

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

João Victor Pereira da Silva

Tipologia das Feições de Precipitação de Óxidos e Hidróxidos de Ferro em Rochas
Siliciclásticas da Formação Resende, Bacia de Volta Redonda - RJ

Trabalho Final de Curso
(Geologia)

UFRJ
Rio de Janeiro
2022

João Victor Pereira da Silva

Tipologia das Feições de Precipitação de Óxidos e Hidróxidos de Ferro em Rochas Siliciclásticas da Formação Resende, Bacia de Volta Redonda - RJ

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

Orientadores:

Prof. Dr. Claudio Limeira Mello
(Departamento de Geologia, IGEO/UFRJ)

MSc. Suelen do Nascimento Vogel
(IGEO/UFRJ)

UFRJ
Rio de Janeiro
2022

Pereira da Silva, JOÃO VICTOR

Tipologia das Feições de Precipitação de Óxidos e Hidróxidos de Ferro em Rochas Siliciclásticas da Formação Resende, Bacia de Volta Redonda - RJ. / João Victor Pereira da Silva - - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2022.

xv, 54 p.: 33 il.

Trabalho Final de Curso (Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2022.

Orientadores: Claudio Limeira Mello, Suelen do Nascimento Vogel.

1. Formação Resende. 2. Geomateriais Análogos. 3. Precipitação de Óxidos e Hidróxidos de Ferro. I. Limeira Mello, CLAUDIO, orientador. II. do Nascimento Vogel, SUELEN, orientadora. III. Tipologia das Feições de Precipitação de Óxidos e Hidróxidos de Ferro em Rochas Siliciclásticas da Formação Resende, Bacia de Volta Redonda - RJ.

João Victor Pereira da Silva

Tipologia das Feições de Precipitação de Óxidos e Hidróxidos de Ferro em Rochas Siliciclásticas da Formação Resende, Bacia de Volta Redonda - RJ

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

Orientadores:

Prof. Dr. Claudio Limeira Mello
(Departamento de Geologia, IGEO/UFRJ)
MSc. Suelen do Nascimento Vogel
(IGEO/UFRJ)

Aprovada em: / /

Por:

Orientador: Claudio Limeira Mello (IGEO/UFRJ)

Aline Theophilo Silva (PETROBRAS/CENPES)

Renato Rodriguez Cabral Ramos (MN/UFRJ)

UFRJ
Rio de Janeiro
2022

Esta dissertação é dedicada às matriarcas que fundamentaram a construção do que sou – Adriana, Maria de Lourdes e Ana Lúcia; e me situaram como um corpo no mundo, vivo e presente.

Agradecimentos

Meus mais sinceros agradecimentos à Universidade Federal do Rio de Janeiro, especialmente no que tange à infraestrutura do Instituto de Geociências e do Departamento de Geologia, cenários do meu período de graduação e desenvolvimento do presente estudo.

À Petrobras que, por meio do financiamento ao projeto “Caracterização da Deformação e de Propriedades Mecânicas e Permoporosas de Arenitos Pouco Consolidados”, possibilitou a oferta de bolsas de iniciação científica, das quais uma proveu suporte à minha atuação como aluno no período entre 2019 e meados de 2020. Adicionalmente, ao Laboratório de Tomografia do CENPES/PETROBRAS pela aquisição das imagens tomográficas.

Ao corpo docente do Departamento de Geologia, por tornarem minha mente e olhos sensíveis à Geologia que habita meus arredores.

Ao orientador, Claudio Limeira Mello, agradeço por todas as oportunidades de crescimento profissional e amadurecimento pessoal ao longo da graduação; pelo incentivo e reconhecimento desde minha atuação como monitor de campo até integrante do Cenozoico - Grupo de Pesquisas em Geologia Sedimentar e Tectônica; e, acima de tudo, por ter sido peça-chave no encerramento desse ciclo, com toda sua compreensão, paciência e dedicação para comigo e nosso trabalho.

À orientadora, Suelen do Nascimento Vogel, agradeço por todos os ensinamentos, companheirismo profissional, disponibilidade durante dias e noites, e palavras de afeto e força. Mesmo estando diante de mudanças drásticas em diversos panoramas de sua vida, sou muito grato que tenha seguido conosco no desenvolvimento desse trabalho.

Aos demais companheiros do grupo de pesquisas, em especial Bernardo Oliveira Fiuza, pela participação como coorientador nas etapas de iniciação científica; e Daniel Carvalho West, por toda a parceria para discussões, tal como pelo auxílio nos primeiros passos do levantamento em campo.

Aos srs. José Luiz de Paiva Leijoto e Robson Luiz de Paiva Leijoto, e família, pela autorização para o acesso ao terreno onde está localizado o afloramento estudado.

À Xisto Jr - Empresa Júnior de Geociências da UFRJ e à família que construí, agradeço por um dos períodos mais “*insanos*” e desafiadores da minha vida. O que almejo para minha trajetória profissional provém, em sua quase totalidade, de sementes plantadas enquanto vestia essa bandeira e me desenvolvia sobre os pilares do Movimento.

Às colegas de curso – e vida – Camila Gomes, Nathalie Diaz, Paula Sant’Ana e Thamirez Bassi, agradeço pela partilha de momentos ímpares ao longo da graduação, nos quais fui fortalecido e encorajado a seguir minha jornada.

E, em primeira instância, a Jorge Nicolas e José Lucas. Agradeço por tudo que nossa estrutura tríplice representou, representa e sempre representará: amor, confiança, suporte, resiliência, e todos os demais substantivos que a ela couberem. Contrariando o que pensam sobre me ter como referência, meus movimentos são os que de fato têm a vocês como tal. Essa conquista é nossa.

Resumo

SILVA, João Victor Pereira da. **Tipologia das Feições de Precipitação de Óxidos e Hidróxidos de Ferro em Rochas Siliciclásticas da Formação Resende, Bacia de Volta Redonda - RJ.** 2022. xv, 54 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

O presente estudo tem como objetivo apresentar uma tipologia de feições de precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro em rochas siliciclásticas pouco consolidadas e fraturadas, tomando tais feições como indicadoras do controle de aspectos faciológicos e estruturais na percolação de fluidos meteóricos. O estudo está baseado nos padrões observados em um afloramento da Formação Resende situado na borda sul do Gráben de Casa de Pedra, principal depocentro da Bacia de Volta Redonda, no sul do estado do Rio de Janeiro, no contexto do Segmento Central do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil. Essa unidade litoestratigráfica, de idade eocênica, corresponde ao principal preenchimento sedimentar da bacia, sendo composta predominantemente por arenitos feldspáticos pouco consolidados, em sua maioria estratificados, intercalados a lamitos e conglomerados. Sucessivos eventos tectônicos foram responsáveis pela formação de conjuntos distintos de estruturas rúpteis que afetam esses depósitos, como falhas e bandas de deformação, constituindo, assim como as diferentes litofácies, elementos controladores do fluxo de fluidos e, conseqüentemente, da cimentação por óxidos/hidróxidos de ferro observada. Como metodologia, adotou-se a identificação, descrição e mapeamento, na escala 1:50, das feições de precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro; coleta de sete blocos de arenitos representativos das feições identificadas; descrição macroscópica das amostras coletadas; interpretação de imagens tomográficas; confecção e descrição de lâminas petrográficas. São propostos nove tipos de feições de precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro, com base em suas disposições, intensidades e, ocasionalmente, cores: Cimentação Associada a Falhas (Cf), disposta ao longo de planos de falha, formando desde massas minerais com relevo positivo até faixas delgadas e sutis de ferro; Cimentação Associada a Bandas de Deformação (Cbd), adjacente às faixas de bandas de deformação, formando desde massas minerais a faixas delgadas de ferro com relevo positivo; Cimentação Concordante com os Limites de Camada (Ccl), com maior intensidade relacionada a contatos litológicos entre materiais arenosos e finos; Cimentação Discordante dos Limites de Camada (Cdl), em faixas paralelas, sub-horizontais, com boa continuidade lateral, não apresentando relação com os limites de camadas; Tingimento Associado a Falhas (Tf), precipitados dispostos, de maneira difusa, em materiais adjacentes a planos de falhas; Tingimento Associado a Bandas de Deformação (Tbd), precipitados dispostos, de maneira difusa, nas adjacências de bandas de deformação; Tingimento Associado à Trama Sedimentar (Tts), precipitados dispostos no interior das camadas, de maneira dispersa ou a evidenciar a atitude de estruturas sedimentares; Bandas de *Liesegang* (LB), produto da precipitação periódica de bandas de óxido de ferro; Concreções (Conc), descritas essencialmente como massas minerais concêntricas.

Palavras-chave: Formação Resende; Geomateriais Análogos; Precipitação de Óxidos e Hidróxidos de Ferro.

Abstract

SILVA, João Victor Pereira da. **Typology of Iron Oxides (and Hydroxides) Precipitates in Siliciclastic Rocks of Resende Formation, Volta Redonda Basin - RJ.** 2022. xv, 54 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

The present study objectives to propose a typology for iron oxides (and hydroxides) precipitates – in poorly lithified and fractured siliciclastic rocks – by understanding these features as fingerprints to lithofaciological and structural control over meteoric fluid flow. The study is based on the patterns observed in an outcrop of Resende Formation, located on the southern board of the Gráben de Casa de Pedra – main depocenter of Volta Redonda basin, Central Segment of the Continental Rift of Southeastern Brazil (RCSB), southern Rio de Janeiro. This lithostratigraphic unit, of Eocene age, corresponds to the basin's main sedimentary filling, and is predominantly composed by poorly lithified feldspathic sandstones, mostly stratified, intercalated with mudstones/siltstones and conglomerates. Successive tectonic events were responsible for the formation of distinct sets of brittle deformation structures that affect these deposits, such as faults and deformation bands, constituting, as well as the characterized lithofacies, controlling elements of fluid flow and, consequently, iron oxides and hydroxides precipitation. The methods applied consisted of identifying, describing and mapping (1:50 scale) the precipitation features; collecting seven sandstone samples, representative of the identified features; macroscopic describing the collected samples; interpreting the tomographic images; producing and describing petrographic thin sections. Nine codes for iron oxides/hydroxides precipitation features are proposed, based on their arrangement, intensities and, occasionally, colors: Cementation Associated with Faults (Cf), which lays along fault planes, forming from positive relief mineral masses to subtle iron trails; Cementation Associated with Deformation Bands (Cbd), disposed alongside deformation bands, forming from mineral masses to iron trails with positive relief; Concordant Cementation with Sedimentary Layer Limits (Ccl), with greater intensity related to lithological contacts between sandy and fine grained materials; Discordant Cementation of Sedimentary Layer Limits (Cdl), in parallel, sub-horizontal, laterally continuous bands which do not appear to relate with sedimentary layer boundaries; Hues Associated with Faults (Tf), precipitates arranged diffusely in materials adjacent to fault cores/zones; Hues Associated with Deformation Bands (Tbd), precipitates arranged diffusely alongside deformation bands; Hues Associated with Sedimentary Patterns (Tts), precipitates arranged inside the layers, diffusely or evidencing the attitude of sedimentary structures; Liesegang bands (LB), formed by periodic precipitation of iron oxide bands; Concretions (Conc), described, essentially, as concentric mineral masses.

Key-Words: Resende Formation; Analogue Geomaterials; Iron Oxides and Hydroxides Precipitates.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – A) Mapa geológico da região da Bacia de Volta Redonda (retirado de Negrão, 2014 e modificado por Maciel et al., 2017), destacando a localização da região de estudo (polígono em contorno amarelo).....	19
Figura 2 – Coluna litoestratigráfica e fases tectônicas propostas para a região da Bacia de Volta Redonda por Negrão et al. (2015 — modificada por Fiuza, 2019).	21
Figura 3 – A) Localização geográfica do afloramento, indicado pelo ícone em cor preta, na região ao Sul da cidade de Volta Redonda (RJ). B) Visão em detalhe da localização do afloramento estudado, indicado pelo ícone em cor preta, à margem da Rodovia do Contorno, Volta Redonda (RJ). Ambas as imagens foram retiradas do Google Earth, cujo acesso foi realizado em janeiro de 2022.....	21
Figura 4 – A) Visão frontal do afloramento estudado, com a indicação (em contorno amarelo) do trecho descrito por Fiuza (2019) na escala 1:50, e das falhas normais principais (F1 e F2). B) Seção estratigráfica-estrutural (escala original 1:50) do afloramento estudado, segundo Fiuza (2019), destacando (em contorno amarelo), a porção do afloramento investigada no presente estudo.	23
Figura 5 – Esquema demonstrativo das etapas metodológicas adotadas no presente estudo.	24
Figura 6 – Levantamento de campo - Mapa Preliminar de Feições de Precipitação de Óxidos/Hidróxidos de Ferro, em escala 1:50, com destaque para os pontos de coleta de amostras.....	25
Figura 7: A e B – Representação dos blocos esculpidos durante a coleta – nas fotografias, o bloco em questão é o de código F1#4B.	27
Figura 8 – A) Notas do processo de descrição macroscópica da amostra NOX#5. B) Amostra NOX#5, envolta em filme plástico. C) Amostra NOX#5 na mesa de descrição, orientada conforme indicado.	28
Figura 9 – Realização do imageamento de uma das amostras (NOX#4) em tomógrafo médico do Laboratório de Tomografia do CENPES/PETROBRAS.	29
Figura 11 – A: Cimentação associada à zona de bandas de deformação adjacente à falha F1, cujo plano se destaca na fotografia. B: Cimentação de coloração amarelo avermelhada associada às faixas de bandas de deformação.	36

Figura 13 – A: Local de retirada da amostra F1#4B, na região do bloco abatido adjacente à falha F1. B: Visão em laboratório da amostra com orientação, escala e identificação expressas na fotografia.	37
Figura 14 – Imagem tomográfica da amostra F1#4B, legendada conforme elementos observados.....	38
Figura 15 – A: Lâmina F1#3A. B: Delimitação de faixas ao longo da lâmina, a partir das variações texturais observadas. C: Quantificação do arcabouço, matriz, cimento e poro em cada faixa identificada (dados fornecidos por Thamirez Nascimento Bassi).	39
Figura 16 – Cimentação concordante com os limites de camadas. A e B: Cimentação pronunciada ao longo do contato entre materiais areníticos(A)/conglomeráticos(B) e pelíticos. C: Cimentação amarela avermelhada ao longo do contato entre camadas areníticas. D: Cimentação marrom ao longo do contato entre camadas areníticas adjacentes à falha F1.	40
Figura 17 – A: Local de retirada do bloco NOX#3, em região onde foi possível observar a presença de cimentação concordante com o limite de camadas. B: Visão em laboratório da amostra com orientação, escala e identificação expressas na fotografia.....	41
Figura 18 – Imagem tomográfica da amostra NOX#3, apresentando, em sua base, massa mineralizada referente à feição de cimentação concordante com os limites entre camadas.....	42
Figura 19 – Cimentação discordante com os limites de camada. A: Foto em detalhe, mostrando a configuração paralela a subparalela das bandas óxidos/hidróxidos de ferro. B: Destaque para a relação espacial de continuidade das bandas de ferro, mostrando independência em relação à geometria das camadas.	43
Figura 20 – Tingimento dos depósitos do bloco soerguido adjacentes ao plano da falha F1.....	43
Figura 21 – Camadas areníticas nas quais é possível identificar diferentes tonalidades da precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro associadas à trama sedimentar. Nesse caso, o foreset das estruturas cruzadas é delineado por cimentação avermelhada, e a cimentação associada aos limites entre sets por coloração amarela-avermelhada. .	44

Figura 22 – A: Local de retirada do bloco NOX#1, em região na qual foi identificada a feição de tingimento associado à trama sedimentar. B: Visão em laboratório da amostra com orientação, escala e identificação expressas na fotografia.....	45
Figura 23 – Imagem tomográfica da amostra NOX#1, com estruturas internas do material evidenciadas pela disposição dos precipitados de óxidos de ferro.	45
Figura 24 – A: Local de retirada do bloco NOX#4, na porção superior do afloramento, onde foi identificada relação entre os precipitados de óxidos/hidróxidos de ferro e as estruturas sedimentares dos depósitos. B: Visão em laboratório da amostra com orientação, escala e identificação expressas na fotografia.	46
Figura 25 – Imagem tomográfica do bloco NOX#4. As estruturas sedimentares estão evidenciadas pelos precipitados.....	46
Figura 26 – A: Bandas de Liesegang, formadas sob contexto de retardo do fluxo, mostrando, ainda, associação espacial com uma faixa de bandas de deformação. B e C: Bandas de Liesegang de menor proporção, observadas em outras porções do afloramento estudado.....	48
Figura 27 – A: Local de retirada do bloco F1#5B, nas adjacências da falha F1, onde foi observada uma zona de bandas de Liesegang. B: Visão em laboratório da amostra com orientação, escala e identificação expressas na fotografia.....	48
Figura 28 – Imagens tomográficas da amostra F1#5B, apresentando a relação das Bandas de Liesegang com a presença de banda de deformação e o acamamento sedimentar.....	49
Figura 29 – A: Imagem de scan da lâmina F1#5B.I, relacionada às bandas de Liesegang observadas; B: Feições e estruturas interpretadas na lâmina.	50
Figura 30 – Seção geológico-estrutural com informações acerca dos padrões reconhecidos de precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro.	53
Figura 31 – Representação do tempo <i>tn</i> na seção geológico-estrutural em escala 1:50 desenvolvida para o estudo. As indicações de interrogações e linhas tracejadas apontam para as incertezas quanto à representação gráfica do dado momento.	59
Figura 32 – Representação do tempo <i>tn + 1</i> na seção geológico-estrutural em escala 1:50 desenvolvida para o estudo. As indicações de interrogações apontam para as incertezas quanto à representação gráfica do momento em questão.	60

Figura 33 – Representação do tempo $tn + 2$, que compreende a distribuição de feições tal como a seção geológico-estrutural final, em escala 1:50, abordada como material resultante do estudo.61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Quadro geral de feições de precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro...34	
Quadro 2 – Sumário de fases de interação rocha-fluido.58	

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
2.	OBJETIVO	18
3.	CONTEXTO GEOLÓGICO	19
3.1.	BACIA DE VOLTA REDONDA E <i>RIFT</i> CONTINENTAL DO SUDESTE DO BRASIL (RCSB).....	19
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	24
4.1.	IDENTIFICAÇÃO DOS ASPECTOS DA PRECIPITAÇÃO DE ÓXIDOS/HIDRÓXIDOS DE FERRO PRESENTES NO AFLORAMENTO.....	25
4.2.	COLETA DE AMOSTRAS REPRESENTATIVAS DAS FEIÇÕES DE PRECIPITAÇÃO DE ÓXIDOS/HIDRÓXIDOS DE FERRO IDENTIFICADAS .	27
4.3.	DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA DAS AMOSTRAS COLETADAS.....	31
4.4.	TOMOGRAFIA DOS BLOCOS DE ARENITOS.....	32
4.5.	CONFECÇÃO DE LÂMINAS PETROGRÁFICAS.....	30
4.6.	ELABORAÇÃO DO QUADRO FINAL DE FEIÇÕES DE PRECIPITAÇÃO DE ÓXIDOS/HIDRÓXIDOS DE FERRO.....	30
4.7.	FINALIZAÇÃO DO MAPA DE FEIÇÕES DE PRECIPITAÇÃO DE ÓXIDOS/HIDRÓXIDOS DE FERRO.....	32
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
5.1.	DESCRIÇÃO GERAL DAS FEIÇÕES DE PRECIPITAÇÃO DE ÓXIDOS/HIDRÓXIDOS DE FERRO.....	33
5.1.1.	Cimentação Associada a Falhas	33
5.1.2.	Cimentação Associada a Bandas de Deformação e Tingimento Associado a Bandas de Deformação	33
5.1.3.	Cimentação Concordante com os Limites de Camadas	40
5.1.4.	Cimentação Discordante dos Limites de Camadas	42
5.1.5.	Tingimento Associado a Falhas	43
5.1.6.	Tingimento Associado à Trama Sedimentar	44
5.1.7.	Bandas de <i>Liesegang</i>	47
5.1.8.	Concreções	51

5.2.	ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DAS FEIÇÕES DE PRECIPITAÇÃO DE ÓXIDOS/HIDRÓXIDOS DE FERRO.....	52
5.3.	FASES DE INTERAÇÃO ROCHA-FLUIDO E FEIÇÕES DE PRECIPITAÇÃO DE MINERAIS DE FERRO ASSOCIADAS.....	56
5.3.1.	Sumário de Fases de Interação Rocha-Fluido.....	57
6.	CONCLUSÕES	62
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68

1. INTRODUÇÃO

A presença de estruturas tectônicas rúpteis, como juntas, falhas e bandas de deformação, impacta diretamente no fluxo de fluidos nas rochas, podendo atuar como condutos ou barreiras. Essas estruturas alteram as características texturais das rochas e, assim, modificam suas propriedades permoporosas (Fossen *et al.*, 2007; Pei *et al.*, 2015), influenciando na configuração hidrodinâmica do sistema (Balsamo *et al.*, 2013).

O caso de rochas siliciclásticas pouco consolidadas é peculiar, uma vez que nesse tipo de rocha a deformação comumente não ocorre de maneira localizada, mas sim de forma pervasiva e muitas vezes difusa, o que dificulta a caracterização de zonas deformadas em reservatórios com essas características, configurando um constante desafio para a indústria (Wibberley & Shipton, 2010). Nesse contexto, o estudo de afloramentos como análogos é uma ferramenta utilizada na busca por soluções para as dificuldades decorrentes do acesso limitado às informações geológicas em subsuperfície (Howell *et al.*, 2014).

Beitler *et al.* (2005) destacam a importância da relação espacial entre a cimentação por óxidos/hidróxidos de ferro e as estruturas tectônicas, constituindo uma importante evidência para a compreensão do comportamento do fluxo de fluidos nos domínios de circulação de águas meteóricas. Balsamo *et al.* (2013), em estudo de arenitos pouco consolidados da Formação Barreiras, identificaram diferentes padrões de ferruginização relacionados a processos distintos de remobilização e precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro, condicionados por padrões litofaciológicos e pela presença de estruturas tectônicas.

Os arenitos da Formação Resende, unidade litoestratigráfica que representa o principal preenchimento das bacias sedimentares do Segmento Central do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (RCSB - Riccomini *et al.*, 2004), têm sido considerados em trabalhos recentes (Maciel, 2016; Maciel *et al.*, 2017; Rotava, 2017; Galvão, 2018; Vogel, 2018; Vogel *et al.*, 2019; Fiuza, 2019; Fiuza *et al.*, 2020) como um geomaterial análogo a reservatórios maastrichtianos, areníticos, pouco consolidados e fraturados presentes nas bacias da margem continental do Sudeste do Brasil. Nesse sentido, um afloramento da Formação Resende na Bacia de Volta Redonda foi alvo de estudos estratigráficos, estruturais, sedimentológicos, geofísicos,

petrográficos, petrofísicos e geomecânicos no âmbito de projeto de pesquisa em cooperação entre a UFRJ e a Petrobras (projeto “Caracterização da deformação e de propriedades mecânicas e permoporosas de arenitos pouco consolidados” - Termo de Cooperação 0050.0102131.16.9 – UFRJ/Coppetec/Petrobras/ANP), no qual o presente trabalho foi desenvolvido.

A Formação Resende é constituída essencialmente por arenitos feldspáticos pouco consolidados (Ramos *et al.*, 2006), em sua maioria estratificados, intercalados a lamitos esverdeados e conglomerados. Esses depósitos são afetados por uma expressiva deformação tectônica, relacionada a pelo menos três eventos deformacionais reconhecidos na região (Riccomini *et al.*, 2004; Negrão *et al.*, 2015; Negrão *et al.*, 2020). Feições de cimentação por óxidos/hidróxidos de ferro são descritas como um dos principais aspectos associados às alterações diagenéticas e intempéricas dos depósitos da Formação Resende (Ramos, 2003; Brêda, 2010), sendo geralmente enfatizados os controles das mudanças litofaciológicas. Também vem sendo destacado o controle das feições de deformação tectônica, especialmente bandas de deformação, na distribuição da ferruginização (Maciel, 2016; Maciel *et al.*, 2017; Rotava, 2017; Galvão, 2018; Vogel, 2018; Vogel *et al.*, 2019; Fiuza, 2019; Fiuza *et al.*, 2020), sendo a análise dessas relações a motivação principal do presente estudo.

2. OBJETIVO

O presente estudo tem como objetivo caracterizar os padrões de precipitação por óxidos/hidróxidos de ferro e a sua distribuição em um afloramento da Formação Resende, descrita como um geomaterial análogo a reservatórios areníticos pouco consolidados.

Nos depósitos investigados, situados na Bacia de Volta Redonda, a presença de feições relacionadas à cimentação por óxidos/hidróxidos de ferro já havia sido destacada em trabalhos anteriores (Maciel, 2016; Maciel *et al.*, 2017; Rotava, 2017; Galvão, 2018; Vogel, 2018; Vogel *et al.*, 2019; Fiuza, 2019; Fiuza *et al.*, 2020).

Busca-se analisar os possíveis fatores estruturais e litofaciológicos controladores da precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro no afloramento e, assim, contribuir para uma melhor compreensão da dinâmica do fluxo de fluidos nesse tipo de rocha.

3. CONTEXTO GEOLÓGICO

3.1. BACIA DE VOLTA REDONDA E RIFT CONTINENTAL DO SUDESTE DO BRASIL (RCSB)

A Bacia de Volta Redonda está inserida no Segmento Central do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (RCSB – Riccomini, 1989; Riccomini *et al.*, 2004) – juntamente às bacias de Resende, Taubaté e São Paulo.

O embasamento da bacia corresponde a rochas do domínio da Faixa Ribeira, formada durante a Orogênese Brasileira, que marcou o final da amalgamação da porção ocidental do paleocontinente Gondwana, entre 790 Ma e 520 Ma (Delgado *et al.*, 2003), sendo caracterizado por uma variação de terrenos litotectônicos compostos por complexos ortoderivados e paragnáissicos e suítes intrusivas, com uma forte estruturação NE-SW (Heilbron *et al.*, 2004) – Figura 1.

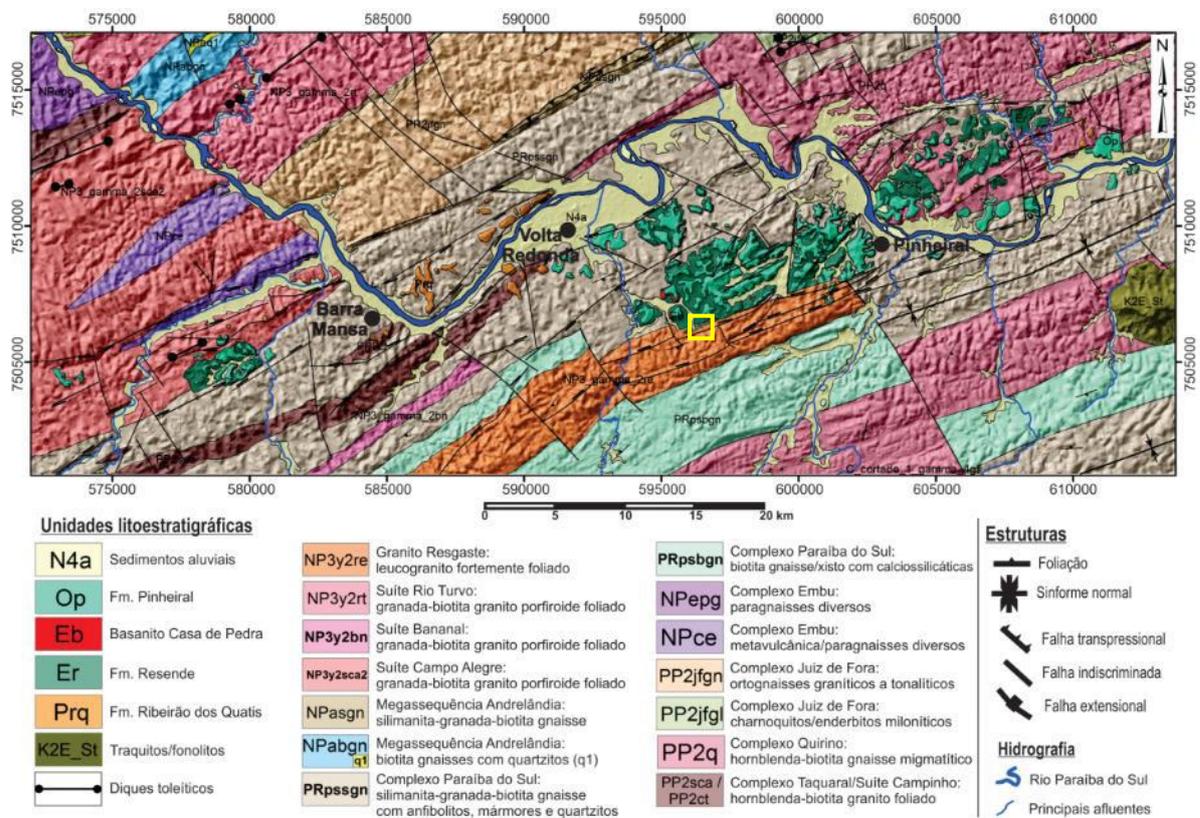


Figura 1 – A) Mapa geológico da região da Bacia de Volta Redonda (Negrao, 2014; modificado por Maciel *et al.*, 2017), destacando a localização da região de estudo (polígono em contorno amarelo).

Os sucessivos eventos relacionados à evolução tectônica da bacia afetam de forma diferenciada suas unidades estratigráficas. Negrão (2014) e Negrão *et al.* (2015) reconheceram quatro estágios evolutivos: E1, TS, TD e E2 (Figura 2).

Ao primeiro estágio de evolução tectônica (E1 - Distensão NW-SE), de idade eocênica, atribui-se a geração dos grábens paleogênicos, sendo proposta pelos autores uma relação entre a deposição das unidades litoestratigráficas e as distintas fases de geração de espaço para a acomodação de sedimentos (criação de depocentros):

- Fase Pré-Rifte: Formação Ribeirão dos Quatis (sistema fluvial entrelaçado) – ciclo inicial da deposição;
- Fase Rifte I: Formação Resende (sistema fluvial entrelaçado e de leques aluviais de borda de falha - principal preenchimento sedimentar da bacia), com a intercalação de rochas vulcânicas ultrabásicas (Basanito Casa de Pedra);
- Fase Rifte II: Formação Pinheiral (sistema fluvial entrelaçado) – ciclo final de deposição.

Os demais eventos tectônicos reconhecidos - Transcorrência Sinistral E-W (TS), Transcorrência Dextral E-W (TD) e Distensão NW-SE (E2), de idades neogênica, pleistocênica e holocênica, são de caráter deformacional, relacionando-se a fases neotectônicas de abrangência regional.

Os diferentes estágios da evolução tectônica são responsáveis pela geração de conjuntos distintos de estruturas rúpteis que, segundo Negrão (2014), podem ser assim caracterizados:

- Evento E1 – falhas normais de direção NE-SW;
- Evento TS – falhas normais sinistrais e sinistrais normais de direção NE-SW a ENE-WSW; falhas normais dextrais e dextrais normais com direção variando de NE-SW a NNW-SSE; e falhas normais NE-SW;
- Evento TD – falhas normais dextrais e dextrais normais de direção WNW-ESE a NW-SE; falhas normais sinistrais e sinistrais normais com direções variando de NW-SE a NNE-SSW; e falhas normais NW-SE;
- Evento E2 – falhas normais de direção ENE-WSW, NE-SW e NNE-SSW.

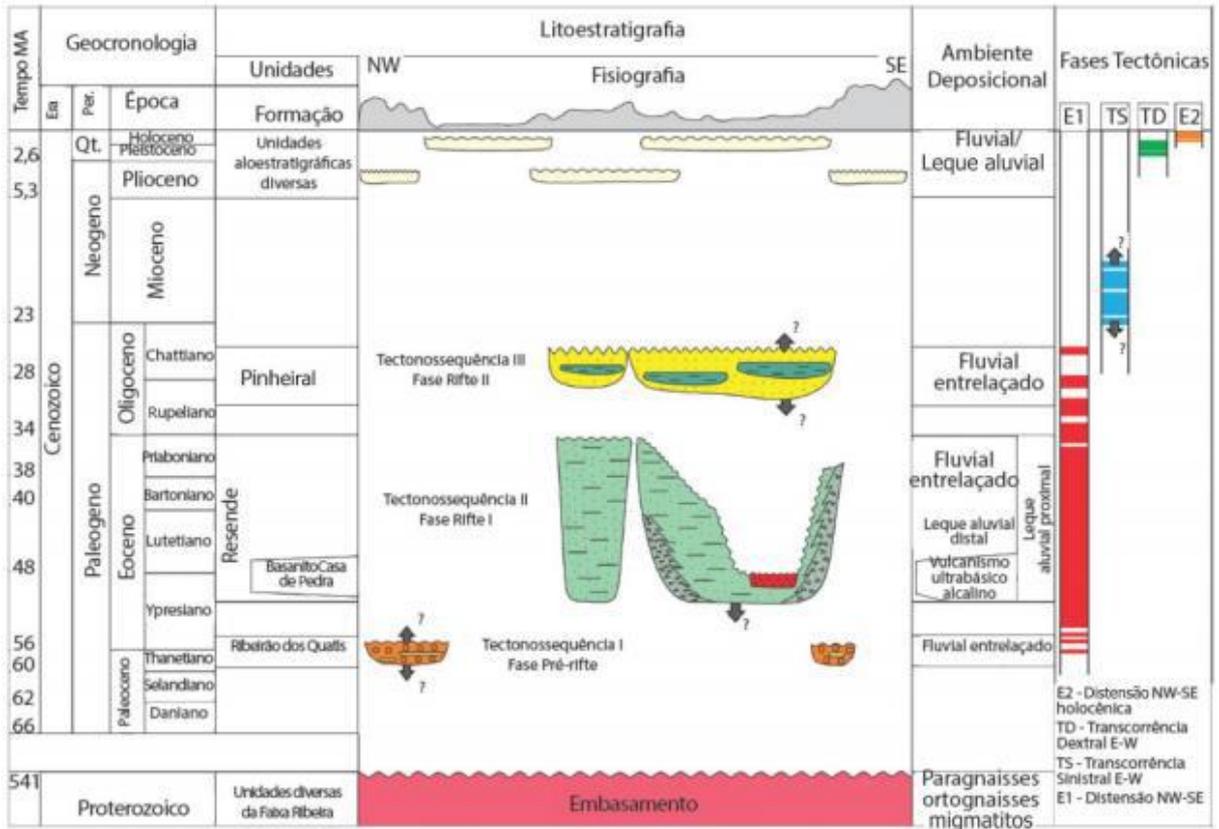


Figura 2 – Coluna litoestratigráfica e fases tectônicas propostas para a região da Bacia de Volta Redonda por Negrão et al. (2015 — modificada por Fiuza, 2019).

O afloramento da Formação Resende estudado está localizado nas proximidades da borda sul (borda de falha) do Gráben de Casa de Pedra – principal depocentro da Bacia de Volta Redonda (Figura 1), em um terreno particular à margem da Rodovia do Contorno (Figura 3), sendo o acesso feito pela Rodovia dos Metalúrgicos (VRD-001, ao sul) ou pela Rodovia Lúcio Meira (BR-393, ao norte). Suas coordenadas UTM (datum WGS84) são: W 0597428 / S 7507066, fuso 23.

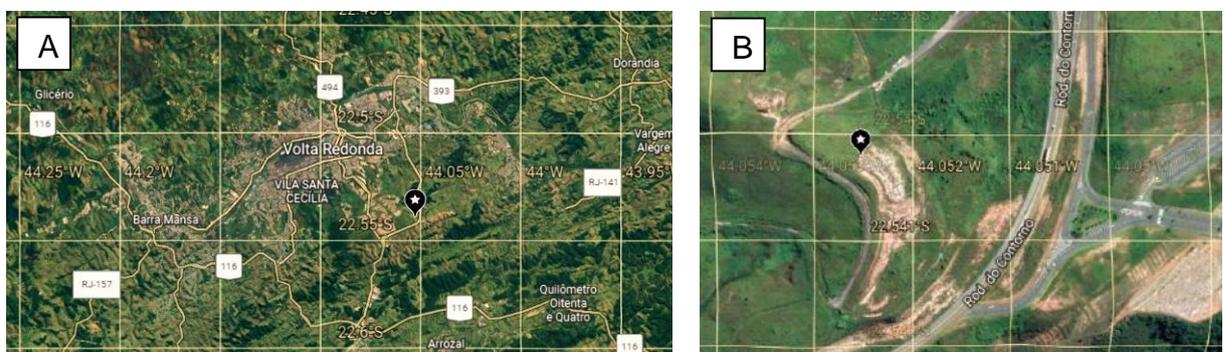


Figura 3 – A) Localização geográfica do afloramento, indicado pelo ícone em cor preta, na região ao Sul da cidade de Volta Redonda (RJ). B) Visão em detalhe da localização do afloramento estudado, indicado pelo ícone em cor preta, à margem da Rodovia do Contorno, Volta Redonda (RJ). Ambas as imagens foram retiradas do Google Earth, cujo acesso foi realizado em janeiro de 2022.

Segmentado em três blocos por duas falhas normais principais de orientação ENE-WSW e mergulhos opostos – ditas F1, ao sul; e F2, ao norte, o afloramento exhibe uma geometria de gráben e é composto por litologias típicas da Formação Resende (Figura 4): intervalos areníticos lenticulares a tabulares, por vezes apresentando estratificação cruzada; intervalos pelíticos de coloração esverdeada; e, subordinadamente, conglomerados e brechas intraformacionais.

Trabalhos desenvolvidos no local (Maciel, 2016; Maciel *et al.*, 2017; Rotava, 2017; Galvão, 2018; Vogel, 2018; Vogel *et al.*, 2019; Fiuza, 2019; Fiuza *et al.*, 2020) apontam para a presença de diversos tipos de estruturas rúpteis associados ao contexto da evolução das zonas de falhas principais – como bandas de deformação, falhas escalonadas e fraturas, evidenciadas na seção estratigráfica-estrutural em escala 1:50 apresentada por Fiuza (2019 – Figura 4).

Na porção sul do afloramento, ocorre uma série de feições de cimentação por óxidos/hidróxidos de ferro, que se destacam por sua intensidade e localização – demonstrando evidente associação com as estruturas tectônicas e litofácies.

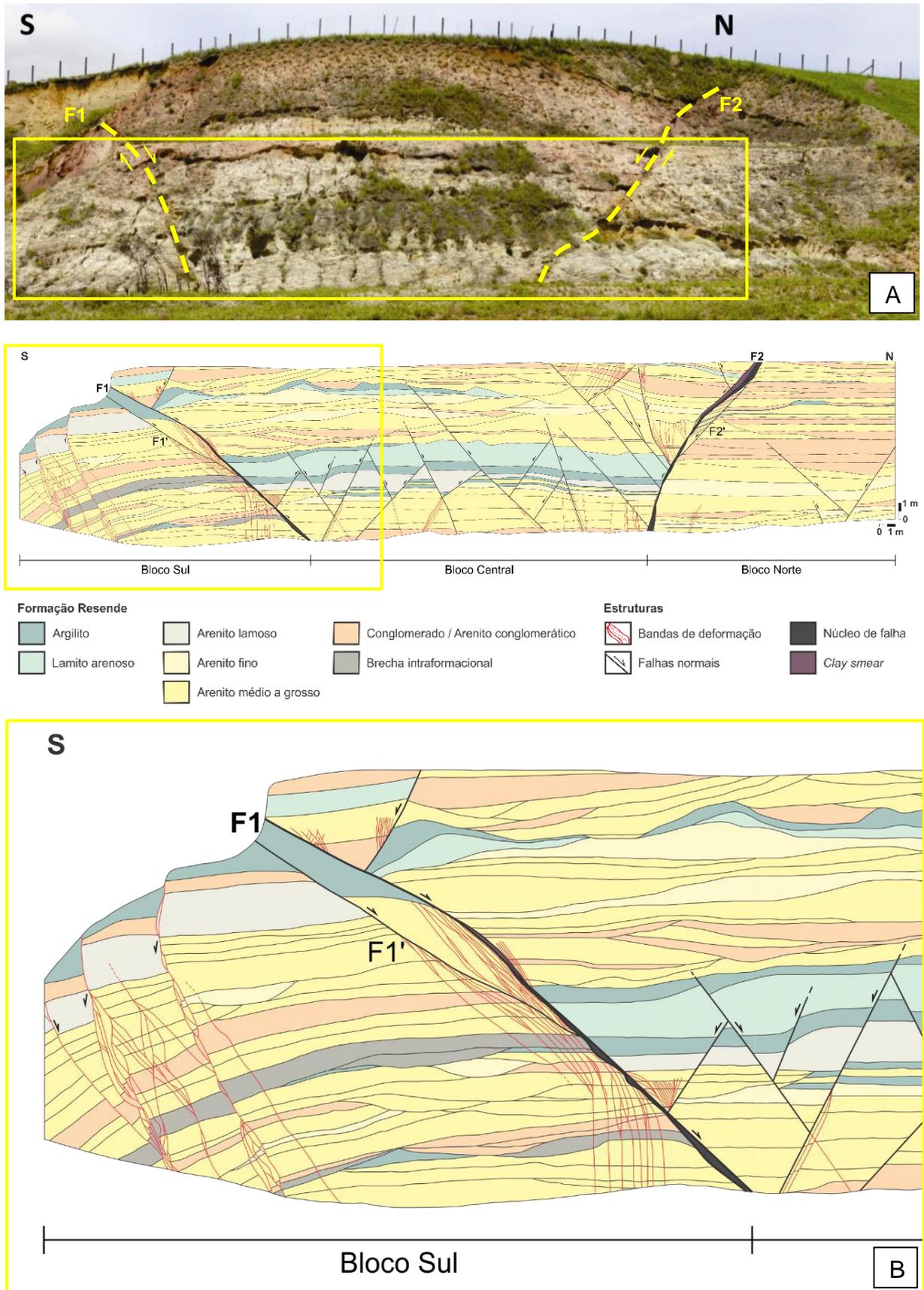


Figura 4 – A) Visão frontal do afloramento estudado, com a indicação (em contorno amarelo) do trecho descrito por Fiuza (2019) na escala 1:50, e das falhas normais principais (F1 e F2). B) Seção estratigráfica-estrutural (escala original 1:50) do afloramento estudado, segundo Fiuza (2019), destacando (em contorno amarelo), a porção do afloramento investigada no presente estudo.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização do estudo, foram adotadas sete etapas metodológicas (Figura 5):

- I. identificação, descrição e mapeamento dos aspectos da precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro presentes no afloramento;
- II. coleta de sete amostras (blocos de arenitos) representativas das feições identificadas;
- III. descrição macroscópica das amostras coletadas;
- IV. aquisição de imagens tomográficas;
- V. confecção de lâminas petrográficas;
- VI. elaboração do quadro síntese das feições de precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro;
- VII. finalização do mapa de feições de precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro, tendo como base a seção estratigráfica-estrutural apresentada por Fiuza (2019) - escala 1:50.

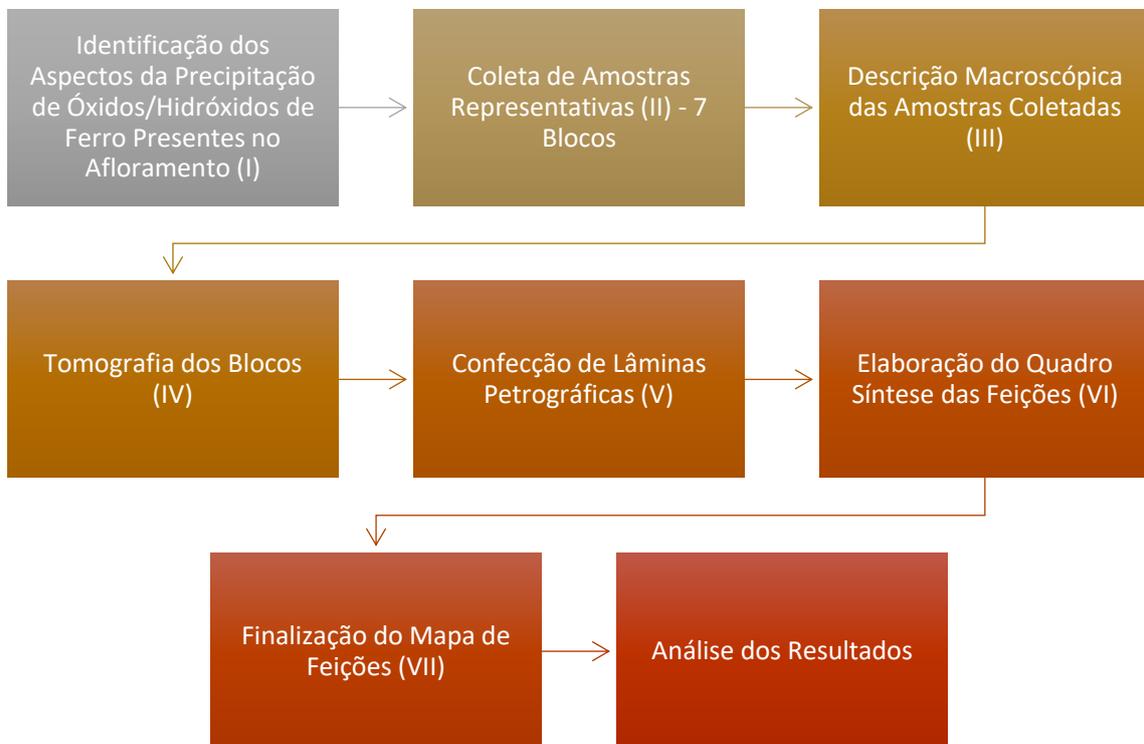


Figura 5 – Esquema demonstrativo das etapas metodológicas adotadas no presente estudo.

Cada uma das etapas metodológicas adotadas é detalhada a seguir.

4.1. IDENTIFICAÇÃO DOS ASPECTOS DA PRECIPITAÇÃO DE ÓXIDOS/HIDRÓXIDOS DE FERRO PRESENTES NO AFLORAMENTO

Para dar início ao trabalho, foi realizado um levantamento de aspectos e distribuições dos precipitados de óxido/hidróxido de ferro presentes no afloramento, buscando estabelecer sua relação com estruturas rúpteis (falhas, bandas de deformação e fraturas) e/ou litofácies (arenitos com estratificação cruzada ou maciços, argilitos com laminação plano-paralela, entre outras).

Nessa etapa, foi utilizada como base a seção estratigráfica-estrutural em escala 1:50 disponível para o afloramento (Fiuza, 2019 – Figura 4), à qual foram adicionadas as informações observadas durante trabalhos de campo desenvolvidos no presente estudo, resultando no mapa preliminar de feições de precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro (Figura 6), tal como na pré-categorização dessas.

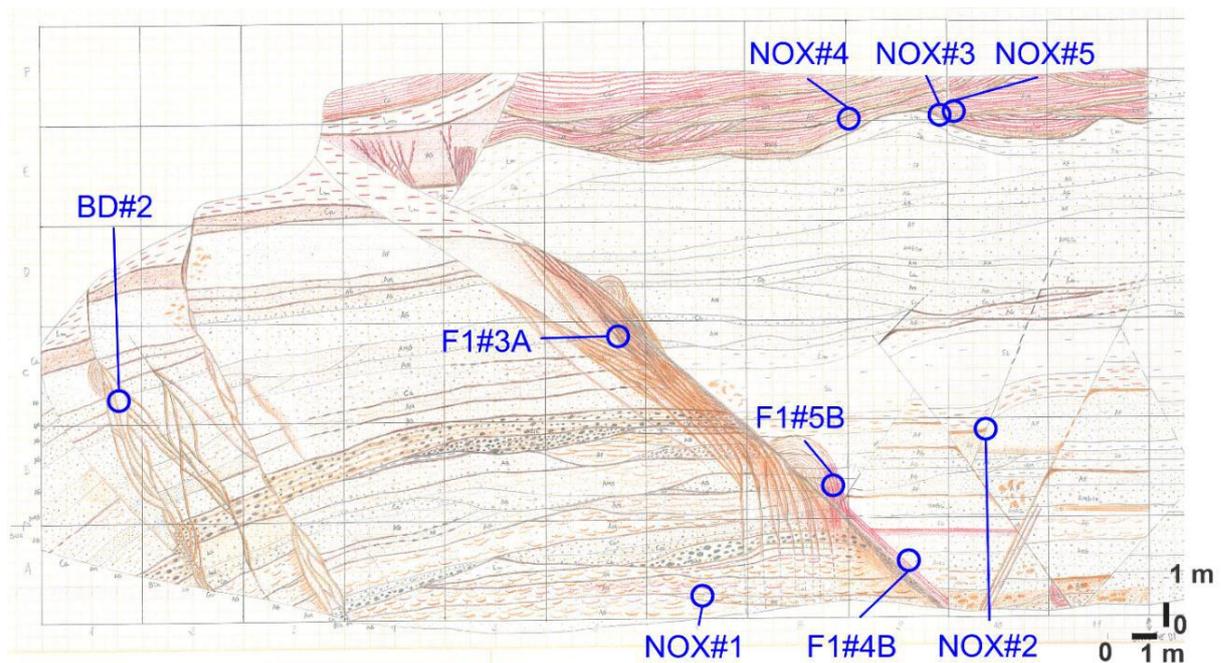


Figura 6 – Levantamento de campo - Mapa Preliminar de Feições de Precipitação de Óxidos/Hidróxidos de Ferro, em escala 1:50, com destaque para os pontos de coleta de amostras.

Para a classificação preliminar das feições de precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro, foram levados em consideração três aspectos principais:

a. Distribuição

A distribuição das feições foi, durante o levantamento, o principal parâmetro para a sua pré-categorização. Foram verificadas as tendências de associação entre determinadas feições de precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro e elementos estruturais e/ou litofaciológicos dominantes em certas porções do afloramento.

Pôde-se estabelecer essa correlação ao serem descritas concentrações de óxidos/hidróxidos de ferro localizadas, por exemplo, ao longo de planos de falha, marcando de maneira considerável a superfície de deslocamento dessas; nas regiões com zonas de bandas de deformação, não raramente apresentando cimentação ao longo das faixas dessas estruturas; em contatos litológicos entre camadas sedimentares, ao longo dos quais os óxidos/hidróxidos se concentravam, evidenciando a separação física de tais intervalos; entre outros exemplos, abordados nas etapas seguintes.

b. Intensidade da cimentação

Durante o levantamento, pôde-se observar uma distinção entre as intensidades das impregnações por óxidos/hidróxidos de ferro, aparecendo ora de maneira mais efetiva, bem delineada, evidenciando os elementos (estruturais e/ou litofaciológicos) aos quais se associa, ora pouco efetiva, disseminada, menos evidente, apenas tingindo o material ao qual se associa.

Tais variações foram representadas no mapa preliminar de feições de precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro, contudo, nessa etapa, ainda não representavam um quesito para a diferenciação – sendo feições de diferentes nuances associadas ao mesmo elemento (agrupadas em uma só classificação).

c. Coloração

Outro parâmetro muito importante no levantamento realizado foi a coloração das feições de precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro. Apesar de não possuir caráter identificador, esse aspecto se fez essencial para a descrição e representação gráfica do material observado.

A presença de óxidos/hidróxidos de ferro atribui às feições tons variantes entre bases marrom, amarelo-avermelhada e/ou vermelha. Para a descrição final, que fundamentou a elaboração do quadro final de feições, fez-se relação com a Carta de Cores para Solos de Munsell (1994) – a ser tratada em seu respectivo tópico.

4.2. COLETA DE AMOSTRAS REPRESENTATIVAS DAS FEIÇÕES DE PRECIPITAÇÃO DE ÓXIDOS/HIDRÓXIDOS DE FERRO IDENTIFICADAS

Com as feições de precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro preliminarmente definidas, foram determinados pontos de amostragem (Figura 6) e feita a coleta de sete blocos de arenitos – F1#4B, F1#5B, NOX#1, NOX#2, NOX#3, NOX#4 e NOX#5, a fim de prosseguir com a caracterização em laboratório.

Em razão do caráter friável dos arenitos da Formação Resende, todos os blocos precisaram ser esculpido no afloramento (Figura 7) até o limite em que pudessem ser destacados e removidos. Os blocos foram, então, envoltos em filme plástico e, nesse, registradas as informações do código da amostra e orientação.



Figura 7: A e B – Representação dos blocos esculpido durante a coleta – nas fotografias, o bloco em questão é o de código F1#4B.

4.3. DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA DAS AMOSTRAS COLETADAS

Nessa etapa, foi enfatizada a identificação dos principais aspectos texturais (granulometria, seleção, forma dos grãos), estruturas sedimentares e feições estruturais rúpteis, para que fosse possível estabelecer de maneira mais precisa suas relações com as feições de precipitação.

As descrições geradas nessa etapa (Figura 8) serviram como base para o avanço do estudo, no que diz respeito à análise prévia das amostras para o levantamento de suas imagens tomográficas, a fim de aumentar o nível de informações sobre a relação entre os aspectos examinados e a precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro.

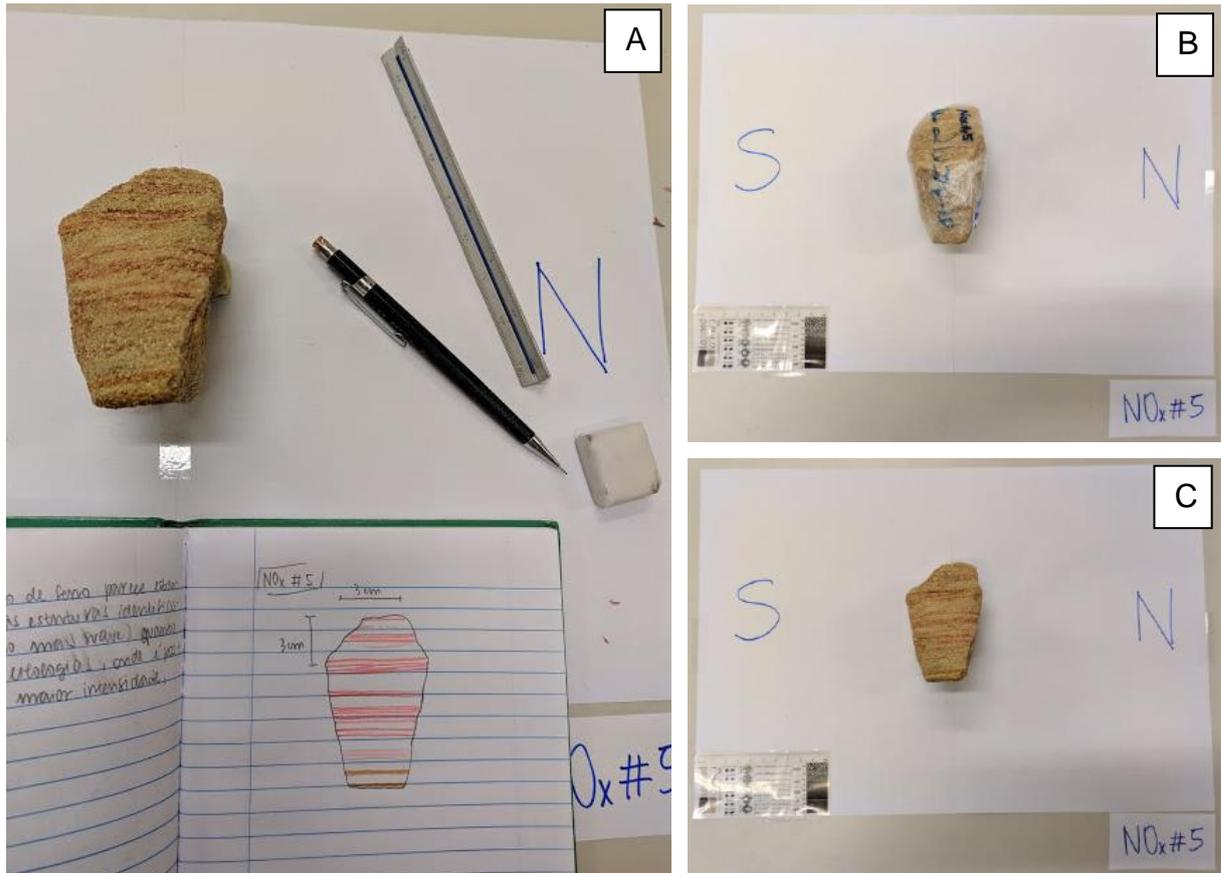


Figura 8 – A) Notas do processo de descrição macroscópica da amostra NOX#5. B) Amostra NOX#5, envolta em filme plástico. C) Amostra NOX#5 na mesa de descrição, orientada conforme indicado.

4.4. TOMOGRAFIA DOS BLOCOS DE ARENITOS

Os sete blocos coletados foram submetidos a um tomógrafo médico (Figura 9) no Laboratório de Tomografia do CENPES/PETROBRAS, com prescrição de feixe em 140V para a tensão e 280 mA para a corrente, a fim de fornecer o melhor contraste de densidade para esse tipo de material.

As diferenças entre os coeficientes de atenuação de energia dos componentes da amostra resultam em respostas diferentes à leitura do tomógrafo, de forma que elementos dos geomateriais com densidade (relativamente) elevada possuem coeficiente de atenuação maior e, conseqüentemente, absorvem mais energia, causando uma resposta maior ao feixe de raios X. Já elementos dos geomateriais com densidade (relativamente) baixa possuem coeficiente de atenuação menor, absorvendo menos energia e gerando uma resposta menos intensa ao feixe.

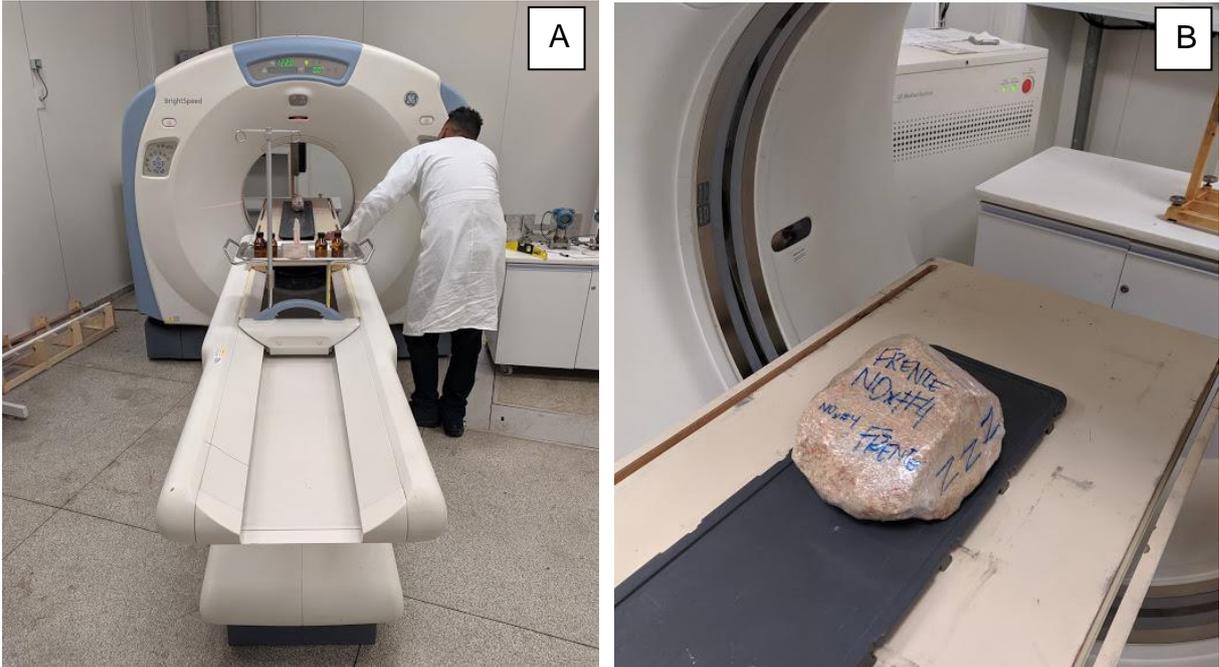


Figura 9 – Realização do imageamento de uma das amostras (NOX#4) em tomógrafo médico do Laboratório de Tomografia do CENPES/PETROBRAS.

As imagens tomográficas obtidas foram processadas no programa Thermo Scientific™ Avizo e, por fim, foram reproduzidas imagens digitais tridimensionais dos blocos analisados, com as diferenças de coeficiente de atenuação traduzidas em escala de cores. Dessa forma, as regiões menos evidenciadas (escuras) nas imagens têm relação com poros e minerais compostos por elementos de menor número atômico (fases minerais menos densas). Regiões de maior evidência (claras) se relacionam com regiões de menor porosidade e minerais de alta densidade, ou compostos por elementos com maior número atômico.

No presente trabalho, a tomografia de raios-x computadorizada (CT) destacou a distribuição dos óxidos/hidróxidos de ferro, sendo esses, em síntese, uma fase mineral densa em relação ao arcabouço majoritariamente quartzo-feldspático.

O entendimento tridimensional da disposição dos óxidos/hidróxidos e das estruturas permite uma boa fundamentação de hipóteses, sendo essencial para a elaboração de propostas sobre o papel de tais elementos na percolação de fluidos.

A análise das imagens geradas possibilitou a seleção de seis amostras para a confecção de lâminas petrográficas. Foi descartado apenas um dos blocos (NOX#2), pois sua descrição macroscópica não correspondeu aos aspectos observados em campo - fator atribuído à perda de integridade da amostra durante as etapas subsequentes à coleta.

4.5. CONFECÇÃO DE LÂMINAS PETROGRÁFICAS

Os blocos selecionados após a análise das imagens tomográficas foram encaminhados para o Laboratório de Laminação do Departamento de Geologia/IGEO/UFRJ e, após impregnação com resina líquida e corante de coloração azul, foram confeccionadas oito lâminas petrográficas em faces e cortes determinados para o estudo microscópico dos elementos identificados nas etapas prévias.

Das lâminas confeccionadas e analisadas, apenas uma foi selecionada para compor a discussão dos resultados do presente estudo.

O principal motivo que embasou a decisão de não prosseguir com o estudo da quase totalidade das lâminas confeccionadas foi a perda da integridade das amostras durante os processos de impregnação e laminação. Dessa forma, não foram preservadas feições de interesse observadas na descrição macroscópica e nas imagens tomográficas.

A fim de contornar a falta de materiais qualificados para as análises microscópicas, foram incorporadas duas lâminas petrográficas pertencentes ao acervo do projeto de pesquisa em que esse estudo esteve inserido – referentes aos blocos BD#2 e F1#3A (Figura 6) – tal como os dados referentes à descrição e à contagem de pontos realizadas por Thamirez Nascimento Bassi, em 2018.

4.6. ELABORAÇÃO DO QUADRO FINAL DE FEIÇÕES DE PRECIPITAÇÃO DE ÓXIDOS/HIDRÓXIDOS DE FERRO

A partir das informações provenientes das etapas de descrição macroscópica, imageamento tomográfico e análise petrográfica, foi reanalisada a classificação preliminar das feições de precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro reconhecidas no afloramento estudado.

Diversos aspectos considerados na pré-categorização foram rediscutidos, principalmente com base nos referenciais teóricos obtidos na revisão da literatura (particularmente o trabalho de Balsamo *et al.*, 2013), em especial com relação aos parâmetros distribuição, intensidade e coloração, mencionados na etapa I. Dessa forma, foi aprimorada a caracterização das feições, permitindo correlações com outros trabalhos e possibilitando a finalização da designação de feições.

Tal como na classificação preliminar, a distribuição foi o fator mais importante na distinção. A associação direta dos precipitados de óxidos/hidróxidos de ferro com determinados elementos estruturais e/ou sedimentológicos foi o principal quesito para a classificação das feições de precipitação, sendo estabelecidos q elementos controladores principais aos quais a formação de determinadas feições está diretamente relacionada: falhas; bandas de deformação; limites entre camadas; e as características de sua trama sedimentar (textura e estruturas sedimentares).

Balsamo *et al.* (2013) apresentam conceitos-chave relacionados à efetividade da cimentação, os quais foram considerados no presente estudo: massas mineralizadas – precipitação maciça de óxidos/hidróxidos de ferro, geralmente associadas a falhas, representando o aspecto mais efetivo da cimentação; impregnações – a precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro que ocorre de maneira mais difusa em relação à primeira, menos efetiva, geralmente associada a materiais areníticos; e tingimentos – a dita “cor de fundo”, representando uma precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro muito difusa/inefetiva e que não cimenta os depósitos, apenas pigmenta.

A coloração das feições de precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro, embora isoladamente não seja um fator discriminante, representa uma informação muito relevante para a descrição do material analisado, sendo estabelecida, nessa etapa, a correlação direta com a Carta de Cores para Solos de Munsell (1994). Por meio dessa, pôde-se delimitar os códigos de cores associados aos espectros identificados no afloramento para cada um dos padrões de precipitação de ferro.

Foi realizado um levantamento remoto, relacionando as fotografias do acervo disponível para o afloramento investigado – sendo selecionadas as mais fiéis ao material estudado – com a Carta de Cores, assim estimando a variedade cromática de cada feição, informação que também compõe o quadro final de feições de precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro.

Além desses parâmetros, o quadro final conta também com uma síntese descritiva da extensão de cada feição em duas dimensões (espessura e continuidade), a fim de ilustrar como a variação das proporções de algumas delas torna esse um critério não necessariamente classificatório.

Pôde-se, então, avançar para a definição das terminologias e respectivos códigos.

A perspectiva adotada para tais designações foi, majoritariamente, a intensidade e o elemento ao qual a feição está associada, em detrimento de características individuais relativas à descrição delas – coloração, entre outras citadas acima.

4.7. FINALIZAÇÃO DO MAPA DE FEIÇÕES DE PRECIPITAÇÃO DE ÓXIDOS/HIDRÓXIDOS DE FERRO

Com base no mapa preliminar desenvolvido a partir da seção estratigráfica-estrutural na escala 1:50 disponível para o afloramento (Fiuza, 2019), foi finalizado o mapa das feições de precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro, abordando todas as questões previamente discutidas, relacionadas ao maior detalhamento das descrições realizadas.

Para a sua construção, por meio de *software* de *design* gráfico, foram integradas as informações acerca da tipologia das feições, distribuição no afloramento, cor e intensidade. Foram preservados aspectos já presentes na seção-base, essenciais para a compreensão do produto desenvolvido no presente estudo, como os limites de camadas, intervalos compostos por litologias finas e a disposição de estruturas tectônicas rúpteis. Assim, pôde-se avançar para a análise e discussão de resultados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. DESCRIÇÃO GERAL DAS FEIÇÕES DE PRECIPITAÇÃO DE ÓXIDOS/HIDRÓXIDOS DE FERRO

A síntese da descrição das feições de precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro, que serão tratadas individualmente a seguir, está expressa no Quadro Geral de Feições (Quadro 1).

5.1.1. Cimentação Associada a Falhas

Identificada como uma disposição de óxidos/hidróxidos de ferro ao longo de planos de falha, essa feição pode apresentar diferentes intensidades, colorações e dimensões (Figura 10). Quando a precipitação é efetiva ao ponto da formação de massas mineralizadas, tende a contribuir para o destaque da região na qual se situa, tornando o relevo positivo e, por vezes, evidenciando a atitude dessas estruturas.

O espectro de cores dessa feição se mostrou intimamente relacionado à sua intensidade. Em regiões onde foi observado maior percentual de cimentação por óxidos/hidróxidos de ferro, a coloração era mais forte – amarela avermelhada tendendo ao marrom. Em regiões onde a precipitação era menos efetiva (tingimentos e impregnações), a coloração era mais suave, sendo descritos tons vermelhos a amarelos avermelhados.

5.1.2. Cimentação Associada a Bandas de Deformação e Tingimento Associado a Bandas de Deformação

Essas feições são descritas como uma disposição de óxidos/hidróxidos de ferro adjacente às faixas de bandas de deformação (figuras 11 e 12). Variações de dimensão não são expressivas, contudo se refletem bastante no que diz respeito aos critérios de intensidade e coloração. Faixas macroscópicas de bandas de deformação, por natureza, já tendem a apresentar relevo positivo em relação a materiais siliciclásticos pouco consolidados nas quais se instalam e, quando delineadas pelos precipitados, adquirem caráter ainda mais proeminente – principalmente quando a precipitação forma massas mineralizadas.

Quadro 1 – Quadro geral de feições de precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro.

(continua)

Código	Feição	Descrição	Coloração (Estimada)	Coloração em Código (Estimada)	Dimensões (Espessura x Continuidade)	Distribuição
Cf	Cimentação associada a falhas	Cimentação de intensidade variável, disposta ao longo de planos de falha, formando desde massas minerais com relevo positivo até faixas delgadas de precipitados	Vermelho fraco a amarelo avermelhado	2.5 YR 4/2 ; 2.5 YR 5/2; 5 YR 6.6; 7.5 YR 8/6	mm - cm x cm - dam	Ao longo da falha F1 e de falhas de menor dimensão
Cbd	Cimentação associada a bandas de deformação	Cimentação de intensidade variável adjacente a faixas de bandas de deformação, formando desde massas minerais a faixas delgadas de precipitados com relevo positivo	Vermelho fraco, amarelo avermelhado a marrom forte	2.5 YR 4/2 ; 2.5 YR 5/2; 7.5 YR 6/6; 7.5 YR 5/6; 7.5 YR 6/8; 7.5 YR 7/8	cm x cm - m	Zonas de bandas de deformação
Ccl	Cimentação concordante com os limites de camadas	Cimentação localizada ao longo de limites de camadas, no geral com maior intensidade relacionada a contatos litológicos entre materiais arenosos e finos; e/ou em porções próximas a elementos de maior hierarquia na arquitetura estrutural	Vermelho claro a amarelo marrom acinzentado muito escuro	10 R 5/6; 10 R 4/6; 2.5 YR 6/6; 2.5 YR 5/6; 7.5 YR 6/6; 10 YR 4/6; 10 YR 3/2; 10 YR 7/6	mm - cm x cm - m	Limites entre camadas
Cdl	Cimentação discordante dos limites de camadas	Cimentação em bandas paralelas, sub-horizontais, de intensidade variável e boa continuidade lateral, não apresentando relação espacial com os limites de camadas	Amarelo avermelhado a marrom forte, rosa a vermelho amarelado	7.5 YR 6/6; 7.5 YR 5/6; 7.5 YR 7/4; 7.5 YR 5/8; 5 YR 4/6	mm x m	Porção superior do afloramento, associada aos pacotes areníticos superiores ao intervalo de finos

(conclusão)

Código	Feição	Descrição	Coloração (Estimada)	Coloração em Código (Estimada)	Dimensões (Espessura x Continuidade)	Distribuição
Tbd	Tingimento associado a bandas de deformação	Precipitados dispostos, de maneira difusa, nas adjacências de faixas de bandas de deformação	Vermelho claro a vermelho	10 R 7/6; 10 R 6/6; 10 R 5/6; 10 R 4/6	cm x cm	Zonas de bandas de deformação, especialmente na porção superior do afloramento
Tts	Tingimento associado à trama sedimentar	Precipitados dispostos no interior das camadas de maneira dispersa, quando o material não apresenta estruturas visíveis; ou levemente orientada, evidenciando a atitude de estruturas sedimentares	Amarelo pálido a amarronzado, rosa a amarelo avermelhado, marrom muito pálido	10 YR 6/8; 10 YR 7/4; 10 YR 7/6; 2.5 Y 8/4; 7.5 YR 7/4; 7.5 YR 7/6; 10 YR 8/4; 7.5 YR 6/6; 10 R 7/3; 10 R 6/4	cm x cm - m	Interior de camadas, por vezes ao longo de estruturas sedimentares
LB	Bandas de <i>Liesegang</i>	Precipitados concêntricos em bandas	Vermelho pálido a vermelho, amarelo a marrom forte	10 R 6/4; 10 R 7/3; 7.5 YR 6/6; 7.5 YR 6/8; 7.5 YR 5/6; 7.5 YR 5/8; 2.5 YR 4/6; 2.5 YR 4/8; 10 YR 7/6; 10 R 5/8	mm x cm	Adjacências de planos de falha
CONC	Concreções	Massas minerais concêntricas	Amarelo avermelhado a marrom forte	7.5 YR 6/6; 7.5 YR 6/8; 7.5 YR 5/6; 7.5 YR 5/8	cm x cm	Ocorrências pontuais nas adjacências da falha F1

Tingimentos associados a essa feição configuram sua aparência mais distinta – cujo aspecto da precipitação é bastante difuso e de coloração suave. Pelo padrão dos precipitados, que aparecem como finas capas de óxidos/hidróxidos de ferro no entorno dos grãos, não há significativa contribuição para mudanças no relevo dos depósitos.



Figura 10 – A e B: Cimentação ao longo do plano da falha F1. C: Cimentação associada a planos de falhas escalonadas. D: Leve impregnação associada a plano de falha, com mergulho evidenciado pela posição da lapiseira.

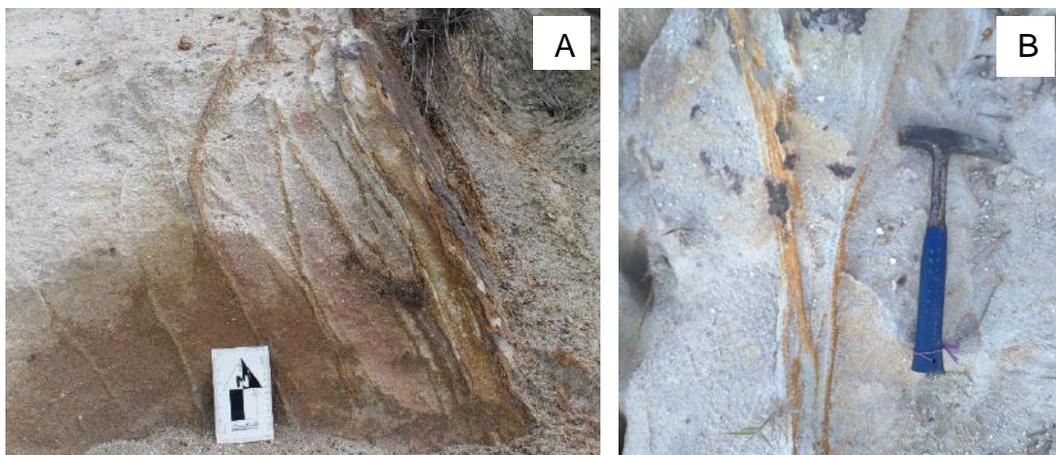


Figura 11 – A: Cimentação associada à zona de bandas de deformação adjacente à falha F1, cujo plano se destaca na fotografia. B: Cimentação de coloração amarelo avermelhada associada às faixas de bandas de deformação.

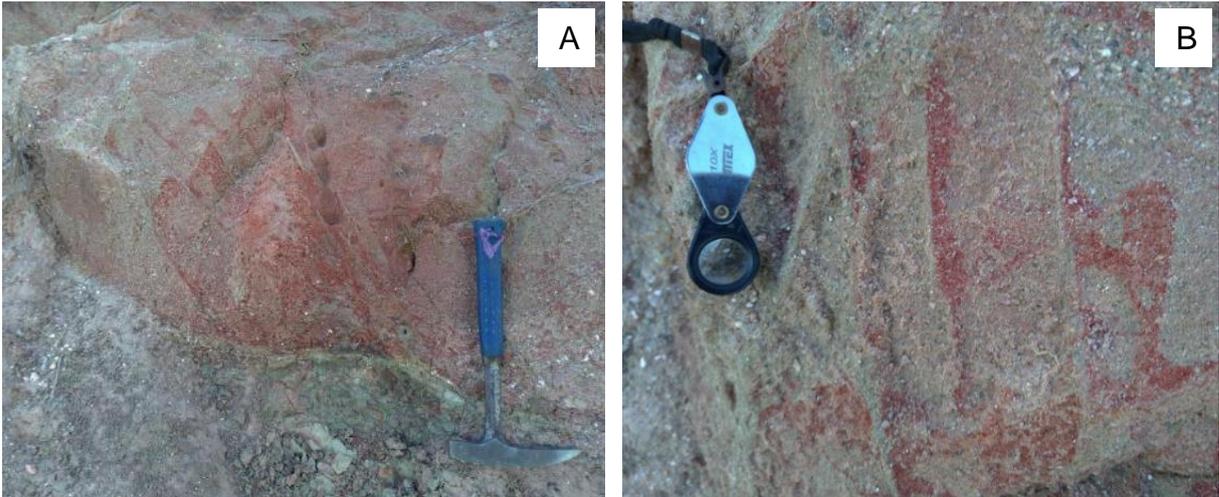


Figura 12 – A e B: Tingimento de pigmentação avermelhada associado às bandas de deformação.

Foi feita a coleta de um bloco (F1#4B) na região próxima à falha principal F1 (Figura 13), para descrição macroscópica e análise por meio de imagens de tomografia.



Figura 13 – A: Local de retirada da amostra F1#4B, na região do bloco abatido adjacente à falha F1. B: Visão em laboratório da amostra com orientação, escala e identificação expressas na fotografia.

A distinção entre elementos na imagem tomográfica, evidenciados pela escala de cores, permitiu a individualização de bandas de deformação ao longo de quase toda a extensão do bloco (Figura 14). Sua disposição é variável, sendo identificado o caráter amalgamado dessas estruturas, que se unem umas as outras em determinadas porções do material analisado. É interessante notar, também, como algumas das faixas de precipitados de óxidos/hidróxidos de ferro são destacadas na

imagem tomográfica, denotando, de fato, sua associação com a distribuição das faixas de bandas de deformação.

Faz-se menção também à identificação de uma concreção de óxidos/hidróxidos de ferro, destacada dos elementos anteriormente citados principalmente pela morfologia – formato elipsoidal. O material em seu interior – de composição caolinítica e coloração esbranquiçada – é assumido como uma evidência do contexto de formação das concreções observadas no afloramento, associadas a núcleos areníticos.

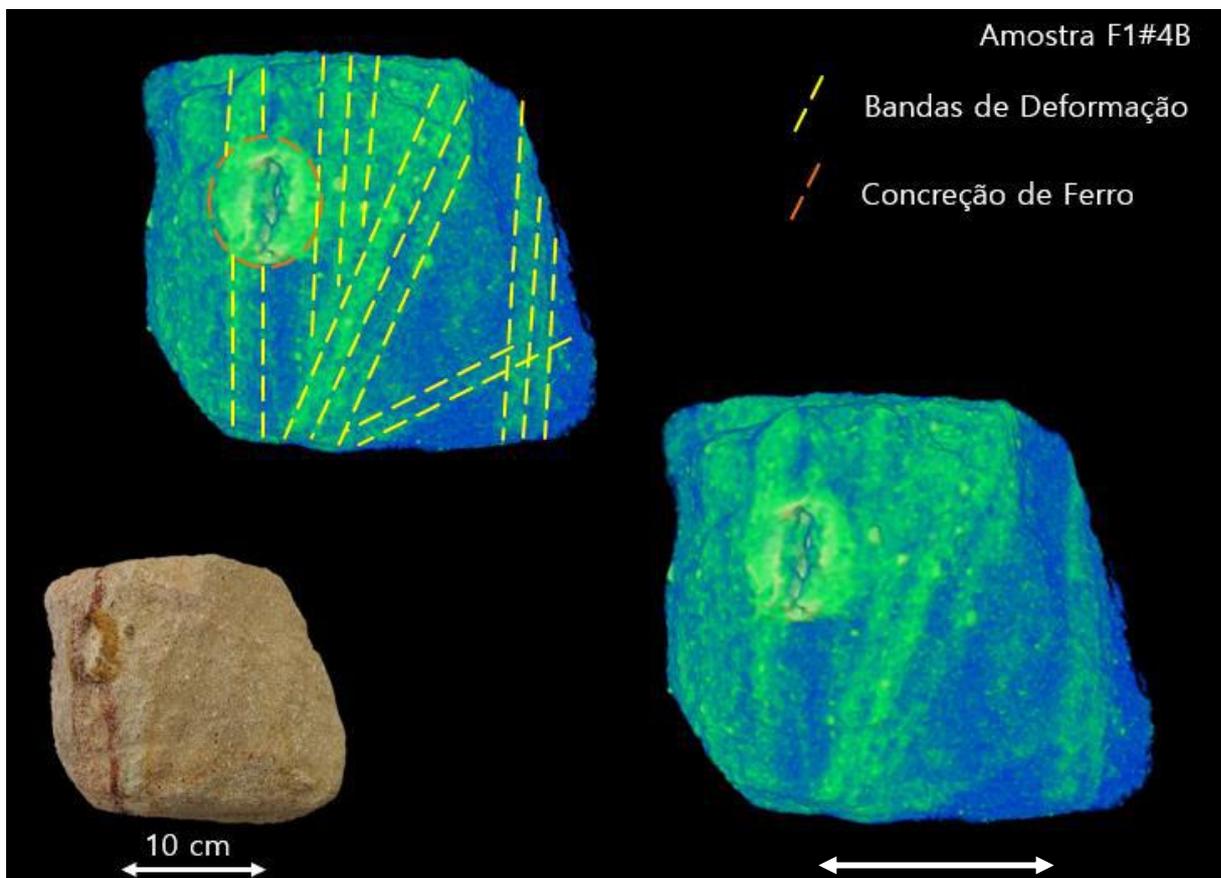


Figura 14 – Imagem tomográfica da amostra F1#4B, legendada conforme elementos observados.

A incorporação da lâmina petrográfica referente ao bloco F1#3A levou em consideração a análise petrográfica realizada por Thamirez Nascimento Bassi (2018), em projeto desenvolvido junto ao grupo de pesquisas do Cenozoico/UFRJ. Nessa, propõe-se a subdivisão do material em dez faixas distintas – numeradas em ordem crescente da direita para a esquerda – com base em uma diferenciação textural (Figura 15).

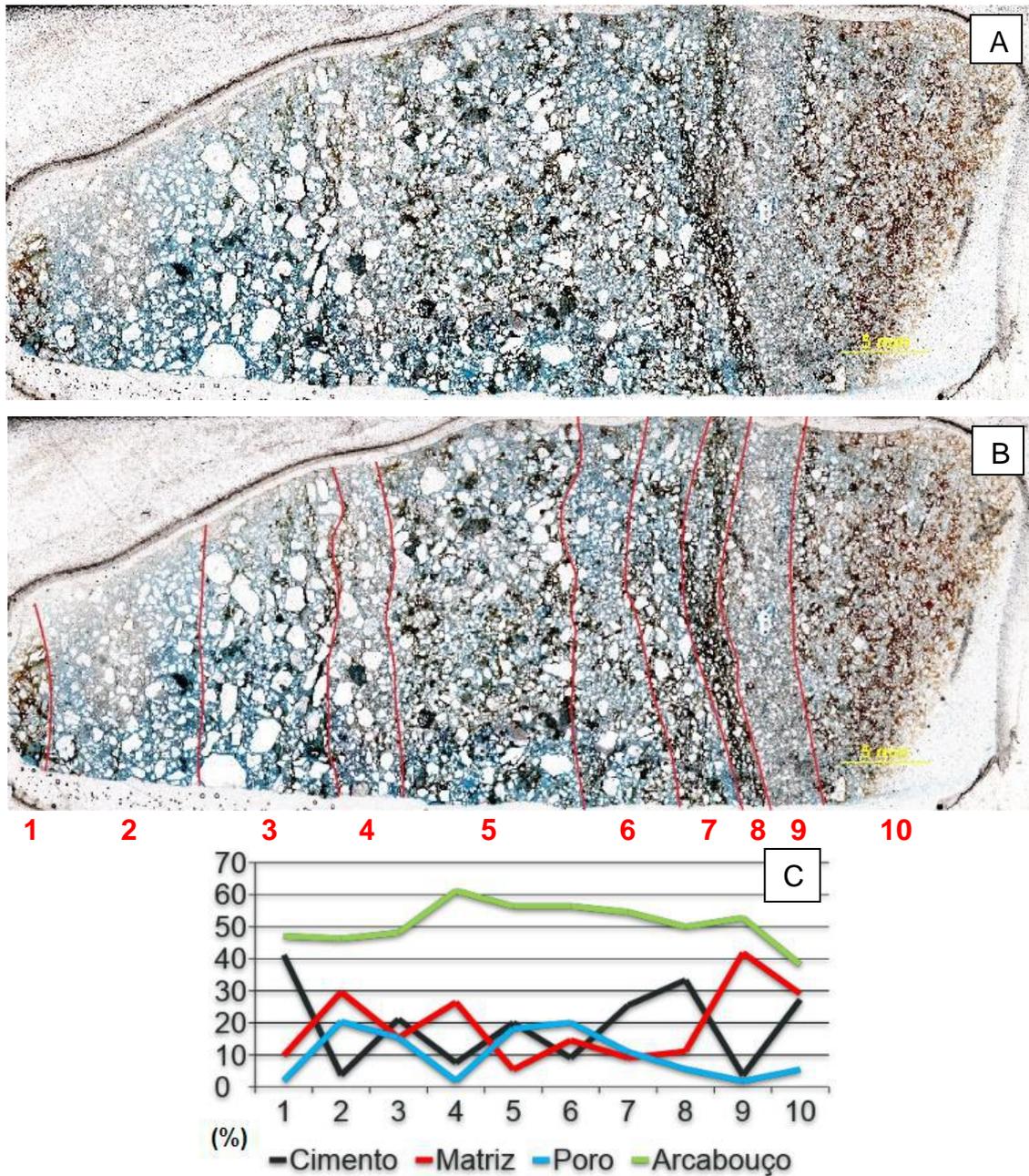


Figura 15 – A: Lâmina F1#3A. B: Delimitação de faixas ao longo da lâmina, a partir das variações texturais observadas. C: Quantificação do arcabouço, matriz, cimento e poro em cada faixa identificada (dados fornecidos por Thamirez Nascimento Bassi, 2018).

A quantificação dos aspectos texturais evidencia o condicionamento da formação de faixas de precipitados de óxidos/hidróxidos de ferro, com estrita associação à disposição e geometria das bandas de deformação adjacentes.

Esses elementos são formados no contexto de atuação de mecanismos de compactação e cominuição de grãos, responsáveis pela alteração das propriedades permoporosas de maneira localizada nos depósitos, como resposta à acomodação da deformação (Fossen *et al.*, 2007; Antonellini & Aydin, 1994). Tais variações texturais

– como a redução de porosidade e diminuição da granulometria nessas zonas – configuram essas faixas como efetivas barreiras para o fluxo de fluidos percolantes, de maneira a facilitar sua concentração e acumulação ao longo das extensões dessas estruturas.

5.1.3. Cimentação Concordante com os Limites de Camadas

Essa feição corresponde à presença de cimento de óxidos/hidróxidos de ferro de maneira restrita ao longo de contatos litológicos, delineando as limitações físicas entre estratos (Figura 16). As maiores intensidades dessa feição estão estritamente relacionadas com mudanças texturais bruscas, podendo haver a formação de massas mineralizadas que evidenciam o plano de contato, por vezes tornando seu relevo pronunciado e acentuando o produto da erosão diferencial.

Impregnações costumam ocorrer ao longo de contatos entre camadas com maior semelhança litofaciológica. Seu espectro de cores varia entre bases vermelhas claras a marrons acinzentadas.

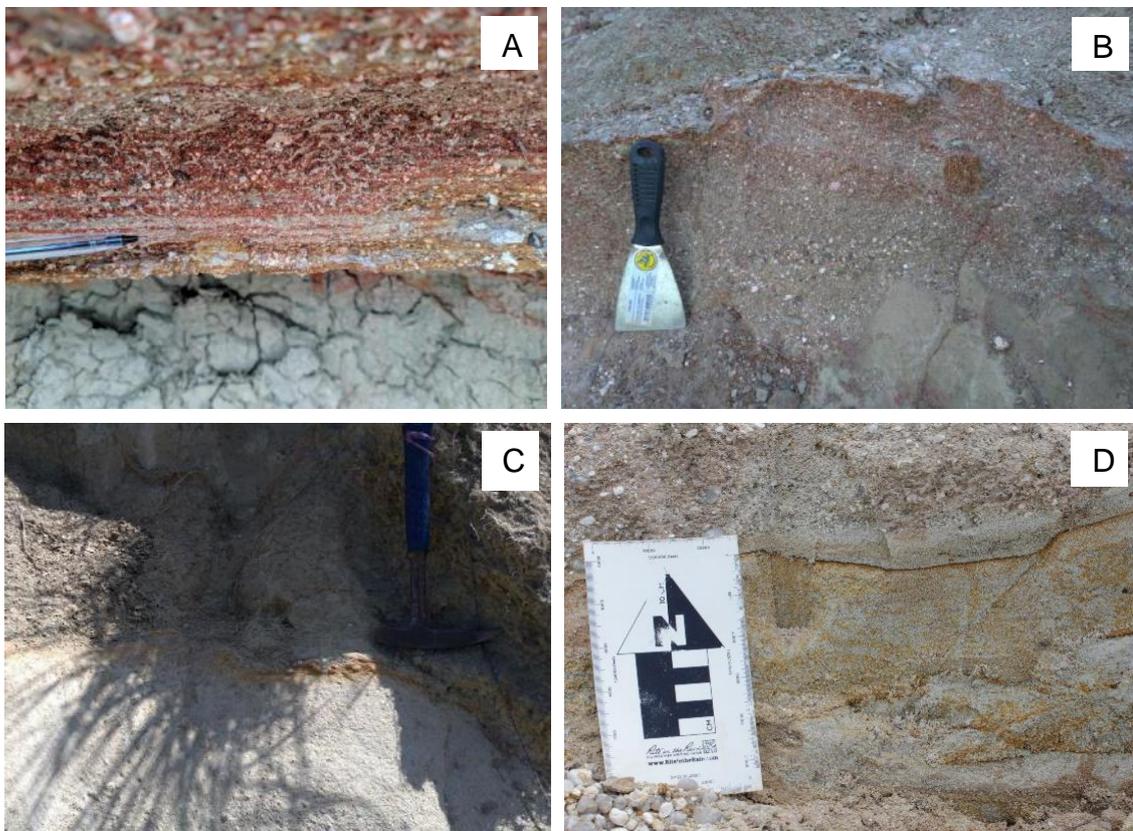


Figura 16 – Cimentação concordante com os limites de camadas. A e B: Cimentação pronunciada ao longo do contato entre materiais areníticos(A)/conglomeráticos(B) e pelíticos. C: Cimentação amarela avermelhada ao longo do contato entre camadas areníticas. D: Cimentação marrom ao longo do contato entre camadas areníticas adjacentes à falha F1.

Foi feita a coleta de um bloco (NOX#3) em uma região entre intervalos areníticos e pelíticos na porção superior do afloramento (Figura 17), onde foi identificada a formação de massa mineralizada ao longo do plano de contato, para a descrição macroscópica e análise por meio de imagens de tomografia.

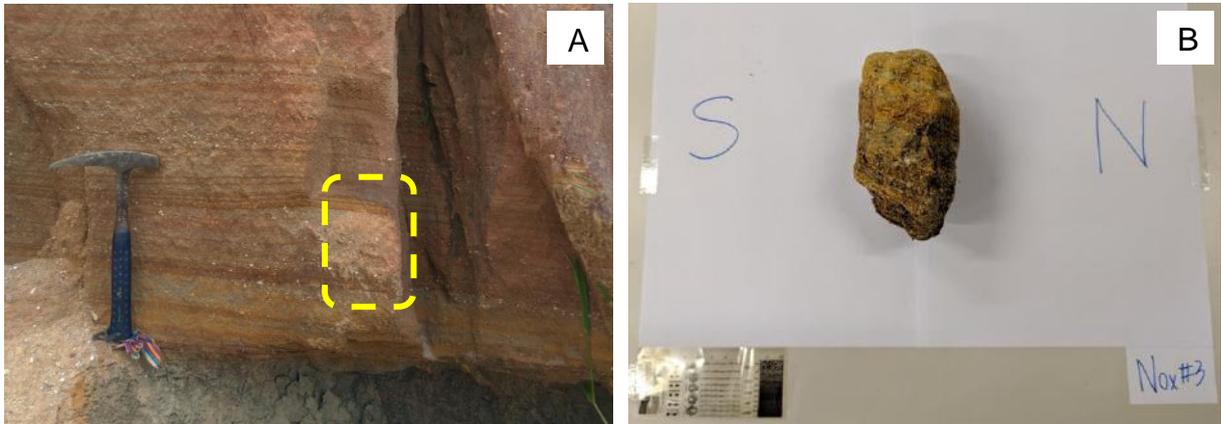


Figura 17 – A: Local de retirada do bloco NOX#3, em região onde foi possível observar a presença de cimentação concordante com o limite de camadas. B: Visão em laboratório da amostra com orientação, escala e identificação expressas na fotografia.

Pela construção em três dimensões do bloco e a utilização de escala de cores compatível com o que se propunha observar, puderam ser individualizados elementos como a atitude do acamamento sedimentar e a intensa cimentação por óxidos/hidróxidos de ferro na parte basal da amostra, disposta em dois planos paralelos a subparalelos à trama sedimentar (Figura 18). As massas mineralizadas compreendem a região do contato entre materiais areníticos – sobrepostos à cimentação, e pelíticos – sotopostos à cimentação, e não preservados devido à perda de integridade do material durante retirada, transporte e manuseio.

As alterações texturais provenientes da intercalação de pacotes rochosos caracterizados por diferentes parâmetros petrofísicos são fatores determinantes na tendência do fluxo advectivo dos fluidos, que interage fisicamente de maneira singular com cada camada. Pela Lei de Darcy, presume-se maior velocidade de escoamento em materiais areníticos porosos, com maior coeficiente de permeabilidade (k), ao passo que esse fluxo tende a ser reduzido, ou mesmo interrompido, ao experimentar encontro com as litologias finas em posição estratigráfica inferior – impermeáveis, com baixíssimo coeficiente de permeabilidade.

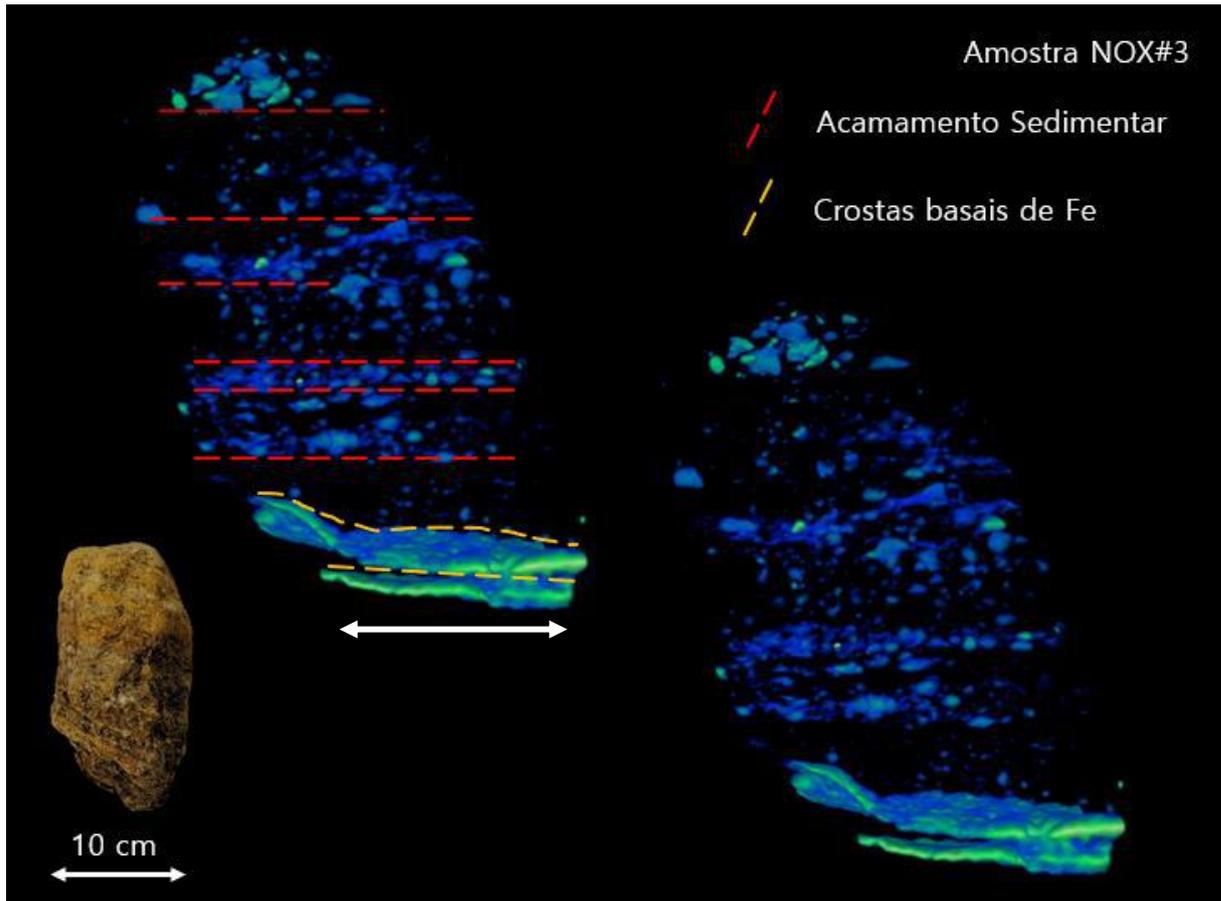


Figura 18 – Imagem tomográfica da amostra NOX#3, apresentando, em sua base, massa mineralizada referente à feição de cimentação concordante com os limites entre camadas.

Dessa maneira, ocorre um conjunto de condições que facilita a concentração e acumulação desses fluidos – rocha porosa sobreposta à barreira de fluido. A tendência se torna, então, uma mobilização com vetores que tendem à horizontalidade, paralelos a subparalelos ao plano que representa o contato litológico.

5.1.4. Cimentação Discordante dos Limites de Camadas

Essa feição é descrita como faixas contínuas de cimento de óxidos/hidróxidos de ferro, frequentes e dispostas paralelamente entre si (Figura 19). Não há variação expressiva dos parâmetros de dimensão – linhas de espessura milimétrica a, raramente, centimétrica; intensidade – aparecendo majoritariamente como impregnações; e cor – comumente ocorrendo em tons de base avermelhada a amarronzada.

A continuidade das faixas se caracteriza por seu arranjo ininterrupto ao longo do intervalo rochoso, sem apresentar condicionamento à geometria individual das camadas que compõem o pacote.

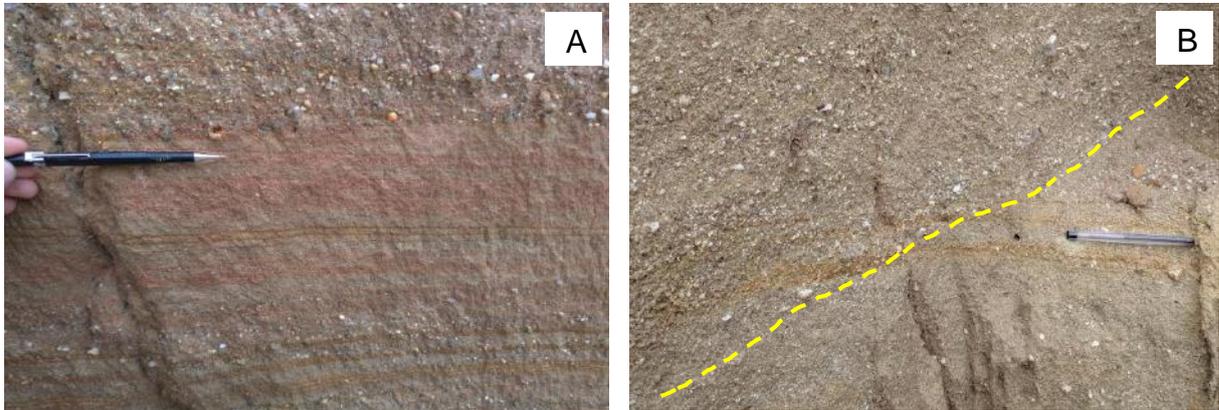


Figura 19 – Cimentação discordante com os limites de camada. A: Foto em detalhe, mostrando a configuração paralela a subparalela das bandas óxidos/hidróxidos de ferro. B: Destaque para a relação espacial de continuidade das bandas de ferro, mostrando independência em relação à geometria das camadas.

5.1.5. Tingimento Associado a Falhas

Essa feição pode ser caracterizada como uma precipitação bastante difusa de óxidos/hidróxidos de ferro, correspondendo a um tingimento dos depósitos de blocos adjacentes a falhas, que tende a colorir os materiais na qual se instala como uma cor de fundo (Figura 20).



Figura 20 – Tingimento dos depósitos do bloco soerguido adjacentes ao plano da falha F1.

Essa cor – observada em bases amarelas avermelhadas – tende a se tornar mais suave conforme se afasta do elemento estrutural ao qual se associa, exibindo uma graduação que reflete, também, a intensidade da precipitação.

5.1.6. Tingimento Associado à Trama Sedimentar

Essa feição estabelece relação entre o padrão de precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro e elementos associados às características faciológicas dos materiais em questão, nos quais a presença, ou ausência, de estruturas sedimentares é destacada (Figura 21).

Quando disposto em corpos maciços, o tingimento ganha uma característica similar a uma cor de fundo, sendo observado homogeneamente ao longo de toda a camada. Quando disposto em corpos estratificados, o tingimento pode ser observado seguindo o padrão geométrico geral das estratificações cruzadas, evidenciando a atitude de *foresets* e a limitação entre *sets*. Pôde-se também observar os precipitados ao longo de planos paralelos de litologias finas laminadas.

A intensidade dessa feição também se reflete em suas cores que, ainda que em tonalidades variadas, tendem a uma aparência suave, sendo descritas variações entre bases amareladas, rosadas e marrons pálidas.



Figura 21 – Camadas areníticas nas quais é possível identificar diferentes tonalidades da precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro associadas à trama sedimentar. Nesse caso, o *foreset* das estruturas cruzadas é delineado por cimentação avermelhada, e a cimentação associada aos limites entre *sets* por coloração amarela-avermelhada.

Foi feita a amostragem de um bloco (NOX#1) na região inferior do afloramento, na qual puderam ser identificados óxidos/hidróxidos de ferro associados a estratos cruzados (Figura 22), para a descrição macroscópica e análise por meio de imagens de tomografia.

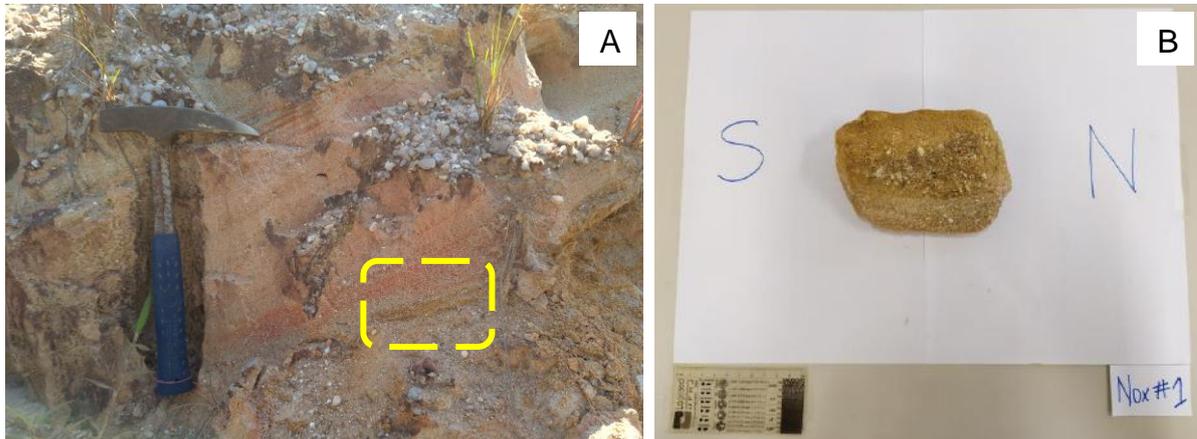


Figura 22 – A: Local de retirada do bloco NOX#1, em região na qual foi identificada a feição de tingimento associado à trama sedimentar. B: Visão em laboratório da amostra com orientação, escala e identificação expressas na fotografia.

Na imagem tomográfica (Figura 23), pôde-se observar a presença das estruturas sedimentares de maneira tridimensional, possibilitando a identificação de feições relativas à continuidade dessas ao longo do bloco coletado – feições de truncamento. A presença dos óxidos/hidróxidos de ferro ao longo desse elemento auxilia em seu realce.

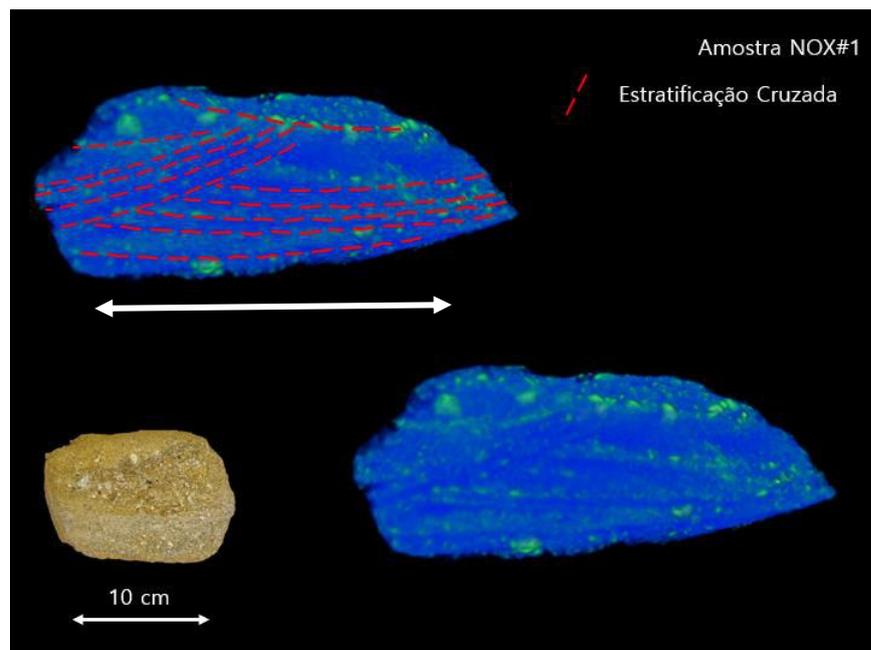


Figura 23 – Imagem tomográfica da amostra NOX#1, com estruturas internas do material evidenciadas pela disposição dos precipitados de óxidos de ferro.

Em outro bloco, coletado em intervalo arenítico na região superior do afloramento (Figura 24), pôde-se perceber similar relação de destaque entre a disposição dos óxidos/hidróxidos de ferro e das estruturas sedimentares.

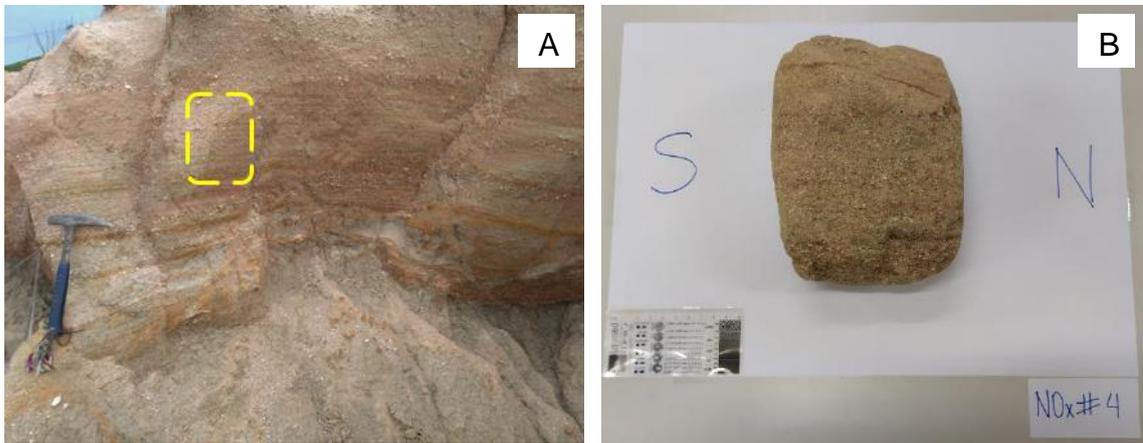


Figura 24 – A: Local de retirada do bloco NOX#4, na porção superior do afloramento, onde foi identificada relação entre os precipitados de óxidos/hidróxidos de ferro e as estruturas sedimentares dos depósitos. B: Visão em laboratório da amostra com orientação, escala e identificação expressas na fotografia.

Na construção tridimensional do bloco (Figura 25), puderam ser individualizados elementos associados à trama sedimentar, tais como estruturas cruzadas – associadas ao topo da amostra – e o paralelismo do acamamento – ao longo do restante do material.

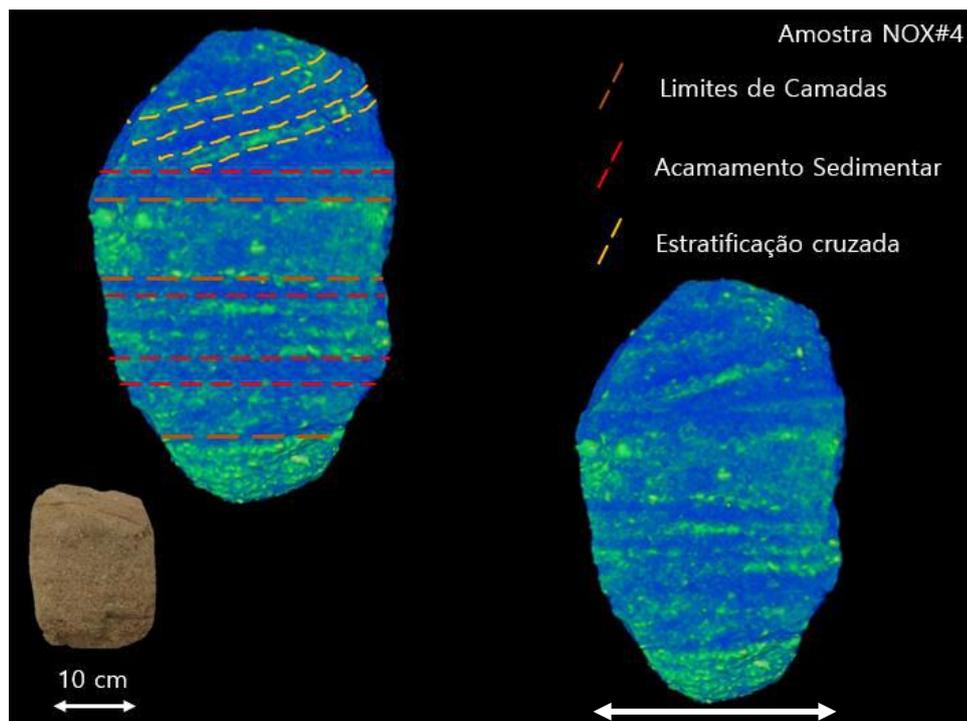


Figura 25 – Imagem tomográfica do bloco NOX#4. As estruturas sedimentares estão evidenciadas pelos precipitados.

Estruturas sedimentares – como estratificações cruzadas e laminações plano-paralelas – compreendem um arranjo geométrico sedimentar composto por distintas superfícies deposicionais. As limitações físicas dessas porções, representam, essencialmente, planos no espaço tridimensional. A nível textural, há a tendência da formação de corredores de maior porosidade associadas a esses elementos, como resposta à maior conectividade entre poros decorrente da existência de uma superfície limitante (Miall, 1996). Como a tendência do fluxo advectivo está diretamente relacionada a uma maior velocidade de escoamento, fluidos percolantes se beneficiam de tais zonas – tomando-as como preferenciais no arranjo geométrico em questão e passando a ditar um *trend* comportamental que favorece a concentração das águas meteóricas (ricas em ferro) ao longo desses limites sedimentares. Esse comportamento não é observado apenas em vetores verticalizados, tendo em vista que, a exemplo das laminações plano-paralelas tingidas ao longo de litologias finas, presume-se o aproveitamento de superfícies limitantes também por fluxos laterais, reiterando a anisotropia dessa propriedade no que diz respeito à existência de uma permeabilidade horizontal, também a ser considerada.

No caso de corpos maciços, presume-se a ausência desse tipo de superfície limitante. Dessa forma, um comportamento mais homogêneo do fluido ao longo da camada é esperado.

5.1.7. Bandas de Liesegang

Anéis de *Liesegang* fazem referência à ocorrência de um padrão espacial de cimentação em faixas concêntricas, descritas como o produto da precipitação periódica/regular de óxidos/hidróxidos de ferro (Balsamo *et al.*, 2013). Essas bandas minerais foram descritas como impregnações de coloração variando entre tons avermelhados a amarronzados (Figura 26). Suas espessuras costumam se restringir à ordem dos milímetros, apresentando mudanças em sua continuidade a depender da geometria e dimensão do conjunto de anéis.

Foi feita a coleta de uma amostra (F1#5B) na região do bloco abatido adjacente à falha principal F1 (Figura 27), representativa da feição de maior complexidade, para a descrição macroscópica e análise por meio de imagens de tomografia.

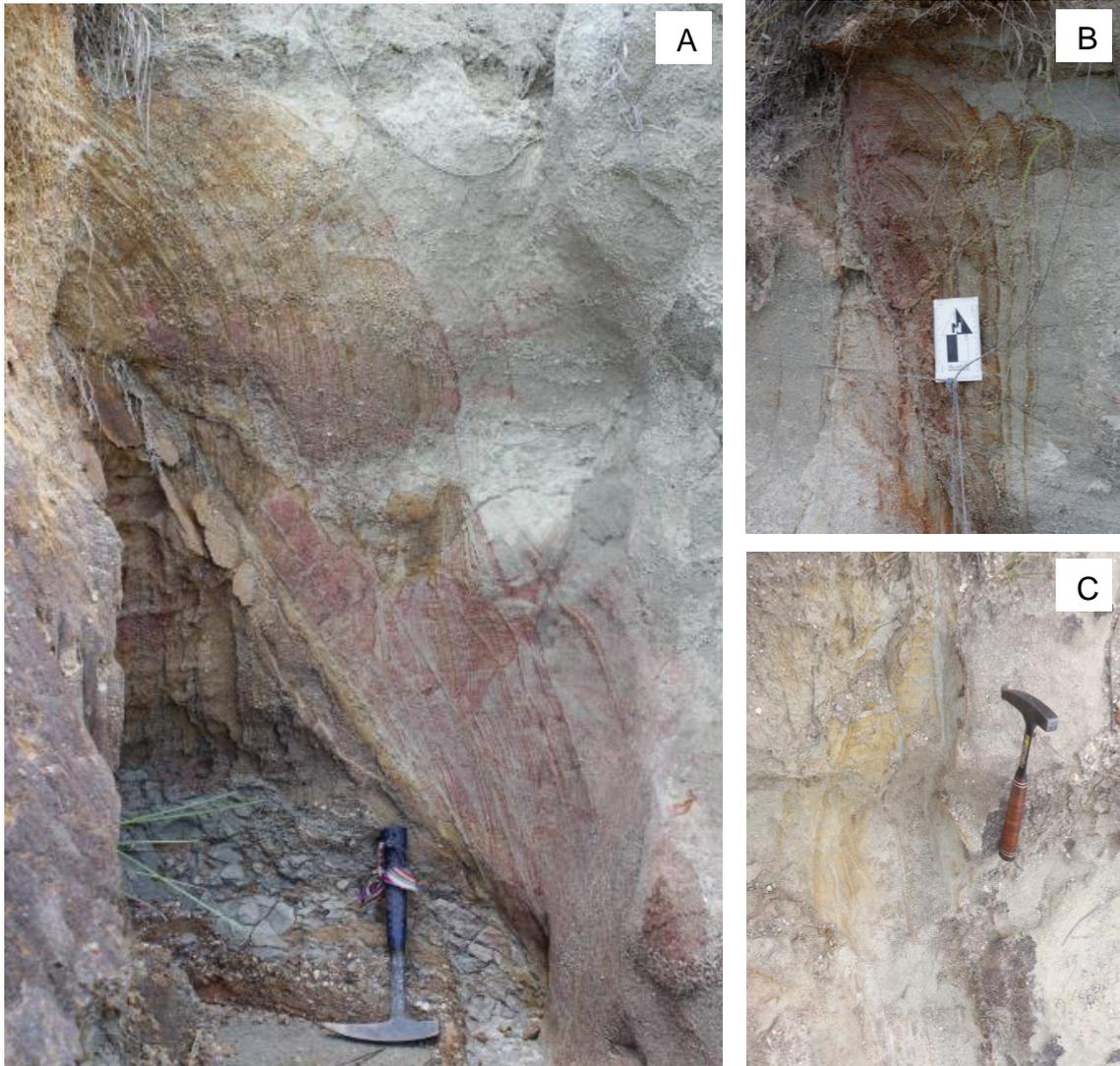


Figura 26 – A: Bandas de Liesegang, formadas sob contexto de retardo do fluxo, mostrando, ainda, associação espacial com uma faixa de bandas de deformação. B e C: Bandas de Liesegang de menor proporção, observadas em outras porções do afloramento estudado.

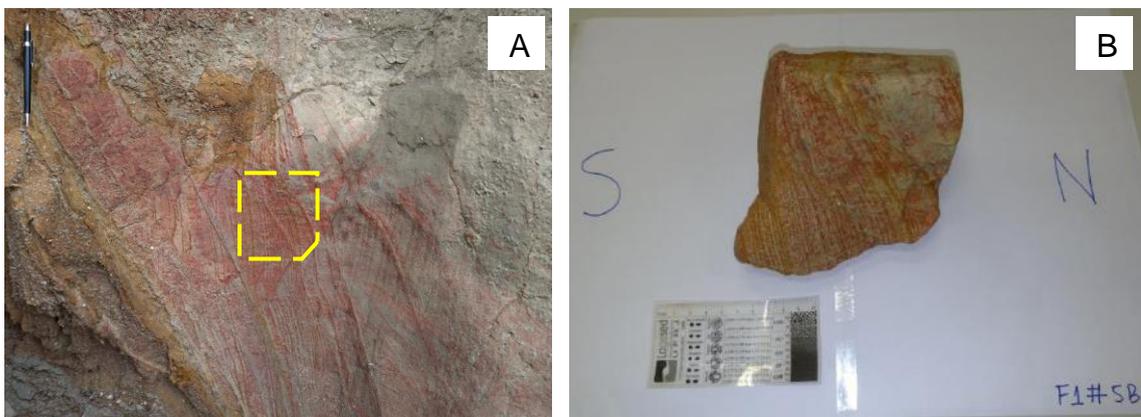


Figura 27 – A: Local de retirada do bloco F1#5B, nas adjacências da falha F1, onde foi observada uma zona de bandas de Liesegang. B: Visão em laboratório da amostra com orientação, escala e identificação expressas na fotografia.

Por meio da imagem tomográfica (Figura 28), é possível individualizar as bandas de óxidos/hidróxidos de ferro e entender sua disposição ao longo do bloco. São evidenciadas sua atitude verticalizada e o espaçamento regular entre os anéis, reiterando o caráter rítmico de seu mecanismo de formação. Com o padrão de densidade evidenciado pela escala de cores, é possível, ainda, identificar a presença de uma faixa de banda de deformação, mais espessa e irregular quando comparada aos anéis. O acamamento sedimentar do material também pode ser observado pelas feições horizontalizadas dispostas ao longo do bloco, especialmente em sua região inferior.

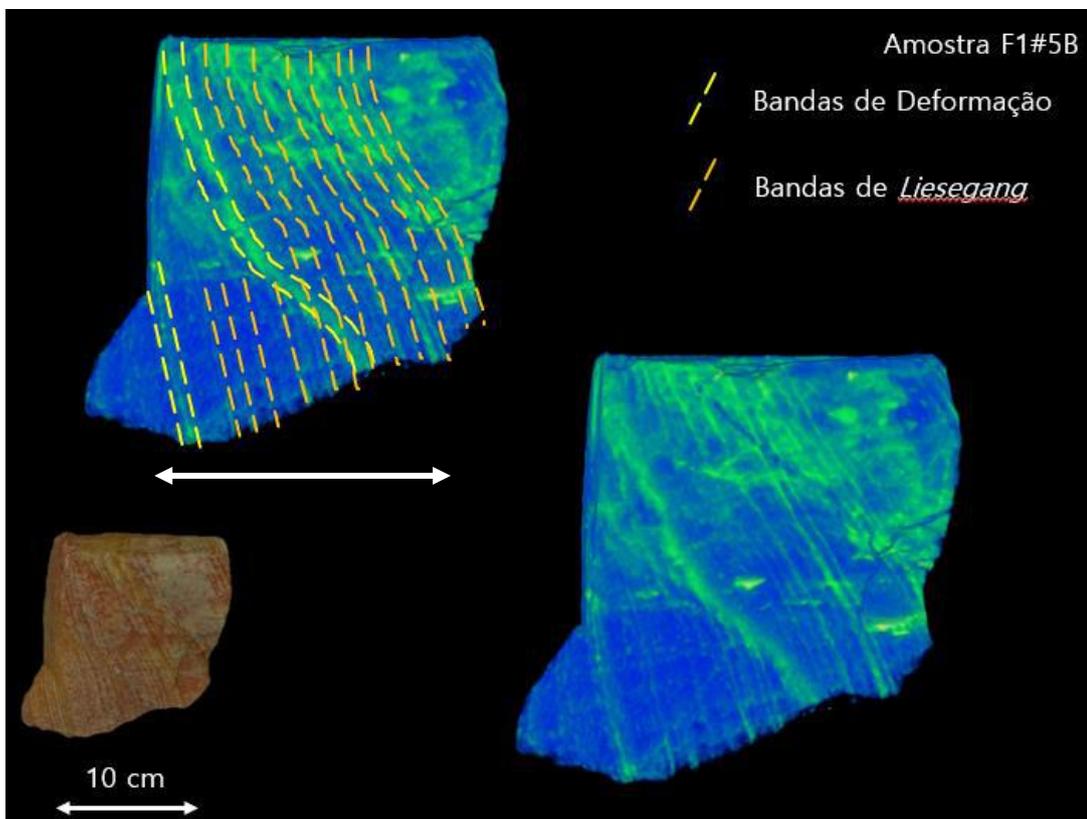


Figura 28 – Imagens tomográficas da amostra F1#5B, apresentando a relação das Bandas de Liesegang com a presença de banda de deformação e o acamamento sedimentar.

A descrição petrográfica da lâmina confeccionada permite observar em maior escala de detalhe o arranjo de elementos tectônicos, sedimentares e diagenéticos compreendido por esses materiais (Figura 29). Primeiramente, faz-se referência à presença de uma falha, identificada devido à brusca mudança granulométrica nas regiões adjacentes à essa estrutura linear. Nota-se uma acumulação de precipitados de óxidos/hidróxidos de ferro ao longo dessa, evidenciando-a e interrompendo o padrão de continuidade dos anéis – caracterizados, no material em questão, como elementos verticalizados e delgados.

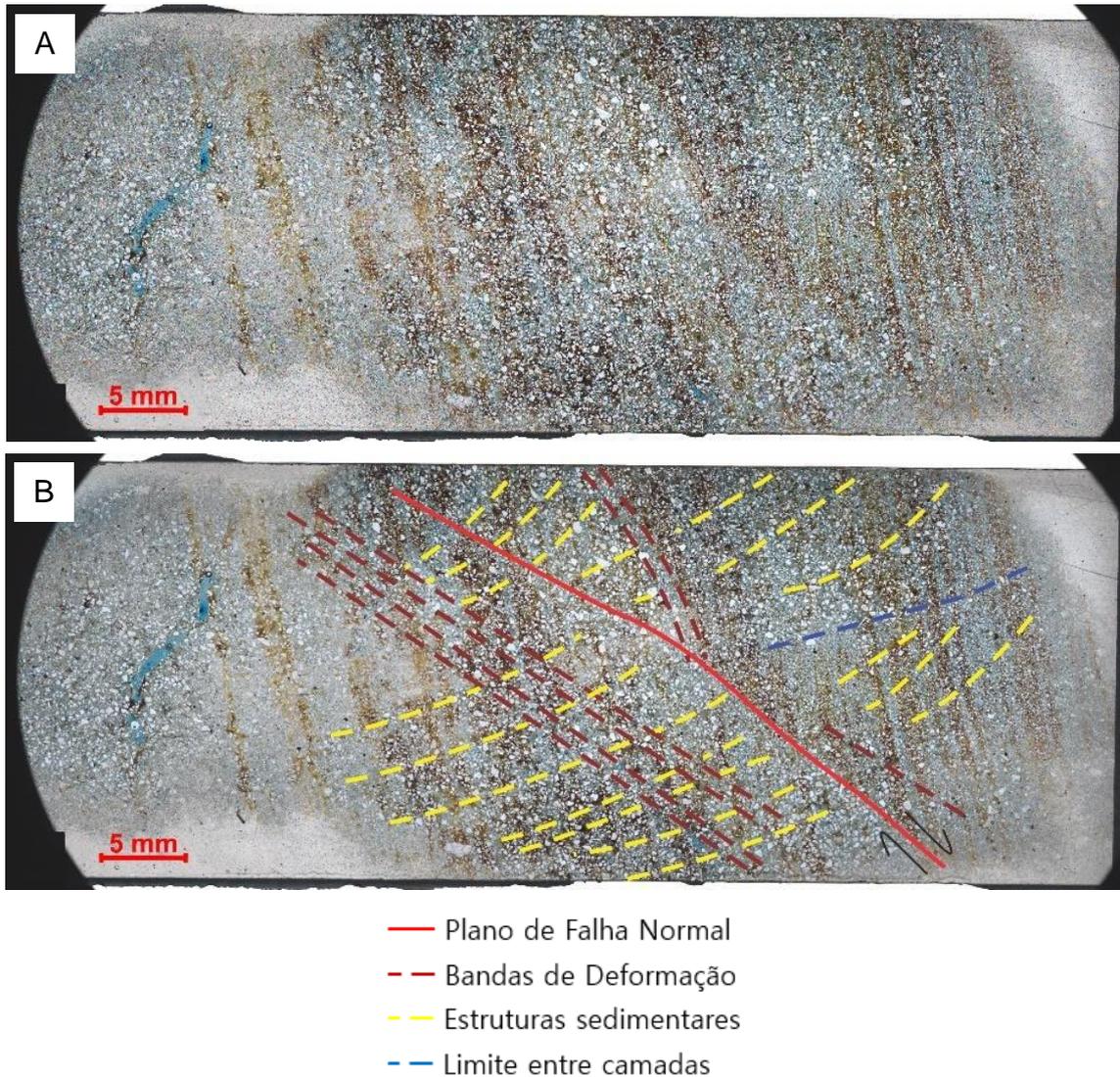


Figura 29 – A: Imagem de scan da lâmina F1#5B.I, relacionada às bandas de Liesegang observadas; B: Feições e estruturas interpretadas na lâmina.

O mecanismo preciso de formação dos anéis de *Liesegang* ainda não é completamente conhecido e replicável, havendo diversas vertentes de pesquisa que tratam da evolução desse modelo sob distintas condições físico-químicas. Hoje, a teoria de formação mais aceita/disseminada para esse tipo de feição de precipitação é o ciclo de supersaturação de Ostwald (Duley *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2012). Quando o mecanismo principal de transferência de massa atuante deixa de ser a advecção, a difusão de reagentes inicia um processo de nucleação de cristais, a fim de reduzir o nível de supersaturação do fluido estagnado por meio desses precipitados insolúveis. Dessa forma, há a localização da cristalização em determinadas faixas, ao passo que regiões adjacentes às mineralizações iniciais iniciam o processo de depleção, cedendo íons para o *front* reativo (Silva, 1989; Giovannini, 2013).

Para o presente estudo, a informação mais relevante no que diz respeito ao entendimento da existência dessas estruturas nos depósitos estudados é o fato da condição de desencadeamento do processo de formação de anéis se dar, necessariamente, em meios que apresentam saturação de fluidos. Segundo Balsamo *et al.* (2013), um fator determinante para a criação de um sistema físico-químico favorável à precipitação dos anéis é o retardo dos fluidos percolantes ao longo de determinadas regiões dos depósitos.

Essas feições se associam às zonas nas quais ocorre a ação conjunta da configuração de elementos estruturais, como falhas, e texturais, como litologias com alta porcentagem de matriz associada – matriz essa que, na perspectiva do processo, pode ser oriunda de alterações diagenéticas ou não. Propõe-se que, nesse contexto, as fácies lamosas – por suas características permoporosas – representariam obstáculos ao fluxo de fluidos proveniente de regiões preferenciais de escoamento (planos de falha), culminando em sua subsequente estagnação (ou redução considerável da velocidade de escoamento) e dando início ao processo de cristalização em anéis concêntricos, insolúveis, cujo *front* de reação acompanha a morfologia da feição.

5.1.8. Concreções

As concreções ferruginosas observadas consistem, essencialmente, no resultado da acumulação do cimento de óxidos/hidróxidos de ferro no entorno de um núcleo arenítico, formando massas com diâmetro de até 5 cm e coloração majoritariamente amarelo-avermelhada a marrom (Figuras 13 e 14). O padrão geométrico dessa feição é esferoidal, podendo atingir formato quase esférico ou mais alongado, a depender da evolução da feição.

O estudo desses elementos traz consigo importantes evidências para a discussão dos mecanismos de transferência de massa (mobilização e precipitação de ferro) atuantes nos materiais em questão, além de informações para a discussão sobre condições paleoambientais associadas à variação de parâmetros físico-químicos do sistema, como pH, atividade bacteriana e condições de oxidação (Parry, 2011; Potter & Chan, 2011).

5.2. ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DAS FEIÇÕES DE PRECIPITAÇÃO DE ÓXIDOS/HIDRÓXIDOS DE FERRO

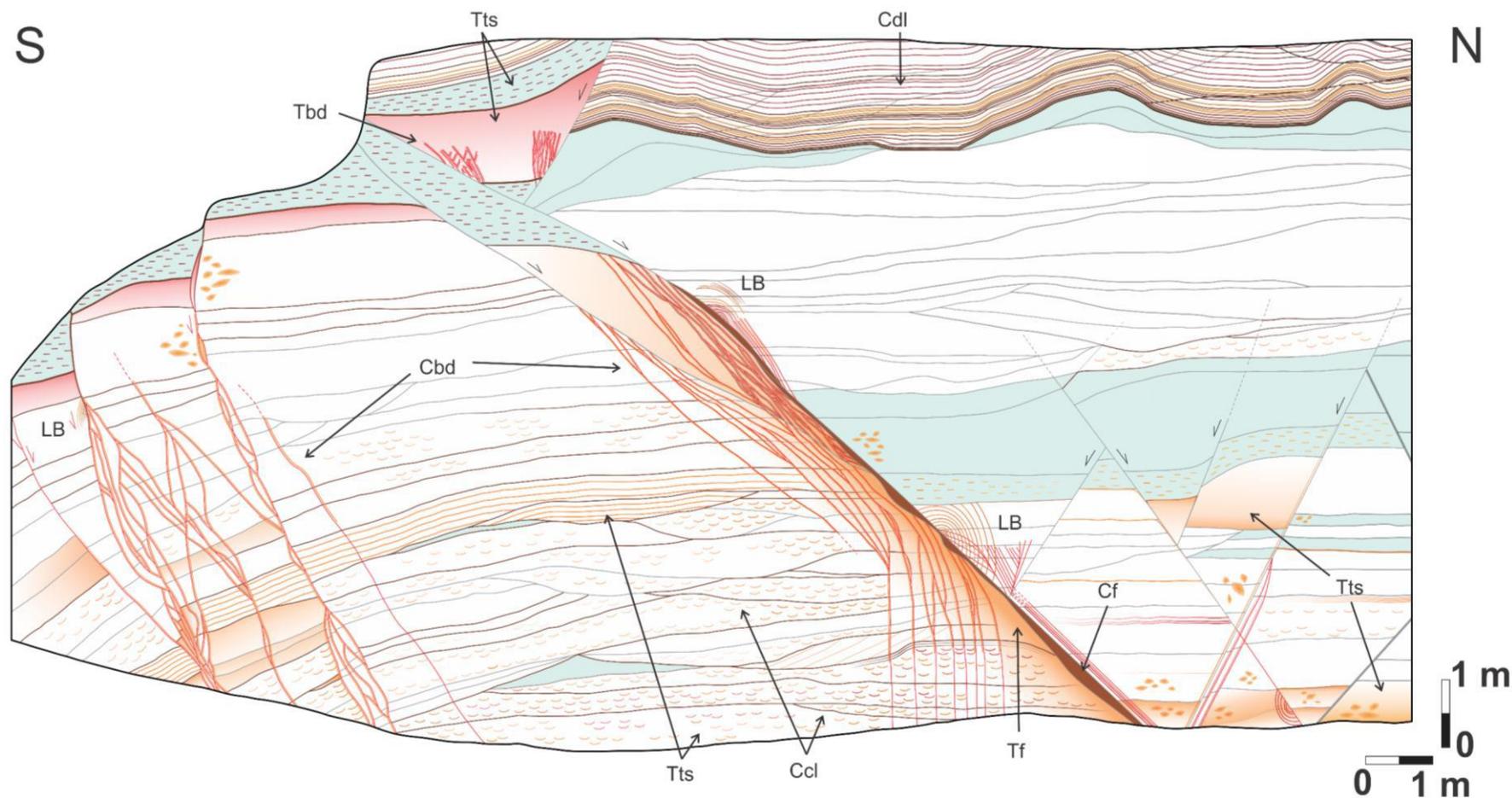
As relações espaciais entre as feições de precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro reconhecidas e os elementos estruturais e sedimentares presentes no afloramento investigado estão expressas na seção geológico-estrutural confeccionada em escala 1:50 (Figura 30) e serão discutidas a seguir.

Na falha principal (F1), de maior hierarquia na arquitetura estrutural da porção do afloramento estudada, foram descritas as expressões mais relevantes, com massas mineralizadas de óxidos/hidróxidos de ferro dispostas ao longo desse elemento, formando feições de espessuras variando entre 5 e 10 cm.

Em falhas de menor dimensão, distribuídas ao longo de todo o afloramento, pôde-se perceber variações na intensidade da precipitação, ora como impregnações que evidenciam esses elementos, ora como tingimentos que salientam a presença das estruturas sem necessariamente cimentá-las.

Zonas de falha são essencialmente heterogêneas em arenitos pouco consolidados, apresentando compartimentos em sua arquitetura caracterizados por texturas e conjuntos de estruturas distintos (Minor & Hudson, 2006; Choi *et al.*, 2016). Balsamo *et al.* (2013) tratam essas zonas como barreiras e/ou condutoras do fluxo de fluidos, a depender dessa configuração.

O padrão de ferruginização observado é uma forte evidência da ação condutora da falha F1, levando em consideração a localização da precipitação ao longo de sua extensão. A concentração elevada de óxidos/hidróxidos de ferro nesse plano, em relação às regiões adjacentes, configura o trecho como preferencial para a convergência do escoamento dos paleofluidos. Entende-se que os processos físicos associados à movimentação da falha, como catástrofe e rearranjo de grãos, alteraram a textura das rochas, de modo a promover uma configuração de propriedades petrofísicas favorável à acumulação desses fluidos.



Legenda de Códigos

Cf - Cimentação Associada a Falhas
 Cbd - Cimentação Associada a Bandas de Deformação
 Ccl - Cimentação Concordante com os Limites de Camada
 Cdl - Cimentação Discordante dos Limites de Camada
 Tf - Tingimento Associado a Falhas
 Tbd - Tingimento Associado a Bandas de Deformação
 Tts - Tingimento Associado à Trama Sedimentar
 LB - Bandas de Liesegang

Coloração do Cimento de Fe

 Grupo de Tonalidades - Marrom
 Grupo de Tonalidades - Amarelo Avermelhado
 Grupo de Tonalidades - Vermelho

Estruturas

 Falhas normais
 Bandas de deformação
 Trama sedimentar

Litologias em destaque

 Siltitos e argilitos
 Arcabouço arenítico a conglomerático

Figura 30 – Seção geológico-estrutural com informações acerca dos padrões reconhecidos de precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro.

Nos arenitos do bloco alto da falha principal F1, nas proximidades dessa estrutura, são reconhecidas feições de tingimento associado a falhas. Entende-se o contexto de formação como associado a uma configuração hidrogeológica na qual o elemento estrutural atuaria como uma barreira para a movimentação global dos fluidos percolantes, ocasionando a sua concentração. Os depósitos areníticos, porosos, facilitariam a acumulação do material por meio da precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro nos vazios intergranulares. Como não ocorrem reações entre fluidos, apenas a concentração de um fluido meteórico, rico em ferro, a precipitação se dá de maneira generalizada, não havendo uma frente reativa específica. O padrão de tingimento gradacional aponta para regiões de maior acúmulo junto à barreira estrutural, nas quais a disponibilidade de íons em solução é maior.

Na região do bloco soerguido adjacente à falha principal F1 destaca-se uma série de faixas de bandas de deformação associadas a essa estrutura de maior hierarquia. Nessa porção, foi descrita a maior intensidade das feições de cimentação associada a bandas de deformação, caracterizadas pela presença de massas mineralizadas ao longo dessas faixas, apresentando espessura entre 1 e 3 cm, relevo positivo e coloração marrom forte a amarela avermelhada. Em outras regiões, foram observadas intensidades menores para a precipitação de óxidos/hidróxidos associados a esses elementos, destacando-se zonas de bandas de deformação localizadas na porção mais ao sul do afloramento investigado.

Na região superior do afloramento, foram descritas as feições de tingimento associado às bandas de deformação. O aspecto da precipitação é bastante difuso e se estende por alguns centímetros de maneira irregular, apresentando coloração suave, comumente vermelha fraca.

Em porções dos depósitos estudados nas quais ocorrem contatos entre intervalos areníticos e pelíticos, especialmente na região superior do afloramento, pôde-se mapear, de maneira proeminente, feições de cimentação concordante com os limites de camadas, como massas mineralizadas de coloração vermelha a marrom acinzentada. Como já discutido, essa feição está relacionada ao controle exercido pelas variações texturais no fluxo de fluidos, com a concentração e acumulação desses fluidos na rocha arenítica porosa sobreposta à barreira de fluido (rocha pelítica).

Essa feição também aparece associada a outras feições de precipitação, como na evidência de contatos litológicos deslocados por conjuntos de falhas escalonadas,

onde tanto os planos de contato quanto os de falha são impregnados por óxidos/hidróxidos de ferro, de cor amarelo avermelhado a marrom. Ao longo de contatos entre camadas areníticas, essa feição ocorre como uma leve impregnação de coloração amarela avermelhada a amarela clara. De maneira contrastante, os intervalos areníticos próximos à falha principal F1 exibem um aumento da porcentagem de cimento associado, que adquire aspecto similar ao de massas mineralizadas e coloração marrom forte.

Faixas contínuas de cimento de ferro discordantes dos limites de camadas também foram encontradas ao longo do intervalo arenítico na porção superior do afloramento estudado, sobreposto a uma sucessão de litologias finas. Admite-se o mesmo mecanismo hidrogeológico de formação interpretado para a cimentação concordante com os limites de camada, sendo as variações sazonais, intensificadas pelo acúmulo de fluidos em uma região de barreira estratigráfica, o principal mecanismo ao qual se pode associar a formação dessa feição. Essas feições representam, dessa forma, o produto de um *front* de reação associado à zona do sistema físico-químico que delimita o contato entre fluidos da região vadosa, ricos em íons de ferro e descendentes, conforme fluxo advectivo, e da região saturada nesse pacote, oxigenados, associados ao nível do lençol freático.

Feições de tingimento associado à trama sedimentar estão presentes ao longo de todo o afloramento estudado, com intensidades do tingimento variáveis de acordo com a posição das camadas em relação à arquitetura deposicional e estrutural. A concentração maior dos precipitados e colorações mais fortes ocorrem em regiões adjacentes à falha principal F1 e em intervalos associados às zonas de barreiras estratigráficas para fluidos percolantes anteriormente mencionadas.

Bandas de *Liesegang* puderam ser observadas em algumas regiões do afloramento, sempre associadas às falhas e determinadas litologias com características texturais como o maior variabilidade granulométrica (menor grau de seleção). A feição de maior dimensão, localizada em um intervalo arenítico lamoso adjacente à falha principal F1, apresenta relação com uma diversidade de falhas de menor hierarquia e bandas de deformação, configuração que torna o entendimento de seus mecanismos de formação e evolução ainda mais complexo.

As concreções foram observadas pontualmente, somando não mais que cinco massas concrecionadas identificadas, fator que, somado à escala dessas feições, não

permitiu seu estudo detalhado, tampouco sua inserção na seção geológico-estrutural elaborada na escala 1:50.

5.3. FASES DE INTERAÇÃO ROCHA-FLUIDO E FEIÇÕES DE PRECIPITAÇÃO DE MINERAIS DE FERRO ASSOCIADAS

A gama de intensidades e colorações associadas às feições de precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro foi tida, em um primeiro momento, como uma indicação principal da existência de múltiplas fases de interação rocha-fluido. Essa abordagem é amplamente utilizada em estudos que investigam a formação de mineralizações do tipo *gossan* e/ou ferro laterítico (Yesares *et al.*, 2017; Velasco *et al.*, 2013; Andreu *et al.*, 2014).

Nesse sentido, ainda que uma diferença essencial se ponha quando analisados os contextos da precipitação de minerais de ferro em questão, considerando o tipo de geomaterial hospedeiro (depósitos metálicos) e os processos físico-químicos atuantes, deve-se reconhecer que ambos os parâmetros descritivos (nuances de cores e grau de efetividade da cimentação) tendem a demonstrar relação com fases de precipitação, substituição e reprecipitação mineral.

Essa ótica é adotada, por exemplo, por Balsamo *et al.* (2013), para discutir a ocorrência de processos dessa natureza em uma investigação ambientada em condições similares às do presente estudo: geomateriais sedimentares (siliciclásticos, pouco consolidados e intensamente deformados) apresentando precipitação de minerais de ferro ocasionada por interações com fluidos meteóricos. No caso abordado pelos autores, pode-se observar que a individualização de feições mais “jovens” está fundamentada em aspectos descritivos, essencialmente visuais, e a teoria para a existência desses precipitados, por sua vez, é pautada no mecanismo de reprecipitação de fases minerais, por influência da reinserção de fluidos meteóricos, em momento relativamente tardio, no sistema em questão.

O desenvolvimento de hipóteses nessa direção requer extenso esforço metodológico voltado à caracterização mineralógica e modelagem de evolução geoquímica do sistema, a fim de comprovar, ou não, a existência de disparidades e/ou relações químicas entre as supostas fases minerais.

Em etapa prévia ao desenvolvimento dos referidos estudos laboratoriais, o presente trabalho aborda um primeiro passo rumo à caracterização de fases de

precipitação de ferro nos depósitos estudados da Formação Resende. A proposta de um sumário de fases de precipitação mineral, discutida neste item, está baseada, essencialmente, nos arranjos das feições descritas nos materiais em questão, observados durante as atividades de campo e refletidos na seção geológico-estrutural elaborada.

Os aspectos descritivos anteriormente apresentados serão, a seguir, contextualizados em escala temporal relativa e sob perspectiva espacial integrada.

5.3.1. Sumário de Fases de Interação Rocha-Fluido

A proposta aqui apresentada de padrões de interação rocha-fluido específicos para momentos da evolução do sistema hidrogeológico estudado considera, em primeira instância, uma relação de subordinação entre elementos e suas respectivas influências, sob a ótica da mecânica de fluidos. A sumarização dos estágios propostos considera a existência de, ao menos, três momentos evolutivos: t^n , t^{n+1} e t^{n+2} (Quadro 2).

Quadro 2 – Sumário de fases de interação rocha-fluido. É abordada, de maneira esquemática, a proposta de três momentos distintos na evolução hidrogeológica do sistema, nos quais a formação de feições sofre influência majoritária de determinados elementos da arquitetura estrutural e litofaciológica do afloramento estudado.

Tempo	Principal(is) Controlador(es)	Elemento(s)	Principal(is) Feição(ões) de Precipitação de Óxidos/Hidróxidos de Ferro Associada(s)	Interpretação Evolutiva
t^{n+2}	Litofácies areníticas (alto % de componentes central do bloco abatido)	pelíticas e/ou mal-selecionadas de argilas do intervalo	Cimentação Discordante dos Limites de Camadas (Cdl) + Bandas de Liesegang (LB)	A formação de novas feições é motivada pela ocorrência de processos de reprecipitação de fases minerais - ocasionada por mecanismos de reinserção e acúmulo de fluidos no sistema, especialmente na porção superior do afloramento
t^{n+1}	Estruturas rúpteis de menor hierarquia e litofácies		Tingimento Associado a Falhas (Tf) + Cimentação Associada a Bandas de Deformação (Cbd) + Cimentação Concordante com os Limites de Camadas (Ccl) + Tingimento Associado à Trama Sedimentar (Tts)	O padrão de percolação de fluidos passa a ser majoritariamente influenciado pelas características internas dos blocos delimitados pela falha F1 (estruturas rúpteis de menor hierarquia estrutural, aspectos texturais e arranjo geométrico de litofácies), além de feições de cimentação por óxidos/hidróxidos de ferro formadas em momento pretérito (Cf e Cbd). Também pode ser cogitada, nesse momento, a formação de feições de precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro na região superior do afloramento
t^n	Falha normal principal (F1) e zona de bandas de deformação adjacente		Cimentação Associada a Falhas (Cf) + Cimentação Associada a Bandas de Deformação (Cbd)	Concentração de fluxo e acumulação de fluidos percolantes majoritariamente associada ao núcleo da falha F1 e, possivelmente, ao conjunto de bandas de deformação associado. Pode-se cogitar, também, a influência das zonas de bandas de deformação ao sul no processo de mobilização de fluidos nessa fase evolutiva

No momento t^n (Figura 31), entende-se que o papel de principal condutor (e acumulador) da percolação foi desempenhado pelo elemento de maior hierarquia estrutural observado: a falha F1, considerando sua ação-chave no rompimento da homogeneidade coesiva dos depósitos em questão. Na escala do afloramento, reitera-se o fato de que o maior grau de efetividade de cimentação descrito está associado à feição “Cimentação Associada a Falhas (Cf)”, observada ao longo do plano da falha F1.

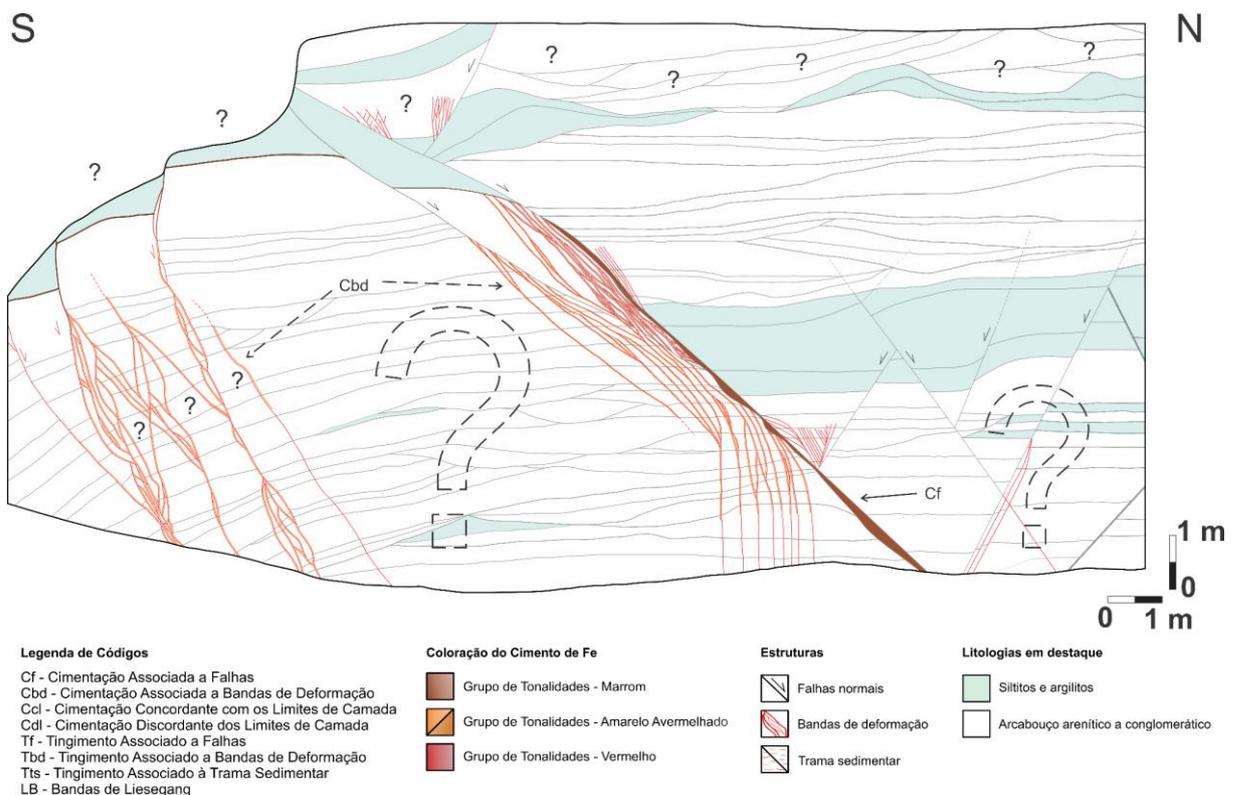


Figura 31 – Representação do tempo t^n na seção geológico-estrutural em escala 1:50 desenvolvida para o estudo. As indicações de interrogações e linhas tracejadas apontam para as incertezas quanto à representação gráfica do dado momento.

Em momento posterior da evolução do sistema hidrogeológico (t^{n+1}), entende-se que as particularidades internas dos blocos delimitados pela falha principal F1 passaram a exercer maior influência na redistribuição interna de fluidos percolantes. Nesse contexto, estruturas tectônicas rúpteis de menor hierarquia e características litofaciológicas dos pacotes sedimentares proporcionaram a formação de uma miscelânea de feições de precipitação de minerais de ferro (Figura 32), associadas a zonas limitadoras de contatos litológicos e arranjos internos de grãos, por exemplo.

Além disso, feições de precipitação formadas no momento t^n também exerceram influência no "novo" padrão de escoamento. A esse respeito, a validação de um tempo t^{n+1} se faz, principalmente, pela presença da feição caracterizada como "Tingimento Associado a Falhas (Tf)" na região adjacente à falha F1.

Nesse contexto, pode-se observar o que se porta como a evidência mais clara de uma relação espacial, e temporal, entre duas feições de precipitação de óxidos de ferro. A ocorrência de uma acumulação de fluidos à esquerda da falha F1 é interpretada como indicadora:

- 1) da existência de cimentação pretérita ao longo de todo o núcleo da falha F1, posicionando tal elemento, que simbolizava a principal zona de condução e acumulação de fluidos durante t^n , como uma barreira de fluxo em t^{n+1} ;
- 2) do padrão geral do escoamento do afloramento no sentido S-N, considerando a estrutura geral do gráben da Casa de Pedra, conforme proposto por Maciel *et al.* (2017).

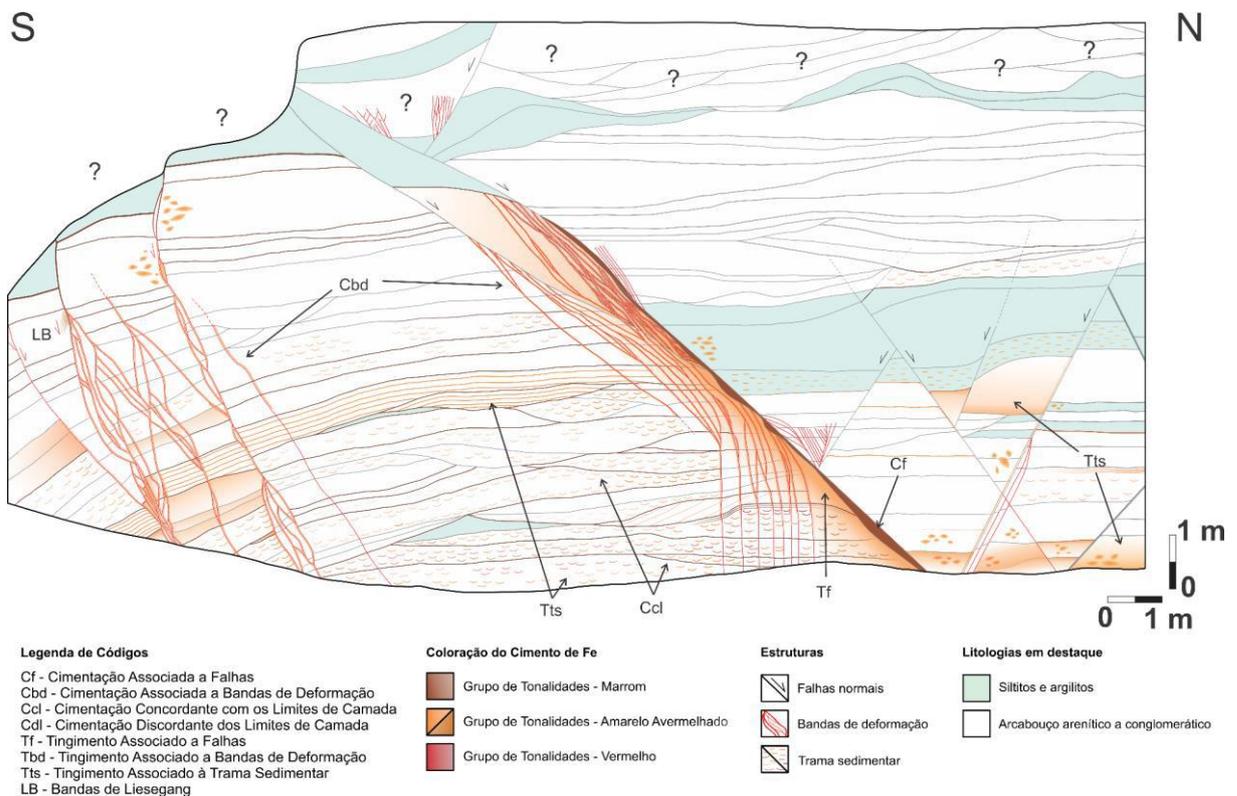


Figura 32 – Representação do tempo t^{n+1} na seção geológico-estrutural em escala 1:50 desenvolvida para o estudo. As indicações de interrogações apontam para as incertezas quanto à representação gráfica do momento em questão.

Por fim, o momento t^{n+2} (Figura 33) compreenderia um estágio evolutivo comparativamente mais tardio. A esse estágio são atribuídas as feições cuja origem pode estar diretamente ligada a um contexto em que processos de reprecipitação mineral são dominantes no sistema, ocasionados por mecanismos de reinserção e acúmulo de fluidos em determinadas regiões. Tais mecanismos, por sua vez, são responsáveis por desencadear uma série de reações físico-químicas originadoras de novos *fronts* reativos.

As feições associadas ao momento t^{n+2} seriam, em sua quase totalidade, pertencentes ao 'Grupo de Tonalidades Vermelhas', individualizado na seção geológico-estrutural desenvolvida. É observável que essas feições tendem a se localizar na região superior do afloramento, fato que tem íntima relação com a existência de um intervalo pelítico abaixo, elemento fundamental, nessa configuração, para a criação de zonas favoráveis à acumulação de fluidos percolantes.

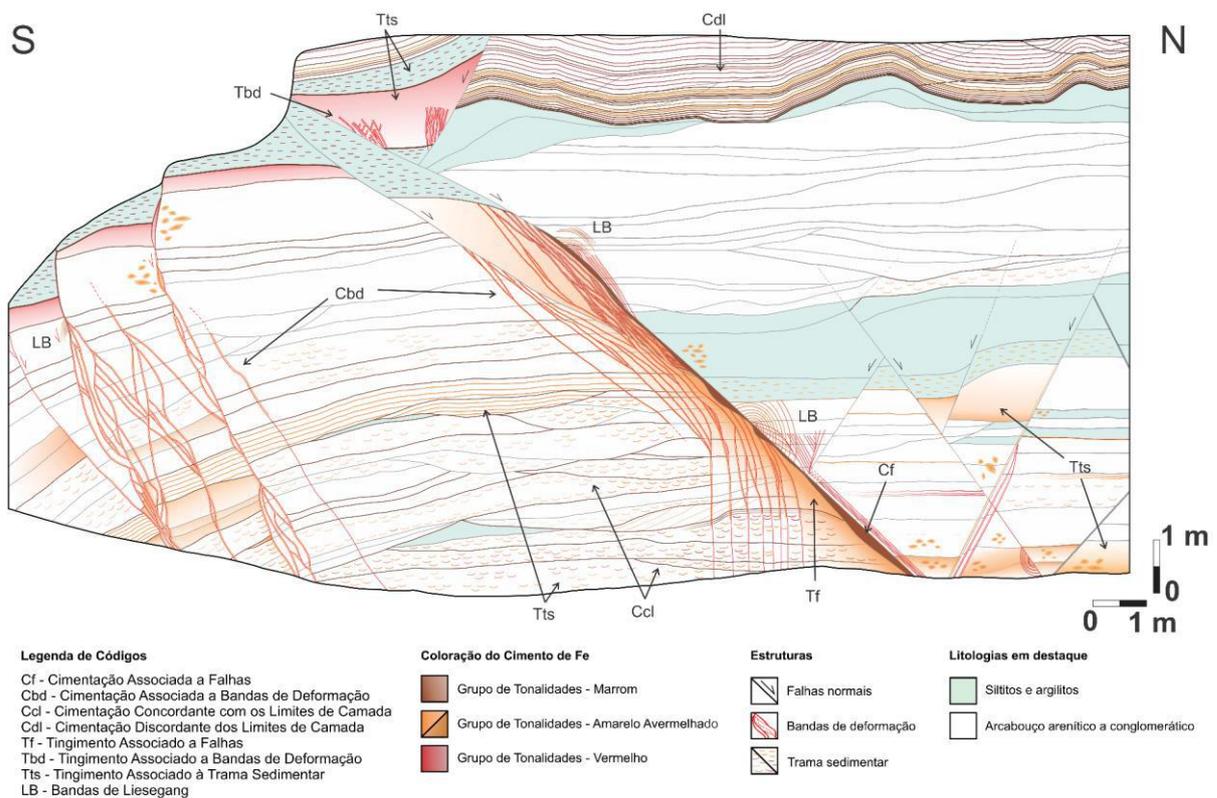


Figura 33 – Representação do tempo t^{n+2} , que compreende a distribuição de feições tal como a seção geológico-estrutural final, em escala 1:50, abordada como material resultante do estudo.

6. CONCLUSÕES

De acordo com a evolução do arranjo estrutural e, conseqüentemente, do sistema físico-químico, planos de falha se comportaram como barreiras e/ou condutores para os fluidos percolantes. Zonas de bandas de deformação, por sua vez, apresentaram-se como efetivas barreiras para o fluxo de fluidos, na configuração observada nos arenitos pouco consolidados estudados.

Aspectos texturais, tais como granulometria e grau de seleção, influenciam diretamente nas propriedades permoporosas apresentadas pelos materiais que compõem a estratigrafia dos depósitos. Tais propriedades são de extrema relevância no que diz respeito aos padrões de mobilização dos fluidos, refletindo-se em suas diferentes interações com limites físicos apresentados pelos estratos, ora facilitadores do vetor principal de escoamento, ora dificultadores, impondo o redirecionamento dos sentidos gerais da percolação.

Pode-se propor a relação da história diagenética do afloramento com múltiplas fases de interação rocha-fluido, sendo teorizada a existência de, ao menos, três momentos – t^n , t^{n+1} e t^{n+2} . A principal evidência para tal se baseia nas nuances relativas à intensidade e coloração dos precipitados, fatores decisivos também para o levantamento e descrição individual das feições. São consideradas relações genéticas entre os padrões de cimentação mais efetivos, formadores de massas mineralizadas, em colorações amarronzadas, e fases mais antigas da história diagenética desses depósitos. Para os precipitados menos efetivos, formadores de leves tingimentos, de coloração avermelhada, por sua vez, supõe-se associação a fases mais recentes e mecanismos de reprecipitação de fases.

Para a confirmação do modelo evolutivo proposto, se faz essencial avançar por meio de estudos geoquímicos e mineralógicos.

Considerações sobre o fluxo geral de fluidos no afloramento, anteriormente proposto por Maciel *et al.* (2017), foram construídas com base na observação da distribuição das feições, em especial as que apresentam relação com o elemento estrutural de maior importância na porção do afloramento estudada - a falha principal F1. A alocação de um padrão de barragem de fluxo ao sul dessa estrutura, tingindo toda sua adjacência à esquerda, se torna uma evidência, junto à posição relativa dos precipitados associados a bandas de deformação, para a admissão de um sentido principal S-N para o escoamento, assim como sugerido por Maciel *et al.* (2017) e

coerente com a localização dos depósitos, próximos à borda sul do Gráben da Casa de Pedra. Nesse contexto, para além das evidências descritas em afloramento, é importante pontuar a influência:

- i) do fator topográfico no sentido geral do escoamento, considerando que ao sul dos depósitos estudados afloram, em cotas mais elevadas, rochas gnáissicas do embasamento;
- ii) do fator estrutural na canalização dos fluidos meteóricos, considerando a ação das falhas delimitadoras da borda sul do Gráben da Casa de Pedra como elementos de grande importância na condução do fluxo em direção aos compartimentos de interior do gráben (depósitos da Bacia de Volta Redonda), em seus respectivos contextos hidrogeológicos.

Como próximas etapas, considera-se importante o avanço do levantamento da seção em direção à porção norte do afloramento, a coleta de amostras para análises mineralógicas em DRX e MEV, e a datação desses óxidos/hidróxidos, a fim de embasar propostas sobre a associação dos precipitados com as diferentes fases diagenéticas e, conseqüentemente, permitir o estabelecimento de modelos de evolução para o sistema hidrogeológico dos depósitos estudados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDREU, E., TORRÓ, L., PROENZA, J.A., DOMENECH, C., GARCÍA-CASCO, A., VILLANOVA DE BENAVENT, C., CHAVEZ, C., ESPAILLAT, J., LEWIS, J. F. (2015). Weathering profile of the Cerro de Maimón VMS deposit (Dominican Republic): Textures, mineralogy, gossan evolution and mobility of gold and silver. *Ore Geology Reviews*, **65**: 165-179.
- ANTONELLINI, M. & AYDIN, A. (1994). Effect of Faulting on Fluid-Flow in Porous Sandstones - Petrophysical Properties. *AAPG Bulletin*, **78**(3): 355–377.
- BALSAMO, F.; BEZERRA, F.H.R.; VIEIRA, M.M.; STORTI, F. (2013). Structural control on the formation of iron oxide concretions and Liesegang bands in faulted, poorly lithified Cenozoic sandstones of the Paraíba Basin, Brazil. *Geological Society of America Bulletin*, **125**(5 6): 913-931.
- BEITLER, B.; PARRY, W.T.; CHAN, M.A. (2005). Fingerprints of fluid flow: Chemical diagenetic history of the Jurassic Navajo Sandstone, southern Utah. *Journal of Sedimentary Research*, **75**: 547 561.
- BRÊDA, T. C. (2010) *Análise Petrográfica Da Formação Resende (Bacia de Resende, RJ)*. Trabalho Final de Curso. Rio de Janeiro: Instituto de Geociências - UFRJ.
- CHEN, L.; KANG, Q.; HE, Y.-L.; TAO, W.-Q. (2012). Mesoscopic Study of the Effects of Gel Concentration and Materials on the Formation of Precipitation Patterns. *Langmuir*, **28**(32): 11745–11754.
- CHOI J. H., EDWARDS P., KO K., KIM, Y. S. (2016). Definition and classification of fault damage zones: A review and a new methodological approach. *Earth Science Reviews*, **152**: 70–87.
- DELGADO I.M., SOUZA J.D., SILVA L.C., SILVEIRA FILHO N.C., SANTOS R.A., PEDREIRA A.J., GUIMARÃES J.T., ANGELIM L.A.A., VASCONCELOS A.M.,

GOMES I.P., LACERDA FILHO J.V., VALENTE C.R., PERROTTA M.M., HEINECK C.A. (2003). Geotectônica do Escudo Atlântico. In: BIZZI L.A., SCHOBENHAUS C., VIDOTI R.M., GONÇALVES J.H. (eds.) Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil, Texto, Mapa & SIG. Brasília, CPRM, Serviço Geológico do Brasil, p. 227-334.

DULEY, J.M.; FOWLER, A.C.; MOYLES, I.R.; O'BRIEN, S.B.G. (2019). Regularization of the Ostwald supersaturation model for Liesegang bands. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **475**(2228): 20190154.

FIUZA, B. O. (2019). *Análise multiescalar da deformação rúptil em rochas siliciclásticas pouco consolidadas (Formação Resende, Eoceno, Bacia de Volta Redonda, RJ)*. Dissertação (Mestrado). Rio de Janeiro: Instituto de Geociências - UFRJ.

FIUZA, B.O.; MELLO, C.L.; RIBEIRO, C.S. (2020). Parâmetros de densidade de falhas e bandas de deformação em rochas siliciclásticas pouco consolidadas da Formação Resende, Eoceno, Bacia de Volta Redonda, estado do Rio de Janeiro. *Geologia USP. Série Científica*, **20**(4): 39-52.

FOSSÉN, H., SCHULTZ; R.A., SHIPTON; Z.K., & MAIR, K. (2007). Deformation bands in sandstone: a review. *Journal of the Geological Society*, 164(4), 755-769.

GALVÃO, M.S. (2018). *O papel das falhas e bandas de deformação sobre o fabric dos arenitos da Formação Resende (Eoceno, Rift Continental do Sudeste do Brasil) e seu impacto sobre o comportamento hidromecânico*. Dissertação (Mestrado). Rio de Janeiro: Instituto de Geociências - UFRJ. 173 p.

GIOVANNINI, A.L. (2013). *Contribuição à geologia e geoquímica do carbonatito e da jazida (Nb, ETR) de Seis Lagos (Amazonas)*. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre: Instituto de Geociências - UFRGS. 112 p.

GOOGLE. *Google Earth website* (2022). Disponível em: <<http://earth.google.com/>>. Acesso em janeiro de 2022.

HEILBRON, M., PEDROSA-SOARES, A. C., CAMPOS NETO, M. C., SILVA, L. C.; TROUW, R. A. J., JANASI, V. A. (2004). A Província Mantiqueira. In: V. Mantesso-Neto, A. Bartorelli, C. D. R. Carneiro, B. B. Brito Neves (Eds.). *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida (203-234)*. São Paulo: Beca.

HOWELL, J. A., MARTINIUS, A. W., GOOD, T. R. (2014). The application of outcrop analogues in geological modelling: a review, present status and future outlook. In: A. W. Martinius, J. A. Howell, T. R. Good (Eds.). *Sediment-Body Geometry and Heterogeneity: Analogue Studies for Modelling the Subsurface* (387, 1-25). London: The Geological Society.

MACIEL, I. B. (2016). *Caracterização da deformação rúptil em afloramento da Formação Resende, Bacia de Volta Redonda (RJ)*. Dissertação (Mestrado). Rio de Janeiro: Instituto de Geociências - UFRJ. 80 p.

MACIEL, I. B.; MELLO, C. L.; SILVA, A. T. 2017. Caracterização da deformação rúptil em afloramento da Formação Resende, Bacia de Volta Redonda, Estado do Rio de Janeiro. *Geologia USP. Série Científica*, **17**(3): 113-124.

MIALL, A. D. (1996) *The Geology of Fluvial Deposits: Sedimentary Facies, Basin Analysis and Petroleum Geology*. Springer-Verlag Berlin, Heiderberg, New York, p. 582.

MINOR, S.A. & HUDSON, M.R. (2006). Regional Survey of Structural Properties and Cementation Patterns of Fault Zones in the Northern Part of the Albuquerque Basin, New Mexico-Implications for Ground-Water Flow: U.S. Geological Survey Professional Paper 1719, 28 p.

- MUNSELL SOIL COLOR COMPANY. (1950, rev. 1994). Munsell soil color chats. Munsell color. Macbeth Division of Kollmorgen Corporation, Baltimore, Maryland, USA.
- NEGRÃO, A. P. (2014). *Evolução tectonossedimentar e deformação rúptil cenozoica da região da Bacia de Volta Redonda (Segmento Central do Rifte Continental do Sudeste do Brasil, RJ)*. Tese (Doutorado). Rio de Janeiro: Instituto de Geociências – UFRJ. 249 p.
- NEGRÃO, A.P.; RAMOS, R.R.C.; MELLO, C.L.; SANSON, M.S.R. (2015). Mapa geológico do Cenozoico da região da bacia de Volta Redonda (RJ, Segmento Central do Rifte Continental do Sudeste do Brasil): identificação de novos grábens e ocorrências descontínuas, e caracterização de estágios tectonossedimentares. *Brazilian Journal of Geology*, **45**: 273-291.
- NEGRÃO, A. P.; MELLO, C. L.; RAMOS, R. R. C. (2020). Tectonosedimentary evolution of the Resende and Volta Redonda basins (Cenozoic, Central Segment of the Continental Rift of Southeastern Brazil). *Journal of South American Earth Sciences* [S.l.], n. , p. 102789-.
- PARRY, W.T. (2011). Composition, nucleation, and growth of iron oxide concretions: *Sedimentary Geology*, **233**: 53–68.
- PEI, Y., PATON, D. A., KNIPE, R. J., WU, K. (2015). A review of fault sealing behaviour and its evaluation in siliciclastic rocks. *Earth-Science Reviews*, **150**: 121-138.
- POTTER, S.L. & CHAN, M.A. (2011). Joint controlled fluid flow patterns and iron mass transfer in Jurassic Navajo Sandstone, Southern Utah, USA. *Geofluids*, **11**: 184-198.
- RAMOS, R.R.C. (2003). *Sistemas Aluviais Terciários da Bacia de Resende, Estado do Rio de Janeiro, Brasil: Análise de Fácies e Revisão Estratigráfica*. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, 221 p.

- RAMOS, R. R. C., MELLO, C. L., SANSON, M. S. R. (2006). Revisão estratigráfica da Bacia de Resende, Rift Continental do Sudeste do Brasil, Estado do Rio de Janeiro. *Geociências*, **25**(1): 59-70.
- RICCOMINI, C. (1989). *O Rift Continental do Sudeste do Brasil*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências - USP. 256 p.
- RICCOMINI, C., SANT'ANNA, L. G., FERRARI, A. L. (2004). Evolução geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil. In: V. Mantesso-Neto, A. Bartorelli, C. Dal Ré Carneiro, B. B. Brito Neves (Eds.). *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Pg. 383-405. São Paulo: Beca.
- ROTAVA, T. (2017). *Caracterização macroscópica e microscópica de bandas de deformação em arenitos da Formação Resende (Eoceno, Rift Continental do Sudeste do Brasil)*. Trabalho Final de Curso. Rio de Janeiro: Instituto de Geociências - UFRJ. 55 p.
- SILVA, A.J.R. (1989). *Estudos teóricos sobre formação de padrões espaciais: Anéis de Liesegang*. Dissertação (mestrado). São Paulo – Instituto de Física – UNICAMP. 88 p.
- VELASCO, R. F., HERRERO, J. M., SUAREZ, S., YUSTA, I., ALVARO, A., Tornos, F. (2013). Supergene Features and Evolution of the Gossans Capping the Massive Sulphide Deposits of the Iberian Pyrite Belt. *Ore Geology Reviews*, **53**: 181-203.
- VOGEL, S. N. (2018). *Caracterização macroscópica e microscópica de aspectos texturais e estruturais relacionados à deformação rúptil de arenitos pouco consolidados (Formação Resende, Bacia de Volta Redonda) e aspectos permoporosos associados*. Dissertação (Mestrado). Rio de Janeiro: Instituto de Geociências - UFRJ. 89 p.

- VOGEL, S. N., MELLO, C. L., SILVA, A. T. (2019). Aspectos tomográficos e microtomográficos de feições de deformação rúptil em arenitos pouco consolidados da Formação Resende (Bacia de Volta Redonda-RJ). *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, **42**: 759-768.
- WIBBERLEY, C. & SHIPTON, Z. (2010). Fault zones: A complex issue. *Journal of Structural Geology*, **32**: 1554-1556.
- YESARES, L.; SAEZ, R; RUIZ DE ALMODOVAR, G; MIGUEL NIETO, J; GOMEZ, C; OVEJERO, G. (2017). Mineralogical evolution of the Las Cruces gossan cap (Iberian Pyrite Belt): From subaerial to underground conditions. *Ore Geology Reviews*, **80**: 377-405.