feições de recristalização associadas.

Figura 4.3 Classificação clássica de rochas de falha (BRODIE et al., 2007)



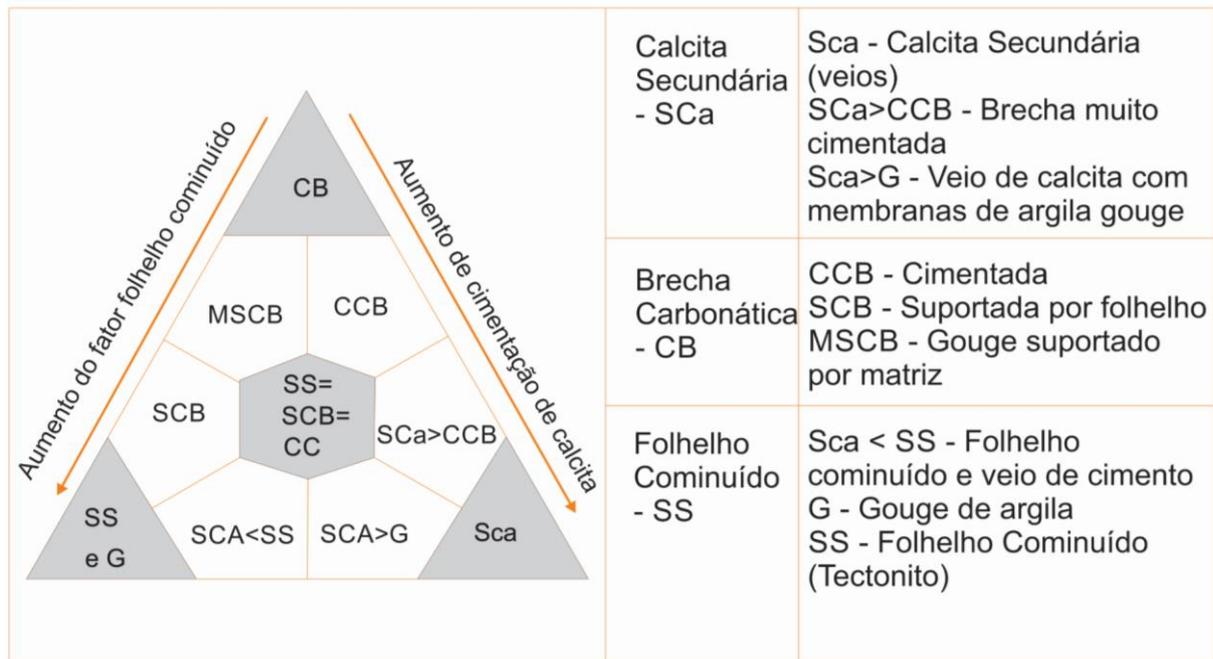
1. Incoesa: Capaz de quebrar em componentes granulares com os dedos ou com canivete.
2. Cataclasito coeso e foliado é indistinguível de milonitos em campo.
3. Cataclasitos grossos também podem ser chamados de brechas de falha (com o prefixo coeso ou incoeso).
4. Cataclasito de granulometria fina também pode ser chamado de *Gouge* de falha.

Obs: Os nomes de rochas incoesas podem ser subdivididos em variedades foliadas e não foliadas.

Neste trabalho, o tema está direcionado para a associação com as rochas carbonáticas. Bastesen & Braathen (2010) estudaram em detalhe 103 falhas extensionais em três localidades (Sinai - Egito, Svalbard - Noruega e região central de Omã), em carbonatos com granulometria fina, adotando um sistema de classificação geométrica das falhas, análise do preenchimento (núcleo) e espessura da zona de rochas cataclásticas. Resultou em uma classificação para o material rochoso de preenchimento das rochas de falhas em rochas carbonáticas.

Assim, as associações litológicas de falhas em rochas carbonáticas com relação ao preenchimento de seu núcleo que podem ser divididas nas fácies: Folhelho Cominuído (*Shale smear - SS*) (Lindsay et al., 1993; Yielding et al., 1997); Brecha Carbonática (CB) (Billi, 2005; Micareli et al., 2003, 2006); Calcita Secundária (SCa) (Benedicto et al., 2008); ou núcleos compostos que podem apresentar uma associação de até as três fácies juntas (Figura 4.4). De modo geral, fragmentos de carbonato se formam por rompimento rúptil; a matriz da brecha consiste em pequenos fragmentos de rocha na fração lama, brecha fina com diferentes graus de cimentação ou folhelho. Minerais secundários precipitados ocorrem em formas de veios de calcita e preenchimento de espaços como poros e, em muitos casos, a calcita precipitada forma membranas e lentes paralelas aos planos de falhas, formando um veio de fissura selante, descrito por Petit et al. (1999).

Figura 4.4 Fácies de preenchimento de núcleo de falha (adaptado de BASTESEN & BRAATHEN, 2010)



Classificação geométrica de falhas em rochas carbonáticas

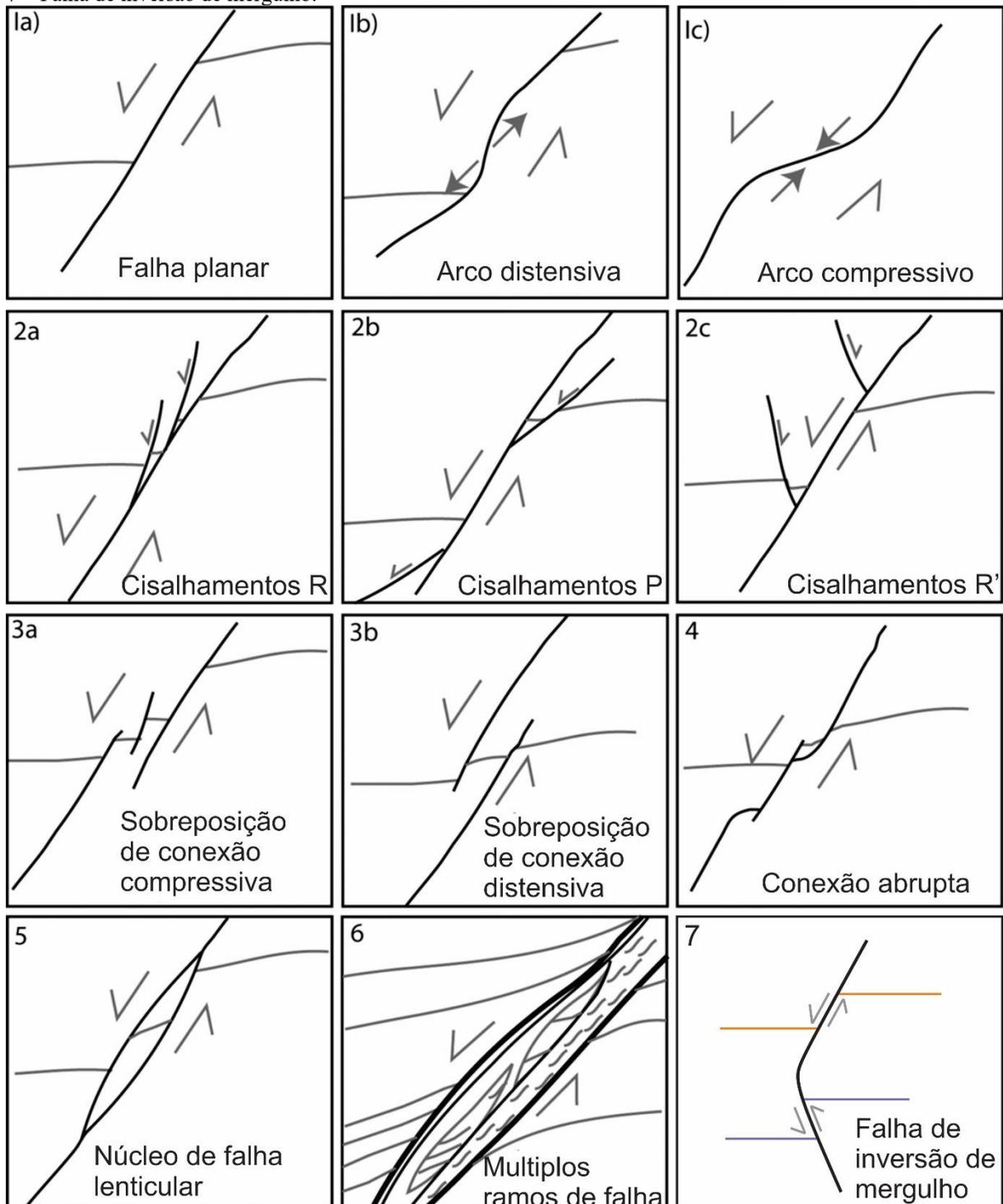
Abaixo estão representados os modelos para a classificação geométrica de falhas (discretas ou em conjuntos associados entre si) em rochas carbonáticas (BASTESEN & BRAATHEN, 2010) onde o Tipo 1 corresponde a falhas com geometria simples que se divide em três; o Tipo 2 representa os planos de falha com fraturas de cisalhamento secundárias referentes ao modelo de Riedel; as geometrias do Tipo 3 são de sobreposição de conexão entre planos; o Tipo 4 apresenta conexão abrupta entre planos; o Tipo 5 conta com lentes de rocha (dúplex); e o tipo 6 uma geometria complexa com múltiplos ramos e composições (Figura 4.5).

Geometria não descrita na literatura

Há um padrão observado na área e observado previamente em Itu em rochas do Grupo Itararé (SILVA et al., 2019) que não está presente na classificação geométrica acima apresentada, que é o de uma rampa de falha normal sobre rochas intercaladas que ao longo de sua extensão, em função da variação do ângulo de mergulho do plano de falha em profundidade, tem o rumo do mergulho invertido. Tal situação faz com que uma mesma falha tenha característica de movimento inverso, sem estar associado a um processo de reativação, e restrito a apenas um fragmento de sua extensão. A explicação pode passar por diversos fatores, porém parece estar associada à refração do plano de falha ao passar por materiais diferentes (diferentes

camadas), no caso representados por pequenos estratos de folhelho intercalados com o calcário dolomítico. Outra situação possível é a associação com falhas de movimento direcional (falhas transcorrentes) e feições de transtensão associadas (tipo flor negativa). Para a complementação então de geometrias observáveis, este último será denominado (neste trabalho): tipo 7 – Falha com inversão de mergulho, adicionada na Figura 4.5.

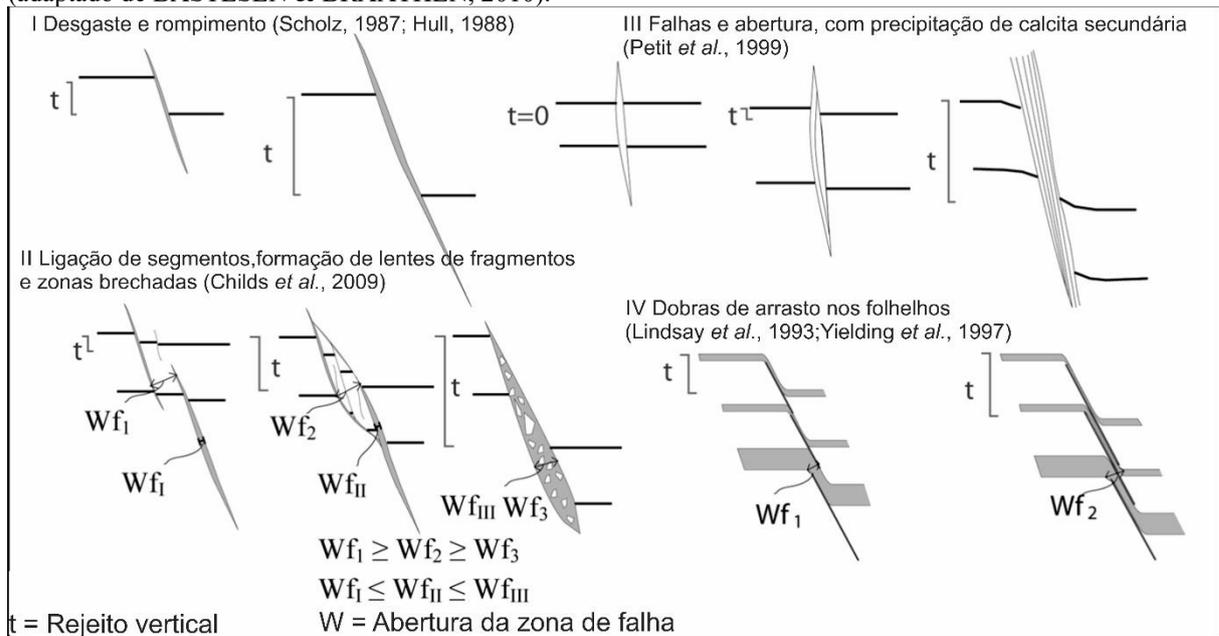
Figura 4.5 Classificação adaptada da versão apresentada por Bastesen & Braathen (2010) com a adição do Tipo 7 – Falha de inversão de mergulho.



Evolução de falhas em rochas carbonáticas

A evolução de falhas em carbonatos possui modelos para diferentes estágios e mecanismos, apresentados no trabalho de Bastesen & Braathen (2010), onde seus dados foram incorporados a informações coletadas da bibliografia. Os modelos apresentados na Figura 4.6 indicam diferentes situações de evolução de rampas de falha, onde é possível um desgaste e rompimento simples, ligações de segmentos que podem ocorrer com uma simples geometria de conexão entre planos, fragmentação e formação de lentes de rocha e uma lente com brecha e material cominuído, espaçamento entre os planos de falha com precipitação de calcita secundária, e dobras de arrasto de folhelho, onde o folhelho cominuído passa a ocupar o núcleo de falha.

Figura 4.6 Evolução de rampas de falha. 1) Desgaste e rompimento. 2) Ligação de segmentos, formação de lentes e zonas brechadas. 3) Falhas e abertura, com precipitação de calcita secundária. 4) Dobras de arrasto nos folhelhos. (adaptado de BASTESEN & BRAATHEN, 2010).



Como conclusão, os autores apresentam as falhas em carbonatos com geometria muito variável, onde a espessura do núcleo da falha em geral aumenta quanto maior o rejeito da falha, corroborando com os trabalhos de Ben-Zion & Sammis (2003) e Wibberley & Shipton (2010), que também indicam que a relação espessura do núcleo de falha/dimensão do rejeito diminui gradativamente com o aumento do movimento das falhas, pois os dois crescem em proporções diferentes. Em relação ao preenchimento dos núcleos da zona de falha (que podem apresentar brechas carbonáticas, *gouge* de carbonato e folhelho, folhelho cominuído, calcita secundária

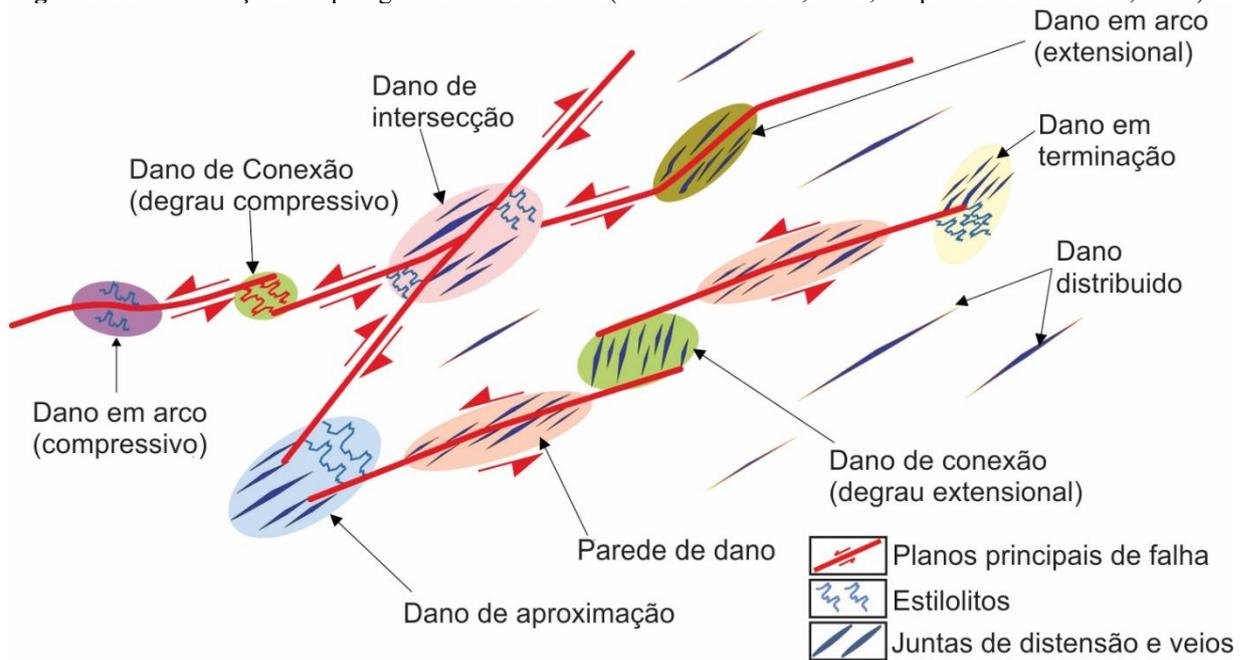
em forma de cimento e veios e lentes da rocha mãe) foi estabelecida uma relação entre as composições e o porte das falhas, onde falhas pequenas (0-1 metros de rejeito) possuem núcleos de falha finos localizados em pequenos segmentos, com membranas de veios de calcita, *gouge* e folhelho cisalhado; falhas moderadas (1-10 metros de rejeito) têm seus núcleos compostos predominantemente de lentes de rocha envoltas por superfícies estriadas com material fino e brechas carbonáticas; falhas grandes (10-100 metros de rejeito) consistem de membranas de veios cisalhados (filmes de calcita definindo *slickensides*) e brechas finas e lentes de rocha finas e localizadas; e falhas maiores que 100 metros possuem núcleos maiores, com ramificações e membranas de folhelho e brechas extensas muitas vezes cimentadas e lentes (BASTESEN & BRAATHEN, 2010).

Zonas de dano

O termo zona de dano (*damage zone*) se refere ao local onde uma zona ou um volume de deformação ou mudança no corpo rochoso é observável, em uma parede rochosa no entorno de uma superfície de falha, que tenha resultado do início, propagação, interação e construção do deslocamento em uma falha (COWIE & SCHOLZ, 1992; MCGRATH & DAVISON, 1995; KIM et al., 2004; PEACOCK et al., 2016). É sinônimo de frente de deformação e zona de textura (WU & GROSHONG, 1991).

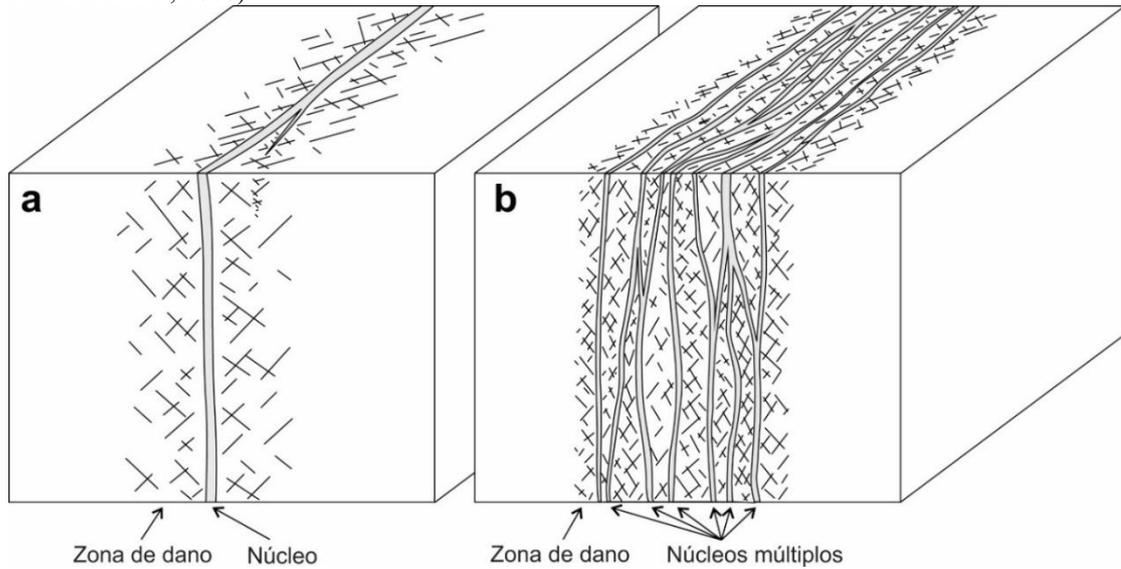
Em Kim et al. (2004) foi feita uma classificação dos tipos de zonas de dano, também discutida em Peacock et al. (2017), apresentada na Figura 4.7. Nesta figura, as zonas de danos seriam marcadas pela deformação das rochas por quebraimento, cominuição, dissolução e precipitação (zonas coloridas), associadas aos traços das falhas principais (traços vermelhos), associados a estruturas de compressão (estilólitos e/ou eslicólitos) ou de distensão (venulações e precipitações associadas ou fraturas abertas).

Figura 4.7 Classificação de tipologia de zonas de dano (PEACOCK et al., 2017, adaptado de KIM et al., 2004).



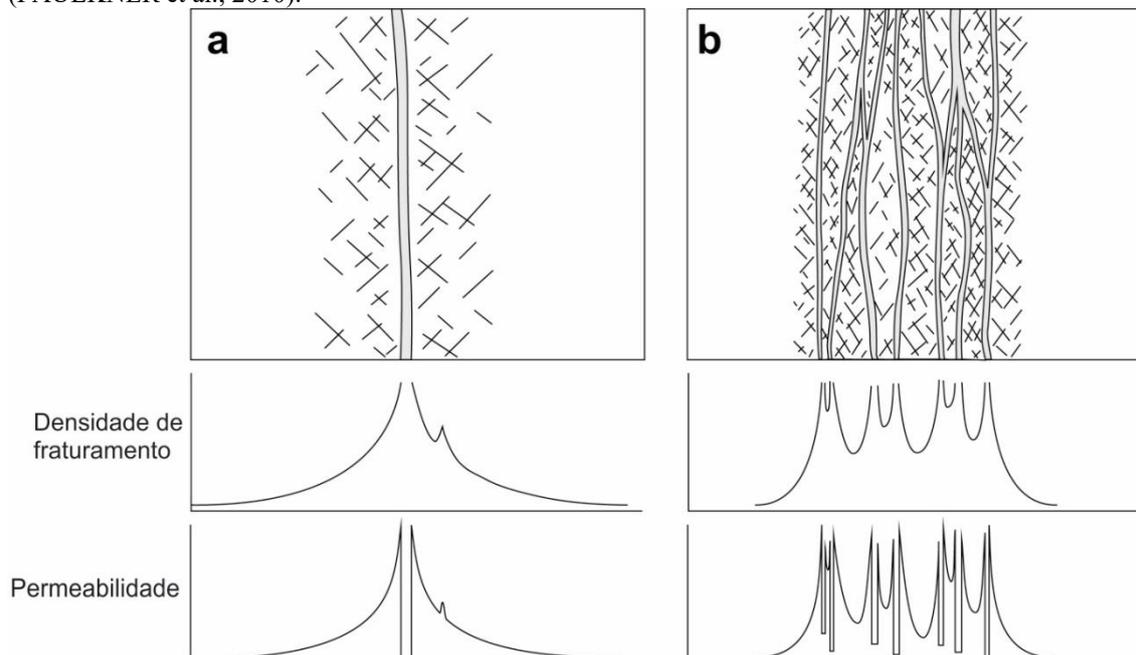
Em Faulkner et al. (2010) é discutida a passagem de fluidos em zonas de falha e a relevância das zonas de dano associadas, ressaltando que a zona de falha pode ter um núcleo individual que seja representativo da zona de dano com fraturamento aumentando de intensidade com a proximidade ao núcleo de falha; ou a zona de falha pode ter maior expressividade lateral e apresentar mais de um núcleo, sendo representada por diversas falhas que podem (ou não) ter características semelhantes entre si, mas que ocorrem associadas e formam uma única e extensa zona de dano, onde os hiatos entre os fragmentos da zona de dano sejam os núcleos das falhas, sem apresentar uma diminuição significativa de dano nestes intervalos (Figura 4.8), representando as chamadas zonas de falhas multinucleadas.

Figura 4.8 a) Zona de dano para um núcleo de falha; b) Zona de dano extensa para zona de falha multinucleada (FAULKNER et al., 2010).



Faulkner et al. (2010) avaliam a permeabilidade para o modelo apresentado, onde um núcleo de falha apresenta baixa permeabilidade enquanto a zona de dano em sua proximidade apresenta alta permeabilidade. Portanto, mesmo o grau de fraturamento aumentando em direção ao núcleo, o plano de falha principal, quando apresenta um núcleo preenchido ou caracterizado por zonas de deformação muito intensa, diminuindo com isso a permeabilidade local, pode atuar como um selante e a zona de dano em sua área próxima pode ser um bom reservatório ou bom canal de fluxo (Figura 4.9).

Figura 4.9 Permeabilidade e densidade de fraturamento em zonas de falha: A) Discreta; B) Multinucleada (FAULKNER et al., 2010).



Refração e ramificação de fraturas

A forma como a propagação de fraturas se dá nas rochas ocorre de forma heterogênea e depende de diversos fatores. Em rochas sedimentares onde o acamamento não sofreu grandes deformações, o espaçamento e densidade de juntas tem forte controle pela estratigrafia e não por falhas ou dobras (BECKER & GROSS, 1996; HANKS et al., 1997; UNDERWOOD et al., 2003, COOKE et al., 2006, ZAHM et al., 2009), mesmo sendo resultado do mesmo processo de formação das dobras ou falhas. O trabalho de Zahm et al. (2009) reforça esta ideia, e afirma que a previsão da propagação e distribuição do fraturamento em uma zona de dano e falha em carbonatos não é precisa sem a caracterização e reconhecimento das variações na estratigrafia, que por consequência afetam a avaliação da permeabilidade associada ao fraturamento.

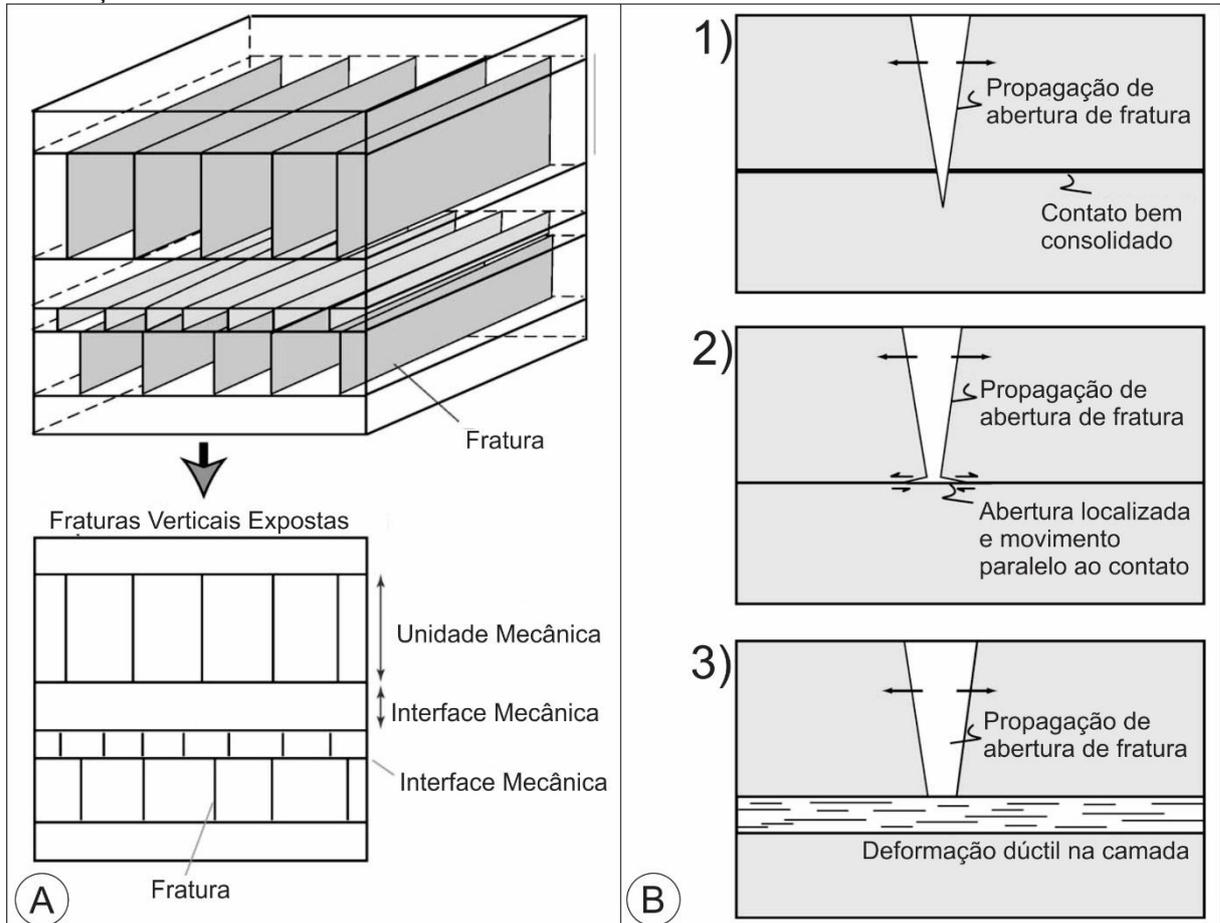
Fraturas perpendiculares ao acamamento tipicamente se iniciam em determinadas camadas e terminam em horizontes estratigráficos distintos (GROSS et al., 1995), porém não necessariamente todos os contatos marcam o início e fim de fraturas (COOKE et al. 2006). Assim, a extensão e o espaçamento dependem do material e espessura das unidades estratigráficas (HUANG & ANGELIER, 1989) e arranjos de propagação de fraturas se ajustam a controles exercidos pelo contraste reológico de sucessões litológicas heterogêneas.

As feições estratigráficas controladoras do início e término de uma fratura compreendem a estratigrafia mecânica de uma sequência. Uma unidade mecânica representa uma ou mais unidades estratigráficas que tem um fraturamento independente de outras unidades. Horizontes estratigráficos que limitam as fraturas são referidos como Interfaces Mecânicas (GROSS et al., 1995, Figura 4.10).

A formação de fraturas em rochas sedimentares começa a partir de pontos de fraqueza e ocorre na localidade com maior concentração destes pontos. Os dois mecanismos predominantes das terminações das fraturas são camadas dúcteis (que deformam internamente e resistem ao fraturamento) e horizontes fracos ou mal consolidados (que abrem e impedem a propagação das fraturas) apresentados na figura 4.10. O mecanismo predominante vai depender das propriedades da sucessão rochosa (COOKE et al., 2006).

O trabalho de Cooke et al. (2006) explica que uma interface fraca é aquela com baixa coesão e/ou coeficiente de fricção que pode abrir ou cisalhar (com refração) em resposta ao esforço imposto pela propagação da fratura. Esta deformação localizada atua para dissipar a concentração do esforço e conseqüentemente resulta na terminação da fratura. Caso os contatos estejam fortemente conectados, fraturas vão passar por esta interface sem qualquer tipo de refração (Figura 4.10).

Figura 4.10 A: As fraturas se desenvolvem ao longo de uma unidade mecânica que por sua vez são separadas por Interfaces Mecânicas, sem propagação de fraturas (modificado por COOKE et al., 2006 de GROSS et al., 1995; UNDERWOOD et al., 2003. B) 1) Propagação de fraturas passa sem mudanças por contatos bem consolidados; 2); terminam ou cisalham em interfaces fracas; 3); terminam em camadas dúcteis que absorvem internamente a deformação.



O trabalho de Zahm et al. (2009) apresenta informações a respeito não só da propagação de fraturas em unidades mecânicas para diferentes pacotes rochosos como também a variação do fraturamento ao mudar de interface. Camadas finas de material argiloso apresentam propagação de fraturas (previamente verticais) horizontalizadas, ou com ângulo menor em comparação ao material carbonático, o fenômeno é uma refração da propagação de fraturamento ao mudar de material.

Cerri et al. (2020) desenvolveram um estudo sobre o comportamento dos estratos heterolíticos do Membro Assistência da Formação Irati, discutindo a porosidade secundária causada por fraturas como predominante nos carbonatos, em função do comportamento mais plástico dos folhelhos, eventualmente com continuidade das fraturas, tratando da estratigrafia mecânica na mesma unidade e rochas deste trabalho. Cerri et al. (2020) concluíram que fraturas mais proeminentes e antigas passavam por diversas unidades mecânicas, sendo responsáveis pela migração, enquanto outras fraturas restritas às unidades armazenavam hidrocarbonetos.

Estilólitos

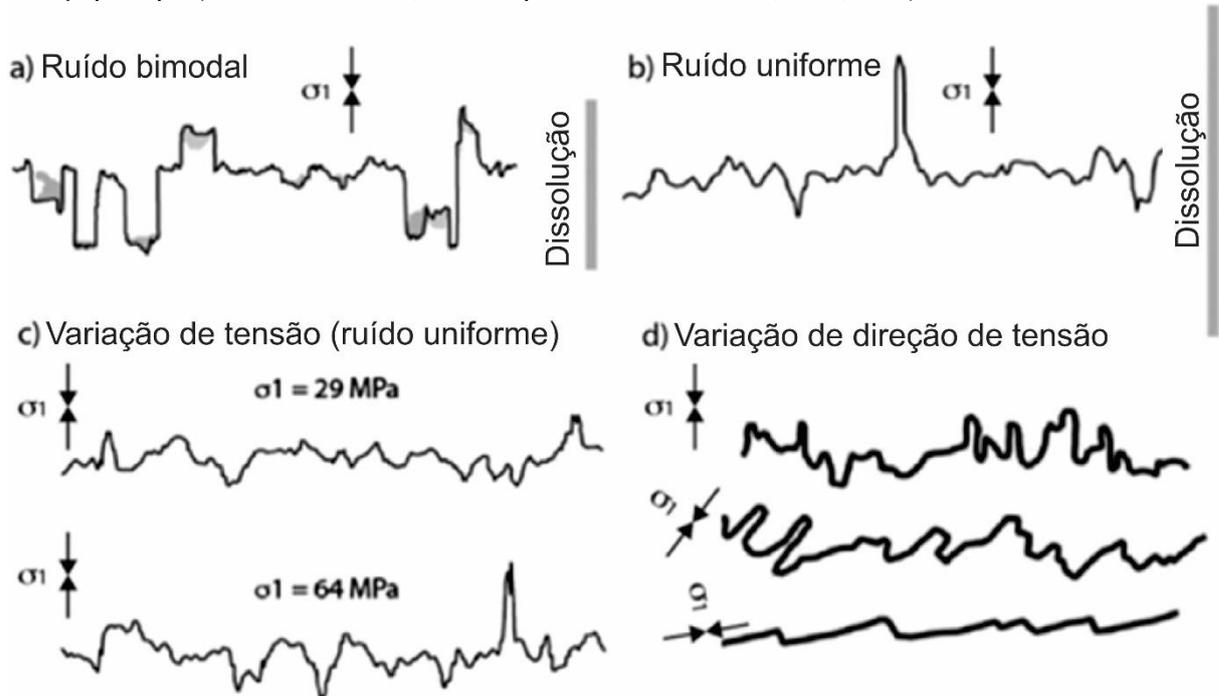
O trabalho de Toussaint et al. (2018) faz uma revisão completa sobre os estilólitos, apresentando o histórico do conhecimento sobre a estrutura até os conceitos modernos, com padrões e conclusões a partir da geometria destas estruturas. Para este trabalho, a parte que tem maior importância se refere aos conceitos e implicações com os esforços atuantes na formação dos estilólitos tectônicos e eslicólitos (*slickolites*), principalmente para estudos estruturais dos mármore, calcários, calcários dolomíticos e materiais siliciclásticos finos.

Estilólitos são interfaces que produzem superfícies rugosas formadas por dissolução por pressão localizada e apresentam concentração de minerais diferentes do material da rocha em que estão inseridas. Normalmente são identificados como linhas escuras (devido à acumulação de resíduos não solúveis) com aspecto dentado e são subdivididos de acordo com a gênese: Sedimentares ou Tectônicos, e de acordo com sua geometria: Estilólitos (paralelos ao acamamento) ou Eslicólitos (oblíquos ou perpendiculares).

Estilólitos sedimentares são resultado da compressão por carga de sedimentos em uma rocha, muitas vezes a escala chega a ser centimétrica e visível a olho nú. Os estilólitos tectônicos, representados e comumente conhecidos devido ao modelo rúptil de Anderson (1942), se formam usualmente perpendiculares à direção de maior esforço (σ_1), muitas vezes intersectando estilólitos sedimentares, enquanto os eslicólitos se formam em direções oblíquas a direção de σ_1 , aproveitando planos de fraqueza, como falhas e juntas.

Partículas minerais diferentes dissolvem em proporções e velocidades diferentes e as partículas que dissolvem mais lentamente tendem a causar as rugosidades. O processo de formação da rugosidade depende principalmente da direção do esforço (*stress*) e da heterogeneidade da rocha, chamado de ruído. Em Kohen et al. (2012) há um estudo de ruídos bimodais em comparação aos uniformes, onde ruídos bimodais produzem dentes maiores e com espaçamentos variáveis de acordo com os grãos, que caso sejam muito pronunciados (como por exemplo um fóssil com mínima dissolução), podem ser utilizados para estimar a quantidade de material dissolvido, enquanto em ruídos uniformes a amplitude das rugosidades não necessariamente será representativa da dissolução, por sofrerem dissolução mais facilmente e deixar margem para uma subestimação da dissolução. O que pode ser avaliado em comparações é o fato de amplitude da rugosidade aumentar com um esforço maior. Outro fator importante ressaltado por Koehn et al. (2007, 2012) e Toussaint et al. (2018) é que a direção de compressão é paralela às laterais (resultante) dos dentes dos estilólitos; logo, dentes inclinados indicam que a superfície de dissolução não foi normal ao eixo de máxima compressão (Figura 4.11).

Figura 4.11 Modelos numéricos de diferentes formatos de estilólitos a partir de diferentes condições; a) Modelo de rugosidade com duas granulometrias diferentes; b) Modelo de rugosidade com granulometria homogênea; c) Variação da rugosidade em função da tensão; d) Variação da geometria do estilólito em função da direção de esforço principal (TOUSSAINT et al., 2018 adaptado de KOHEN et al., 2007, 2012).



Características de fraturas abertas e passagem de fluidos em rochas carbonáticas

Em rochas com baixa permeabilidade como carbonatos, o fraturamento é de extrema importância para a retenção e passagem de fluidos em um sistema de reservatório, e este fator também é afetado indiretamente pela estratigrafia que, ao ser conhecida, facilita a previsão da arquitetura de fraturas em subsuperfície. Unidades mecânicas espessas possuem fraturas longas e contínuas, que são caminhos diretos para a migração de fluidos, enquanto unidades mecânicas pouco espessas possuem fraturas escalonadas com mais “obstáculos” para a migração de fluidos. No caso de intercalações de carbonatos e folhelhos, as camadas de folhelho que não são fraturadas funcionam como interfaces mecânicas entre unidades mecânicas fraturadas, o que gera compartimentações de fluidos em reservatório (COOKE et al., 2006).

O trabalho de Wennberg et al. (2016) tem foco na característica de juntas em carbonatos e seus impactos em fluxos de fluidos. Rochas pouco porosas, como alguns carbonatos, têm sua permeabilidade dependente do fraturamento da rocha. A formação destes canais é resultado da ação de processos mecânicos e diagenéticos. Segundo o autor, pelos processos mecânicos a

abertura das fraturas está associada a fraturas extensionais discretas que ocorrem parcialmente abertas e suas propriedades hidráulicas são controladas por dissolução e cimentação, e fraturas de cisalhamento singulares que geram aberturas em degraus no plano de falha devidas ao deslocamento ao longo de irregularidades nas superfícies das fraturas (Figura 5.12). As zonas de dano possuem alta densidade de fraturas que se intersectam, resultando em uma canalização de fluxos nestas porções. Segundo Nelson (2001), alguns parâmetros que devem ser levados em conta para modelar o fluxo de fluidos em reservatórios fraturados são: orientação das fraturas (devido a conectividade das fraturas), abertura (influencia na permeabilidade da fratura e porosidade), extensão da fratura (continuidade), densidade de fraturamento e o estado de tensões *in situ*.

Fraturas extensionais representadas por veios apresentam baixa permeabilidade por ter o espaço da fratura preenchido por um material precipitado, enquanto fraturas abertas com maior espaço no espaçamento da fratura tem permeabilidade mais elevada. Processos diagenéticos e a presença de fluidos ou dissolução são fatores que afetam a porosidade de uma unidade mecânica fraturada. A abertura total da fratura pode ser minimizada para a passagem de fluidos com cimentação ou aumentada com a dissolução das paredes, e em ambos os casos há comportamentos distintos para efeitos da fratura e da matriz. No caso da cimentação, o efeito matriz corresponde a uma cimentação próxima da fratura, enquanto o efeito da fratura implica em uma abertura parcial, onde o fluxo é diminuído por uma cimentação parcial da fratura. No cenário com dissolução, ao ocorrer na matriz, a porosidade da rocha é ampliada, sem influência direta na ampliação da abertura e da passagem do fluido pela fratura (apesar de poder aumentar a passagem de fluido pelos poros), enquanto que a dissolução atuando diretamente a partir da fratura resulta na formação de cavidades associadas, fraturas vesiculares (*vuggy fracture*), promovendo a ampliação do canal de passagem de fluidos (WENNBERG et al., 2016, Figura 4.13).

Fraturas cisalhantes também podem apresentar aberturas que podem ser cimentadas parcialmente ou totalmente e preservação de espaços que eventualmente podem servir como canais de fluxo de fluidos, neste caso o espaço é criado como uma zona de alívio distensivo (*releasing overlap*) (termo genérico para a abertura de espaço em qualquer tipo de falha, semelhante ao *pull apart* das falhas transcorrentes (WENNBERG et al., 2016). Porém em rochas poucos porosas, sua permeabilidade dependente do fraturamento, que por sua vez pode ser heterogênea e a passagem de fluidos acaba sendo canalizada em canais principais ao invés de pequenas fissuras, tornando muitas fraturas ineficazes para a passagem de fluidos.

Figura 4.12 Fraturas de abertura e de cisalhamento gerando abertura e canal de passagem de fluidos, com cimentação parcial

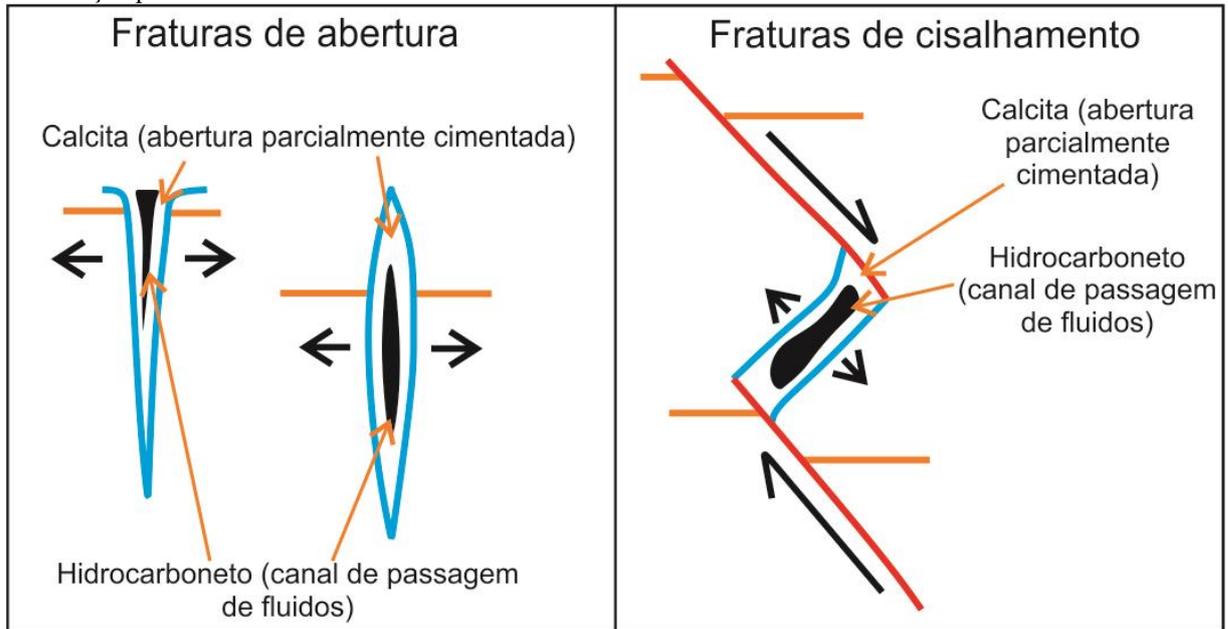
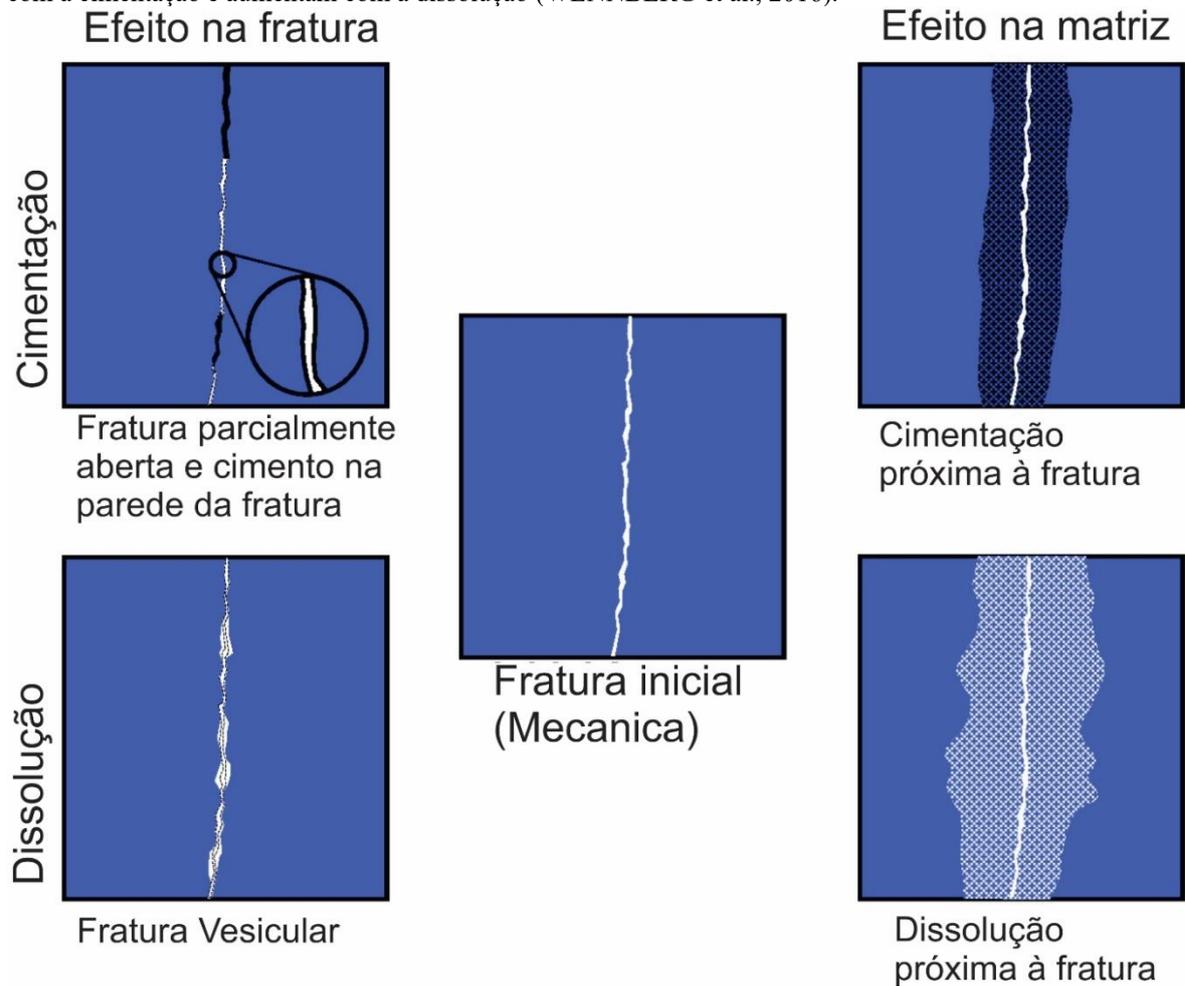


Figura 4.13 Efeitos diagenéticos nas propriedades de abertura da fratura (gerada por processos mecânicos) podem ser destrutivas por cimentação ou construtivas por dissolução. A porosidade da matriz e permeabilidade diminuem com a cimentação e aumentam com a dissolução (WENNBORG et al., 2016).



5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Mapa de lineamentos

Para os lineamentos observados na escala 1:100.000 (Figura 5.1) foi traçado um total de 216 linhas. O diagrama de comprimento acumulado apresenta uma direção preferencial N50W, seguido por N60-80W e N20-30E. O diagrama de frequência acumulada mostrou a mesma direção principal, N50W, seguido das direções N60-70W, N20-30E com as direções N-S e E-W como realces medianos, se destacando mais em relação ao diagrama de comprimento acumulado, o que indica que são frequentes, porém com pequena extensão.

Para os lineamentos na escala 1:50.000 (Figura 5.2) foi traçado um total de 574 linhas. O diagrama de comprimento acumulado apresenta uma direção preferencial N50W, seguido de N60W também com valor alto, N40W e N70W em seguida e com realce mediano N50E, N-S e E-W. O diagrama de frequência acumulada apresentou as mesmas direções na mesma sequência de grandeza, começando da maior N50W, N60W, N40W, N60W, N50E N-S e E-W com a diferença de que em relação ao comprimento acumulado a direção N-S apresentou um destaque levemente superior.

Ao comparar os lineamentos nas duas escalas é visível que a direção preferencial N50W se mantém tanto nos diagramas de frequência acumulada e comprimento acumulado, porém a direção N-S e E-W são mais facilmente identificadas na escala 1:50.000 e que no geral não apresentam grandes extensões, mas são frequentes.

Em relação ao contexto estrutural, é notável no entorno da localização da área um alinhamento das feições de relevo interpretadas na escala 1:50.000 com a direção da estrutura de Jibóia, onde a área estudo está inserida, especificamente as laterais da estrutura, marcadas por falhas tem direção igual a direção N50-60W identificada em alta frequência no mapa de lineamentos.

Figura 5.1 Mapa de lineamentos interpretado na escala 1:100.000 com diagramas de comprimento acumulado e frequência acumulada.

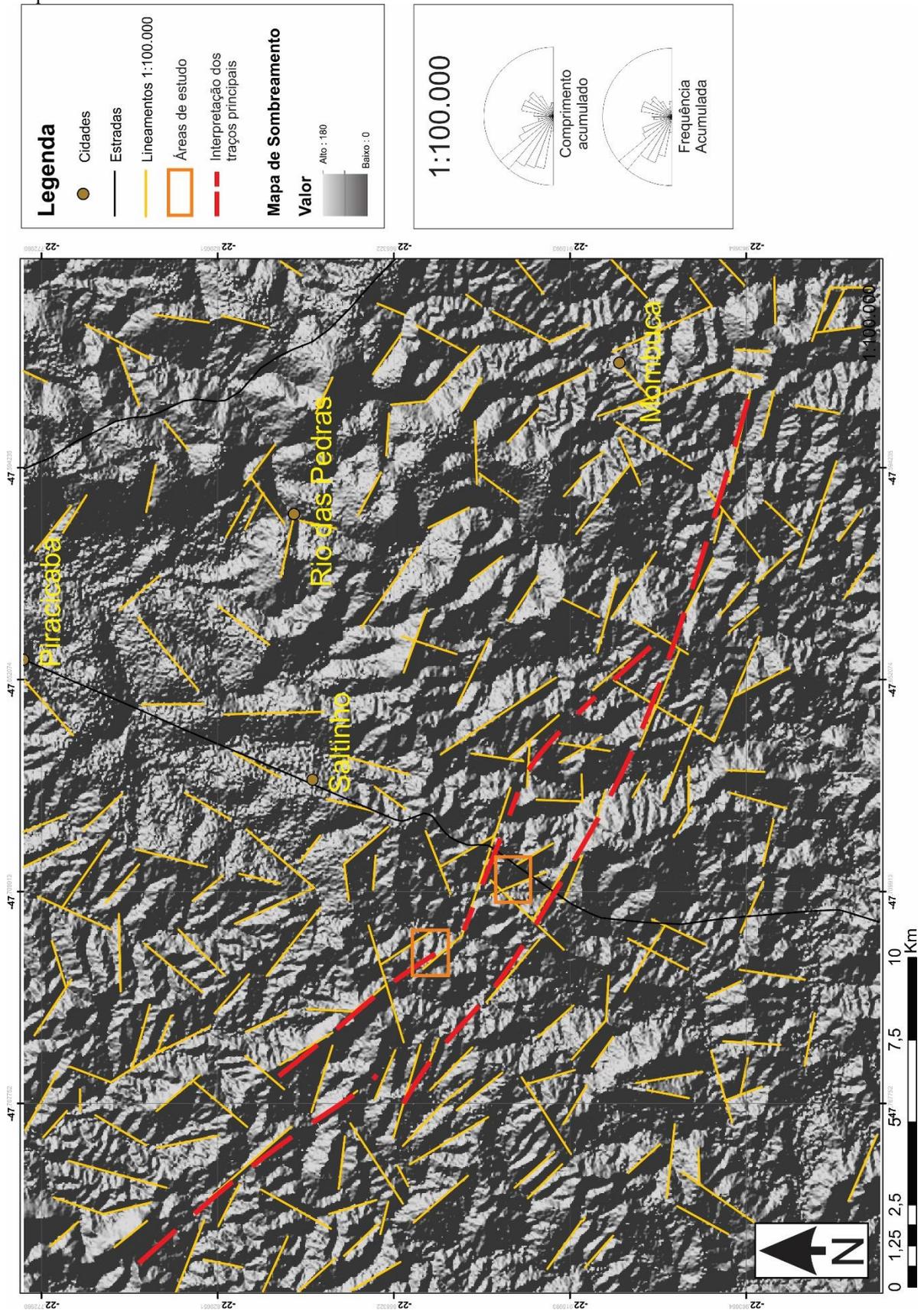
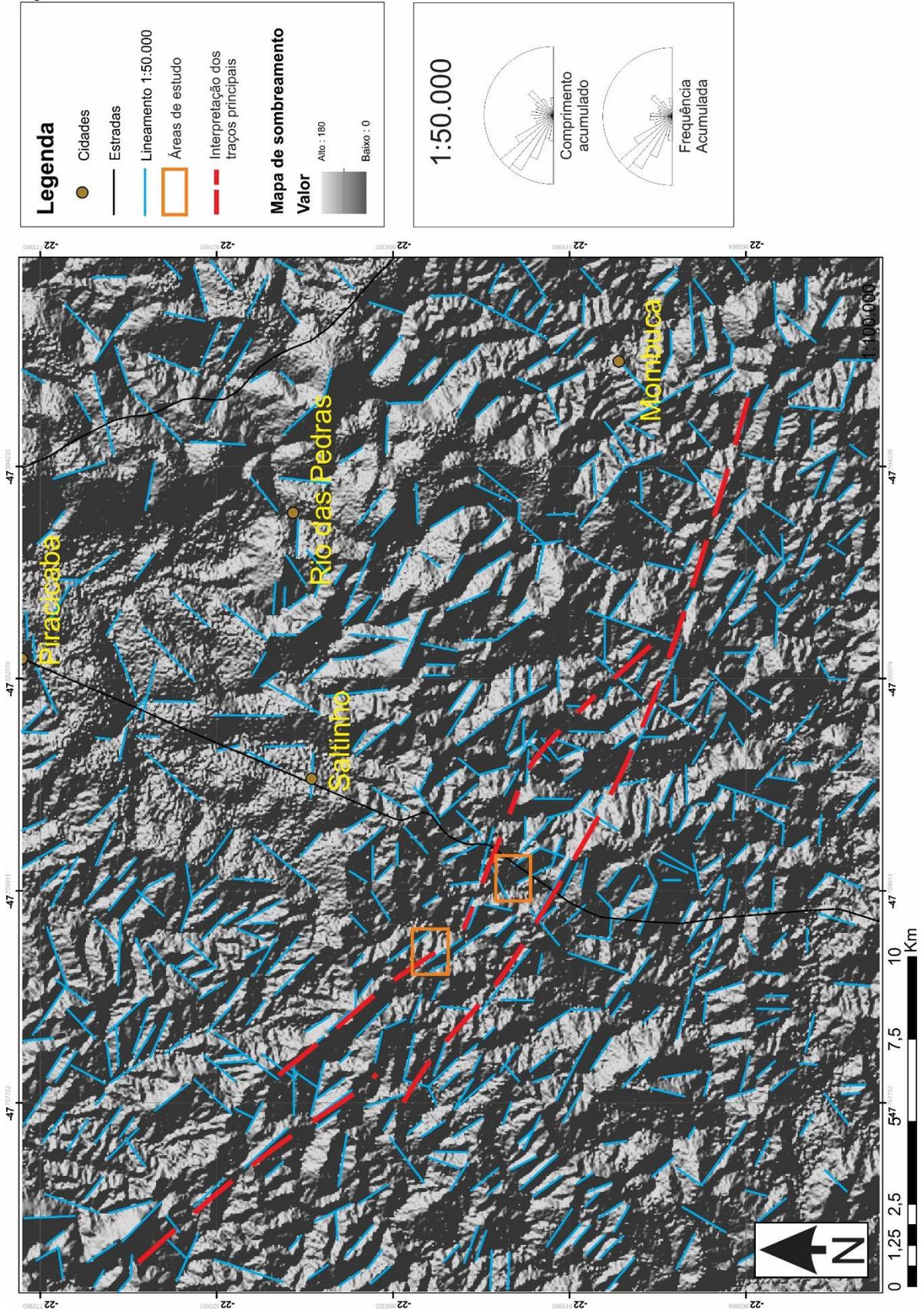


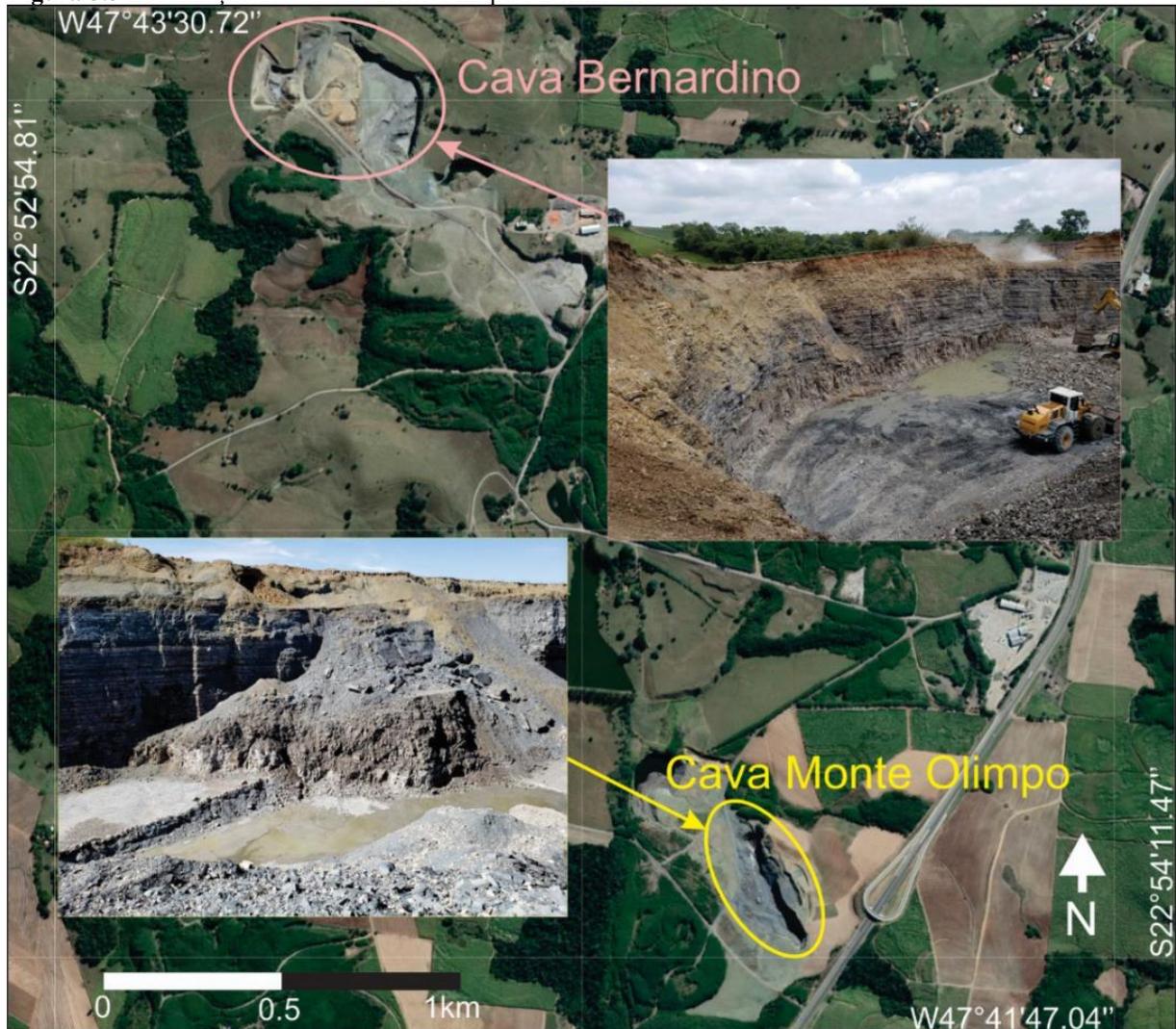
Figura 5.2 Mapa de lineamento interpretado na escala 1:50.000 com diagramas de comprimento acumulado e frequência acumulada.



5.2. Estruturas Observadas em Campo

O local está dividido de acordo com as frentes de lavra, para este trabalho as frentes estudadas foram Monte Olimpo e Bernardino (Figura 5.3). A Cava Monte Olimpo com formato semelhante a um anfiteatro, é marcada por um conjunto de falhas principais com direção NW, formando um sistema de horste/gráben em que há uma tendência de escalonamento com os níveis superiores em direção a NE perceptível, pois as falhas sintéticas são as com mergulho para SW e possuem um rejeito maior, impactando na diminuição da cota para os blocos no rumo SW. A Cava Bernardino teve um avanço mais rápido, permitindo apenas observações descontínuas e pontuais, não possibilitando a elaboração de um bloco diagrama 3D.

Figura 5.3 Localização das cavas Monte Olimpo e Bernardino



A grande maioria das falhas é do tipo normal, com rejeito de mergulho, superfícies irregulares e rejeito variando ao longo de uma mesma falha, indicando que, já na escala local, as falhas devem possuir ligeiro comportamento de tesoura, ou então ocorre a presença de uma porção central da falha com um rejeito maior em relação às extremidades. Ao se comparar com os modelos identificados na literatura moderna, revisada na fundamentação teórica, é possível concluir que no local ocorre uma zona de falha multinucleada, com zonas de dano entre as falhas. No interior das falhas, com espessuras e geometria irregular, centimétricas a métricas, ocorrem zonas de brechação/cominuição e fraturamento intenso.

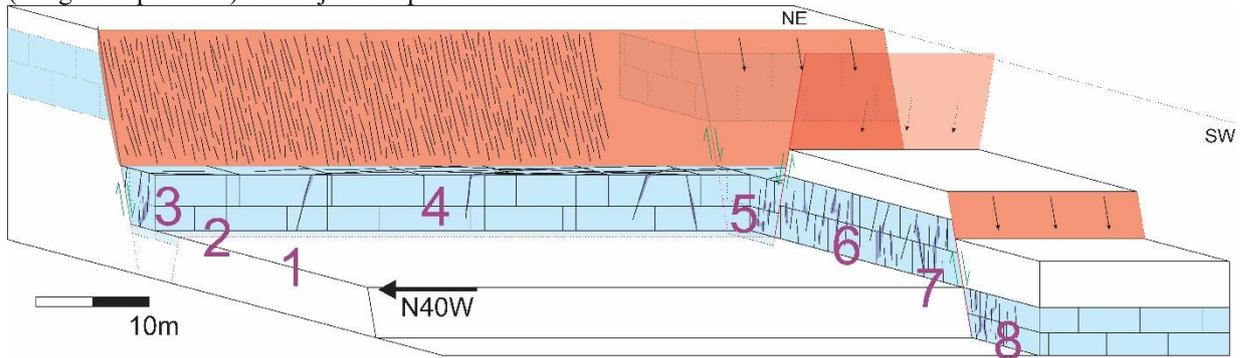
Cava Monte Olimpo

Na cava Monte Olimpo, o levantamento dos dados foi realizado de forma sistemática com 8 pontos de referência para correlação ao longo da frente de lavra (Figura 5.4), com aquisição de atitudes das estruturas, coleta de amostras e levantamento fotográfico das estruturas descritas. A Figura 5.5 apresenta um panorama geral esquemático da frente Monte Olimpo em bloco diagrama, com destaque para as três principais falhas e a localização dos pontos utilizados no levantamento.

Figura 5.4 Frente Monte Olimpo, com principais falhas e pontos levantados em destaque (Base: Google Earth).



Figura 5.5 Bloco diagrama esquemático representativo da frente de lavra Monte Olimpo, com falhas sintéticas (mergulhos para SW) com rejeitos superiores ao da falha antitética.



5.3. Zonas de Falhas

Como descrito anteriormente, o local possui um sistema de falhas com direção NW-SE escalonado, onde os blocos posicionados a NE estão mais elevados, devido a uma disparidade entre os rejeitos das falhas com mergulho SW (maiores) e NE (menores). Há presença de dobras de arrasto próximas aos planos de falha, principalmente associadas às camadas de folhelhos, e ligeiros basculamentos de camadas localizados também relacionados às falhas.

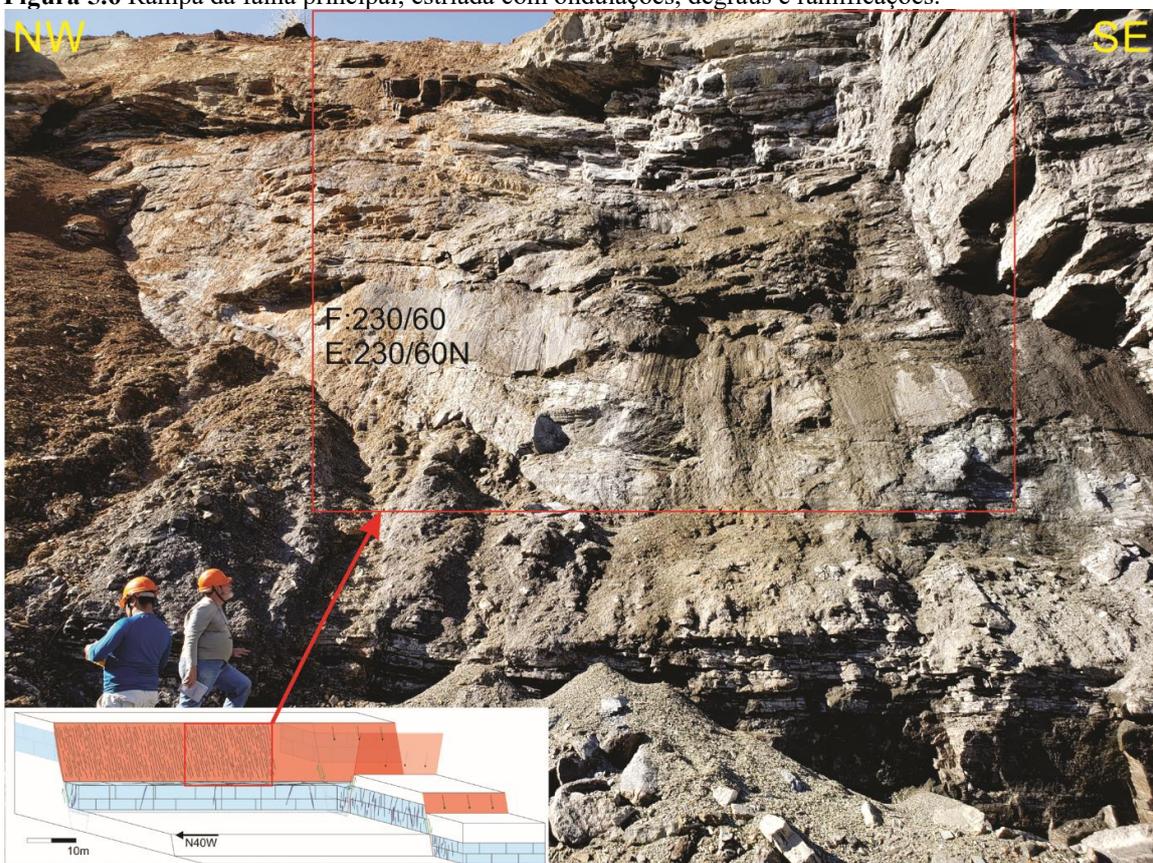
Seguindo os conceitos abordados no capítulo anterior, os resultados obtidos representam uma zona de falha multinucleada com extensa zona de dano (mínimo de 30 m), onde ocorrem três falhas normais principais com direção NW, sendo duas sintéticas e de maior rejeito com mergulho para SW (rejeitos da ordem de 10 m e 3 m) e uma antitética entre as duas, com rejeito menor (da ordem de 50 cm) e mergulho para NE.

Apesar de em muitos casos, ao se observar uma falha em diferentes escalas a mesma ser considerada como fractal, neste caso o conceito não se aplica pois em uma zona de falha como a estudada, foram observados, em diferentes planos, estágios de desenvolvimento e com mecanismos diferentes atuantes nas falhas, além de geometrias distintas. Podendo ser classificadas de maneira sistemática pela relação entre rejeito e abertura das falhas, e comportamento distinto da propagação de falha em diferentes litologias, com ramificações e refração da deformação ao cruzar camadas com competências diferentes.

Associadas às zonas de falhas, há presença de interseções de segmentos diversos e cominuição de fragmentos das rochas afetadas ao longo das rampas de falhas, exemplificando os três diferentes estágios apontados por Childs et al. (2009), com brechação do material intrafalha, dobras de arrasto de folhelhos intercalados com calcário, precipitação e cisalhamento de calcitas em planos de falha, estrias em porções arqueadas compressivas e distensivas das falhas.

A falha de maior rejeito está localizada a na porção NE, tem atitude do plano próxima a 230/60 (reta de mergulho), com estrias 230/60, seu rejeito vertical é de 8 a 10 metros. O plano principal encontra-se ondulado com porções planas, com estrias no rumo do mergulho variando até 5° entre si (variação no *rake*) e espessura do núcleo de falha que varia na escala decimétrica, podendo passar de 1 metro (Figura 5.6). Ao longo da rampa de falha, ocorrem rochas catacladasas, dos tipos folhelho cominuído, brechas carbonáticas, formação de dobras de arrasto acentuadas nos folhelhos, e feições locais de precipitação e deformação (cisalhamento) de calcita secundária.

Figura 5.6 Rampa da falha principal, estriada com ondulações, degraus e ramificações.



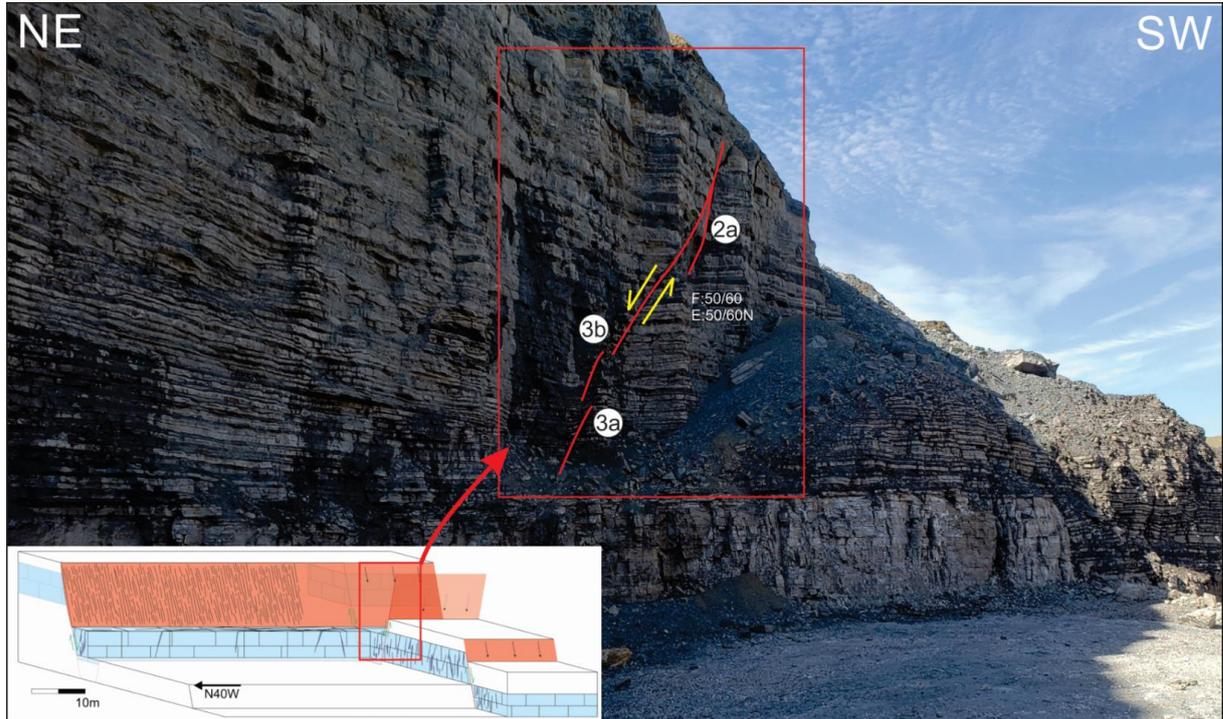
Nos arredores dos planos principais, é possível identificar diversos dúplexes distensivos, com planos de falha com geometria sigmoidal, abrindo e fechando no próprio plano de falha principal (Figura 5.7), promovendo a rotação interna do bloco e a formação de dobras de arrasto. Seguindo a classificação de Bastesen & Braathen (2010), este núcleo de falha está na escala pequena a média e, analisando as variações na sua geometria, na nomenclatura segmentos da rampa se enquadram nos tipos 1a – Falha planar, 1b - Arco distensivo, 1c- Arco compressivo, 2b – Cisalhamento P, 5 – Núcleo de falha lenticular e 6 – Múltiplos ramos de falha (Figura 5.7).

Figura 5.7 Dúplex distensivo em plano de falha principal com dobras de arrasto, o que caracteriza uma geometria lenticular com ligamento de rampas. Com destaque para as geometrias 1a – Falha planar, 1b - Arco distensivo, 1c- Arco compressivo, 2b – Cisalhamento P, 5 – Núcleo de falha lenticular e 6 – Múltiplos ramos de falha.



O plano de falha principal antitético tem rejeito que varia de 20 cm (na porção NW) a 50 cm (na porção SE), o que gera uma geometria em mapa de tesoura, semelhante a rampas de alívio. A atitude do plano principal é 50/60 (reta de mergulho), com estrias 50/60 (Figura 5.8). Os planos de falha apresentam ligações de segmentos de falha, com um estágio inicial de evolução de falha, com lentes de rocha isoladas, predominando a intersecção de segmentos métricos.

Figura 5.8 Falha antitética, com rampas de falha paralelas em um estágio inicial de cominuição e dobras de arrasto no folhelho e as geometrias 2a – cisalhamento R, 3a – sobreposição de conexão compressiva e 3b – sobreposição de conexão distensiva.



No detalhe, feições desta falha observadas em sua zona de dano proximal mostram planos antitéticos com rejeitos menores que variam de poucos centímetros até milímetros. As estrias são de mergulho e há uma ramificação do plano principal formando conexões entre os planos, onde se encontram as fases inicial e intermediária do processo de evolução de rampas de falhas segundo o modelo de Childs et al. (2009), com intersecção de pequenos segmentos de rampas. Nesta porção também foi identificado um pequeno gráben com rejeito inferior a 10 cm, em que a deformação por ruptura e deslocamento presente afeta apenas um estrato (carbonatos), acomodada nas extremidades da camada superior por ondulação (folhelhos), com fraturamento intenso e uma zona brechada no encontro do par conjugado de falhas. As falhas conjugadas apresentam mergulhos próximos a 70°-80°. Há um arrasto de finas camadas de folhelho intercalado com o calcário, em seu entorno e na porção “basal” do gráben ocorrem juntas subverticais, abertas e/ou preenchidas com hidrocarbonetos (Figura 5.9), exemplificando o quadro geral o que é encontrado no afloramento como um todo.

Segundo a classificação de Bastesen & Braathen (2010) as geometrias reconhecidas são do tipo 1b – Arco distensivo no plano principal, 1c – Arco compressivo no plano principal, 2a – Cisalhamentos R, 2b – Cisalhamentos P, 3a – Sobreposição de conexão compressiva e 4 – Conexão abrupta nos planos adjacentes. Foram identificados calcita secundária, folhelho

cominuído e o próprio carbonato fino (possivelmente intensamente cominuído) preenchendo o núcleo de falha, todos com espessura milimétrica (Figura 5.10).

Figura 5.9 Falhas observadas em diferentes escalas, associadas a uma zona de falha principal. A) Quadro Preto: Falha planar com rejeito vertical de 30 cm, sem abertura e preenchimento na falha, com pequeno arrasto das camadas de folhelho intercalado com o calcário; notar o fraturamento intenso propagado principalmente na lapa. B) Pequena falha normal de escala centimétrica em nível silicificado. C) Quadro Verde: Pequeno gráben, com arrasto do folhelho preenchendo o topo do gráben, juntas abertas e zona brechada abaixo.

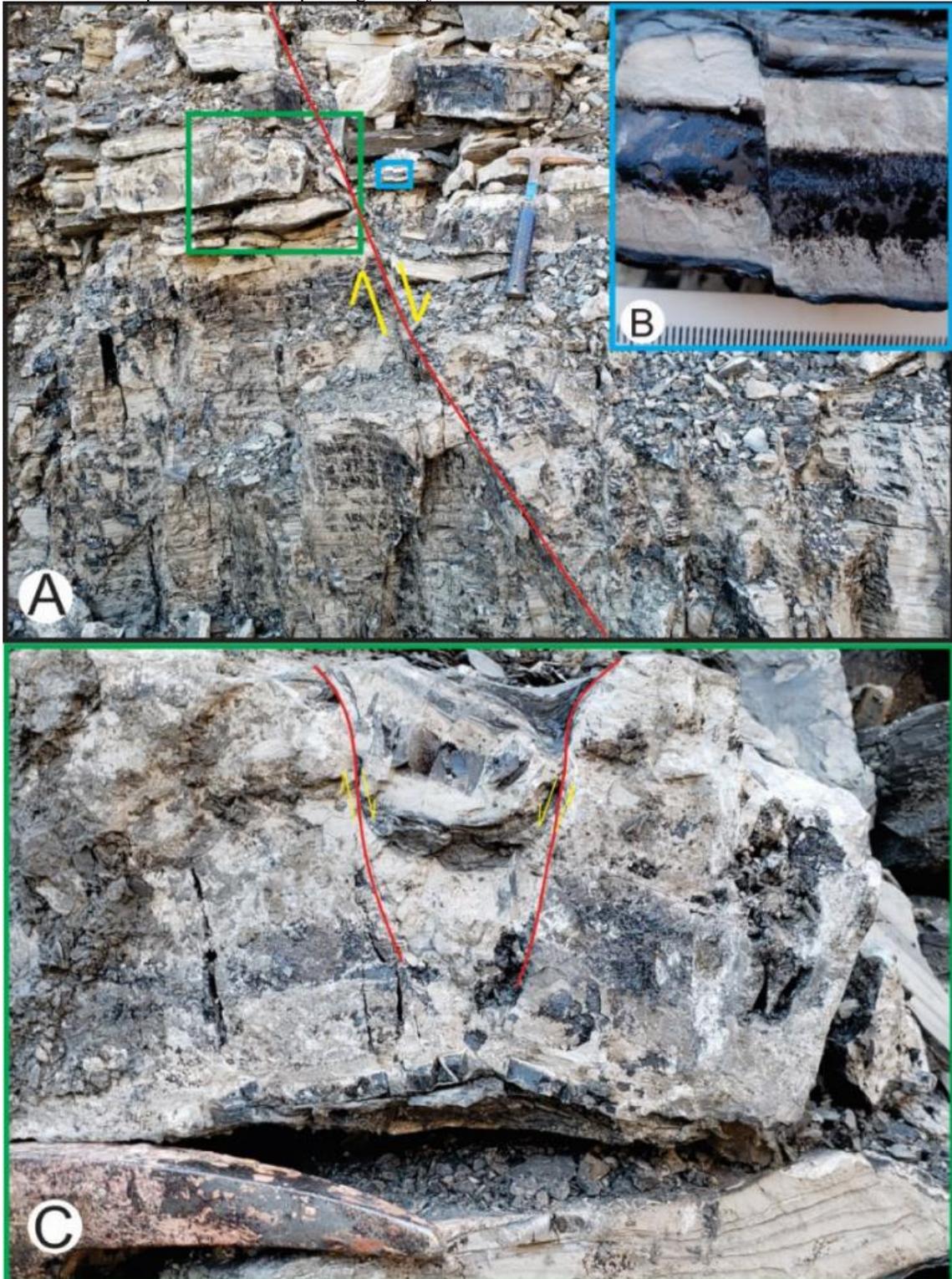
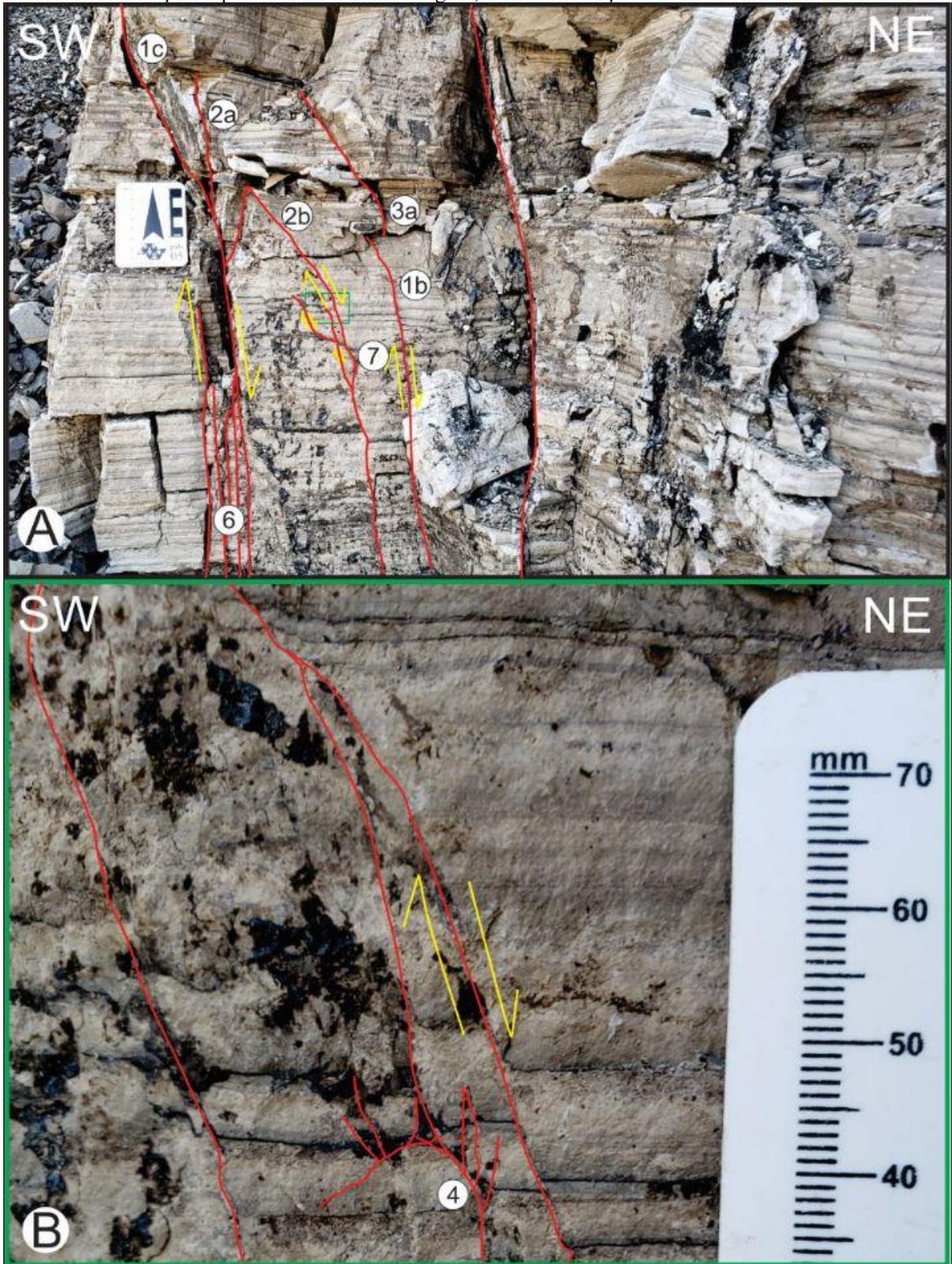
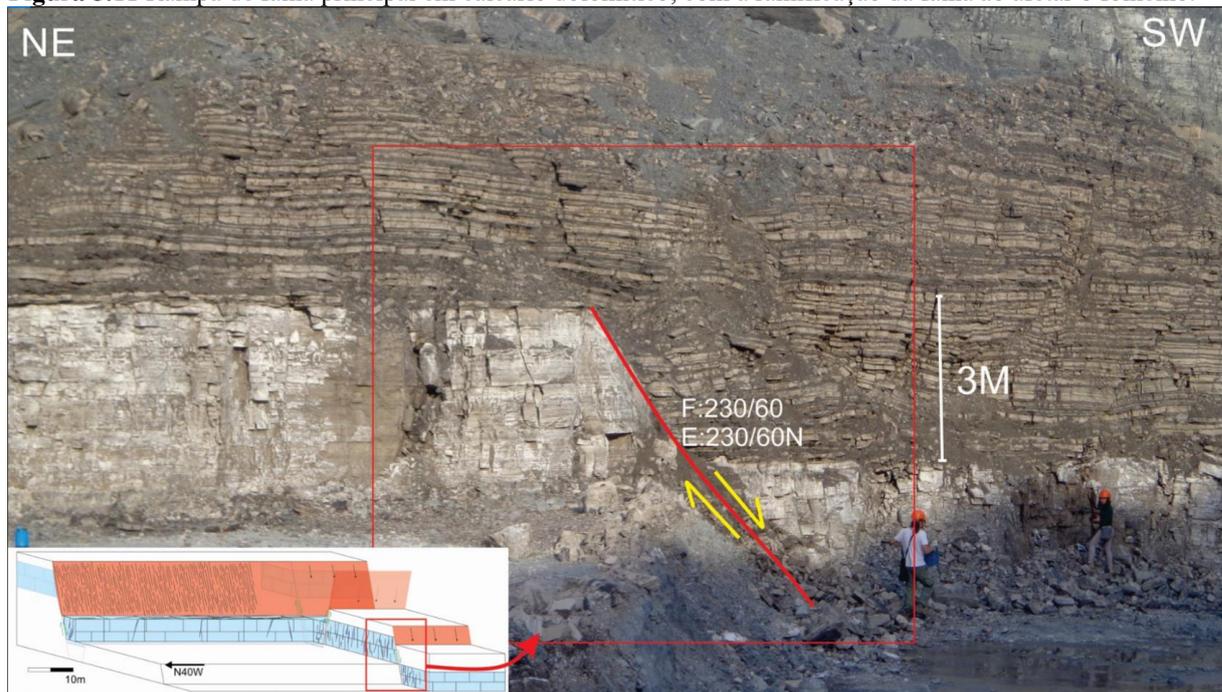


Figura 5.10 Pequenas falhas associadas à falha antitética principal com ramificações e curta zona brechada com as geometrias 1b – arco distensivo, 1c – arco compressivo, 2a – cisalhamento R, 2b – cisalhamento P, 3a – sobreposição de conexão compressiva, 4 – conexão abrupta, 6 – múltiplos ramos de falha, 7 - falha de inversão de mergulho. A) Quadro preto: visão geral com múltiplos planos de falha. B) Quadro verde: visão em detalhe com brecha em intersecção de planos. Em ambas as imagens, notar a exsudação de hidrocarbonetos.



O terceiro conjunto de falhas foi o de acesso mais fácil, foi possível ver em três dimensões suas propriedades devido ao avanço da cava. O plano principal tem atitude 230/60 (reta de mergulho) e estria 230/60, ocorrendo como uma zona discreta no calcário dolomítico que se ramifica ao deformar a intercalação de folhelhos acima do calcário. O rejeito vertical é de aproximadamente 3 metros e se mantém constante ao longo dos 50 m, onde está exposto (Figura 5.11).

Figura 5.11 Rampa de falha principal em calcário dolomítico, com a ramificação da falha ao afetar o folhelho.

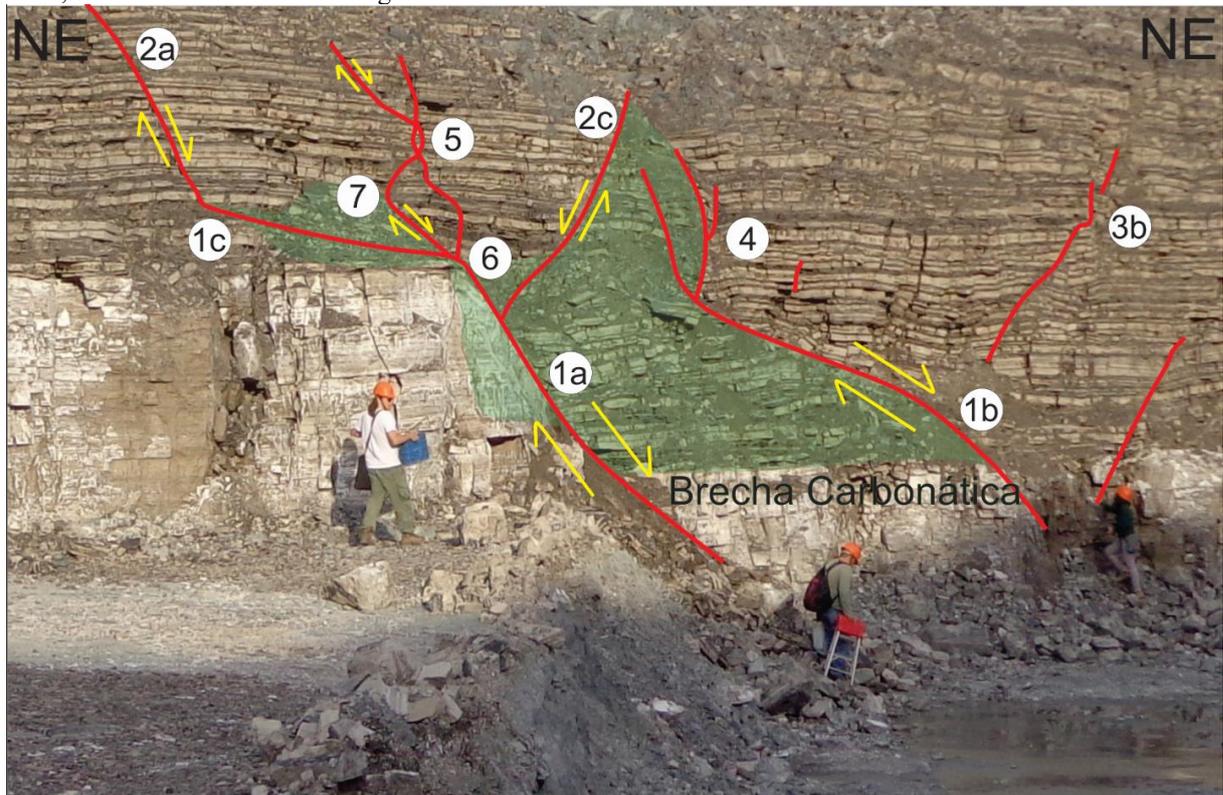


O núcleo da falha apresenta duas composições principais, a rampa principal está marcada por rochas intensamente cominuídas (tectonito, na concepção de WIBBERLEY & SHIPTON, 2010), composta de um carbonato fino e escuro com espessura aproximada de 10 cm. Emoldurando ou associada a este material há uma brecha carbonática, com espessura irregular, variando de 5 até 50 cm com presença de diversas pequenas falhas secundárias (com rejeitos de dimensões centimétricas até micrométricas) com mergulhos variados, em função da intensa rotação de blocos e fragmentos dentro da zona brechada (Figura 5.12).

Esta falha é considerada de pequeno porte segundo o trabalho de Bastesen & Braathen (2010), porém é a segunda de maior expressão na área de estudo e suas geometrias são principalmente dos tipos 1a – Falha planar e 1b – Arco distensivo, ambos no calcário. Ao se ramificar, em seus traços na parte superior no folhelho acima do calcário, ela passa a ter geometrias diferentes nos diferentes ramos, como 1b – Arco distensivo, 1c – Arco compressivo,

2a – Cisalhamentos R, 2c – Cisalhamentos R' e 5 – Núcleo de falha lenticular (Figura 5.12). Na escala milimétrica e micrométrica as geometrias presentes são 1b – Arco distensivo, 1c – Arco compressivo, 2a – Cisalhamentos R, 2b – Cisalhamentos P, 2c – Cisalhamentos R', 3b – Sobreposição de conexão distensiva, 5 – Núcleo de falha lenticular, 6 – Múltiplos ramos de falha e 7 – Falha com inversão de mergulho, descritas no subcapítulo seguinte.

Figura 5.12 Ramificação do plano principal de falha ao se propagar nas variações litológicas, com as geometrias 1a – falha planar, 1b – arco distensivo, 1c – arco compressivo, 2a – cisalhamento R, 2c – cisalhamento R', 3b – sobreposição de conexão distensiva, 4 – conexão abrupta, 5 – núcleo de falha lenticular, 6 – múltiplos ramos de falha, 7 – falha de inversão de mergulho.



Além das falhas do tipo normal predominantes, há falhas inversas antitéticas não associadas com a geometria de inversão de mergulho, mas, que se repetem em um mesmo padrão, em pequenos blocos “ejetados” em meio aos estratos, formando par conjugado com falhas do tipo normal de baixo ângulo. Há elementos de dois estágios distintos da evolução de zona de falha para a cominuição do material da rampa de falha, com ligação de segmentos de falhas e o estágio final com material cominuído (BASTESSEN & BRAATHEN, 2010) e dobras de arrasto no folhelho.

Cota 14

Na porção da “Cota 14”, onde ocorreu o avanço da cava Monte Olimpo no sentido sudeste, foi observada uma continuação das estruturas principais, com pequenas variações nos rejeitos, maior frequência de pequenas falhas associadas, indicando uma ramificação mais acentuada das falhas em relação à primeira frente estudada. Essa frente permite representar a zona de dano associada ao conjunto de falhas na Cava Monte Olimpo.

A falha principal com rejeito de aproximadamente 10 metros tem um núcleo de falha espesso, na ordem métrica, preenchido por brechas e material cominuído na rampa principal, e duas direções de estria, a primeira e predominante de mergulho e uma segunda direção direcional discreta, indicando uma reativação. Excluindo as pequenas falhas presentes no material brechado, há poucas falhas subordinadas a esta falha principal, com apenas algumas antitéticas (R') com rejeito inferior a um metro. No bloco de capa da falha principal (que inclui a falha antitética e, a partir dela, define um pequeno horste) a zona de dano é representada por falhas e fraturamento intenso, com o material brechado e cominuído com fragmentos predominantes em lentes no núcleo das falhas. Há uma sequência de falhas sintéticas e antitéticas, formando pequenos grábens e um conjunto de falhas sintéticas ligadas a uma antitética com maior continuidade, formando horstes e com as falhas sintéticas ramificadas, com refração da propagação do plano e brechas preenchendo o núcleo de falha.

As geometrias principais identificadas neste nível são 1a – falha planar, 1b – arco distensivo, 1c – arco compressivo, 2a – cisalhamento R, 2b – cisalhamento P, 2c – cisalhamento R', 5 – núcleo de falha lenticular, 6 – múltiplos ramos de falha e 7 – falha de inversão de mergulho (Figuras 5.13 e 5.14). Os materiais que compõem o núcleo de falha são brechas carbonáticas, fragmentos de rocha, folhelho cominuído (tectonito de carbonato).

A Figura 5.15 indica uma falha paralela a principal sintética com ramificações que são correspondentes a geometria 2a, cisalhamento R, onde há um preenchimento de brecha no núcleo de falha e diversas falhas secundárias, com inversão de mergulho, refração e interrupção abrupta de falhas em função da variação de litologia durante a propagação da falha. As pequenas camadas de folhelho têm comportamento mais dúctil e muitas falhas tem sua terminação nessas pequenas camadas. Em algumas fraturas restritas as camadas mais espessas de carbonato há um preenchimento de betume, muito mais fino e em quantidades muito inferiores se comparado aos afloramentos de cotas mais baixas nas camadas principais de calcário dolomítico.

Figura 5.13 Visão geral da porção sudeste da cava Monte Olimpo (Cota 14), com destaque para as falhas principais, com as geometrias 1a - falha planar, 1b - arco distensivo, 1c - arco compressivo, 2a - cisalhamento R, 2b - cisalhamento P e 2c - cisalhamento R'

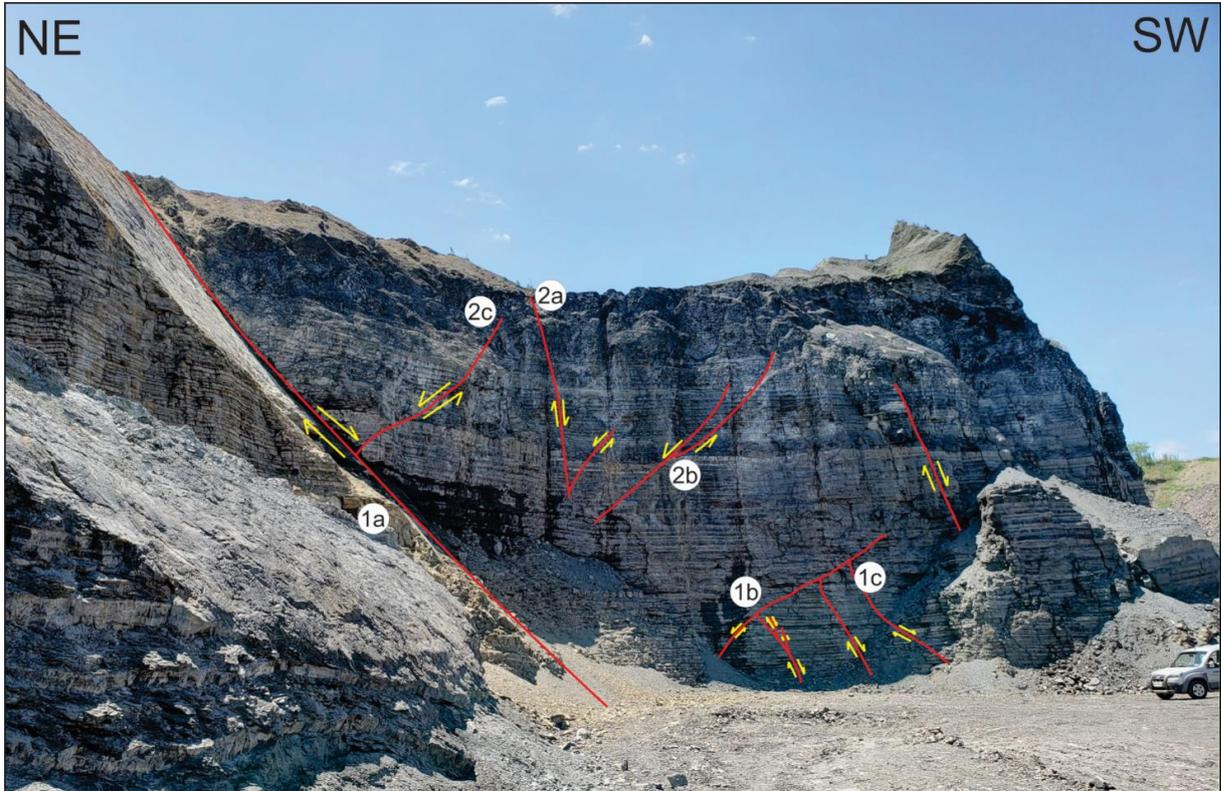
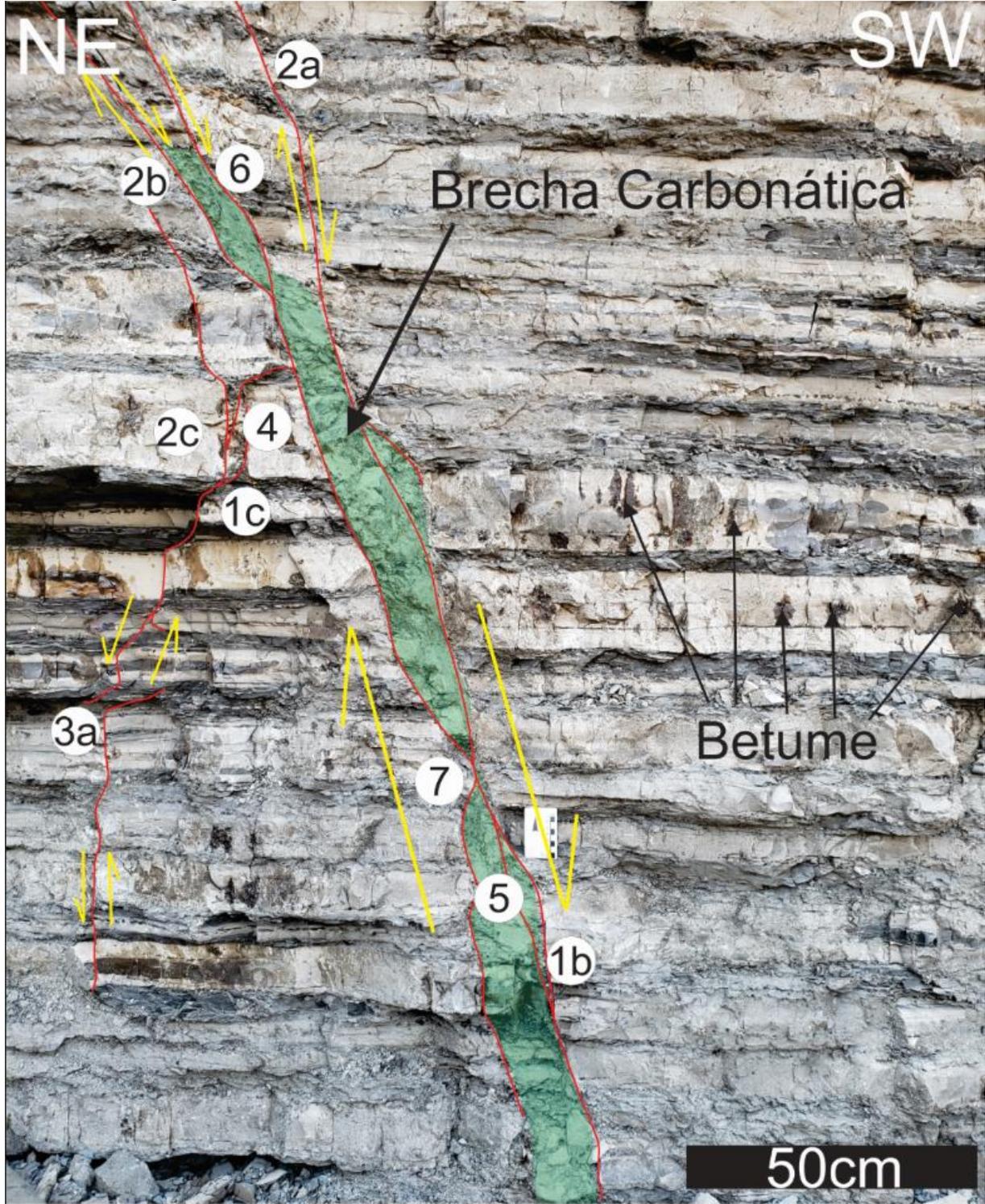


Figura 5.14 Detalhe da porção central da figura 5.11 incluindo as falhas principais com exceção da maior, permitindo observar uma complexidade maior das estruturas com mais variações, ramificações e geometrias. As geometrias presentes na foto indicadas pelas letras são: 1b - arco distensivo, 1c - arco compressivo, 2a - cisalhamento R, 2c - cisalhamento R', 5 - núcleo de falha lenticular, 6 - múltiplos ramos de falha e 7 - falha de inversão de mergulho.



Figura 5.15 Detalhe de uma falha sintética secundária, com ramificação dos planos de falha, falha antitética com refração da propagação do plano de falha e terminação em camada de folhelho, núcleo de falha preenchido por brecha e betume em pequena quantidade em juntas de extensão, abertas e restritas no calcário. Geometrias de falha 1b – arco distensivo, 1c – arco compressivo, 2a – cisalhamento R, 2b – cisalhamento P, 3a - sobreposição de conexão compressiva, 4 – conexão abrupta, 5 – núcleo de falha lenticular, 6 – múltiplos ramos de falha e 7 – falha de inversão de mergulho. A cor verde indica a ocorrência de brecha carbonática associada a zona de falha.



Cava Bernardino

Na Cava Bernardino não foi possível identificar rejeito das falhas principais, porém o fácil acesso aos planos principais de falha permitiu uma caracterização detalhada das estruturas e do material presente nos núcleos de falha, na lapa, onde apenas um dos blocos espessos de calcário dolomítico se encontrava exposto.

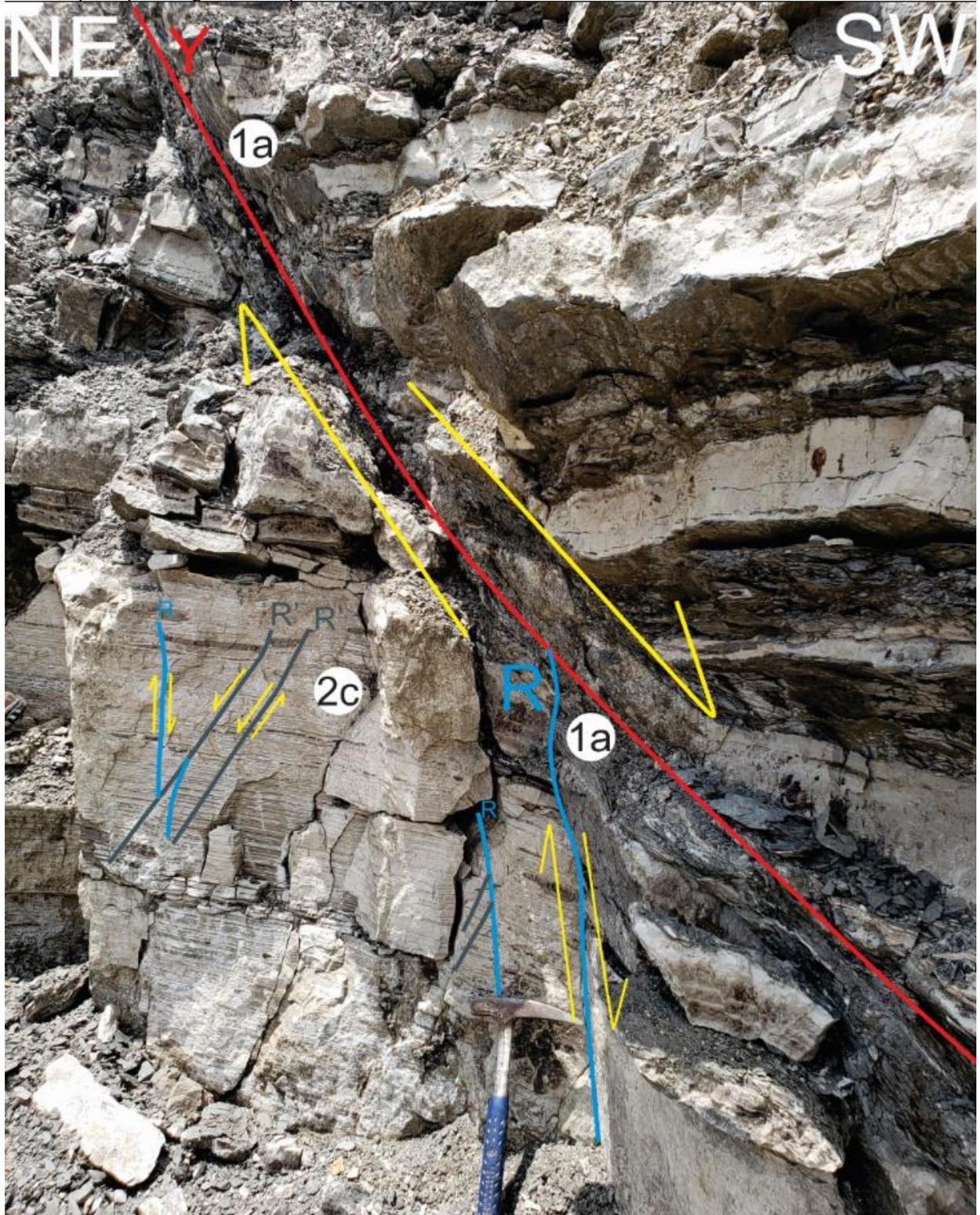
Próximo ao plano de falha principal as camadas se encontram basculadas, com a inclinação aumentando à medida que estavam mais próximas ao plano de falha. Na porção da falha onde se teve acesso foi observada uma falha principal de direção NW do tipo normal, com estrias de mergulho, afetando uma intercalação de folhelhos finos (até 10cm de espessura) e calcários dolomíticos um pouco mais espessos (entre 20 a 40cm) e com a presença do banco de calcário dolomítico espesso no bloco NE (lapa). No local há diversas falhas secundárias, associadas ao plano principal, com destaque para planos de cisalhamento R (sintéticos) e R' (antitéticos) além de uma grande quantidade de falhas ramificadas na zona de dano proximal (Figura 5.16).

O núcleo da falha principal tem preenchimento de folhelho cominuído foliado, com lentes de calcita secundária seguindo a foliação paralela a rampa de falha principal. Em planos de falha secundários afetando o banco de calcário dolomítico há zonas brechadas em falhas sintéticas do tipo R.

Na Cava Bernardino como um todo não foi identificado betume, porém a área de acesso foi muito limitada e não teve exposição de uma ampla zona de dano em blocos baixos de calcário.

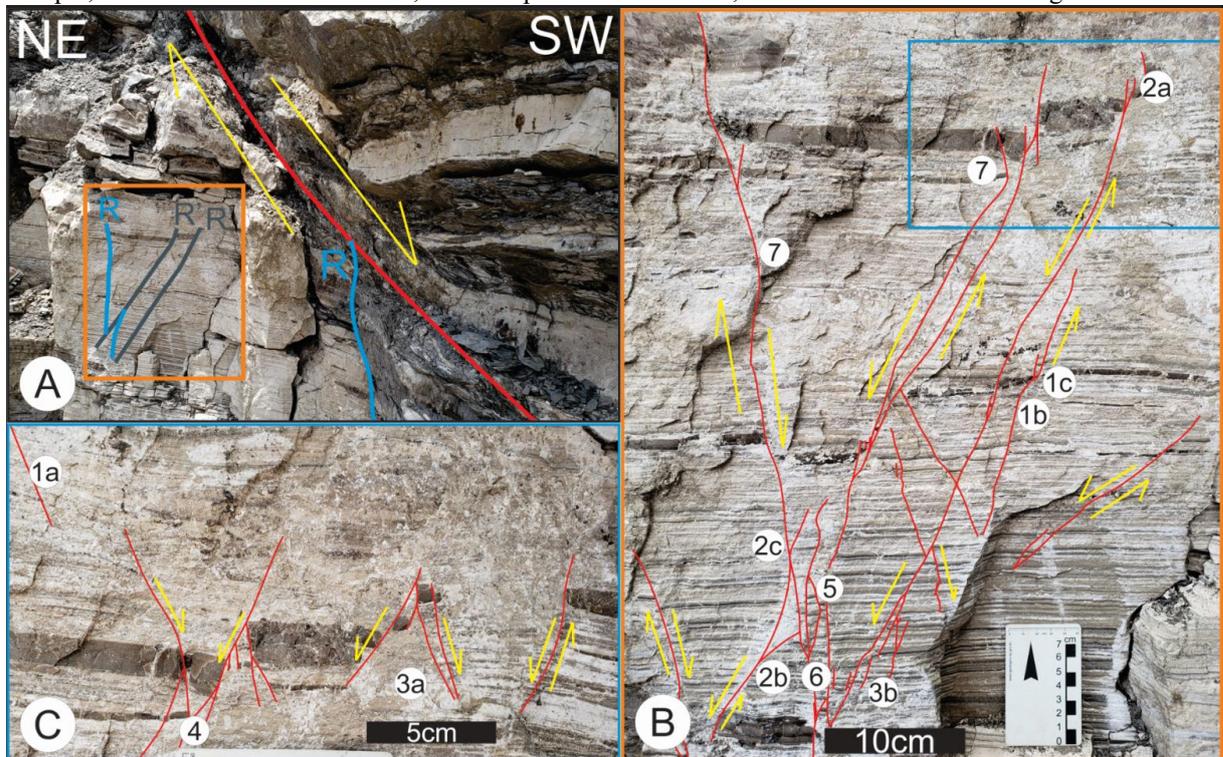
A falha apresenta um estágio avançado de evolução, com a presença de material brechado e cominuído núcleos de falha, alto ângulo de inclinação das camadas adjacentes e espessas lentes de calcita secundária paralela ao plano principal de falha, segundo a classificação de Bastesen & Braathen (2010), todas as geometrias de falha foram identificadas no banco de calcário dolomítico: 1a – falha planar, 1b – arco distensivo, 1c – arco compressivo, 2a – cisalhamento R, 2b – cisalhamento P, 2c – cisalhamento R', 3a – sobreposição de conexão compressiva, 3b – sobreposição de conexão distensiva, 4 – conexão abrupta, 5 – núcleo de falha lenticular, 6 – múltiplos ramos de falha, 7 – falha de inversão de mergulho.

Figura 5.16 Plano principal de falha Y com falhas secundárias do tipo R e R', com uma quantidade maior de estruturas presentes no banco de calcário, com dobras de arrasto e preenchimento de núcleo de falha por folhelho cominuído, com lentes de calcita secundária precipitada neste material com linhas de crescimento paralelo ao plano de falha principal. As geometrias presentes são 1a – falha planar, 2a – cisalhamento R e 2c – cisalhamento R'.



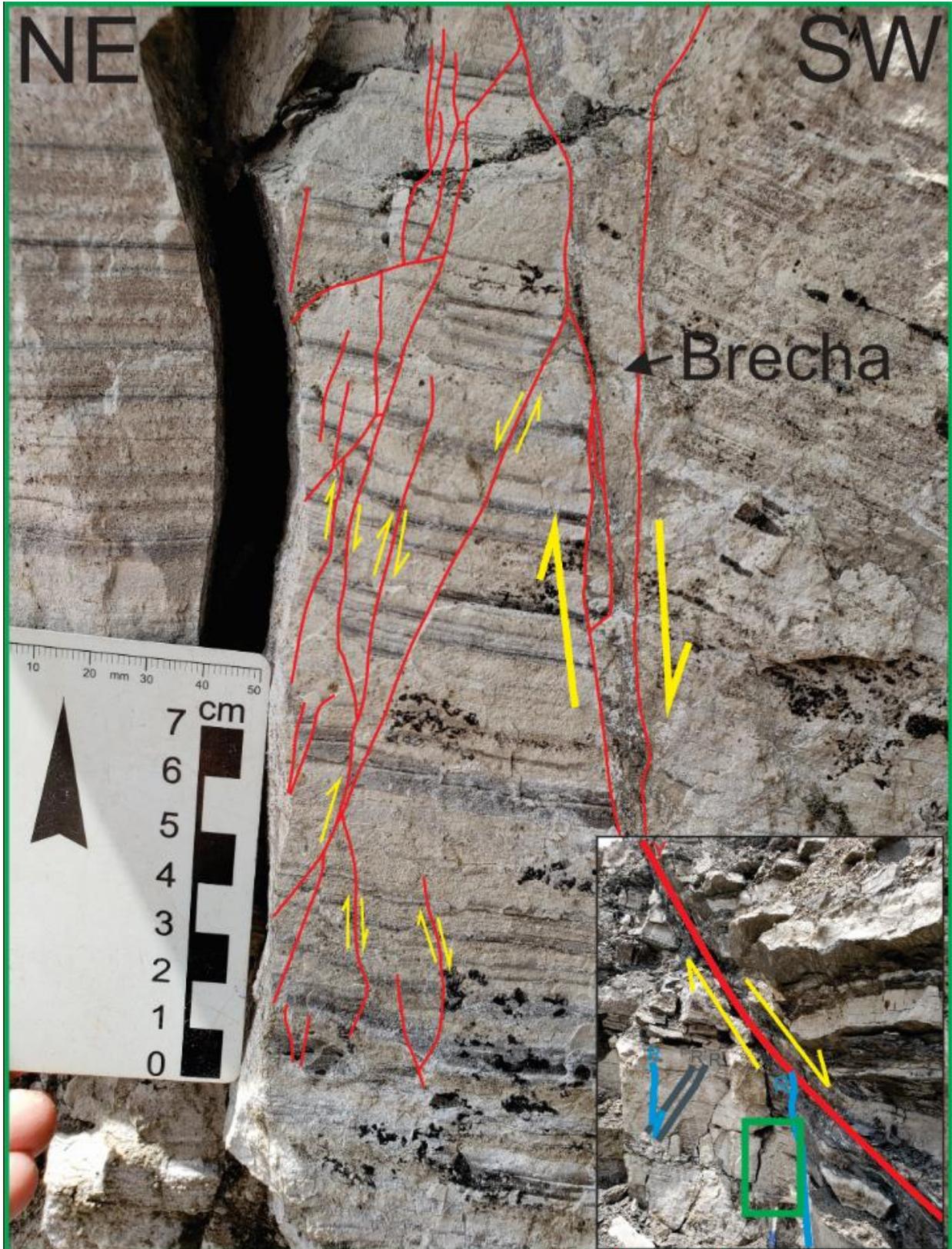
A presença de falhas e estruturas secundárias é mais marcante na espessa camada de calcário dolomítico, as camadas de folhelho intercaladas com as camadas menores de calcário aparentam absorver internamente parte da deformação, diminuindo a propagação das estruturas nestes níveis. No banco calcário é notável o aumento expressivo da quantidade de planos com a geometria 7 – falha de inversão de mergulho, que indica uma propagação das falhas com refração sensível a pequenas variações nos acamamentos (Figura 5.17).

Figura 5.17 Detalhe das estruturas relacionadas a falhas secundárias no calcário dolomítico, com geometrias 1a – falha planar, 1b – arco distensivo, 1c – arco compressivo, 2a – cisalhamento R, 2b – cisalhamento P, 2c – cisalhamento R', 3a – sobreposição de conexão compressiva, 3b – sobreposição de conexão distensiva, 4 – conexão abrupta, 5 – núcleo de falha lenticular, 6 – múltiplos ramos de falha, 7 – falha de inversão de mergulho.



A Figura 5.18 apresenta um grupo de falhas que formam um par conjugado associado a um plano sintético R subvertical (cujo núcleo de falha é preenchido por uma brecha com um nível avançado de cominuição do calcário). Estas falhas estão levemente inclinadas em relação as estruturas da área, onde parte das falhas são inversas, o que pode indicar uma pequena rotação do bloco neste local.

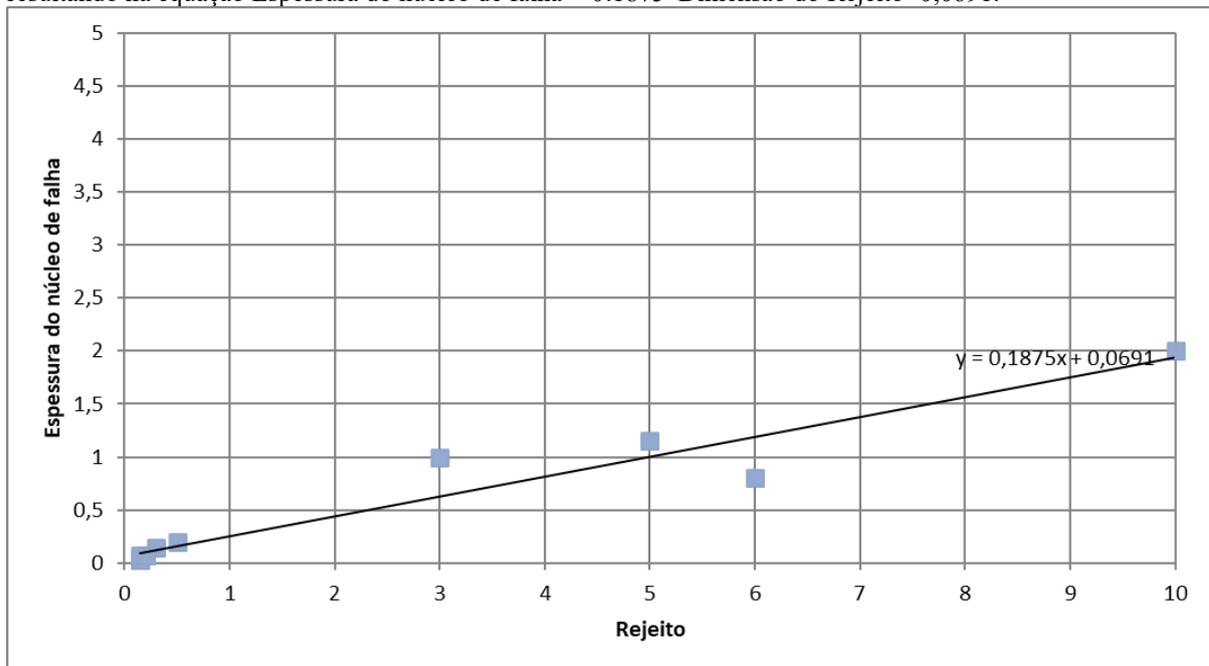
Figura 5.18 Detalhe de falhas secundárias no calcário dolomítico, com preenchimento de brecha no plano sintético R subvertical e uma pequena inclinação do par conjugado associado, indicando localmente uma pequena rotação do bloco e das suas estruturas internas.



5.3.1. Relação espessura do núcleo de falha / rejeito

Um número pequeno e consistente de medidas de espessura de núcleos de falha foi coletado, permitindo correlacionar com a dimensão do respectivo rejeito, levando à confecção de um gráfico que apresenta a relação espessura do núcleo de falha *versus* a dimensão do rejeito (Figura 5.19). Essa relação diminuiu com a evolução da falha (BASTESEN & BRAATHEN, 2010), a espessura do núcleo de falha aumenta a uma taxa muito inferior em comparação ao rejeito, gerando uma reta de baixo ângulo visível no gráfico. Este dado reforça a ideia de que a complexidade das zonas de falha se dá nos estágios iniciais de sua evolução (BEN-ZION & SAMMIS, 2003). Para uma compreensão melhor da representatividade destes dados é necessária uma amostragem maior de medidas. A equação gerada foi: $\text{Espessura do núcleo de falha} = 0,1875 \times \text{Dimensão do Rejeito} + 0,0691$, o que indica que a espessura do núcleo de falha tem uma taxa de crescimento aproximadamente 20% da dimensão do rejeito.

Figura 5.19 Gráfico gerado a partir das medidas de espessura do núcleo de falha e seus respectivos rejeitos, resultando na equação $\text{Espessura do núcleo de falha} = 0,1875 \times \text{Dimensão do Rejeito} + 0,0691$.



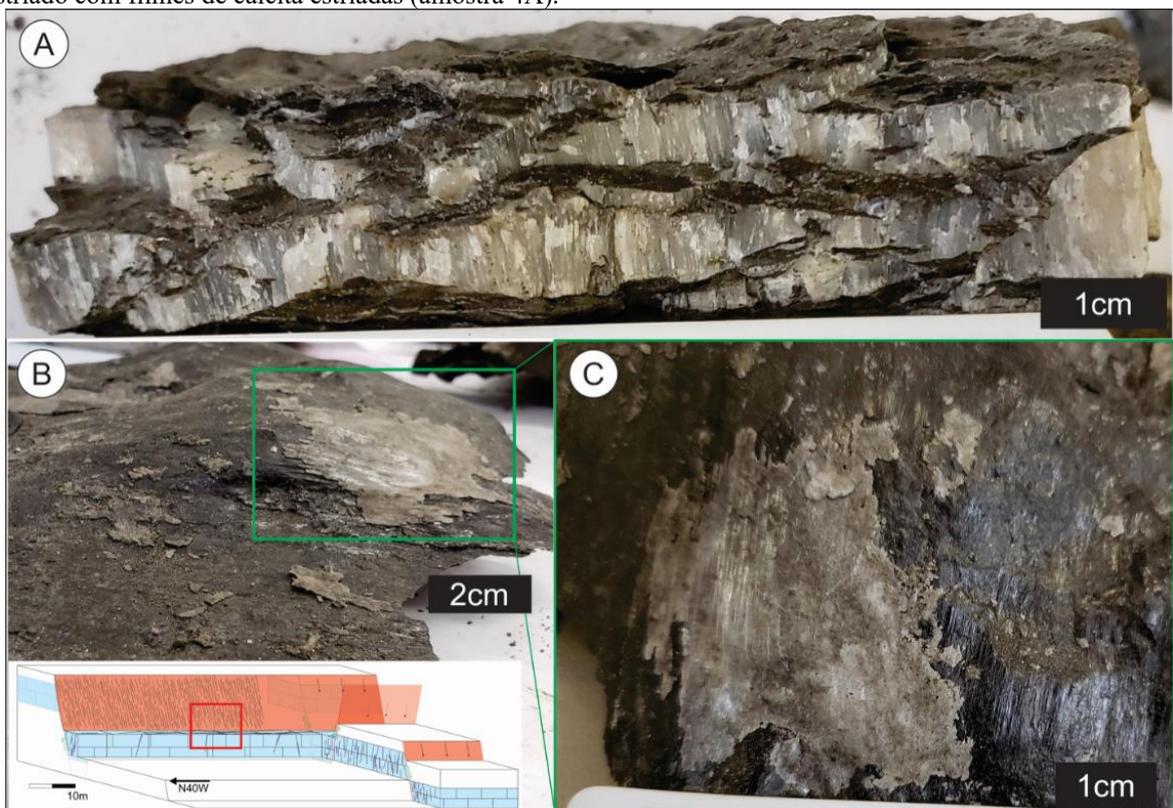
5.4. Zonas Brechadas e Cataclásticas – rochas das zonas de falhas

Já citado previamente, associado aos segmentos de maior deformação das falhas principais (núcleos) encontra-se um material escuro, afanítico, foliado e estriado. Representa material intensamente deformado, com cominuição extrema dos grãos. Nas porções proximais,

um material altamente afetado pela deformação, gerando um volume brechado ao redor da falha em bolsões irregulares de espessura variada na escala métrica, com uma compactação intensa, cominuição do material carbonático e concentração de falhas e juntas, em escalas centimétricas até micrométricas. De modo geral, estes litotipos constituem o quadro principal das rochas associadas aos núcleos das zonas de falhas reconhecidas.

De acordo com a literatura são preenchimentos comuns para núcleos de falhas, que neste caso são representados pelas fácies: Folhelho cominuído (SS); Brecha Carbonática (CB); Calcita Secundária (SCa); Fragmentos da própria rocha cominuídos ou não; completado com situações de núcleos compostos que podem apresentar uma associação de até as três fácies juntas. O material de folhelho cominuído se assemelha a um ultracataclasito (+ de 90% de matriz), porém apresenta uma textura intensamente foliada, semelhante à de um milonito. Na definição de Wibberley & Shipton (2010), pode ser considerado um tectonito, que corresponde a rocha do núcleo da falha, com granulometria muito fina e foliação formados pela cominuição ao longo da rampa de falha, com planos ondulados e fortemente estriados (Figura 5.20). Apresenta crescimento de calcita entre os planos estriados, com espessuras de até 1 mm, formando lentes isoladas ou filmes mais contínuos. As superfícies estriadas (paralelas ao mergulho) são bem marcadas na rocha e nos filmes de calcita (Figura 5.20).

Figura 5.20 Folhelho cominuído (tectonito) A) Com calcita secundária concordante com a foliação B) e C) estriado com filmes de calcita estriadas (amostra 4A).



As brechas carbonáticas ocorrem com extensão variada, espessuras irregulares associadas no núcleo de falhas. A principal ocorrência reconhecida, posicionada mais a SW da Cava Monte Olimpo, apresenta duas principais composições separadas por planos de falhas secundárias. Foram estudadas as amostras 7A, 7B e 7C, descritas a seguir, coletadas na terceira falha principal da Cava Monte Olimpo, no ponto de coleta número 7 (Figura 5.21).

Figura 5.21 Localização das amostras de brecha carbonática 7A, 7B e 7C.



O calcário dolomítico apresenta pequenas variações de composição com variação de granulometria que é predominantemente fina e alguns níveis com coloração escura, níveis de microfósseis e eventuais porções silicificadas. A brecha carbonática identificada nas proximidades da rampa principal de falha apresenta blocos rotacionados deste calcário em uma matriz fina composta do calcário cominuído, e níveis de fósseis parcialmente dissolvidos pelos estilólitos. Os blocos possuem juntas que em alguns casos apresenta preenchimento por hidrocarboneto que pode estar exsudado também na extensão dos pequenos estratos dos blocos, porém estão confinados pelos estilólitos e pela matriz envolta dos blocos (Figuras 5.22, 5.23 e 5.24).

Nas porções mais distais do núcleo das falhas, geralmente separadas por algum plano bem definido, a rocha apresenta pequenos segmentos de falhas, no geral são limitados por eslicólitos e estilólitos. Porções de granulação variada e matriz de granulação fina, compactos e brechados, mostram presença de hidrocarbonetos ao longo do acamamento, barrados por falhas isoladas com rejeitos micrométricos. A figura 5.22 apresenta as duas composições da brecha com uma separação bem definida por um plano de falha paralelo ao plano principal.

Figura 5.22 Amostra 7A, com ambos materiais de brecha descritos, limitados por falha normal paralela ao plano principal.

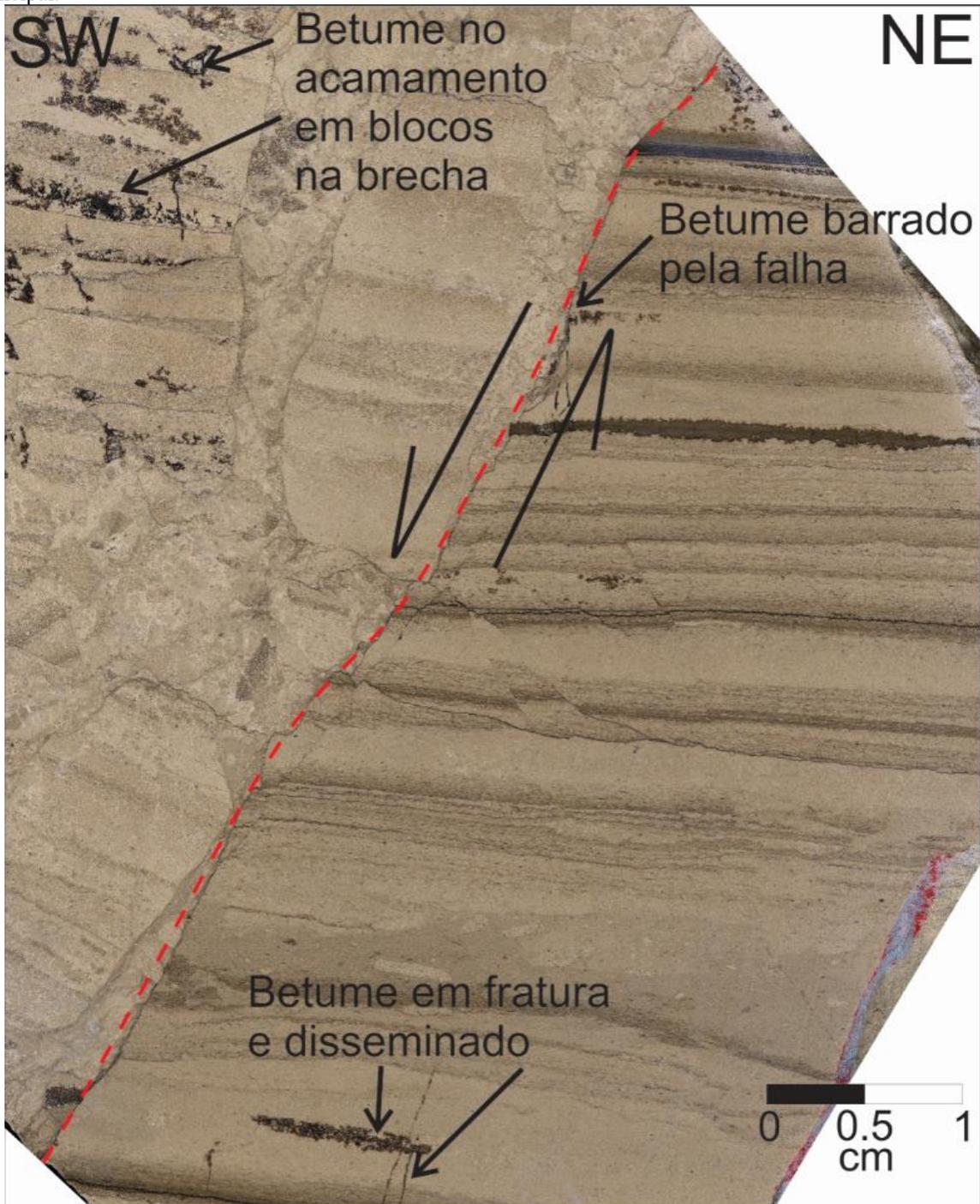


Figura 5.23 Zona brechada na zona de falha, com mergulho aproximado de 60° e bloco abatido a SW. Amostra 7B com blocos e fragmentos rotacionados, presença de falha do tipo normal paralela ao plano principal e falhas inversas secundárias antitéticas (porção direita inferior da amostra). As porções em cor preta representam concentrações de hidrocarbonetos (concentrados na lapa e zona de falha).

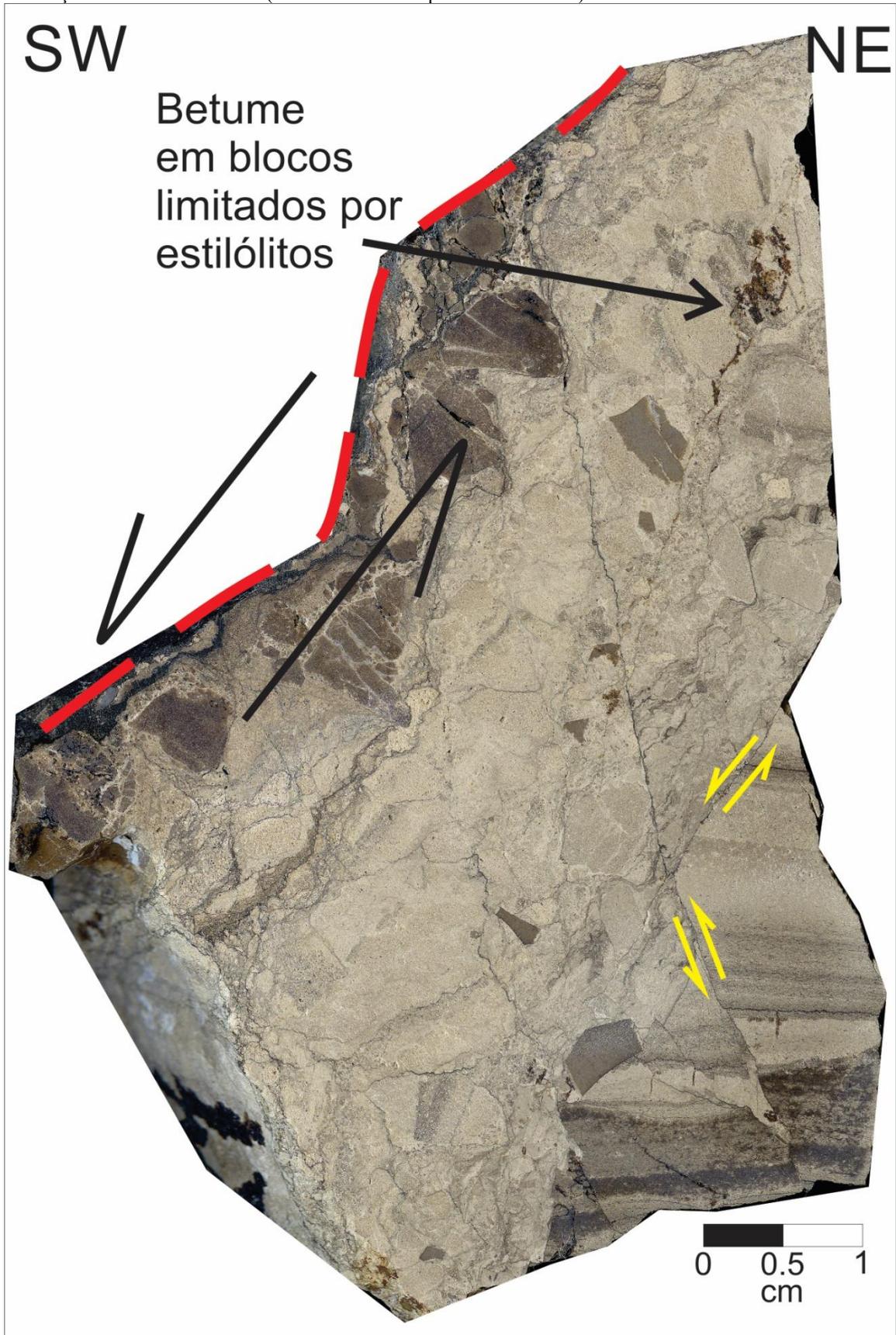
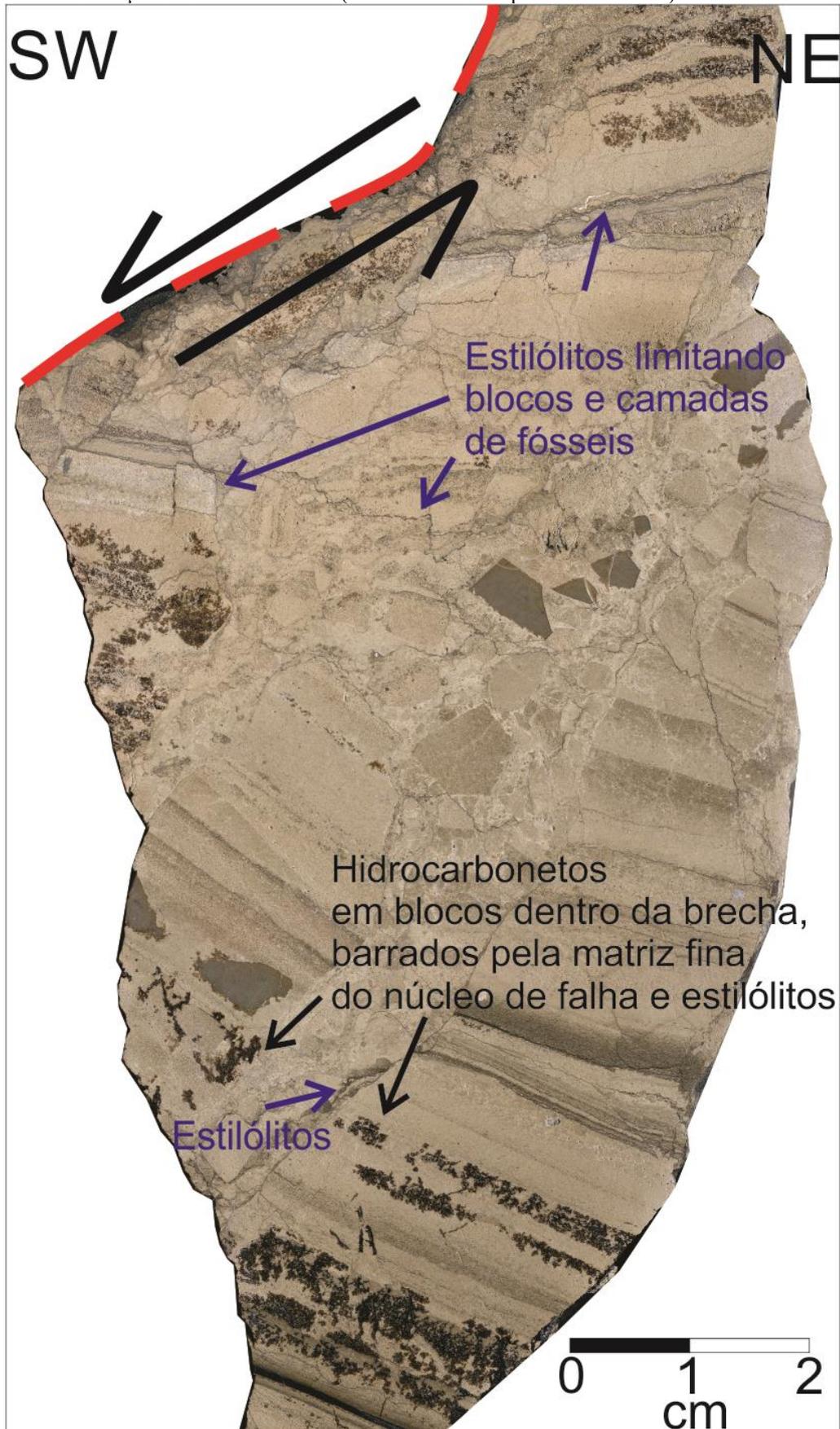


Figura 5.24 Zona brechada na zona de falha, com mergulho aproximado de 60° e bloco abatido a SW. Amostra 7C com blocos e fragmentos rotacionados e dissolução de pressão, formando estilólitos. As porções em cor preta representam concentrações de hidrocarbonetos (concentrados na lapa e zona de falha)



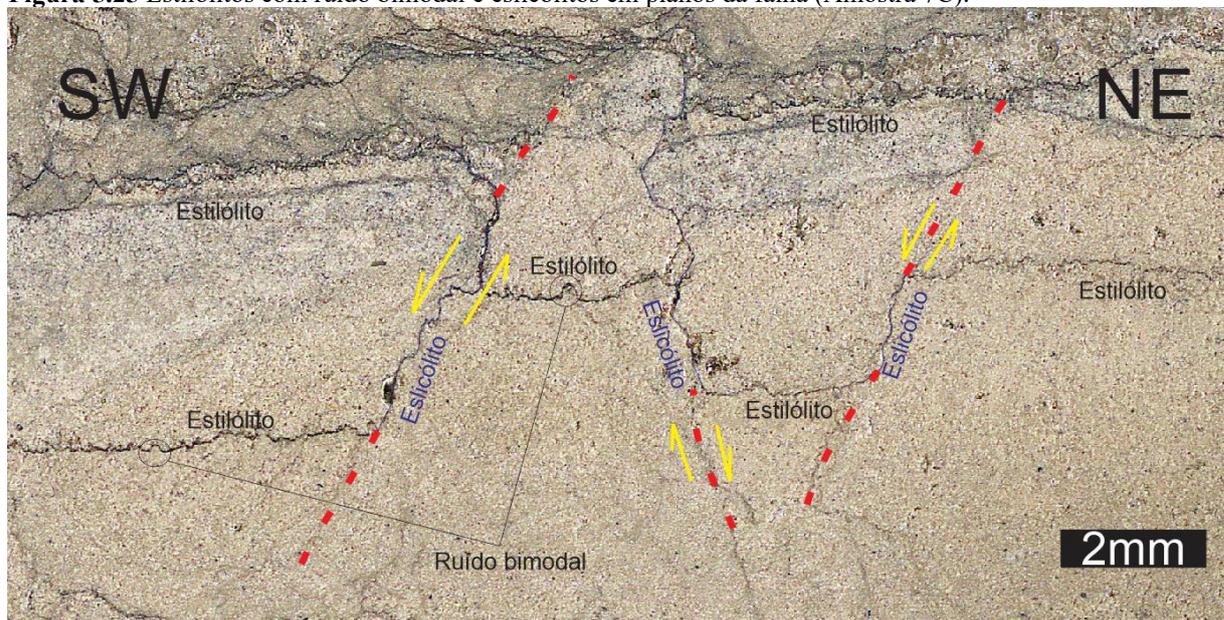
5.5. Estilólitos

Os estilólitos observados na área se encontram nas amostras obtidas nas zonas brechadas, e só são possíveis de serem identificadas nas imagens escaneadas em alta resolução das amostras.

Devido à escala sub-milimétrica, o contexto de deformacional e a impossibilidade de ter uma compactação na área de milhares de metros de sedimentos acima da Formação Irati, as estruturas observadas podem ser consideradas como estilólitos tectônicos e, quando ocorrem junto a planos de falha e têm uma inclinação dos segmentos em relação ao seu traço principal, são denominados eslicólitos.

Há presença de ruídos bimodais, resultantes de grãos com competência diferente entre si e eslicólitos em planos de falha, que passam a ter uma superfície irregular invertendo o ângulo em sua extensão (Figura 5.25). Seu arranjo geométrico se assemelha ao quadro de falhas conjugadas reconhecido neste estudo.

Figura 5.25 Estilólitos com ruído bimodal e eslicólitos em planos da falha (Amostra 7C).



Os estilólitos tectônicos presentes ocorrem em posição sub-horizontal, seguindo planos do acamamento do calcário dolomítico ou próximos disto, a amplitude dos dentes dos estilólitos é inferior a 100 micrometros, e apontam para uma direção de σ_1 perpendicular ao acamamento (*i.e.* sub-vertical) (Figura 5.26).

Nos pequenos fragmentos rotacionados nas porções brechadas, os estilólitos estão rotacionados junto com os blocos, seguindo o acamamento dos mesmos, e eventualmente seguindo os planos que limitam os blocos, podendo ser classificados como eslicólitos associados aos planos de fraturas que também rotacionaram.

Nas amostras onde foram reconhecidos estilólitos, foi possível perceber que sua presença limita a ocorrência de hidrocarbonetos, segundo a literatura, pelo fato de o estilólito se formar a partir de uma compactação e dissolução por pressão do material, localmente pode atuar como selante, por sua impermeabilidade. A explicação se aplica no caso, onde é possível observar pequenos fragmentos do calcário no material brechado, onde se encontra betume preenchendo camadas e fraturas no calcário, porém confinados pelos eslicólitos nas extremidades ao redor do fragmento, formando pequenas concentrações de hidrocarboneto “ilhadas” no meio do material brechado (Figuras 5.22, 5.23 e 5.24).

Na Figura 5.26, da amostra 7A, é possível identificar o bloco ejetado citado no subcapítulo zonas de falha, um par conjugado de falhas se encontra com um eixo de esforço principal obliquo em relação ao apresentado na área (subvertical), indicando que naquela porção o esforço principal tinha uma direção diferente. Por se tratar de uma zona brechada, é possível que algum bloco contido na zona brechada teve uma rotação ou deslocamento durante o processo aplicando um esforço pontual e gerando estas falhas de segunda ordem. Outra possibilidade seria alguma variação da geometria do plano principal gerar um arco compressional resultando nestas estruturas.

Considera-se também a possibilidade de blocos rotacionados e deslocados durante a evolução da falha e brechação podem influenciar também a posição e formação dos estilólitos, pois além de estilólitos paralelos ao acamamento em blocos rotacionados, a rotação e aplicação de um esforço diferencial em direções distintas do esforço principal pode ser o responsável pela formação dos estilólitos nas bordas destes blocos.

Como demonstrado no trabalho de Toussaint et al. (2018), a assimetria das ondulações com orientações dos dentes da rugosidade do estilólito para direções não perpendiculares a direção do plano principal do estilólito indica a posição do esforço principal, Nestes casos é representada pelos eslicólitos, reafirmando a posição do esforço principal na vertical, acordando com os estilólitos tectônicos com geometria simétrica (Figura 5.27).

Figura 5.26 Estilólitos e eslicólitos em planos de falha com trecho com transição de estilólito para eslicólito (Amostra 7A).

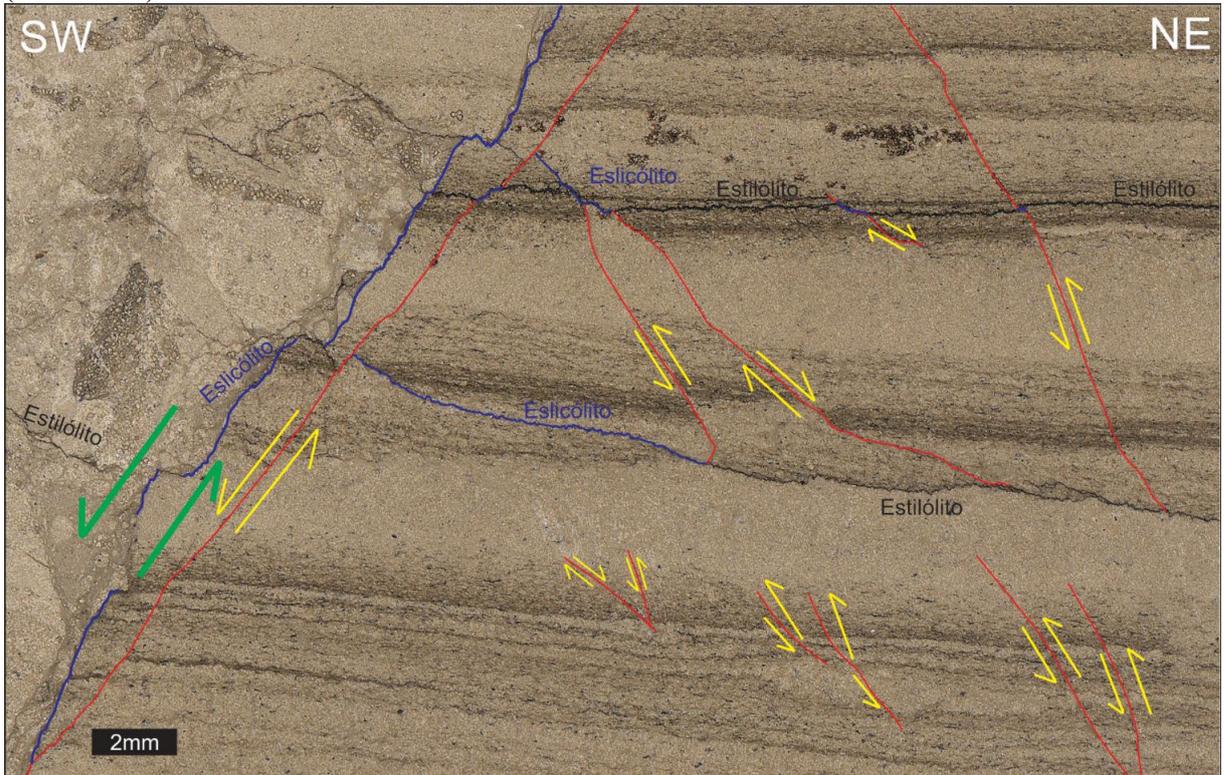
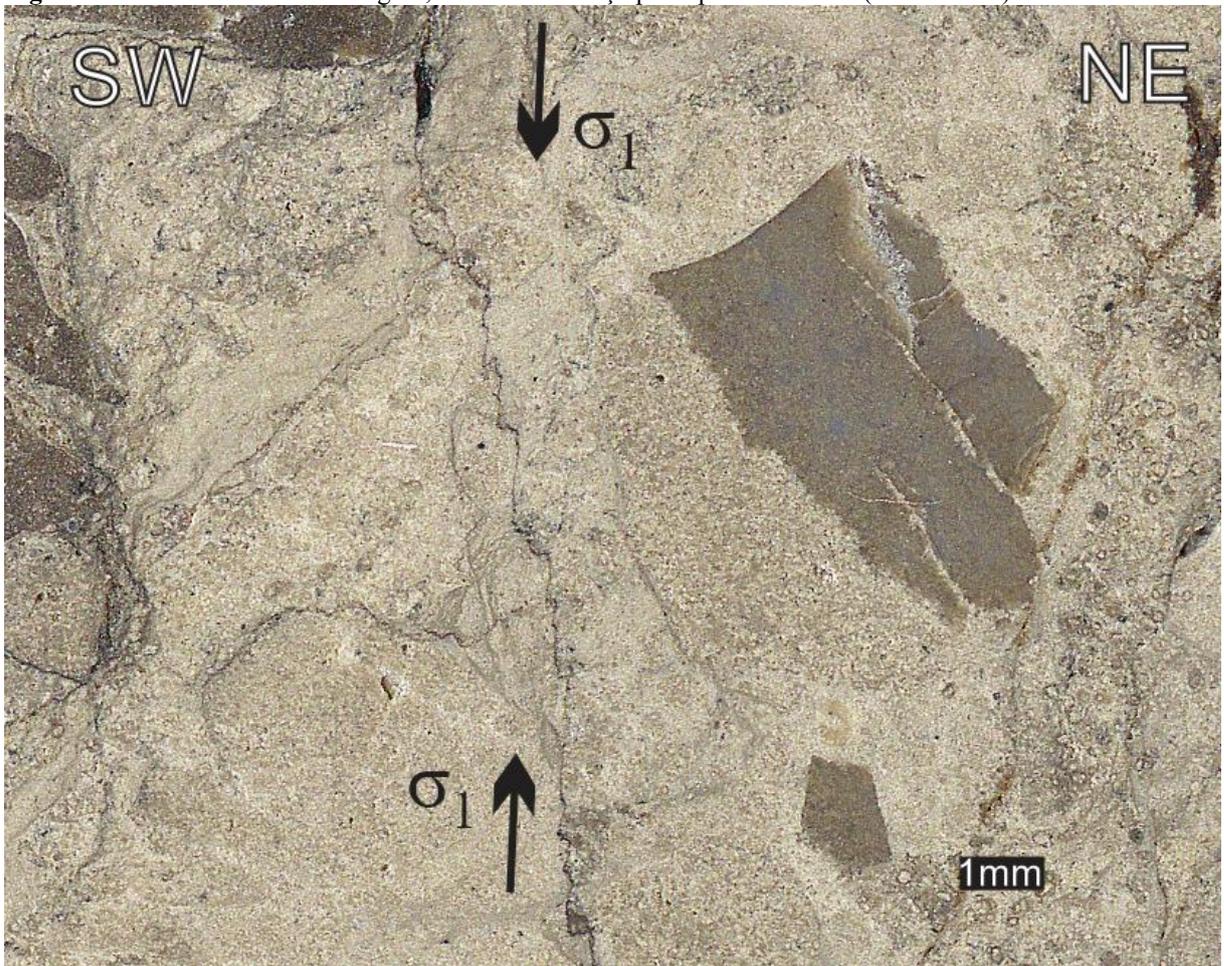


Figura 5.27 Eslicólito com alto ângulo, indicando esforço principal subvertical (Amostra 7B).



5.6. Zona de Dano

Considerando todo o maciço rochoso estudado como uma zona de falha multinucleada, com uma largura aparente de cerca de 30 metros, reconhece-se entre seus limites e em seu entorno proximal uma extensa zona de dano. Além das pequenas falhas associadas, neste trecho predomina a presença de juntas, fechadas e abertas, marcadamente no corpo principal de carbonatos. As juntas abertas apresentam-se com formas lenticulares (mais abertas no centro), preferencialmente preenchidas por hidrocarbonetos, mas também com calcitas ou vazias. Suas direções preferenciais estão ao longo de NW-SE, assim como as das principais falhas, porém seus mergulhos são maiores, subverticais (Figura 5.28).

Seguindo a classificação de Peacock et al. (2017) adaptada de Kim et al. (2004), foi identificada na escala de afloramento uma zona com danos de aproximação e distribuídos, enquanto na escala mesoscópica, de amostras de mão, existem danos de parede, de intersecção e de conexão. Na escala microscópica foi classificado como dano de conexão (degrau contracional).

Como observado no trabalho de Faulkner et al. (2010), em zonas de dano próximas às falhas, a densidade de fraturamento aumenta com a proximidade do núcleo de falha e a permeabilidade também aumenta, porém no núcleo de falha, apesar de a densidade de fraturas ser a mais alta, não há permeabilidade ou esta é diminuída.

Na escala centimétrica e milimétrica são observadas bandas de deformação, com uma deformação absorvida internamente, com realocação de grãos e restrita em pequenos estratos. A imagem a seguir (Figura 5.29), detalhe parcial do gráben presente na figura 5.9C, indica as mesmas geometrias observadas nas escalas maiores afetando apenas uma fina camada de calcário dolomítico, próximo a um plano principal. A banda de deformação, além de ter seu término nas camadas de folhelho (mais dúctil), em muitas porções seus traços terminam no meio da camada de calcário dolomítico, indicado pela desordenação dos leitos e desarranjo dos grãos, formando bandas acinzentadas. Ramificam-se a partir de falhas ou mesmo a partir de fraturas abertas.

Figura 5.28 Zona de dano entre dois núcleos de falha. Os traços escuros com manchas azuladas representam juntas abertas, com exsudação de hidrocarbonetos.

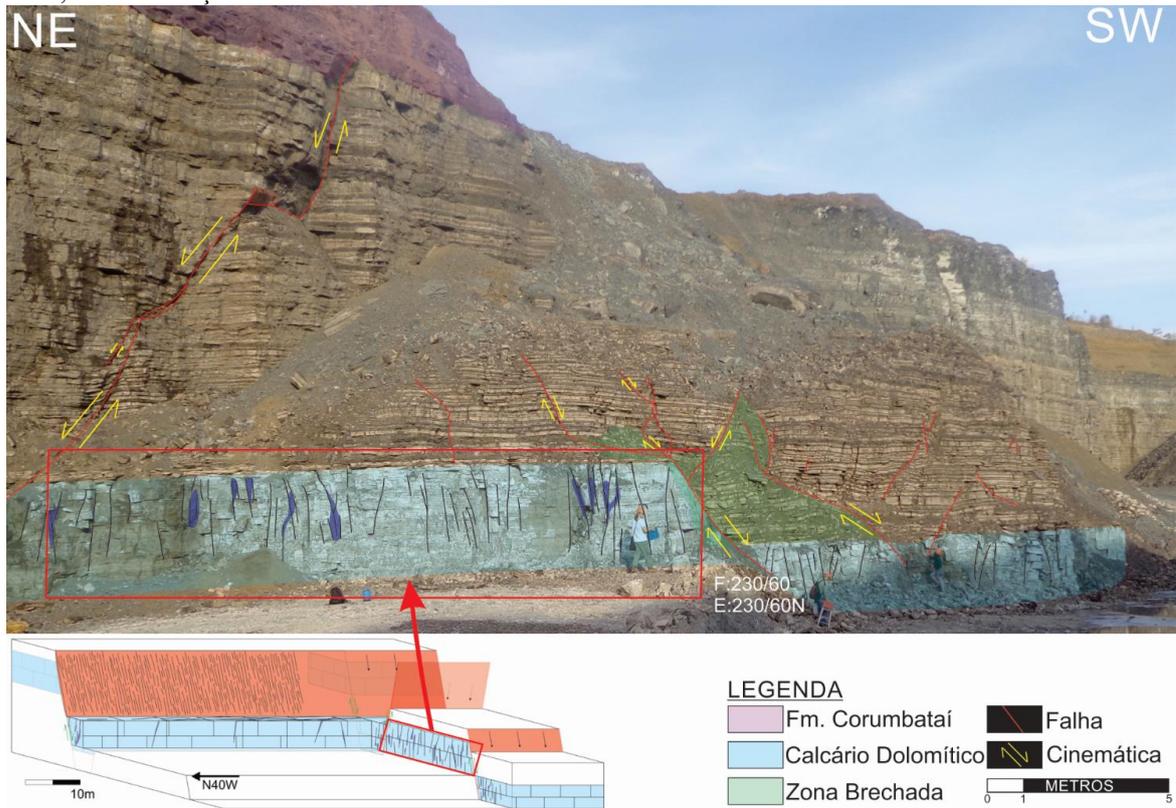
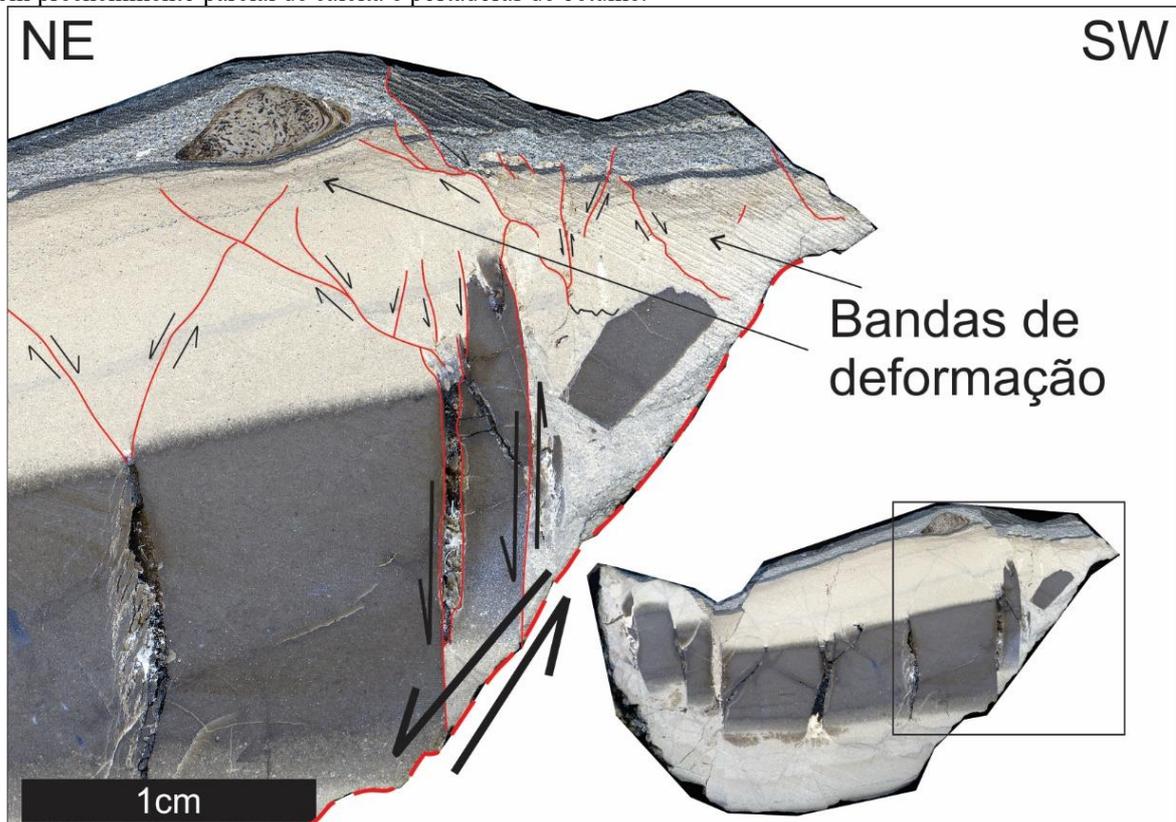


Figura 5.29 Camadas centimétricas a milimétricas de calcário dolomítico realçadas por diferentes cores. Bandas de deformação em camada de calcário dolomítico, com deformação indicada pela desordenação de grãos no término das estruturas. Ruma à camada mais resistente, as bandas de deformação se associam a fraturas abertas, com preenchimento parcial de calcita e portadoras de betume.



5.6.1. Relação entre estruturas e hidrocarboneto nas zonas de dano

Os hidrocarbonetos presentes na área de estudo são caracterizados por terem textura semelhante a um betume; são sólidos com uma alta viscosidade, que diminui quando exposto ao sol, escorrendo e formando gotas e colunas que descem pelas paredes do afloramento, impregnando qualquer material que entre em contato. Quando sólido reflete a luminosidade, dando impressão de polimento da superfície.

Ocorre preenchendo as juntas abertas que estão restritas ao banco principal de calcário dolomítico, de direção preferencial NW e subverticais, porém também se encontram nas juntas que fazem a conexão entre estes planos. Em alguns casos, a abertura das fraturas e preenchimento por esses hidrocarbonetos nas juntas é superior a 10 centímetros (Figura 5.30).

A ocorrência no pacote superior, heterolítica, de folhelhos intercalados com calcários e silexitos, de espessuras centimétricas a decimétricas, é bem menos acentuada, mas quando reconhecida, está associada a fraturas restritas às camadas de calcário, mais resistentes, em pequenas juntas abertas.

Como descrito de maneira breve anteriormente, em uma escala de afloramento, o betume está restrito a juntas, sem passar pelas falhas principais e ocupando a maior parte do espaçamento das juntas, porém ao se observar a relação entre o hidrocarboneto e as estruturas presentes, a complexidade é maior e tais observações são válidas apenas a grosso modo.

Com a presença de estilólitos e esclólitos constatada, é natural que o material dissolvido pela pressão seja precipitado em espaços vazios, onde há um alívio de pressão, por exemplo, nas fraturas abertas nas rochas carbonáticas mais resistentes. Isto foi constatado na observação das estruturas na escala milimétrica em que há a precipitação de calcita em muitas juntas, coexistindo e dividindo espaço com o hidrocarboneto. A precipitação da calcita ocorre nas bordas das juntas, que no geral encontram-se parcialmente abertas com betume em seu núcleo. É notável que na escala milimétrica as falhas e juntas são interligadas, onde ramificações de falhas sintéticas e antitéticas convergem em pontos onde começam as juntas, que por sua vez são mais salientes em porções silicificadas, que tem uma tendência a não absorver internamente a deformação.

Além das juntas parcialmente abertas ou totalmente preenchidas por calcita, há localmente fraturas vesiculares, formando pequenas cavidades, com presença de betume e espaços abertos, além de apresentarem betume disseminado na rocha em zonas proximais a estas cavidades. Tais feições são resultado de dissolução local, que aumentam a porosidade da

rocha e ampliam o espaço das juntas, criando condutos de permeabilidade local, gerando paredes rugosas, estas zonas são menos restritas em comparação as zonas com precipitação e tem maior capacidade de transporte e acumulação de betume (Figuras 5.31 e 5.32).

Ao contrário do que é visto em escala mesoscópica e macroscópica, planos de falhas de rejeito milimétrico também possuem betume. Isto ocorre porque falhas deste porte não apresentam material de núcleo de falha espesso o suficiente para ser selante. Além disso os planos de falhas estão interligados com muitas juntas, inclusive sendo responsáveis pela formação de algumas delas, ao se ter uma geometria do tipo 1b – Arco distensivo, que gera um alívio distensivo em meio a falha, semelhante a estruturas tipo *pull apart* presente em zonas de cisalhamento transcorrente (Figura 5.31).

Em alguns casos, o núcleo de falha, composto por carbonato fino e fragmentos associados às brechas, é removido, com indícios de dissolução, gerando pequenas cavidades nos núcleos de falha, que também têm conexões com as juntas e tem preenchimento por betume e calcita precipitada em alguns casos, indicando ter passagem de fluidos e se tornando canais potenciais para a passagem e acúmulo de hidrocarbonetos (Figura 5.32).

Outro exemplo de espaços abertos com passagem de fluidos são contatos de camadas, que por serem muitas vezes interfaces mecânicas se tornam um plano de descontinuidade e fraqueza, com aberturas por dissolução e por diferenciação de deformação entre dois materiais (deslocamento de apenas uma camada, ou formação de arcos), se ligando as demais estruturas e sendo preenchidas por betume e calcita precipitada (Figura 5.32).

Os hidrocarbonetos também são presentes pontualmente seguindo acamamento ou em zonas porosas próximas às fraturas que têm como característica paredes dissolvidas (fraturas vesiculares). No caso dos hidrocarbonetos presentes em poros do acamamento, a sua origem está associada a presença de alguma fratura próxima fonte deste betume (Figura 5.32), ou então totalmente isolados, limitados por estilólitos em brechas carbonáticas em núcleos de falha, que impedem a passagem deste betume para outras porções da rocha (Figura 5.22).

De modo geral, além das ocorrências de betume estão associadas: ao acamamento sedimentar, ao longo dos limites litológicos ou de pequenas cavidades de dissolução; as acumulações principais se ajustam a fraturas abertas, principalmente limitadas aos corpos carbonáticos, associadas com calcita ou com vazios indicativos de dissolução das paredes; às zonas brechadas, em sua porosidade decorrente da variação da granulação da rocha, ou em vazios associados às brechas, promovidos por remoção mecânica ou dissolução; em irregularidades dos planos ou rampas de falhas, que formam “vazios”, ideais tanto para a formação de brechas grossas quanto para a precipitação de calcita secundária.

Figura 5.30 Exsudação de hidrocarboneto em juntas na zona de dano



Figura 5.31 Rocha encaixante do gráben da figura 5.9C, representativa de uma zona de dano proximal à falha principal, com betume preenchendo espaços de juntas vesiculares com uma ramificação intensa e espaços abertos de pequenas falhas, a conexão destas estruturas auxilia na migração e acúmulo de hidrocarbonetos. Destaque para a geometria de inversão de mergulho, resultado da conexão de um plano de falha e de uma fratura extensional, formando um dos condutos principais da amostra para passagem de fluidos.

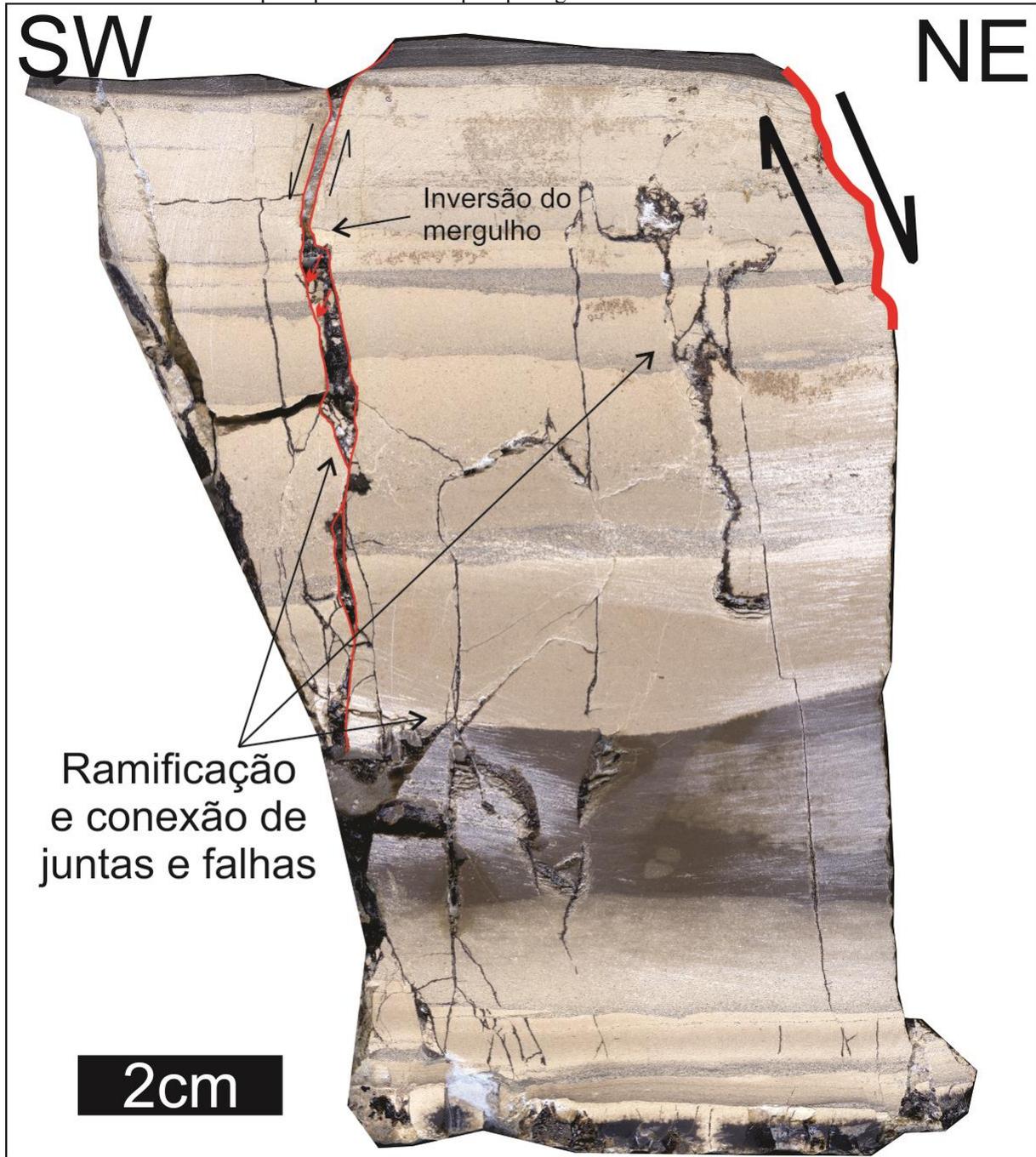
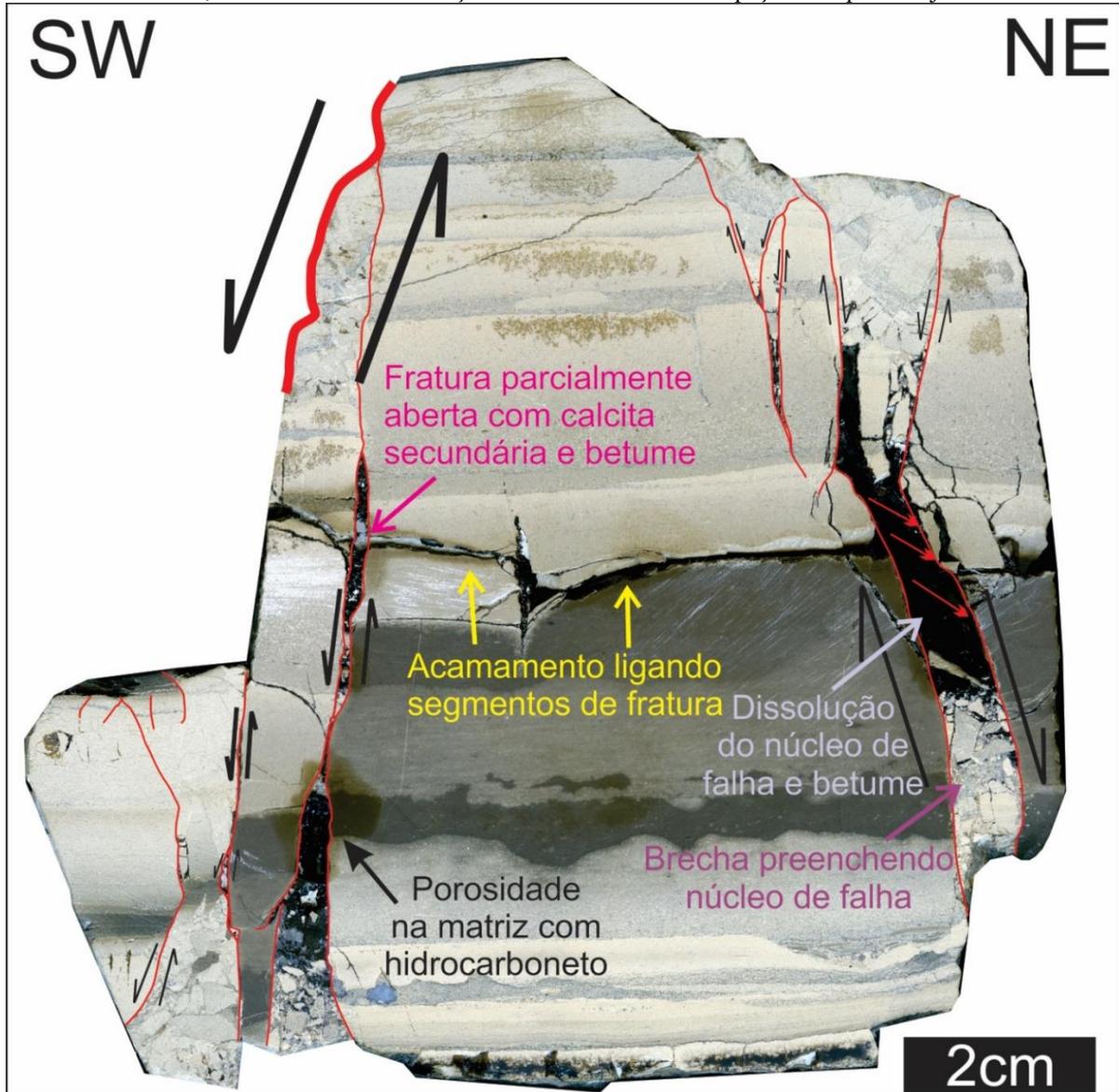


Figura 5.32 Plano de falha na porção NE de rejeito milimétrico porém com grande espaço gerado pela dissolução e remoção da brecha carbonática do núcleo de falha, o espaço está preenchido por betume e tem conexão com outras fraturas através da ramificação e abertura de um acamamento, que por ser um plano de fraqueza permitiu a percolação de fluidos e apresenta calcita secundária precipitada e hidrocarbonetos. Na porção SW há uma falha com a mesma dissolução e abertura em seu núcleo, com calcita secundária e uma zona próxima com porosidade na rocha encaixante, com uma alta concentração de hidrocarboneto no espaço e nos poros adjacentes.



As feições acima descritas associadas às fraturas abertas são reconhecidas como de fraturas de extensão do modelo clássico de Anderson, mesmo aquelas associadas às irregularidades dos planos de cisalhamento das pequenas falhas, gerando espaços devido a geometria da rampa de falha, tidas como estruturas ideais para a formação de porosidade secundária nestes tipos de rochas carbonáticas.

5.6.2. Propagação do fraturamento

A variação e propagação do fraturamento na Formação Irati é visivelmente condicionada pela estratigrafia e tipo de rocha, onde algumas intercalações entre folhelhos, carbonatos e material silicificado apresentam ramificações, refração e descontinuidade da propagação das fraturas, camadas espessas de carbonato, mesmo com estratificação entre carbonatos mais claros e escuros, não há variação.

As camadas de carbonato, mesmo estratificado, se comportam como uma unidade mais resistente e podem ser consideradas unidades mecânicas, pois seus contatos são fortemente ligados, na maioria das vezes sem afetar a propagação de falhas e juntas. Camadas de folhelho que limitam o espesso pacote de carbonato e os contatos das camadas são interfaces de mudança do comportamento das rochas, algumas fraturas não se propagam de uma camada a outra, o que caracteriza a camada de folhelho como interface mecânica, enquanto outras fraturas sofrem refração ou mudam de posição ao se propagar ao longo dos ritmitos, o que faz do contato dado pelo acamamento também uma interface mecânica. O trabalho de Cerri et al. (2020) também fez o reconhecimento das unidades e interfaces mecânicas do Membro Assistência da Formação Irati.

A propagação das fraturas nas camadas de ritmitos também apresenta ramificações, refração e descontinuidade ao se propagar pelo folhelho e outras camadas pouco espessas de material fino e de muita matéria orgânica, indicando que além do contato ter uma fraca ligação das camadas, indica um caráter dúctil variável do folhelho, que ao absorver internamente a deformação impede a propagação do fraturamento ou refrata o plano de fratura.

O melhor exemplo para o comportamento das fraturas em diferentes camadas, observado em escala de amostra, está presente no gráben da figura 5.9C, onde os planos de falha não se propagam para o estrato de cima e seu término ocorre na variação de material dentro da própria camada, indicando a variação litológica e os contatos como interfaces mecânicas, além da variação do comportamento mais dúctil do folhelho em relação ao carbonato e ao material silicificado (Figura 5.35 e 5.36).

Assim como no trabalho de Cerri et al. (2020) foi constatado que fraturas mais proeminentes, de maior grandeza, tem sua propagação por diversas unidades mecânicas, o que leva a observação da influência da escala na definição das unidades e interfaces mecânicas, consolidação dos contatos e ductibilidade das camadas. Para falhas de pequeno porte a propagação é menor em comparação as de grande porte, fraturas milimétricas não cruzam pequenas variações em uma mesma litologia e a deformação de falhas é absorvida em níveis

carbonáticos maciços, enquanto estruturas na escala centimétrica e dessimétrica são interrompidas apenas em variações bruscas de litologia. Falhas métricas reconhecidas apenas em pacotes e sequências muito distintas, sendo que neste último caso, para falhas, o mais comum é apenas a refração e ramificação, sem a interrupção.

Este fator também pode ser responsável na região pela descontinuidade de falhas ao cruzar litotipos cujas distintas características físicas acabam formando interfaces mecânicas nos contatos entre as camadas, impedindo, refratando ou ramificando a propagação das falhas, o que gera hiatos de informação em mapas.

Figura 5.33 Propagação de falha antitética em uma intercalação de carbonatos e folhelhos, com uma horizontalização da falha ao passar pelas camadas de folhelho, até terminar em uma camada mais dúctil de folhelho. Há presença de um betume com alta viscosidade restrito a níveis de carbonato, porém em pequena quantidade.

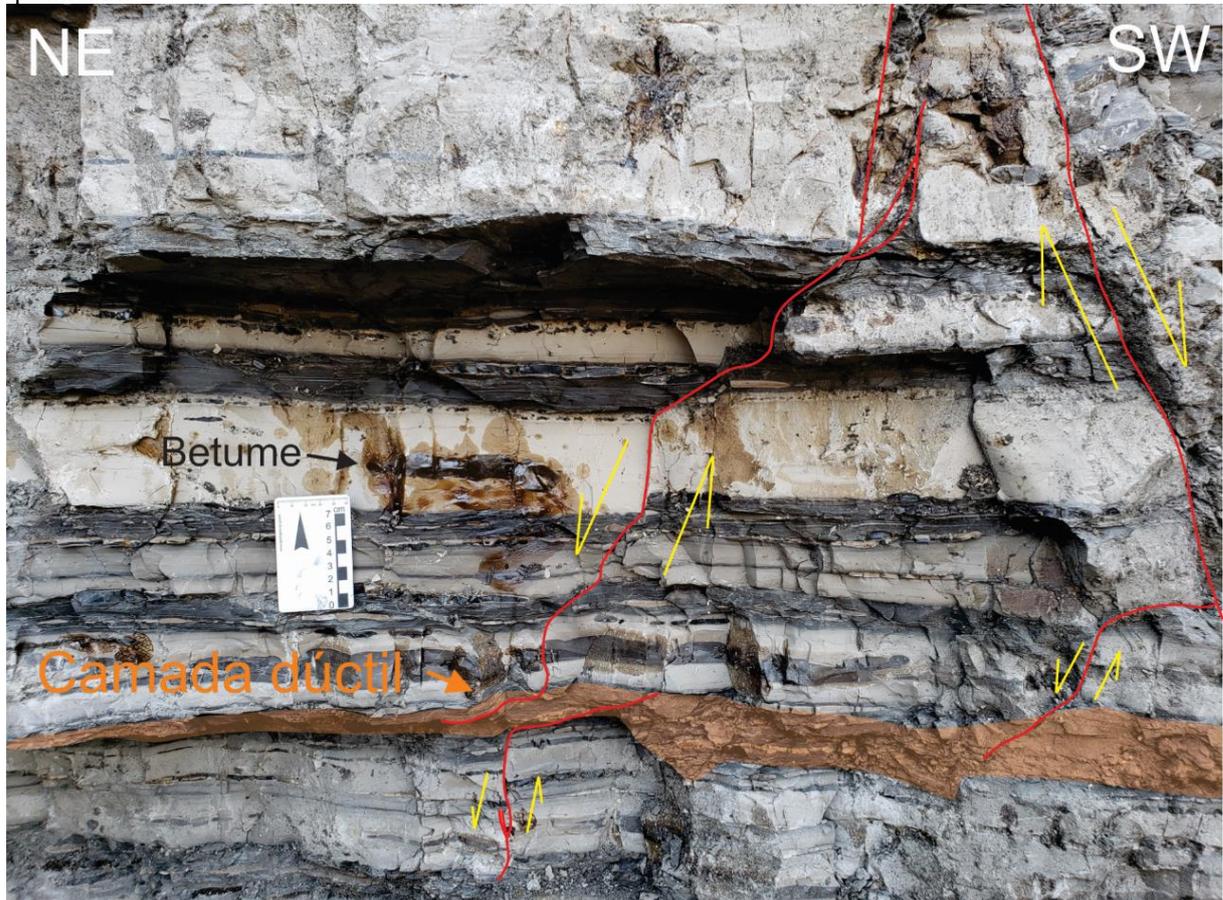


Figura 5.34 Fatia interna do gráben presente na figura 5.9C, com brecha na borda, bandas de deformação, ramificação de estruturas ao se propagar por diferentes estratos e abertura de plano de falha com uma geometria de distensão. Os níveis de folhelho no topo absorvem parte da deformação, implicando no término de muitas estruturas, além de bandas de deformação no próprio calcário dolomítico.

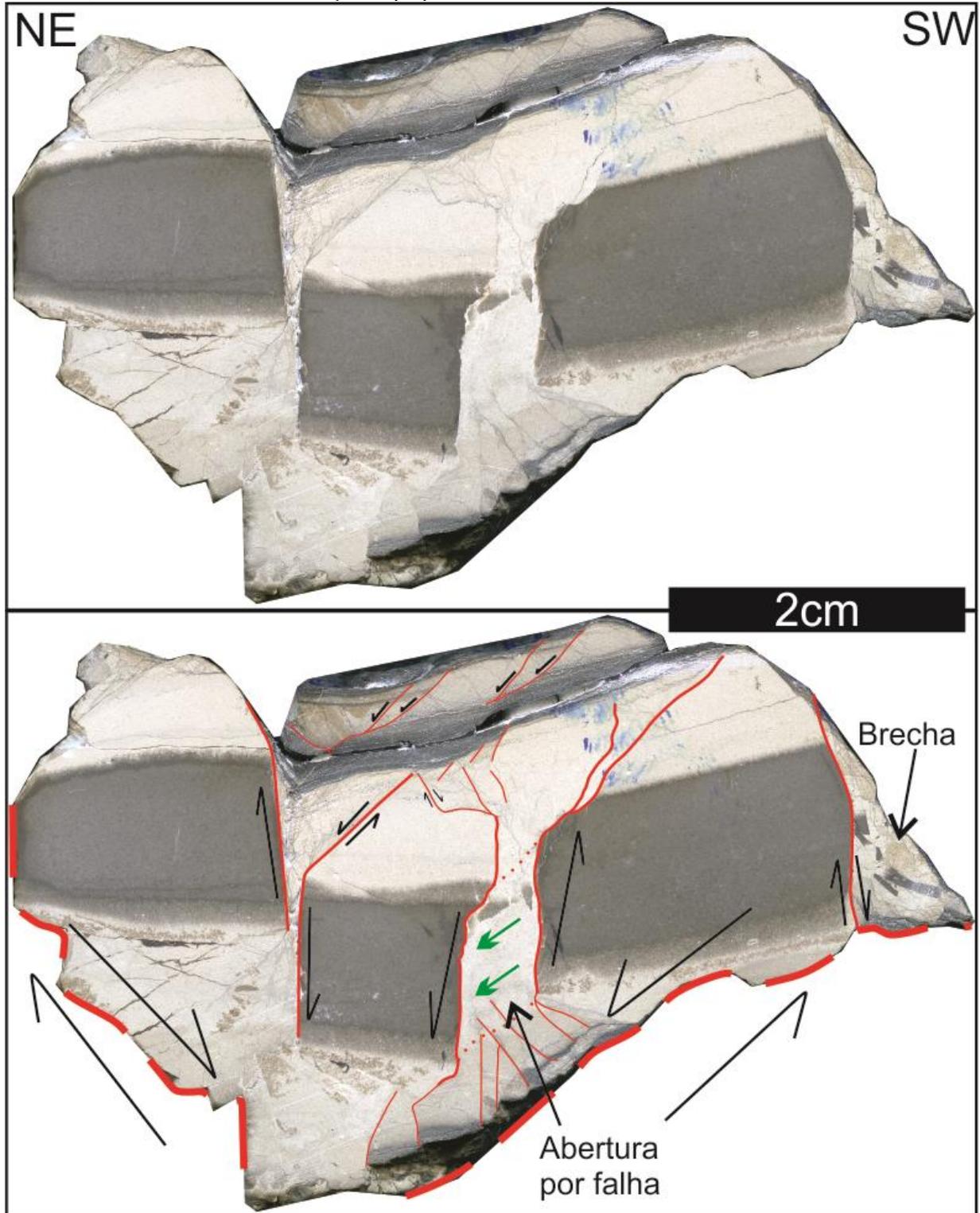
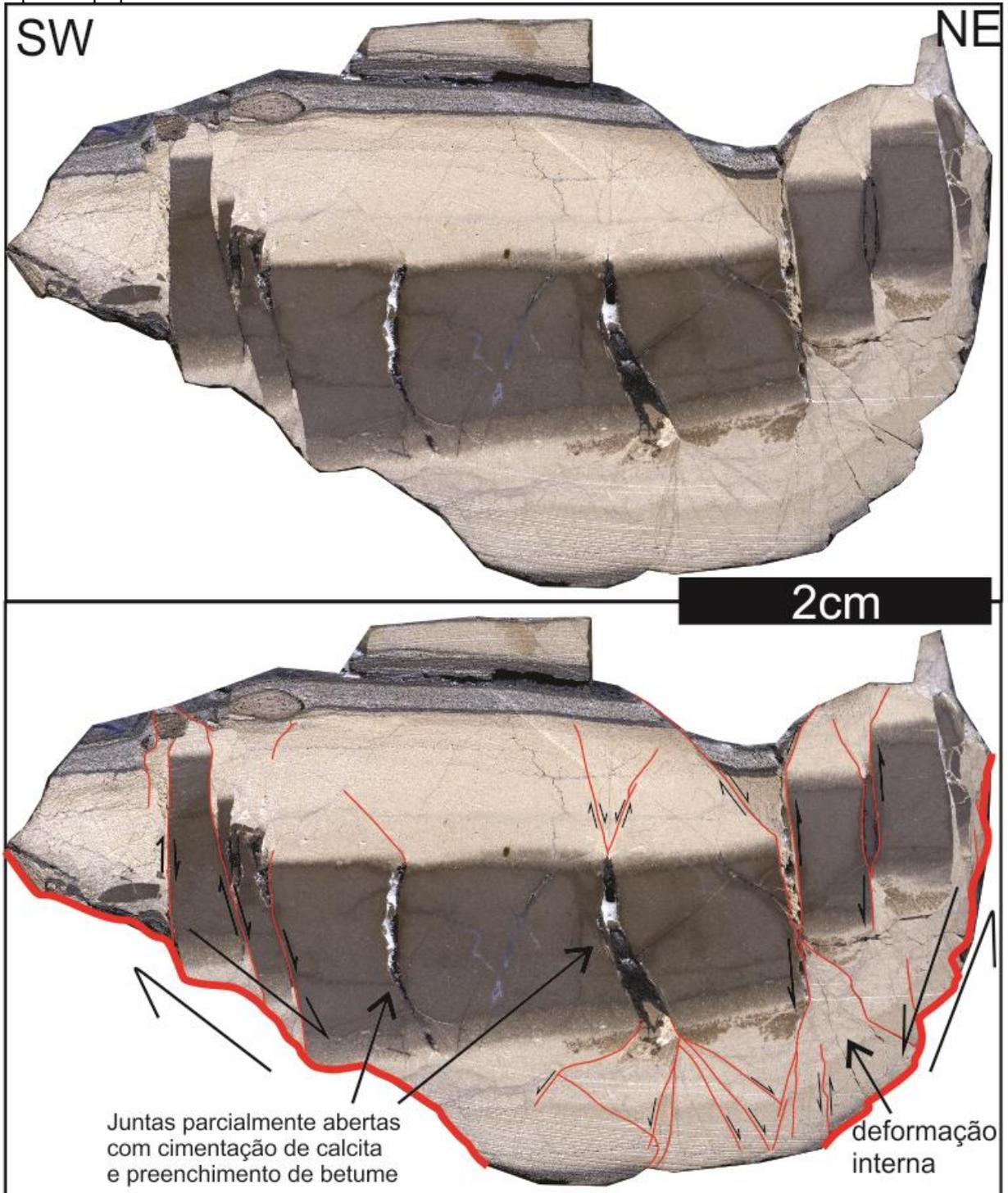


Figura 5.35 Fatia externa do gráben presente na figura 5.9C, pares conjugados de falha passam a se unir em uma única falha ao se propagar pelo material silicificado, gerando uma abertura e se ramificando novamente ao se propagar pela camada de calcário dolomítico. O maior número de blocos silicificados falhados e com menor dimensão indica uma forte ramificação dos planos observados na fatia anterior, mesmo em uma variação de espessura pequena de 1cm.



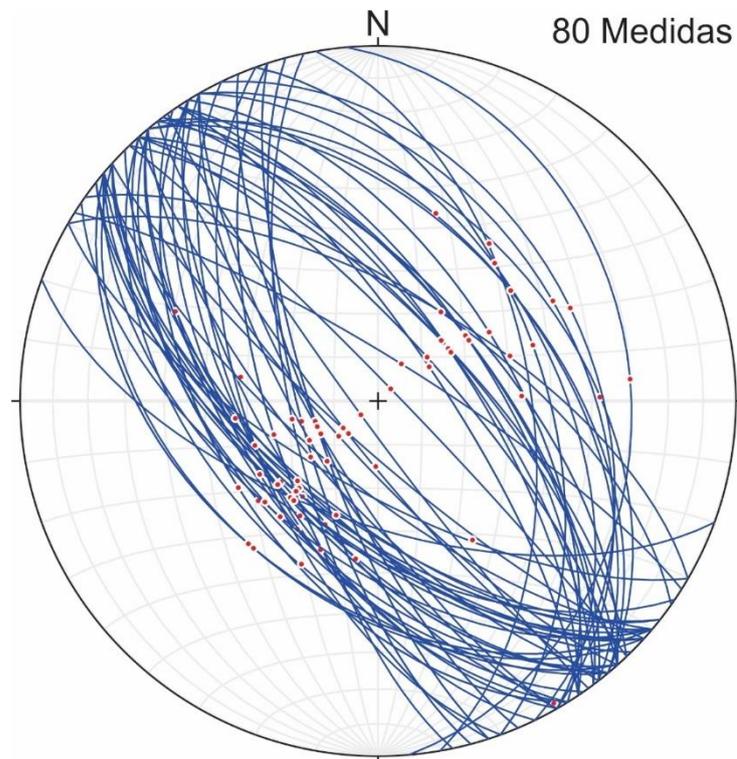
5.7. Análise estrutural: o quadro geométrico e cinemático

Falhas

Para as falhas, foram representadas as projeções ciclográficas dos seus planos e as respectivas estrias. O número total de falhas medidas foi de 94, com mergulho de médio a alto e direção preferencial NW-SE com certa variação, além de falhas isoladas de outras direções. A grande maioria das falhas é do tipo normal com rejeito preferencial de mergulho (concentração das estrias ao longo da direção NE-SW), porém foram identificadas uma falha inversa e uma falha transcorrente sinistral na Cava Bernardino, além de um pequeno número de falhas transcorrente dextrais em ambas cavas, sem representatividade no quadro geral.

O número de medidas reconhecido em campo de falhas do tipo normal, com direção NW-SE representativas do arranjo em par conjugado foi de 80, as direções preferenciais foram N40W e N50W, seguidas por N30W, N60W e N20W (Figura 5.36).

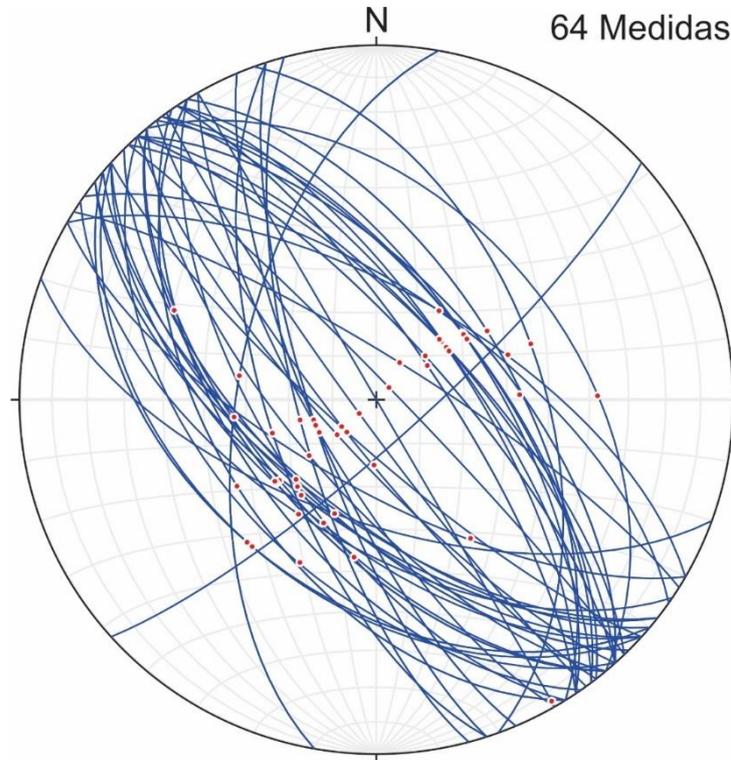
Figura 5.36 Estereograma com planos de falhas do tipo normal (projeções ciclográficas) e respectivas estrias das três frentes.



Na cava Monte Olimpo onde ocorreu o levantamento sistemático durante a primeira etapa de campo, foram medidas 64 falhas, com orientações preferenciais N45W/60SE,

N50W/68NE e N20W/72SW, além de falhas do tipo normal isoladas de direção N10E/60NW e N50E/15SE e uma falha transcorrente N30W/Vertical (Figura 5.37).

Figura 5.37 Estereograma com planos de falhas da cava Monte Olimpo (projeções ciclográficas) e respectivas estrias.



No avanço da cava para a “Cota 14” foram medidas mais 13 falhas, com predomínio para falhas do tipo normal de direção N50W/55SW, N40W/60SW e N40W/50NE (formando um par conjugado, Figura 5.38). Foi possível observar também uma reativação do plano de falha principal N40W/60SW (originalmente do tipo normal) para transcorrente dextral.

Na Cava Bernardino o número total de falhas medidas foi de 16, além das falhas de direção preferencial NW do tipo normal e transcorrente dextral, foram identificadas uma falha inversa e uma transcorrente sinistral. As direções preferenciais foram N40W/60SW e N40W/60NE para as falhas do tipo normal, N10E/30SE para a falha inversa e N40W/85NE para a falha transcorrente sinistral normal (Figura 5.39).

É notável no arranjo geométrico reconhecido para os conjuntos de falhas apresentados o duplo mergulho dos planos de falhas, tanto para SW (predominante) quanto para NE, formando arranjos clássicos de pares conjugados de fraturas de cisalhamento, ajustando-se, por exemplo, ao pequeno grabén representado na Figura 5.6.

Figura 5.38 Estereograma com planos de falhas da cota 14 (projeções ciclográficas) e respectivas estrias. **13 Medidas**

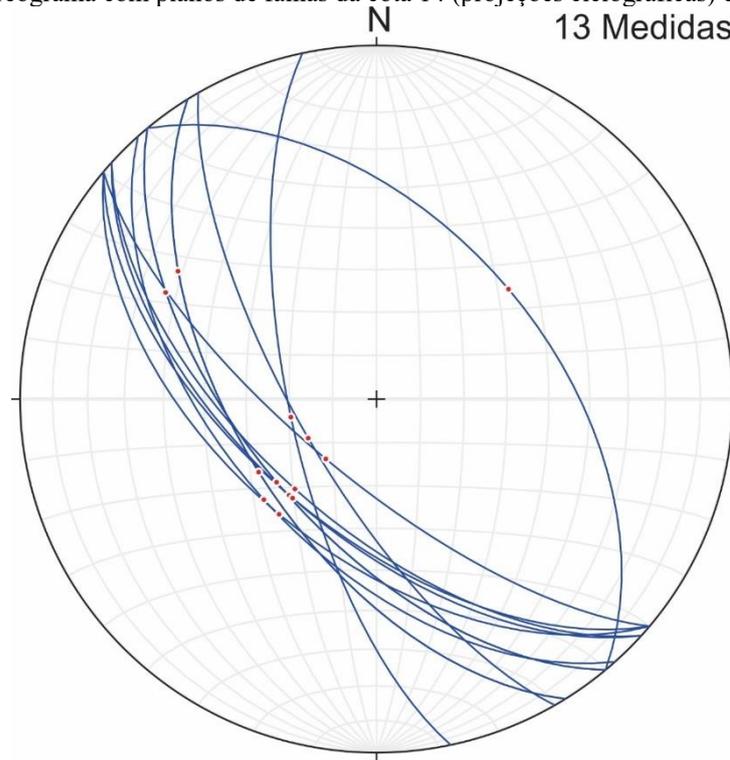
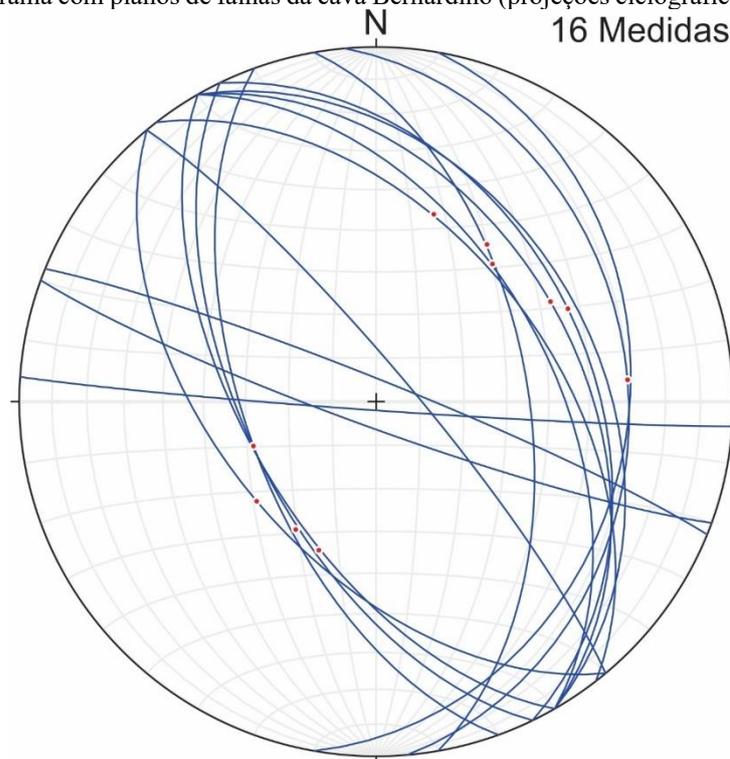


Figura 5.39 Estereograma com planos de falhas da cava Bernardino (projeções ciclográficas) e respectivas estrias. **16 Medidas**



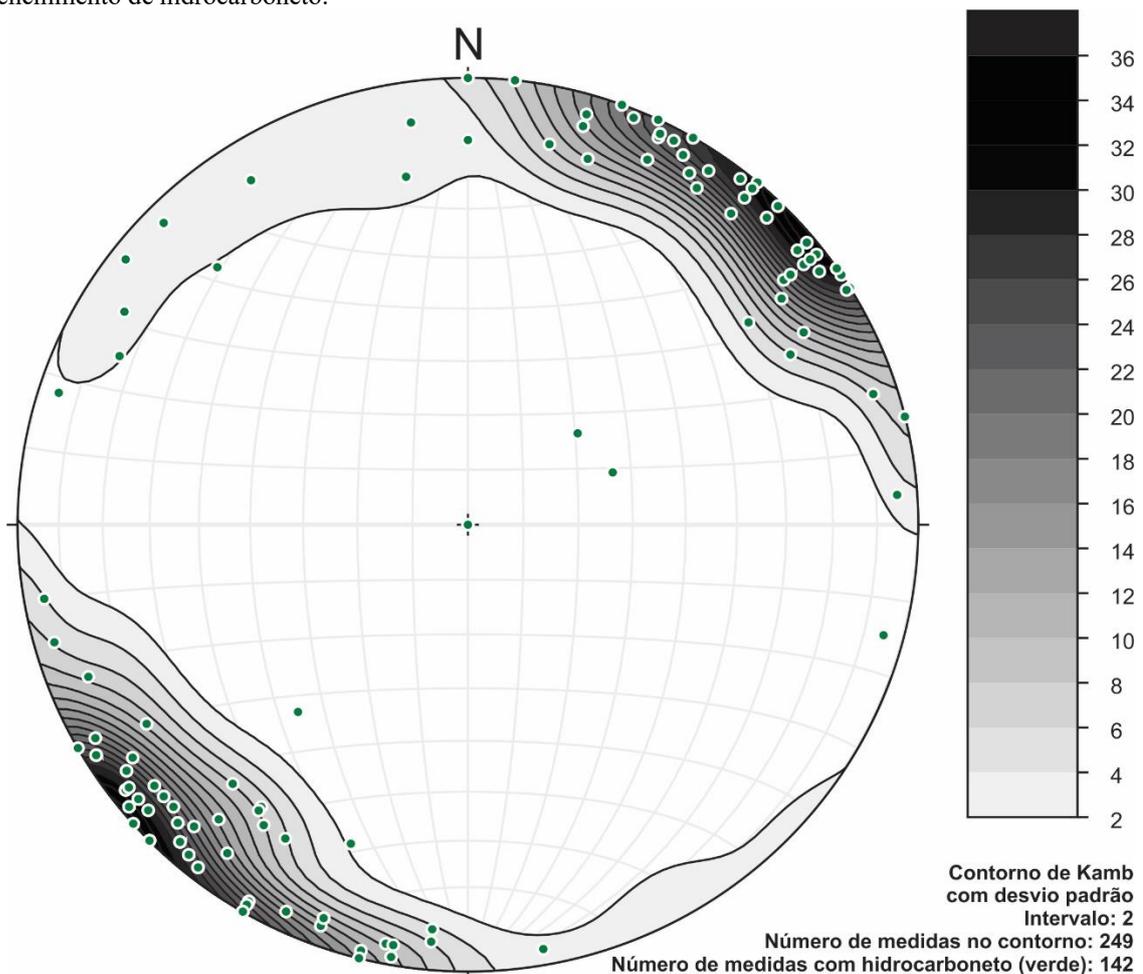
Juntas

Foram coletadas 249 medidas de juntas, das quais 142 apresentam preenchimento de hidrocarboneto. A representação foi efetuada pelos polos dos planos, para determinação do diagrama de frequência (Figura 5.40). A orientação preferencial reconhecida foi

N40W/vertical, com ligeira dispersão ao longo da direção NW-SE. Os mergulhos, são acentuadamente de alto ângulo a verticais.

É destacado que as juntas apresentarem vários sinais de abertura, relacionados por exemplo à forma lenticular verticalizada, aos processos de dissolução associados com corrosão das paredes e formação de vesículas, ao preenchimento por calcita e localmente presença de brecha. O sinal principal de abertura, no entanto, está relacionado à forte exsudação de hidrocarbonetos ao longo dos planos de fratura. No mesmo estereograma da Figura 5.40 foram representados os polos das juntas reconhecidas com exsudação de hidrocarbonetos (pontos verdes). É reconhecido a forte orientação NW-SE para estas fraturas abertas, principalmente com mergulhos subverticais. A maioria das juntas sem presença de óleo foram as NE-SW, porém, algumas desta direção apresentaram hidrocarboneto devido a intersecção com planos NW-SE. As direções preferencias foram N30W/86SW, N50W/87SW e N41W/88NE.

Figura 5.40 Estereograma de contorno dos polos das juntas com destaque em verde para os polos das juntas com preenchimento de hidrocarboneto.

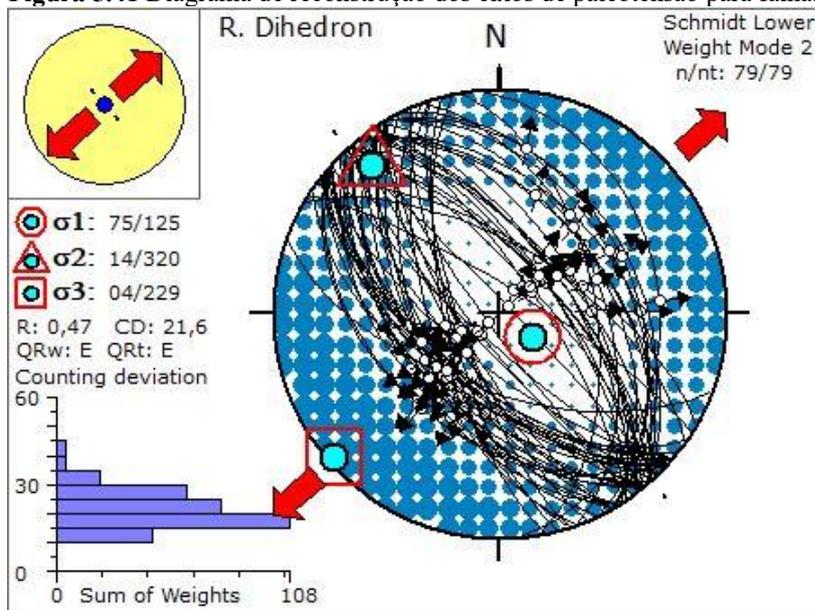


5.8. Eixos de Paleotensões: o quadro dinâmico

A análise dos diagramas de reconstrução dos eixos de paleotensão pelo método dos diedros retos (ANGELIER & MECHLER 1977, ANGELIER 1994) permitiu agrupar os dados em um grupo principal de falhas do tipo normal NW e falhas de menor relevância não representativas da área, em diagramas separados.

O primeiro quadro com o maior número de medidas, é o mais representativo do que foi visto em campo e descrito até o momento, se trata de um sistema de falhas do tipo normal com direção preferencial N40-50W com mergulhos para NE e SW, formando um par conjugado (Figura 5.41). Também é constatado uma falha transcorrente dextral que se encaixa no mesmo sistema de esforços de ShMax e ShMin. O diagrama indicou direções preferenciais de esforços: σ_1 125/75 (subvertical); σ_2 320/14 (NW-SE subhorizontal); σ_3 229/04 (NE-SW subhorizontal), indicando um sistema distensivo com direção NE-SW.

Figura 5.41 Diagrama de reconstrução dos eixos de paleotensão para falhas normais NW-SE.



As falhas do tipo normal NE-SW e transcorrentes dextrais NW-SE (incluindo as de reativação), inversa NW-SE, transcorrente sinistral NW-SE e outras falhas obliquas não são representativas do quadro local, e ocorrem de maneira isolada. Tais falhas foram agrupadas em dois diagramas de reconstrução dos eixos de paleotensão (Figuras 5.42 e 5.43), de forma a reconhecer a possível ocorrência de outros pulsos tectônicos deformacionais, anteriores ou posteriores a formação do quadro principal de falhas normais NW-SE, porém sem dados suficientes para detalhar estes eventos neste trabalho.

Figura 5.42 Diagrama de reconstrução de eixos de paleotensão para falhas associadas a reativação transcorrente dextral NW-SE.

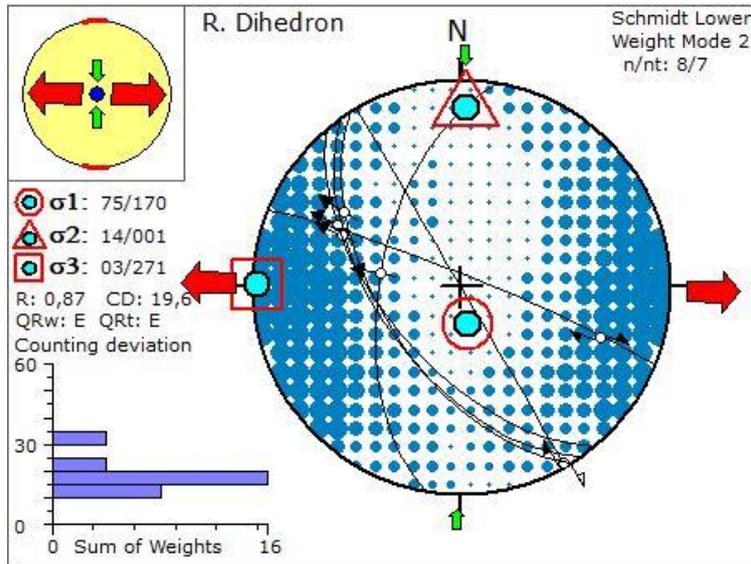
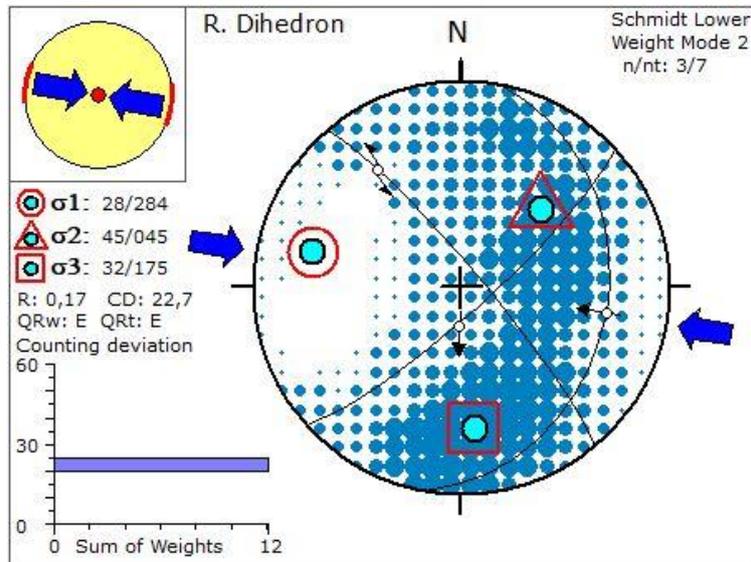


Figura 5.43 Diagrama de reconstrução de eixos de paleotensão para falhas associadas a transcorrência sinistral NW-SE.



As falhas transcorrentes dextrais NW-SE têm sua importância no quadro regional, pois Silva et al. (2019) apresentaram interessante estudo de associação de zona transcorrente dextral e falhas normais nas rochas do Grupo Itararé, na região de Itu. O arranjo reconhecido pelos autores mostra o desenvolvimento de estruturas tipo flor negativa, com falhas normais também direcionadas NW-SE. Estas feições foram associadas ao Lineamento Tietê. As estrias de reativação são obliquas, com sentido dextral normal, indicando uma reativação dextral de alguns planos de falha normal. Segundo a literatura (e.g. RICCOMINI, 1997; SOUSA, 2002), estaria possivelmente relacionada a eventos neotectônicos em uma transcorrência leste-oeste dextral, sendo esta falha NW com a característica de sintética R dextral.

5.9. Modelo de trapa estrutural

Os estudos estruturais realizados nas cavas de exploração de calcário dolomítico da Formação Irati permitiram o levantamento detalhado das estruturas associadas à ocorrência de hidrocarbonetos, associados e concentrados em determinado arranjo de falhas e fraturas, levando à elaboração de um modelo de trapa estrutural para rochas carbonáticas. Foram reconhecidos os papéis das falhas e rochas de falhas a elas associadas, das juntas extensionais, dos estilólitos e eslicólitos e da calcita secundária presente em zonas de abertura. O modelo de trapa estrutural presente é de um corpo de calcário dolomítico altamente fraturado em uma zona de dano de alta permeabilidade, causada por uma zona de falha multinucleada e que, em função do fraturamento associado, serve de reservatório para acumulação do hidrocarboneto.

No quadro regional, trabalhos anteriores reconhecem presença de um dique de diabásio próximo à área, com mesma direção da estrutura principal presente no local (IPT, 1981; CPRM, 2006; SOUSA, 2002; BATISTA, 2002). Os trabalhos de estudos de geração de hidrocarboneto na Formação Irati (THOMAZ FILHO et al., 2008) apontam para a presença das rochas básicas associadas à Formação Serra Geral como responsáveis pela energia de maturação da matéria orgânica que deu origem ao hidrocarboneto presente nas fraturas.

O banco calcário representa um bloco limitado por falhas conjugadas, do tipo normal, alongado na direção NW-SE, com largura aproximada de 30 metros e extensão desconhecida no momento, mas que alcança no mínimo 100 metros. O hidrocarboneto está acumulado neste corpo de calcário intensamente fraturado, representando um pequeno horste assimétrico. A zona de falhas posicionada a NE tem mergulho para NE e rejeito submétrico, enquanto que a falha limitante à SW tem rejeito vertical de cerca de 3m. A trapa estrutural é selada no topo por uma camada de folhelho e por núcleos de falha em suas laterais. Os selos são marcados pelas rochas de zonas de falhas associadas, com destaque para os tectonitos tipo folhelho cominuído e brechas carbonáticas, e localmente pelo próprio calcário (Figura 5.44).

Os canais de migração apontados no subcapítulo 5.5.1 são em macroescala representados por fraturas abertas preenchidas por hidrocarboneto, resultantes de distensão ou extensão associada às camadas mais resistentes ou, na maioria das vezes, associadas a irregularidades dos planos de falhas, resultando em descontinuidades propensas à separação (do tipo pull-apart). Em micro escala pequenas falhas, fraturas vesiculares, fraturas com abertura parcial e calcita secundária, aberturas distensivas em falhas, aberturas de núcleos de falha dissolvidos e removidos, espaços em acamamentos e porosidades próximas a fraturas. A conexão destes canais aumenta a capacidade de migração e acúmulo de hidrocarboneto nestes

níveis. Em termos geométricos, formam estruturas associadas à intersecção entre planos de falhas conjugados, ou intersecção entre planos de falhas e planos de fraturas extensionais, representando condutos associados às orientações do eixo cinemático σ_2 .

O arranjo de falhas reconhecido é de pares conjugados de cisalhamento, com direção preferencial NW-SE e mergulhos alternados para SW (principal) e para NE. Os indicadores de movimento apontam para falhas normais com estrias de mergulho, associadas então a esforços principais com eixos σ_1 subvertical, σ_2 NW-SE sub-horizontal e σ_3 NE-SW sub-horizontal.

A direção principal de fraturas com óleo retido é NW-SE, com mergulhos mais acentuados, de orientação preferencial NW-SE subvertical. No arranjo acima reconhecido para o elipsoide de esforços, representam fraturas distensivas ou extensionais, perpendiculares à σ_3 , portanto favoráveis a abertura e à percolação e migração de fluidos, entre eles os hidrocarbonetos.

Este modelo de falhas conjugadas em arranjo de par de fraturas de cisalhamento e associação com juntas de extensão subverticais, em posição bissetora do ângulo agudo entre as falhas, se ajusta ao modelo de desenvolvimento de planos de falhas de Anderson (1942), com as juntas abertas ocupando a posição de juntas de distensão, em um sistema distensivo, com eixo principal vertical.

A variação de escala das estruturas reconhecidas mostra também importante papel das fraturas micrométricas que, apesar da irregularidade de suas superfícies (as observações em escalas maiores mostram que as superfícies das falhas não são exatamente planas, mas muitas são curvilíneas e/ou irregulares) podem ser consideradas como causadas pelos mesmos esforços das estruturas maiores. Contribuem, à sua maneira, para a formação de espaços vazios associados a estas irregularidades, associadas a fraturas abertas interconectadas.

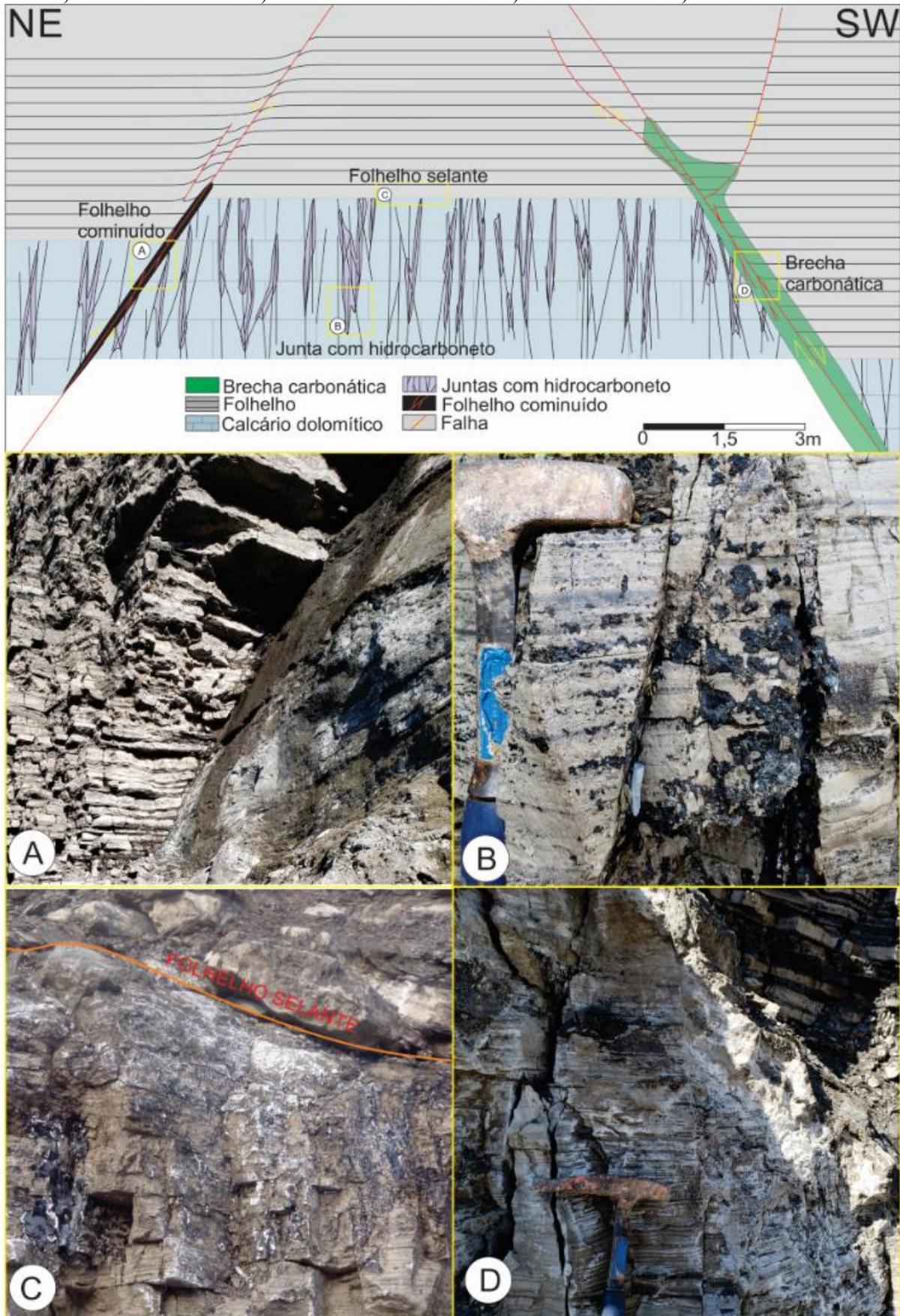
Muitas fraturas de outras direções não apresentam nenhum resquício de hidrocarboneto, porém as direções NE, N-S e E-W e planos horizontais que apresentam betume são de extrema importância, pois indicam uma intersecção com as fraturas de direção NW, aumentando a concentração e migração de hidrocarboneto nestes pontos.

As bandas de deformação apresentam deslocamentos e assinaturas cinemáticas semelhantes ao quadro macroscópico reconhecido, porém não foram reconhecidas acumulações de hidrocarboneto ao longo de seus traços, apenas em fraturas de extensão a elas associadas (lentes abertas, Figura 5.29). São interpretadas como decorrentes de pequenas recristalizações dos minerais, redução o tamanho dos grãos, sem criar espaços vazios. Estes (espaços vazios), aparecem sendo criados em fraturas abertas, onde ocorre a mudança brusca da litologia (calcário cinza claro versus calcário cinza escuro na Figura 5.29), formando fraturas abertas associadas

à refração, criando irregularidades em função do diferente comportamento reológico do material.

A figura 5.44 apresenta de modo esquemático o modelo estrutural reconhecido, indicando a importância das falhas e rochas de falhas associadas como selantes, e as fraturas extensionais como canais de migração e exsudação do hidrocarboneto nesta ocorrência.

Figura 5.44 Modelo de trapa estrutural reconhecido para ocorrência de hidrocarbonetos na área de estudo, Saltinho – SP. A) Folhelho cominuído. B) Juntas com hidrocarboneto. C) Folhelho selante. D) Brecha carbonática



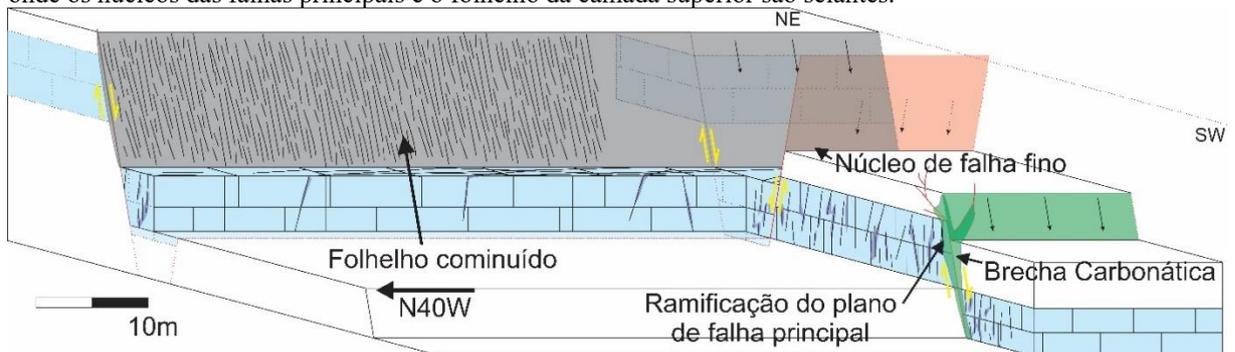
5.10. Análise integrada dos dados

Integrando os dados, temos uma zona de falha multinucleada, próximo à borda NE do gráben a sudeste da estrutura de Jibóia, limitado por falhas de direção NW, concordantes com a sua elongação, em um sistema de blocos escalonados e abatimento preferencial para SW.

O arranjo geométrico reconhecido, de falhas normais conjugadas e juntas associadas, se ajusta a um modelo de deformação distensivo NE-SW, o qual é entendido como responsável pela formação da estrutura de Jibóia (ou Gráben Serrote), aqui reconhecida apenas sua borda limítrofe.

O sistema apresenta zona de dano importante, com rochas de zonas de falhas reconhecidas de diversos tipos, com fraturamento intenso associado, interconectado ou não. As juntas nas rochas carbonáticas funcionam com o principal canal de fluxo e exsudação dos hidrocarbonetos. O quadro reconhecido pode representar importante análogo para estudos de formação, fluxo e mesmo de acumulação de hidrocarbonetos em rochas carbonáticas onde foi possível identificar padrões geométricos e estágios de evolução da zona de falha, os materiais que compõe os núcleos de falha e como a zona de dano serve de reservatório para hidrocarboneto (Figura 5.45).

Figura 5.45 Bloco diagrama representativo da área de estudo. Uma zona de falha multinucleada, com uma zona de dano extensa marcada por juntas extensionais com preenchimento de betume, formando uma trapa estrutural onde os núcleos das falhas principais e o folhelho da camada superior são selantes.



6. CONCLUSÕES

O trabalho permite algumas conclusões em diferentes tópicos, sob a perspectiva macro a área estudada representa localmente o comportamento das estruturas alinhadas com o Lineamento Tietê para o momento em que houve a distensão SW-NE identificada, com estruturas com direção preferencial NW, seguindo a estruturação regional e com unidades e estruturas condizentes com os mapeamentos da área, porém com uma complexidade maior que a representada nos mapas regionais, com o escalonamento das falhas principais sintéticas e falhas antitéticas secundárias com um rejeito menor. O mapa de lineamentos em ambas escalas corrobora para a visualização e constância desta estruturação NW nas diferentes escalas. As falhas do tipo normal, indicam o evento deformacional principal e inicial distensivo SW-NE descrito acima, porém as medidas de estrias de reativação e falhas transcorrentes dextrais podem indicar uma reativação dextral de mesma direção NW, além das falhas isoladas do tipo inversa e sinistral, que devido a pequena quantidade não permitem nenhuma afirmação precisa sobre outros eventos.

As estruturas identificadas se enquadram nos modelos recentes revisados na fundamentação teórica, com margem para maior aprofundamento e classificações mais completas, apresentando uma nova geometria não descrita nos trabalhos, com a inversão do mergulho do plano de falha, que está associada com a variação da litologia durante a propagação do plano de falha. Alguns dados quantitativos são importantes para reforçar a ideia apresentada em Ben-Zion & Sammis (2003) de que a complexidade de zonas de falha é definida nos estágios iniciais da evolução destas zonas. O fato de a dimensão do rejeito aumentar muito mais em comparação a espessura do núcleo de falha durante o desenvolvimento e a repetição das geometrias vistas na macroescala e rochas de falha nas falhas e nas amostras com rejeito centimétrico e milimétrico (considerando estas como falhas em estágio inicial de evolução).

A propagação do fraturamento em diferentes litologias também escancara os diferentes comportamentos mecânicos das litologias envolvidas, funcionando em seus contatos (acamamento) como interfaces mecânicas e servindo como controle de propagação das fraturas, onde quanto maior a extensão da fratura, maior a unidade mecânica. Além da refração dos planos de fratura, há ramificação e terminação dos planos, com forte influência para a passagem e retenção de fluidos, que são identificados principalmente nestas fraturas. A nova geometria descrita neste trabalho, 7 – Falha de inversão de mergulho, está diretamente associada com a propagação da falha em materiais com competências distintas, onde a falha apresenta um rejeito

normal em uma porção e inverso em outra, uma vez que as falhas apresentam estrias de mergulho.

O modelo de trapa estrutural para carbonatos fraturados com falhas atuando como selantes apresentado é esclarecedor e de extrema relevância para a área de petróleo e do armazenamento regional de betume nos carbonatos. As rampas de falha apresentam uma composição de seu núcleo impermeável, que aliado à camada de folhelho acima do calcário, retém o hidrocarboneto presente na zona de dano que por sua vez é altamente permeável (Figura 5.49). Tal observação também é válida na microescala, onde blocos de calcário na zona brechada são selados por calcário fino cominuído e estilólitos, retendo o hidrocarboneto apenas nos estratos e fraturas internas, porém nesta escala é visível que planos de falha com pequenas extensões e com núcleos de falha pouco espessos também são condutos para passagem e armazenamento de hidrocarboneto. Os espaços abertos onde se encontra o hidrocarboneto são no geral fraturas extensionais (juntas abertas) com uma quantidade massiva do volume da abertura com preenchimento de carbonato, porém ao analisar amostras em uma escala microscópica é visível a presença de dissolução como atuante para a ampliação destes espaços e calcita secundária limitando a passagem e tornando algumas fraturas parcialmente abertas, influenciando o caminho e as limitações da passagem do hidrocarboneto. O fato de o acúmulo de hidrocarbonetos estar preferencialmente nestas fraturas extensionais permite uma associação de migração e acúmulo de fluidos em estruturas paralelas a direção de esforço intermediária σ_2 , o que sugere a importância da identificação da direção e posição deste eixo, e associação dos esforços com a direção preferencial de acúmulo de fluidos.

Por fim, é possível concluir que o estudo desta zona de falha multinucleada afetando calcários dolomíticos com presença de betume proporciona um grande avanço no conhecimento das estruturas da região, com um olhar detalhado na complexidade e sua propagação em diferentes escalas, além de reconhecer um modelo simplificado de trapa estrutural para carbonatos fraturados, estabelecendo a relação entre o fraturamento, dissolução e precipitação do carbonato, estilólitos, falhas selantes e a migração do hidrocarboneto neste meio.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F. F. M.; BARBOSA, O. Geologia das quadrículas de Piracicaba e Rio Claro, Estado de São Paulo. *Boletim DNPM/DGM*, v. 143, p. 96, 1953.
- AMARAL, S. *Geologia e Petrografia da Formação Irati (Permiano) no Estado de São Paulo*. Tese de Livre Docência. Bol. Inst. Geocienc. Astron. USP), 1967.
- ANDERSON, E.M. *The dynamics of faulting*. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1942. 183 p.
- ANGELIER, J. Fault Slip Analysis and Paleostress Reconstruction. in: HANCOCK, P. L. (ed.), *Continental Deformation*, Pergamon Press, Oxford, pp. 53- 100, 1994.
- ANGELIER, J. & MECHLER, P. Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en séismologie: la méthode des dièdres droits. *Bull. Soc. Geol. France*, (7), XIX, 6: 1309-1318, 1977.
- ARAÚJO, C.C. de, YAMAMOTO, J.K., ROSTIROLLA, S.P. Arenitos Asfálticos na Bacia do Paraná: Estudo das Ocorrências no Alto Estrutural de Anhembi. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 14(1):47-70, 2008.
- ARAÚJO, L. M.; TRIGUIS, J. A.; CERQUEIRA, J. R.; FREITAS, L. C. da S. The atypical Permian Petroleum System of the Paraná Basin, Brazil. In M.R. Mello & B.J. Katz (eds.) *Petroleum systems of South Atlantic margins. AAPG Memoir 73:377-402*, 2000.
- AQUAROLI, L. H. S. *Papel da tectônica rúptil na possível migração de hidrocarbonetos: estudo da porção noroeste da estrutura de Pitanga, região central do estado de São Paulo*. Trabalho de Conclusão de Curso. UNESP. 57 pag. 2013.
- ASSINE, M. L., SOARES, P. C. Interação flúvio-eólica na Formação Pirambóia. 4 *Simpósio de Geologia do Sudeste*, Boletim Resumos, 65. Águas de São Pedro: SBG, 1995.
- ASSINE, M. L., PIRANHA, J. L., CARNEIRO, C. D. R. Os paleodesertos Pirambóia e Botucatu. In: V. M. Neto, A. Bartorelli, C. D. Carneiro, B. B. Brito-Neves (Coords.). *Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida* (p. 77-92). São Paulo: Beca, 2004.

- BASTESEN, E.; BRAATHEN, A. Extensional faults in fine grained carbonates- analysis of fault core lithology and thickness – displacement relationships. *Journal of Structural Geology* 32, 1609-1628, 2010.
- BARBOSA, O. & ALMEIDA, F. F. M. – A série Tubarão na bacia do rio Tietê, Estado de São Paulo. Rio de Janeiro. *Bol. Div. Geol. Min.* – D.N.P.M., Notas preliminares, 1949.
- BATISTA, M.J. *Caracterização Estrutural do Alto de Jibóia, Região Central do Estado de São Paulo*, Relatório Técnico – Científico Final, UNESP, ANP PRH-05, 2002.
- BECKER, A.; GROSS, M. R. Mechanisms for joint saturation in mechanically layered rocks: an example from southern Israel. *Tectonophysics* 257, 223– 237, 1996.
- BENEDICTO, A.; PLAGNES, V.; VERGÉLY, P.; FLOTTÉ, N.; SCHULTZ, R. A. Fault and fluid interaction in a rifted margin: integrated study of calcite-sealed fault-related structures (Southern Corinth margin). In: WIBBERLEY, C. A. J.; KURZ, W.; IMBER, J.; HOLDSWORTH, R. E.; COLLETTINI, C. (Eds.) *The Internal Structure of Fault Zones: Implications for Mechanical and Fluid-Flow Properties*. Geological Society, London, *Special Publications*, vol. 299, pp. 257e275, 2008.
- BEN-ZION, Y.; SAMMIS, C. Characterization of Fault Zones. *Pure and Applied Geophysics*. 160. 677-715, 2003.
- BILLI, A. Grain size distribution and thickness of breccia and gouge zones from thin (<1 m) strike-slip fault cores in limestone. *Journal of Structural Geology* 27, 1823-1837, 2005.
- BRODIE, K.; FETTES, D.; HARTE, B.; SCHMID, R. Structural terms including fault rock terms. *British Geological Society Professional Paper* 3: 14p., 2007.
- CAVALLARO, F. A. *Investigação Geofísica do Alto Estrutural de Anhembi - SP*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- CERRI, R. I.; LUVIZOTTO, G. L.; TOGNOLI, F. M. W.; WARREN, L.V.; OKUBO, J.; MORALES, N. Mechanical stratigraphy and structural control of oil accumulations in fractured carbonates of the Irati Formation, Paraná Basin, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 2020.

- CHAHUD, A. *Geologia e paleontologia das formações Tatuí e Irati no centro-leste do Estado de São Paulo*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- CHILDS, C.; MANZOCCHI, T.; WALSH, J. J.; BONSON, C. G.; NICOL, A.; SCHÖPFER, M. P. J. A geometric model of fault zone and fault rock thickness variations. *Journal of Structural Geology* 31 (2), 117-127, 2009.
- COIMBRA, A. M.; BRANDT NETO, M.; PETRI, S. O alinhamento estrutural do Tietê. In: *Simpósio de Geologia Regional*, 1, São Paulo. *Atas*. São Paulo, SBG. P. 145-152. 1977.
- COOKE, M. L.; SIMO J.A.; UNDERWOOD C. A.; RIJKEN, P., Mechanical stratigraphic controls on fracture patterns within carbonates and implications for groundwater flow. *Sedimentary Geology*, Volume 184, Issues 3–4, Pages 225-239, 2006.
- COUTINHO, J. M. V. Dyke swarms of the Parana Triple Junction, Southern Brazil. *Geol. USP Sér. Cient.*, São Paulo, v. 8, n. 2, p. 29-52, 2008.
- COWIE, P. A.; SCHOLZ, C. H. Growth of faults by accumulation of seismic slip. *J. Geophys. Res.* 97, 11085-11095, 1992.
- CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. *Geologia e Recursos Minerais do Estado de São Paulo: Sistemas de Informações Geográficas (SIG)*. Brasília: MME, Programa Geologia do Brasil: Integração, Atualização e Difusão de Dados da Geologia do Brasil, Mapas Geológicos Estaduais. Escala 1:750000, CD-ROM, 2006.
- DAEMON R. F. & QUADROS, L. P. de. *Bioestratigrafia e Palinologia do Paleozóico Superior da Bacia do Paraná. Ponta Grossa*. PETROBRÁS/DESUL. 1 v.; Relatório Interno nº 384, 1969
- DELVAUX, D.; SPERNER, B. Stress tensor inversion from fault kinematic indicators and focal mechanism data: the TENSOR program. In: NIEUWLAND, D. (Ed.) *New Insights into Structural Interpretation and Modelling*. Geological Society, London, *Special Publications*, 212: 75-100, 2003.
- ESRI - ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. *ArcGIS Desktop 10.3*, 2015.

- FAULKNER, D. R.; JACKSON, C. A. L.; LUNN, R. J.; SCHLISCHE, R. W.; SHIPTON, Z. K.; WIBBERLEY, C. A. J; WITHJACK, M. O. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. *Journal of Structural Geology*, Volume 32, Issue 11,2010, 1557-1575,
- FERREIRA, F. J. F.; MORAES, R. A. V.; FERRARI, M. P.; VIANNA, R. B. Contribuição ao estudo do alinhamento estrutural de Guapiara. In: *Simposio regional de geologia*. Curitiba: SBG, 1981. p. 226-240, 1981.
- FRIES, M. *Estudo dos altos estruturais de Pitanga, Artemis, Pau D'Alho e Jibóia (flanco nordeste da bacia sedimentar do Paraná), através dos métodos geofísicos da gravimetria e magnetometria terrestres*. 2008. 238 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2008.
- GAMA JR, E.G. A sedimentação do Grupo Passa Dois (exclusive Formação Irati): um modelo geomórfico. *Revista Brasileira de Geociências*, 9 (2): 1-16, 1979
- GIMENEZ, V. B. *Caracterização do padrão estrutural da Formação Irati (Permiano) aplicada à migração de hidrocarbonetos na Bacia do Paraná, região de Rio Claro e Ipeúna (SP)*. IGCE. UNESP (Trabalho de Conclusão de Curso – Geologia). 105 pag. 2015.
- GROSS, M. R.; FISCHER, M. P.; ENGELDER, T.; GREENFIELD, R. J. Factors controlling joint spacing in interbedded sedimentar rocks: interpreting numerical models with field observations from the Monterey Formation, USA. In: AMEEN, M.S. (Ed.), *Fractography: Fracture Topography as a Tool in Fracture Mechanics and Stress Analysis*. *Geological Society of America Special Publication* vol. 93, pp. 215– 233, 1995. GUDMUNDSSON, A.; SIMMENES, T. H.; LARSEN, B.; PHILIPP, S. Effects of internal structure and local stresses on fracture propagation, deflection, and arrest in fault zones. *Journal of Structural Geology*. 32, 2010.
- HANKS, C. L.; LORENZ, J.; LAWRENCE, T.; KRUMHARDT, A. P. Lithologic and structural controls on natural fracture distribution and behavior within the Lisburne Group, northeastern Brooks Range and North Slope subsurface, Alaska. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 81, 1700– 1720, 1997.
- HASUI, Y; PENALVA, F.; HENNIES, W.T. Geologia do Grupo São Roque. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 23., Salvador, P. 101-34, 1969.

- HIGGINS, M.W. Cataclastic Rocks. *USGS Prof. Paper. 687*, 97pp., 1971.
- HILLS, E. S. *Outlines of Structural Geology*. Methuen, London, 1940.
- HUANG, Q.; ANGELIER, J. Fracture spacing and its relation to bed thickness. *Geological Magazine* 126, 355–362, 1989
- HULL, J. Thickness displacement relationships for deformation zones. *Journal of Structural Geology* 10, 431-435, 1988.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT), *Mapa Geológico do Estado de São Paulo*. Divisão de Minas e Geologia Aplicada, 1981.
- KIM, Y. S.; PEACOCK, D. C. P.; SANDERSON, D. J. Fault damage zones. *Journal of Structural Geology*, Volume 26, 503-517, 2004.
- KOEHN, D.; EBNER, M.; RENARD, F.; TOUSSAINT, R.; PASSCHIER, C. W. Modelling of stylolite geometries and stress scaling. *Earth Planet Sci. Lett.* 341, 104–113, 2012.
- KOEHN, D.; RENARD, F.; TOUSSAINT, R.; PASSCHIER, C. W. Growth of stylolite teeth patterns depending on normal stress and finite compaction. *Earth Planet Sci. Lett.* 257 (3–4), 582–595, 2007
- LINDSAY, N. G.; MURPHY, F. C.; WALSH, J. J.; WATTERSON, J. *Outcrop studies of shale smears on fault surfaces*. In: FLINT, S.S., BRYANT, I.D. (Eds.), *The Geological Modelling of Hydrocarbon Reservoirs and Outcrop Analogues. Special Publications, International Association of Sedimentologists*, vol. 15, pp. 113e123, 1993.
- LISBOA, Á. C. *Caracterização Geoquímica Orgânica dos Folhelhos Neo-Permianos da Formação Irati – Borda Leste da Bacia do Paraná, São Paulo*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- MATEUS, A.; RICCOMINI, C.; FERREIRA, E. J.; TASSINARI, C. C. Permian-Triassic maturation and multistage migration of hydrocarbons in the Assistência Formation (Irati Subgroup), Paraná Basin, Brazil: implications for the exploration model. *Brazilian Journal of Geology*, 44(3), 355-360, 2014.

- MATTOS, N. *Caracterização geológica e potencial para reservatórios no Grupo Itararé, na região Centro-Leste do Estado de São Paulo*, p. 64, TCC (Graduação em Geologia) - Unicamp, Campinas, 2012.
- MCGRATH, A. G.; DAVISON, I. Damage zone geometry around fault tips. *Journal of Structural Geology*, 17, 1011-1024, 1995.
- MELO, M. S.; COIMBRA, A. M.; CUCHIERATO, G. Fácies sedimentares da Formação Rio Claro, Neoceno-zóico da Depressão Periférica Paulista. *Revista do Instituto Geológico*, v. 18, n. 1-2, p. 49-63, 1997.
- MICARELLI, L.; BENEDICTO, A.; WIBBERLEY, C. A. J. Structural evolution and permeability of normal fault zones in highly porous carbonate rocks. *Journal of Structural Geology* 28 (7), 1214-1227, 2006.
- MICARELLI, L.; MORETTI, I.; DANIEL, J. M. Structural properties of rift-related normal faults: the case study of the Gulf of Corinth, Greece. *Journal of Geodynamics*. 36 (1e2), 275-303, 2003.
- MILANI, E. J. *Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozoica do Gondwana Sul – ocidental*. 255 f. Tese (Doutorado em Geociências). Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1997.
- MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUSA, P. A.; FERNANDES, L. A.; FRANÇA, A. B. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, v. 15, n. 2, p. 265–287, 2007.
- MONTANHEIRO, M. A. F. *Alto estrutural na região de Laranjal Paulista/SP: caracterização gravimétrica e geológica*. 2015. 168 f. Tese - (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2015.
- MORAES REGO, L. F. A geologia do petróleo no Estado de São Paulo. *Bol. Serv. Geol. Min.*, DNPM, 46. p 1-110, 1930
- MORALES, N.; AQUAROLI, L. H. S.; SOUZA, I. A.; GIMENEZ, V. B. Ocorrência de arenitos asfálticos na Formação Tatuí, no Alto Estrutural de Pitanga, borda leste da Bacia

- do Paraná. In: *47º Congresso Brasileiro de Geologia, 2014, Salvador - BA. Anais*. Salvador - BA: Sociedade Brasileira de Geologia - Núcleo Bahia – Sergipe, 2014.
- NELSON, R. A. *Geological Analysis of Naturally Fractured Reservoirs*, 2nd edn. Gulf Publishing Co., Houston, TX, 2001.
- NEVES, M. A.; PEREIRA, S.Y.; MORALES, N. Comportamento do Aquífero fissural na microbacia do Córrego da Cachoeira, município de Vinhedo (SP). In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS*, 12., Florianópolis, 2002.
- PEACOCK, D.C.P.; DIMMEN, V.; ROTEVATN, A.; SANDERSON, D.J. A broader classification of damage zones. *Journal of Structural Geology*, 102, 179-192, 2017.
- PEACOCK, D.; KNIPE, R.; SANDERSON, D. Glossary of normal faults. *Journal of Structural Geology*, Volume 22. 291-305, 2000.
- PEACOCK, D.; NIXON, C.; ROTEVATN, A.; SANDERSON, D.; ZULUAGA, L. Glossary of fault and other fracture networks. *Journal of Structural Geology*. 92, 12-29, 2016.
- PERINOTTO, J. A. J.; ZAINE, M. F. *Patrimônios Naturais e História Geológica da Região de Rio Claro-SP*. Rio Claro: Arquivo Público e Histórico do Município de Rio Claro, 2008. v. 1.
- PETIT, J. P.; WIBBERLEY, C. A. J.; RUIZ, G. 'Crack-seal', slip: a new fault valve mechanism? *Journal of Structural Geology* 21 (8e9), 1199e1207, 1999.
- RICCOMINI, C. *Tectonismo gerador e deformador dos depósitos sedimentares Pós-Gondvânicos da porção centro-oriental do estado de São Paulo e áreas vizinhas*. 1995. 100 f. Tese (Livre Docência) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- RICCOMINI, C. Arcabouço estrutural e aspectos do tectonismo gerador e deformador da Bacia Bauru no Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*; n. 27, v. 2, p. 153-162, 1997.
- SAAD, A.R. *Estratigrafia do subgrupo Itararé no Centro Sul do Estado de São Paulo*, Dissertação de mestrado, Instituto Geociências, USP, 107p, 1977.

- SANTOS, R. V.; SOUZA, P. A.; ALVARENGA, C. J. S.; DANTAS, E. L.; PIMENTEL, M. M.; OLIVEIRA, C. G.; ARAÚJO, L. M. Shrimp U-Pb Zircon dating and palinology of bentonitic layers from the Permian Irati Formation, Paraná Basin, Brazil. *Gondwana Research, Osaka*, v. 9, p. 456-463, 2006
- SCHNEIDER, R. L.; MULMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A.; DAEMON, R. F.; NOGUEIRA, A. A. Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná. In: *Congresso Brasileiro de Geologia, Porto Alegre. Anais...* Porto Alegre: SBG, 1974.
- SCHOLZ, C. H. Wear and gouge formation in brittle faulting. *Geology* 15, 493e495, 1987
- SILVA, P. R. C.; SOUZA, I. A.; RIFFEL, S. H.; MORALES, N.; HASUI, Y. Geometria e Cinemática em zona de fraturas: exemplo do Parque do Varvito, Itu – Sp. In: *Geosudeste, Campinas – SP 2019*.
- SIBSON, R. H. Fault rocks and fault mechanisms. *Journal of the Geological Society (London)* 133, 191-213, 1977.
- SIMÕES, M. G. & FITTIPALDI, F. C. *Fósseis da região de Rio Claro*. Arquivo do Município de Rio Claro, 77p, 1992.
- SNOKE, A. W.; TULLIS, J.; TODD, V. R. *Fault-related Rocks: A Photographic Atlas*. Princeton Univ. Press. 1998.
- SOARES, P. C. O limite glacial/pós-glacial do Grupo Tubarão no Estado de São Paulo. *Anais Academia Brasileira de Ciências*, v. 44, p. 333–342, 1972.
- SOARES, P. C. Elementos estruturais da parte nordeste da Bacia do Paraná: classificação de gênese. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 28. Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: SBG, v. 1, p. 107-121, 1974.
- SOARES, P. C.; LANDIM, P. M. B. Comparison between the tectonic evolution of the intracratonic and marginal basins in South Brazil. *An. Acad. Bras. Ciênc.*, v. 48, p. 313-324, Rio de Janeiro, 1975.
- SOUZA, M. O. L. *Caracterização Estrutural dos altos estruturais de Pitanga, Artemis, Pau D’Alho e Jibóia, centro do Estado de São Paulo*. 2002. 206 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas de Rio Claro, UNESP, Rio Claro, 2002.

- SOUSA, M. O. L.; MORALES, N. Evolução tectônica do Alto Estrutural de Pitanga - SP. *In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS; SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE TECTÔNICA*, 7, Lençóis - BA: SBG, p. 40-42, 1999
- THOMAZ-FILHO, A. Ocorrência de Arenito Betuminoso em Anhembi (SP) – Cubagem e Condicionamento Geológico. Congresso Brasileiro de Geologia. 32. Salvador. *Anais*. p.2344- 2348. 1982.
- THOMAZ-FILHO, A., MIZUZAKI, A. M. P.; ANTONIOLI, L. Magmatismo nas bacias sedimentares brasileiras e sua influência na geologia do petróleo. *Revista Brasileira de Geociências*. 38(2). p128-137. 2008.
- TOUSSAINT, R.; AHARONOV, E.; KOEHN, D.; GRATIER, J.-P.; EBNER, M.; BAUD, P.; ROLLAND, A.; RENARD, F. Stylolites: A review. *Journal of Structural Geology*. Volume 114. 10.1016, 2018.
- UNDERWOOD, C. A.; COOKE, M. L.; SIMO, J. A.; MULDOON, M. A. Stratigraphic controls on vertical fracture patterns in Silurian Dolomite, northeastern Wisconsin. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 87, 121– 142, 2003.
- WENBERG, O. P.; CASINI G.; JONOU S.; PEACOCK D. C. P. The characteristics of open fractures in carbonate reservoirs and their impact on fluid flow: a discussion. *Petroleum Geoscience*, 2016.
- WHITE, I.C. *Relatório final da Comissão de Estudos das Minas de Carvão de Pedra do Brasil*, Rio de Janeiro, 1908.
- WIBBERLEY, C.; SHIPTON, Z. Fault zones: A complex issue. *Journal of Structural Geology*. Volume 32, 2010.
- WU, S.; GROSHONG, R. H. Low-temperature deformation of sandstone, southern Appalachian fold-thrust belt. *Bull. Geol. Soc. Am.* 103, 861-875, 1991.
- YIELDING, G.; FREEMAN, B.; NEEDHAM, D. T. Quantitative fault seal prediction. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 81, 897e917, 1997
- ZAINE, J. E. *Geologia da Formação Rio Claro na Folha Rio Claro (SP)*. Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências e Ciências Exatas/UNESP, Rio Claro, SP. 98p.1994.

- ZAINE, J. E. *Mapeamento geológico-geotécnico por meio do método do detalhamento progressivo: ensaio de aplicação na área urbana do Município de Rio Claro (SP)*. 189p. Tese de Doutorado - Instituto de Geociências e Ciências Exatas/UNESP, 2000.
- ZAHM, C. K.; ZAHM, C. L.; BELLIAN, J. A. Integrated fracture prediction using sequence stratigraphy within a carbonate fault damage zone, Texas, USA, *Journal of Structural Geology*, 2009.
- ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, L. S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; APPI, V. T.; NETO, E. V. S.; CERQUEIRA, J. R.; MARQUESA, A. The Paraná Basin, Brazil. In: LEIGHTON, M. W.; KOLATA, D. R.; EIDEL, J. J. *Interior cratonic basins*. Tulsa: AAPG, p. 681-708. *Memoir 51*, 1990a.
- ZALAN, P. V., WOLFF, S., CONCEIÇÃO, J. C. J., MARQUES, A., ASTOLFI, M. A. M., VIEIRA, I. S., APPI, V. T., ZANOTTO, O. A. 1990. Bacia do Paraná. In: GABAGLIA G. P. R.; MILANI E. J. *ORIGEM E EVOLUÇÃO DE BACIAS SEDIMENTARES*, págs. 135 - 169, Petrobras, Rio de Janeiro, 1990b.

8. ANEXO I – TABELA DE TERMOS ASSOCIADOS A FRATURAS

| Alteration zone | | Geológico | | | Geométrico | | Topológico | | Cinemático | | Mecânico | |
|------------------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|--|-----------------|--------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--|--|
| | Zonas de alteração | Natural fracture | Fratura natural | Aperture | Abertura | Branch | Ramo | Dip-slip | Rejeito de mergulho | Anticrack | Anticrack | |
| Anticrack | <i>Anticrack</i> | Neptunian dyke | Dique neptuniano | Bed-bound fault or fracture | Falha/Fratura concordante com o acamamento | I node | Nó do tipo I | Extension (al) fault | Falha extensional | Bed-bound fault or fracture | Falha/Fratura concordante com o acamamento | |
| Breccia | Brechia | Non-conductive | Fratura não condutiva | Branch | Ramo | Isolated branch | Ramo isolado | Extension (al) fracture | Fratura extensional | Brittle fault or fracture | Falha/Fratura rípidil | |
| Cataclasis | Clataclase | Normal fault | Falha normal | Isolated fault or fracture | Falha/Fratura isolada | Node | Nó | Fault | Falha | Cataclasis | Clataclase | |
| Clastic dyke | Dique clástico | Oblique-slip fault | Falha oblíqua | Layer-bound fault or fracture | Falha/Fratura concordante com a camada | Vertex | Ponto médio | Hybrid fracture | Fratura híbrida | Discontinuity | Descontinuidade | |
| Closed fracture | Fratura fechada | Open fracture | Fratura aberta | Length | Comprimento | Y node | Nó do tipo Y | Isolated fault or fracture | Falha/Fratura isolada | Fault | Falha | |
| Conductive fault or fracture | Falha/Fratura condutiva | Partly-open fracture | Fratura parcialmente aberta | Lens | Lente | X node | Nó do tipo X | Normal fault | Falha normal | Fracture | Fratura | |
| Crack | Greta | Reverse fault | Falha reversa | Roughness, fault or fracture | Rugosidade da falha/fratura | | | Oblique-slip fault | Falha oblíqua | Hybrid fracture | Fratura híbrida | |
| Deformation band | Banda de deformação | Seal | Selante | Segment | Segmento | | | Reactivation | Reativação | Hydrofracture | Fratura hídrica | |
| Desiccation crack | Greta de ressecamento | Sedimentary dyke | Dique sedimentar | Shear joint | Junta de cisalhamento | | | Reverse fault | Falha de reversa | Induced fracture | Fratura induzida | |
| Diatreme | Diatrema | Sill | Soleira | Slip vector | Vetor de deslocamento | | | Shear joint | Junta de cisalhamento | Layer-bound fault or fracture | Falha/Fratura concordante com a camada | |
| Discontinuity | Descontinuidade | Slackenside | Estria | Surface, fault or fracture | Superfície de falha/fratura | | | Strike-slip fault | Falha direccional | Microcrack | Microfissura | |
| Dyke (or dike) | Dique | Slickolie | Estiólito | Tip line | Linha de extremidade | | | Tensile fracture | Fratura de tensão | Mode I | Modo I | |
| Fault | Falha | Slip plane | Plano de deslocamento | Tip point | Ponto de extremidade | | | Tension (al) fracture | Fratura tensional | Mode II | Modo II | |
| Fissure | Fissura | Slip surface | Superfície de deslocamento | Trace | Traço | | | Thrust fault | Falha de cavalgamento/inversa | Mode III | Modo III | |
| Fracture | Fratura | Strand | Falha representativa | Trace length | Comprimento do traço | | | Transform fault | Falha transformante | Opening-mode | Modo de abertura | |
| Granulation seam | <i>Granulation seam</i> | Strike-slip fault | Falha direccional | | | | | | | Propagation | Propagação | |
| Hydrothermal | Hidrotermal | Stybolite | Estiólito | | | | | | | Shear fracture | Fratura de cisalhamento | |
| Injectite | Injecito | Tension gash | Eixo de tensão | | | | | | | Tensile fracture | Fratura de tensão | |
| Joint | Junta | Thrust fault | Falha de cavalgamento/inversa | | | | | | | Tension (al) fracture | Fratura tensional | |
| Lineament | Lineamento | Transform fault | Falha transformante | | | | | | | | | |
| Microcrack | Microfissura | Vein | Veio | | | | | | | | | |
| Mud crack | Greta de contração | | | | | | | | | | | |

Fraturas individuais e estruturas associadas

| Geológico | | Geométrico | | | Topológico | | Cinemático | | | Mecânico | | | |
|-----------------|-----------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------------|---------------------------------|------------------------------|----------------------|--------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| Horse | Cavalo | Abutting fault or fracture | Falha/Fratura adjacente | Geometric coupling | Acoplamento geométrico | Branch | Ramo | Antithetic fault | Falha antitética | Pull-apart | Pull-apart | Fault linkage | Conexão de falha |
| Triple junction | Junção tríplice | Antithetic fault | Falha antitética | Geometric linkage | Conexão geométrica | Connecting node | Nó de conexão | Bridge fault or fracture | Bloco de conexão | Relay ramp | Rampa de alívio | Interaction, fault or fracture | Interação de falha/fratura |
| | | Approaching fault or fracture | Falha/Fratura de aproximação | Horse | Cavalo | Dangling end | Final pendente/abrupto | Broken bridge | Bloco de conexão | Relay zone/structure | Zona/Estrutura de alívio | Interaction, mechanical | Interação mecânica |
| | | Branch | Ramo | Hard-linkage | Conexão abrupta | Doubly-connected branch | Ramificação dupla | Coherence, kinematic | Coerência | Soft -linkage | Conexão suave | Linkage, fault or fracture | Conexão de falha/fratura |
| | | Bi-modal | Bi-modal | Intersection line | Linha de intersecção | Singly-connected | Ramificação simples | Conjugate | Conjugado | Strike -linkage | Conexão cruzada | | |
| | | Branch line | Linha de ramificação | Intersection point | Ponto de intersecção | | | Connecting fault or fracture | Falha/Fratura de conexão | Synthetic fault | Falha sintética | | |
| | | Branch point | Ponto de ramificação | Oblique | Obliquo | | | Coupling | Acoplamento | Trailing | Arrasto | | |
| | | Bridge, fault or fracture | Bloco de conexão | Orthogonal | Ortogonal | | | Coupling, kinematic | Acoplamento | Transfer fault | Falha de transferência | | |
| | | Broken bridge | Bloco de conexão rompido | Overstep, fault or fracture | Falhas/Fraturas sobrepostas | | | Dip-linkage | Conexão de mergulho | Wing crack | Terminação em asa | | |
| | | Coherence, geometric | Coerência | Pull-apart | Pull-apart | | | Fault-linkage | Conexão de falha | | | | |
| | | Conjugate | Conjugado | Relay ramp | Rampa de alívio | | | Hard-linkage | Conexão abrupta | | | | |
| | | Connecting fault or fracture | Falha/Fratura conectada | Relay zone/structure | Zona/Estrutura de alívio | | | Interaction, fault or fracture | Falha/Fratura de interação | | | | |
| | | Coupling, geometric | Acoplamento | Splay fault | Leque | | | Intersection, fault or fracture | Falha/Fratura de intersecção | | | | |
| | | Crossing fault or fracture | Falha/Fratura cruzada | Step, fault or fracture | Degradu de falha/fratura | | | Kinematic coupling | Acoplamento cinemático | | | | |
| | | Dip-Linkage | Conexão de mergulho | Synthetic fault | Falha sintética | | | Kinematic linkage | Conexão cinemática | | | | |
| | | Geometric coherence | Coerência geométrica | Trailing | Arrasto | | | Linkage fault or fracture | Falha/Fratura de conexão | | | | |

Interação entre duas (ou mais) fraturas

| Geológico | | Geométrico | | | Topológico | | Cinemático | | Mecânico | | |
|--------------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Architecture | Arquitetura | Anastomosing | Anastomosado | Imbricate | Imbricado | Arrangement, network | Sistema de disposição | Approaching damage zone | Zona de dano de aproximação | Approaching damage zone | Zona de dano de aproximação |
| Array, fault or fracture | Arranjo de falha/fratura | Block | Bloco | Intensity, fault or fracture | Intensidade de falha/fratura | Backbone | Espinha | Array, fault or fracture | Arranjo de falha/fratura | Damage zone | Zona de dano |
| Domain | Domínio | Bi-modal | Bi-modal | Intersection damage zone | Zona de dano de intersecção | Cluster | Agrupamento | Coherence, kinematic | Coerência | Interaction damage zone | Zona de dano de interação |
| Duplex | Dúplex | Coherence, geometric | Coerência | Network, fault or fracture | Sistema de falha/fratura | Connectivity | Conectividade | Damage zone | Zona de dano | Intersection damage zone | Zona de dano de intersecção |
| Imbricate | Imbricado | Compartment | Compartmento | Organisation, network | Organização | Critical connectivity | Conectividade crítica | Domain | Domínio | Linking damage zone | Zona de dano de conexão |
| Stockwork | Stock-work | Compartmentalisation | Compartmentalização | Percolation | Percolação | Dimensionless intensity | Intensidade adimensional | Domino faults | Domínio de falhas | Mechanical stratigraphy | Estratigrafia mecânica |
| | | Connectivity | Conectividade | Percolation threshold | Limite de percolação | Finite cluster | Agrupamento finito | Horsetail | Terminação rabo de cavalo | Process zone | Zona de processo |
| | | Corridor, fracture | Corredor de fratura | Pinnate | Pinado | Infinite cluster | Agrupamento infinito | Interaction damage zone | Zona de dano de interação | Saturation, joint | Saturação de junta |
| | | Density fault or fracture | Densidade de falha/fratura | Polygonal faults | Falhas poligonais | Isolated cluster | Agrupamento isolado | Intersection damage zone | Zona de dano de intersecção | Tip damage zone | Zona de dano em terminação |
| | | Domain | Domínio | Polymodal | Polimodal | Percolation | Percolação | Mechanical stratigraphy | Estratigrafia mecânica | Wall damage zone | Zona de dano em parede |
| | | Domino faults | Domínio de falhas | Population | População | Percolation threshold | Limite de percolação | Linking damage zone | Zona de dano de conexão | | |
| | | Duplex | Dúplex | Relay pattern | Padrão de alívio | Spanning cluster | Agrupamento abrangente | Pinnate | Terminação pinada | | |
| | | En echelon | Em échelon | Set, fault or fracture | Conjunto de falha/fratura | | | Polymodal | Polimodal | | |
| | | Flower structure | Estrutura em flor | Spacing, fault or fracture | Espaçamento de falha/fratura | | | Reactivation | Reativação | | |
| | | Frequency, fault or fracture | Frequência de falha/fratura | Swarm, fault or fracture | Enxame de falha/fratura | | | Tip damage zone | Zona de dano em terminação | | |
| | | Horsetail | Terminação rabo de cavalo | Zone, fault or fracture | Zona de falha/fratura | | | Wall damage zone | Zona de dano em parede | | |
| | | | | | | | | Wing crack | Terminação em asa | | |