



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

Gustavo Correia e Silva Machado

**CARACTERIZAÇÃO TEXTURAL E COMPOSICIONAL DE ZONAS DE
BANDAS DE DEFORMAÇÃO EM ARENITOS DA FORMAÇÃO RESENDE
(EOCENO, BACIA DE VOLTA REDONDA/RJ)**

Trabalho de Conclusão de Curso

**Rio de Janeiro
2024**

GUSTAVO CORREIA E SILVA MACHADO

CARACTERIZAÇÃO TEXTURAL E COMPOSICIONAL DE ZONAS DE BANDAS DE DEFORMAÇÃO EM ARENITOS DA FORMAÇÃO RESENDE (EOCENO, BACIA DE VOLTA REDONDA/RJ)

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

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

Bernardo Oliveira Fiuza
(IGEO/UFRJ)

CIP - Catalogação na Publicação

M149c Machado, Gustavo Correia e Silva
Caracterização textural e composicional de zonas de bandas de deformação em arenitos da Formação Resende (Eoceno, Bacia de Volta Redonda, RJ) / Gustavo Correia e Silva Machado. -- Rio de Janeiro, 2024.
57 f.

Orientador: Claudio Limeira Mello.
Coorientador: Bernardo Oliveira Fiuza.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Bacharel em Geologia, 2024.

1. Petrografia. 2. Deformação tectônica dútil. 3. Arenitos pouco consolidados. I. Mello, Claudio Limeira, orient. II. Fiuza, Bernardo Oliveira, coorient. III. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob a responsabilidade de Miguel Romeu Amorim Neto - CRB-7/6283.

GUSTAVO CORREIA E SILVA MACHADO

CARACTERIZAÇÃO TEXTURAL E COMPOSICIONAL DE ZONAS DE BANDAS DE DEFORMAÇÃO EM ARENITOS DA FORMAÇÃO RESENDE (EOCENO, BACIA DE VOLTA REDONDA/RJ)

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

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

Bernardo Oliveira Fiuza
(IGEO/UFRJ)

Aprovada em: 17/01/2024

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Claudio Limeira Mello (IGEO/UFRJ)

Prof. Dr. Renato Rodriguez Cabral Ramos (MN//UFRJ)

Dra. Aline Theophilo Silva (PETROBRAS)

Dedicado à Rozane, Luis Cláudio, Maria de Lourdes, Fernando Ruffato e Giulia.
Minha família.

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha profunda gratidão à Universidade Federal do Rio de Janeiro pela infraestrutura excepcional que me acompanhou durante meus anos de graduação no Departamento de Geologia.

Também gostaria de agradecer à Petrobras e ao projeto "Caracterização da Deformação e de Propriedades Mecânicas e Permoporosas de Arenitos Pouco Consolidados" pela bolsa de Iniciação Científica que recebi de 2020 a 2022, bem como pelo fornecimento dos equipamentos necessários para a aquisição de imagens tomográficas e realização de ensaios de petrofísica básica no Laboratório do CENPES/PETROBRAS.

Aos pesquisadores envolvidos no projeto "Caracterização da Deformação e de Propriedades Mecânicas e Permoporosas de Arenitos Pouco Consolidados", sou imensamente grato pela disponibilidade em responder às minhas dúvidas e por terem me auxiliado em várias etapas, tanto neste trabalho quanto ao longo da minha graduação. Gostaria de destacar especialmente a colaboração de Suelen Vogel e Bernardo Fiuza.

Meus sinceros agradecimentos aos meus orientadores, Claudio Limeira Mello e Bernardo Oliveira Fiuza, que estiveram ao meu lado desde a minha primeira Jornada de Iniciação Científica em 2020 até a conclusão deste trabalho. Agradeço a paciência, carinho e conselhos valiosos que tiveram um impacto positivo tanto na minha carreira profissional quanto na minha vida pessoal.

Gostaria de reconhecer as contribuições de Suelen do Nascimento Vogel e Thamirez do Nascimento Bassi na produção de figuras e diagramação deste trabalho.

Aos meus irmãos e amigos do "Panela das painelas", agradeço imensamente por todo o companheirismo ao longo desses longos seis anos.

À minha família, sou imensamente grato por todo o apoio e estrutura que me proporcionaram ao decidir cursar Geologia. Sem vocês, eu não teria conseguido concluir essa graduação.

À família Gomes de Souza, por todo suporte psicológico, emocional e educacional no momento mais difícil da minha vida.

Gostaria de dedicar essa conquista à minha mãe, Rozane Correia e Silva, e à minha avó, Maria de Lourdes Martins Correia. Embora não estejam fisicamente presentes, são fundamentais para que eu tenha chegado até aqui. Esta conquista é para vocês.

RESUMO

MACHADO, Gustavo Correia e Silva. **Caracterização Textural e Composicional de Zonas de Bandas de Deformação em Arenitos da Formação Resende (Eoceno, Bacia de Volta Redonda, RJ)**. 2024, 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Este estudo tem como objetivo avaliar a influência da deformação tectônica rúptil sobre os aspectos texturais e composicionais de arenitos com bandas de deformação presentes na Formação Resende na Bacia de Volta Redonda, inserida no Segmento Central do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (RCSB). Esta unidade litoestratigráfica, de idade eocênica-oligocênica, é reconhecida como o principal preenchimento sedimentar das bacias do Segmento Central do RCSB, sendo caracterizada pelo predomínio de arenitos feldspáticos, pouco consolidados, intercalados a lamitos e, subordinadamente, conglomerados. Os depósitos da Formação Resende registram sistemas de leques aluviais, associados às bordas de falha, e canais fluviais entrelaçados. As rochas da Formação Resende são afetadas por conjuntos distintos de estruturas rúpteis (falhas e juntas), produzidos nos sucessivos eventos da evolução tectônica do RCSB. Estudos recentes destacaram a presença de bandas de deformação em arenitos da Formação Resende na Bacia de Volta Redonda. As bandas de deformação constituem estruturas rúpteis de escala milimétrica a centimétrica que modificam as propriedades texturais, composicionais e permoporosas das rochas, influenciando diretamente na capacidade de percolação de fluidos. A metodologia adotada no presente estudo envolve a análise de três lâminas petrográficas, sendo uma de arenito não deformado (ND3) e duas de arenitos deformados (BD#1-2 e F1#3A). Os aspectos texturais (arcabouço, matriz, cimento e poro) e composicionais foram quantificados através do método Gazzi-Dickinson, sendo contado um total de 500 pontos por lâmina. Nos resultados obtidos, destaca-se a presença de faixas com diferentes níveis de deformação nas lâminas de arenitos deformados. Evidências dessa diferença deformacional estão associadas ao aumento da compactação e da quantidade de matriz, e redução da granulometria e da porosidade nas faixas mais deformadas. A redução da porosidade promove barreiras para o fluxo de fluidos, assinaladas pela concentração de cimento de óxido/hidróxido de ferro paralelamente às bandas de deformação. Em relação aos aspectos composicionais, verificou-se um aumento na razão quartzo-feldspato nas rochas deformadas quando comparada à rocha não deformada, o que pode ser atribuído à menor resistência mecânica dos feldspatos durante o processo de cominuição dos grãos associado à geração das bandas de deformação.

Palavras-chave: Petrografia; deformação tectônica rúptil; arenitos pouco consolidados.

ABSTRACT

MACHADO, Gustavo Correia e Silva. **Textural and Compositional Characterization of Deformation Band Zones in Sandstones of the Resende Formation (Eocene, Volta Redonda Basin, RJ)**. 2024, 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

The present study aims to evaluate the influence of brittle tectonic deformation on the textural and compositional aspects of sandstones with deformation bands of the Resende Formation in the Volta Redonda Basin, inserted in the Central Segment of the Continental Rift of Southeast Brazil (RCSB). This lithostratigraphic unit, Eocene-Oligocene in age, is recognized as the main sedimentary filling of the basins of the Central Segment of the RCSB, being characterized by the predominance of poorly lithified feldspathic sandstones, interbedded with mudstones and, subordinately, conglomerates. The Resende Formation deposits record alluvial fan systems, associated with fault edges, and braided river channels. The rocks of the Resende Formation are affected by distinct sets of brittle structures (faults and joints), produced in the successive events of the tectonic evolution of the RCSB. Recent studies highlighted the presence of deformation bands in the sandstones of the Resende Formation in the Volta Redonda Basin. Deformation bands constitute millimeter to centimeter scale brittle structures that modify textural, compositional and permeability properties of rocks, directly influencing the capacity for fluid percolation. The methodology adopted in the present study involves the analysis of three petrographic slides, one of undeformed sandstone (ND3) and two of deformed sandstone (BD#1-2 and F1#3A). The textural (framework, matrix, cement, and pore) and compositional aspects were quantified using the Gazzi-Dickinson method, with a total of 500 points being counted per slide. The presence of sectors with different levels of deformation in the deformed sandstones stands out. Evidence of this deformational difference is associated with the increase in compaction and in the amount of matrix, and reduction in particle size and porosity in the more deformed sectors. The reduction in porosity promotes barriers to the flow of fluids, marked by the concentration of iron oxide/hydroxide cement parallel to the deformation bands. Regarding compositional aspects, there was an increase in the quartz-feldspar ratio in deformed rocks when compared to undeformed rock, which can be attributed to the lower mechanical resistance of feldspars during the grain comminution process associated with the generation of bands of deformation.

Keywords: Petrography; brittle tectonic deformation; poorly lithified sandstones.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** – (a) Bandas de deformação em arenitos. Notar a diferença da espessura das bandas em camadas de arenitos finos e grossos. (b) *Cluster* de bandas de deformação transicionando para uma superfície de deslizamento em arenito fino/siltito na parte inferior da imagem (Fossen *et al.*, 2017).....17
- Figura 2**- Classificação cinemática de bandas de deformação. PDB: *pure dilation bands* (bandas de dilatação); SEDB: *shear-enhanced dilation bands* (bandas de dilatação com cisalhamento); DSB: *dilation shear bands* (bandas de cisalhamento e dilatação); SSB: *simple shear bands* (bandas de cisalhamento simples); CSB: *compaction shear bands* (bandas de cisalhamento e compactação); SECB: *shear-enhanced compaction bands* (bandas de compactação com cisalhamento); PCB: *pure compaction bands* (bandas de compactação). Fonte: Bassi (2022- adaptado de Fossen *et al.*, 2007 e Fossen *et al.*, 2017)..... 18
- Figura 3** - (a–d) Principais tipos de bandas de deformação, baseados no mecanismo de deformação. (e) Gráfico mostrando os tipos de bandas formadas de acordo com a profundidade e o teor em filossilicatos (limites aproximados e graduais, devido à influência de outros fatores). Fonte: Bassi (2022, adaptado de Fossen, 2012)..... 19
- Figura 4** - Principais fatores que controlam os processos envolvidos no desenvolvimento de bandas de deformação (in Bassi, 2022, a partir de Fossen *et al.*, 2017).....20
- Figura 5** - Variação das propriedades petrofísicas de uma zona de falha. a) Zona representada por uma única superfície; b) zona com múltiplos planos (Pei *et al.*, 2015)..... 21
- Figura 6** – Mapa de localização do afloramento estudado, destacando as vias de acesso para a área de estudo. Fonte: Fiuza (2019).....22
- Figura 7** - *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (figura modificada a partir de Melo *et al.*, 1985, retirada de Rotava, 2017), destacando as bacias sedimentares envolvidas nesta feição geotectônica. No seu segmento central, estão as bacias de São Paulo, Taubaté, Resende e Volta Redonda.....23

Figura 8 - Mapa geológico da Bacia de Volta Redonda e do embasamento adjacente (adaptado de Negrão, 2014 <i>in</i> Maciel, 2016).....	24
Figura 9 - Alinhamento entre Poços de Caldas (MG) e Cabo Frio (RJ) de intrusões alcalinas datadas do final do Mesozoico/início do Cenozoico. Fonte: Negrão (2014) modificado de Riccomini <i>et al.</i> (2004).....	25
Figura 10 - Esboços paleotectônicos da evolução do segmento central do <i>Rift</i> Continental do Sudeste do Brasil - Legenda no quadro D: 1) falhas de componente predominante normal; 2) falha de componente transcorrente sinistral; 3) falha de componente transcorrente dextral; 4) falha de componente predominante reversa; 5) falha com movimentação não caracterizada. Fonte: modificado de Riccomini <i>et al.</i> (2004).....	26
Figura 11 - Coluna litoestratigráfica e fases tectônicas propostas para a região da Bacia de Volta Redonda por Negrão <i>et al.</i> (2015 - modificada por Fiuza, 2019).....	27
Figura 12 - Seções geológicas representativas da evolução tectônica da Bacia de Volta Redonda, segundo Negrão <i>et al.</i> (2015). (A) Seção geológica representativa do hemigráben produzido no estágio Rife. (B) Seção geológica representativa da configuração atual em depocentros e áreas de ocorrência distintas após as fases tectônicas deformadoras.....	28
Figura 13 – (A) Afloramento da Formação Resende na Bacia de Volta Redonda considerado no presente estudo, descrito inicialmente por Maciel (2016). (B) Seção estratigráfica-estrutural produzida por Fiuza (2019) para a porção inferior do afloramento	30
Figura 14 - Representações esquemáticas de bandas de desagregação, bandas cataclásticas e cimentação associada a bandas de deformação (a partir de Pei <i>et al.</i> , 2015), relacionando-as a cada uma dessas feições identificadas por Rotava (2017) em arenitos da Formação Resende na Bacia de Volta Redonda – extraída de Fiuza (2019).....	31

Figura 15 – Aspectos texturais quantificados por Bassi (2022) para as diferentes faixas de deformação reconhecidas em lâminas de arenitos da Formação Resende coletados em zona de bandas de deformação (BD#2 P1-B) e em zona de falha (F1#3AP1-A) em afloramento na Bacia de Volta Redonda.....	33
Figura 16 – Localização das amostras na seção estratigráfica-estrutural elaborado por Fiuza (2019) com enfoque na porção sul do afloramento estudado.....	34
Figura 17 - Imagens tomográficas dos blocos de arenitos ND#3, BD#1/2 e F1#3A, com orientação dos <i>plugs</i> confeccionados por Vogel (2018).....	35
Figura 18 - Imagens das lâminas dos arenitos analisados: A) lâmina confeccionada no bloco ND#3_ <i>plug</i> 2; B) lâmina confeccionada no bloco BD#1/2_ <i>plug</i> 1; C) lâmina confeccionada no bloco F1#3A_ <i>plug</i> 1.....	36
Figura 19 – Imagens da lâminas petrográficas de arenitos deformados (BD#1/2 e F1#3A), com a interpretação de faixas milimétricas com diferentes características texturais.....	37
Figura 20 - Padrão granulométrico do arcabouço do arenito ND#3.....	38
Figura 21 - Fotomicrografias obtidas do arenito ND#3. A) Arenito médio a grosso, moderadamente selecionado, com grãos angulosos (nicóis paralelos, aumento de 4x, diâmetro do campo de 5 mm); B) destaque, no centro da imagem, para grão de ortoclásio alterado, produzindo porosidade móldica e matriz argilosa (epimatriz), contornando os grãos (nicóis paralelos, aumento de 4x, diâmetro do campo de 5 mm).....	38
Figura 22 - Percentuais de arcabouço, matriz, cimento e porosidade do arenito ND#3.....	39
Figura 23 - Padrão granulométrico do arcabouço do arenito BD#1/2.....	40
Figura 24 - Percentuais de arcabouço, matriz, cimento e porosidade do arenito BD#1/2.....	40

Figura 25 – A) Fotomicrografia obtida na amostra BD#1/2, destacando a fragmentação da borda de grãos de quartzo ((nicóis paralelos, aumento de 20x, diâmetro do campo de 1mm). B) Fotomicrografia obtida na amostra BD#1/2, destacando a cimentação por óxidos/hidróxidos de ferro (nicóis paralelos, aumento de 20x, diâmetro do campo de 1mm).....	41
Figura 26 - Imagem da lâmina BD#1/2, com a interpretação de faixas milimétricas (1 a 8) com diferentes características texturais.....	42
Figura 27 - Variações de porosidade, arcabouço, cimento e matriz no arenito BD#1/2 conforme as faixas com diferentes características texturais.....	42
Figura 28 - Padrão granulométrico do arcabouço do arenito F1#3A.....	43
Figura 29 - Percentuais de arcabouço, matriz, cimento e porosidade do arenito F1#3A.....	43
Figura 30 – Lâmina F1#3A, com a interpretação de faixas milimétricas (1 a 10) com diferentes características texturais.....	44
Figura 31 – Variações de porosidade, arcabouço, cimento e matriz no arenito F1#3A conforme as faixas com diferentes características texturais.....	44
Figura 32 – A) Fotomicrografia obtida na amostra ND#3, destacando um grão de plagioclásio (nicóis cruzados, aumento de 20x, diâmetro do campo de 1 mm). B) Fotomicrografia obtida na amostra ND#3, destacando um grão de biotita levemente deformado por compactação (nicóis cruzados, aumento de 20x, diâmetro do campo de 1 mm).....	46
Figura 33 – Fotomicrografia obtida na amostra BD#1/2, destacando, no centro, um grão de muscovita quebrado no plano de clivagem (nicóis cruzados, aumento de 20x, diâmetro do campo de 1 mm).....	47
Figura 34 – Fotomicrografia obtida na amostra F1#3A, destacando um grão de microclina fraturado (nicóis cruzados, aumento de 20x, diâmetro do campo de 1mm).....	49

Figura 35 - Classificação petrográfica das amostras estudadas no diagrama triangular de Folk (1980)..... 49

Figura 36 – A) Classificação petrográfica das faixas estudadas no arenito BD#1/2 no diagrama triangular de Folk (1980).....50

Figura 37 - Classificação petrográfica das faixas estudadas no arenito F1#3A no diagrama triangular de Folk (1980).....50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aspectos texturais dos arenitos deformados (por bandas de deformação e falhas) e não deformados em afloramento da Formação Resende na Bacia de Volta Redonda (Rotava, 2017).....	32
Tabela 2 - Aspectos composicionais dos arenitos deformados (por bandas de deformação e falhas) e não deformados em afloramento da Formação Resende na Bacia de Volta Redonda (Rotava, 2017).....	32
Tabela 3 - Aspectos composicionais do arenito ND#3.....	45
Tabela 4 - Aspectos composicionais do arenito BD#1/2	46
Tabela 5 - Aspectos composicionais do arenito F1#3A.....	48
Tabela 6 - Comparação entre os aspectos composicionais totais dos arenitos ND#3, BD#1/2 e F1#3A.....	50

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVO	16
3. BASES CONCEITUAIS.....	17
3.1 O que são bandas de deformação?	17
3.2. A influência de bandas de deformação no fluxo de fluidos.....	21
4. ÁREA DE ESTUDO.....	22
4.1 Localização	22
4.2 Geologia Regional.....	23
4.3 Evolução Tectônica da Bacia de Volta Redonda.....	25
4.4 Estratigrafia da Bacia de Volta Redonda.....	28
4.5 Revisão de trabalhos anteriores	29
5. MATERIAIS E MÉTODOS	34
6. RESULTADOS.....	38
6.1 Análise textural do arenito não deformado.....	38
6.2 Análise textural dos arenitos deformados	40
6.3 Aspectos composicionais do arenito não deformado	45
6.4 Aspectos composicionais dos arenitos deformados.....	46
6.5 Classificação petrográfica dos arenitos analisados.....	49
7. DISCUSSÃO	51
8. CONCLUSÃO.....	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

1. INTRODUÇÃO

Bandas de deformação são estruturas tectônicas de geometria tabular e escala milimétrica a centimétrica formadas por deformação dútil em rochas porosas, como os arenitos pouco consolidados (Aydin, 1978; Fossen *et al.*, 2007). Essas estruturas podem ser analisadas tanto micro- quanto macroscopicamente, variando desde bandas estreitas a zonas de deformação mais largas e complexas.

A compreensão da formação e distribuição das bandas de deformação em arenitos pouco consolidados fornece informações valiosas sobre os processos de deformação das bacias sedimentares e, principalmente, para a caracterização de qualidade de reservatórios. Essas estruturas podem influenciar diretamente a permeabilidade e a porosidade dos arenitos, afetando a exploração de recursos naturais, como petróleo e água subterrânea.

Maciel (2016) e Maciel *et al.* (2017) foram os primeiros autores a descrever macroscopicamente bandas de deformação nos depósitos da Formação Resende na Bacia de Volta Redonda, localizada no sul do estado do Rio de Janeiro, fazendo parte do segmento central do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (RCSB - Riccomini, 1989). Os depósitos da Formação Resende são principalmente constituídos por arenitos feldspáticos pouco consolidados, intercalados com pelitos esverdeados e conglomerados (Ramos *et al.*, 2006). Esses arenitos são considerados análogos a reservatórios siliciclásticos pouco consolidados e fraturados presentes nas bacias marginais do Sudeste do Brasil.

Rotava (2017) analisou microscopicamente essas bandas de deformação, classificando-as em dois tipos: bandas cataclásticas e bandas de desagregação. A autora quantificou aspectos texturais e composicionais de arenitos não deformados e deformados da Formação Resende. Desde então, diversos estudos têm sido conduzidos sobre as bandas de deformação dos arenitos da Formação Resende (Galvão, 2018; Vogel, 2018; Vogel *et al.*, 2019; Fiuza, 2019; Fiuza *et al.*, 2020; Bassi, 2022). Dentre tais estudos, Bassi (2022) realizou uma análise textural mais detalhada dos arenitos com bandas de deformação, quantificando os aspectos texturais (granulometria do arcabouço, matriz, cimento e porosidade) em diferentes faixas de deformação nas amostras analisadas anteriormente por Rotava (2017).

Nesse contexto, o presente estudo busca dar continuidade às pesquisas realizadas, buscando quantificar não somente os aspectos texturais mas também os aspectos composicionais de arenitos da Formação Resende afetados por bandas de deformação, adotando a mesma abordagem de Bassi (2022).

2. OBJETIVO

O objetivo deste estudo consiste em avaliar a influência da deformação tectônica rúptil sobre os aspectos texturais e composicionais de arenitos com bandas de deformação da Formação Resende aflorantes na Bacia de Volta Redonda.

Pretende-se com o estudo fornecer uma contribuição para o conhecimento sobre a deformação tectônica no contexto do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil.

3. BASES CONCEITUAIS

3.1 O que são bandas de deformação?

Bandas de deformação são estruturas tabulares delgadas que se desenvolvem em rochas porosas, como arenitos pouco consolidados (Figura 1), com espessura milimétrica a centimétrica, apresentando-se em um padrão anastomosado, com compactação da rocha e cominuição granulométrica por cisalhamento (Aydin & Johnson, 1978). Elas são o resultado de um *strain* localizado, podendo ser encontradas em diferentes regimes tectônicos, desde distensivos e transcorrentes até compressivos (Fossen *et al.*, 2017). Bandas de deformação podem ser encontradas individualmente ou agrupadas em zonas, com o aumento progressivo do *strain*. Em estágios mais avançados, podem desenvolver superfícies de deslizamento (Figura 1b). As bandas individuais normalmente acomodam rejeitos de poucos milímetros a poucos centímetros, mesmo que se estendam por dezenas a centenas de metros. Já em *clusters*, os rejeitos de cada banda individual se acumulam por toda a zona (Aydin & Johnson, 1978).

Essas estruturas podem ocasionar uma maior coesão da rocha, assim reduzindo a porosidade e a permeabilidade e, por consequência, resultando em uma maior resistência à erosão. Por essa razão, geralmente são observadas como feições salientes em afloramentos rochosos.

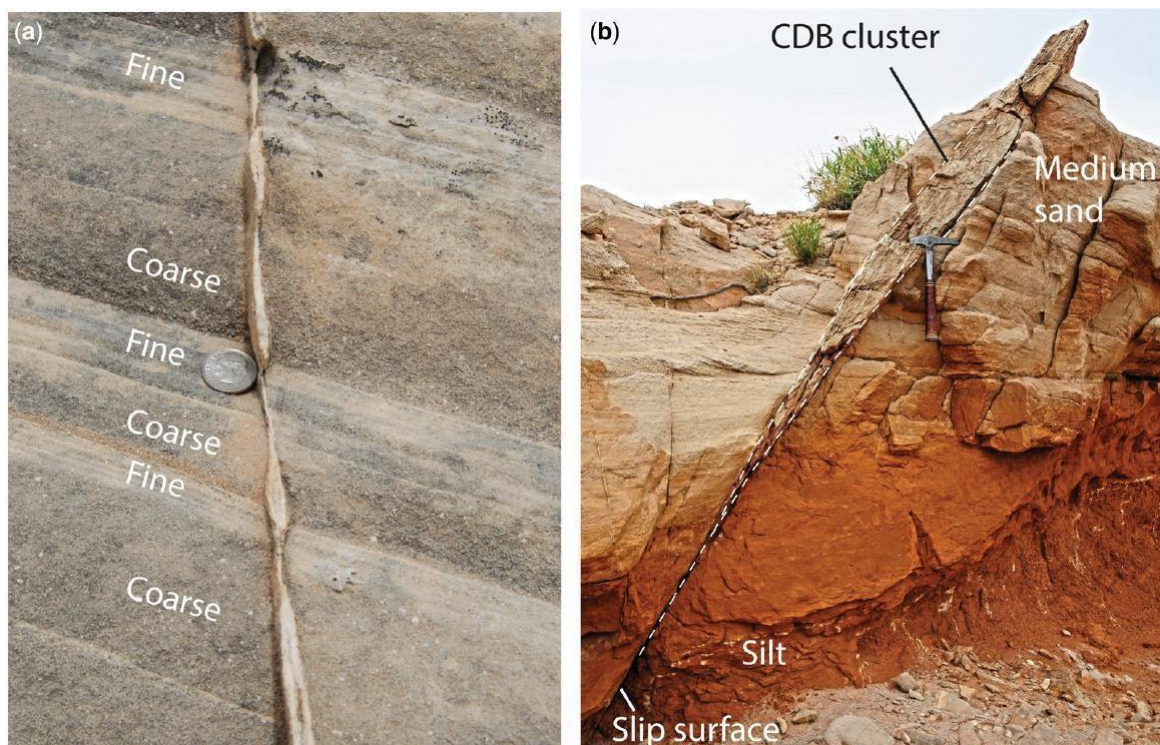


Figura 1 - (a) Bandas de deformação em arenitos. Notar a diferença da espessura das bandas em camadas de arenitos finos e grossos. (b) *Cluster* de bandas de deformação transicionando para uma superfície de deslizamento em arenito fino/siltito na parte inferior da imagem (Fossen *et al.*, 2017).

As bandas de deformação podem ser classificadas com relação aos aspectos cinemáticos, associando-se desde cisalhamento simples até compactação e dilatação, além de combinações intermediárias desses processos. A maioria das bandas de deformação se desenvolve no espectro que vai do cisalhamento à compactação, com a componente de cisalhamento predominando (Fossen *et al.*, 2017 - Figura 2).

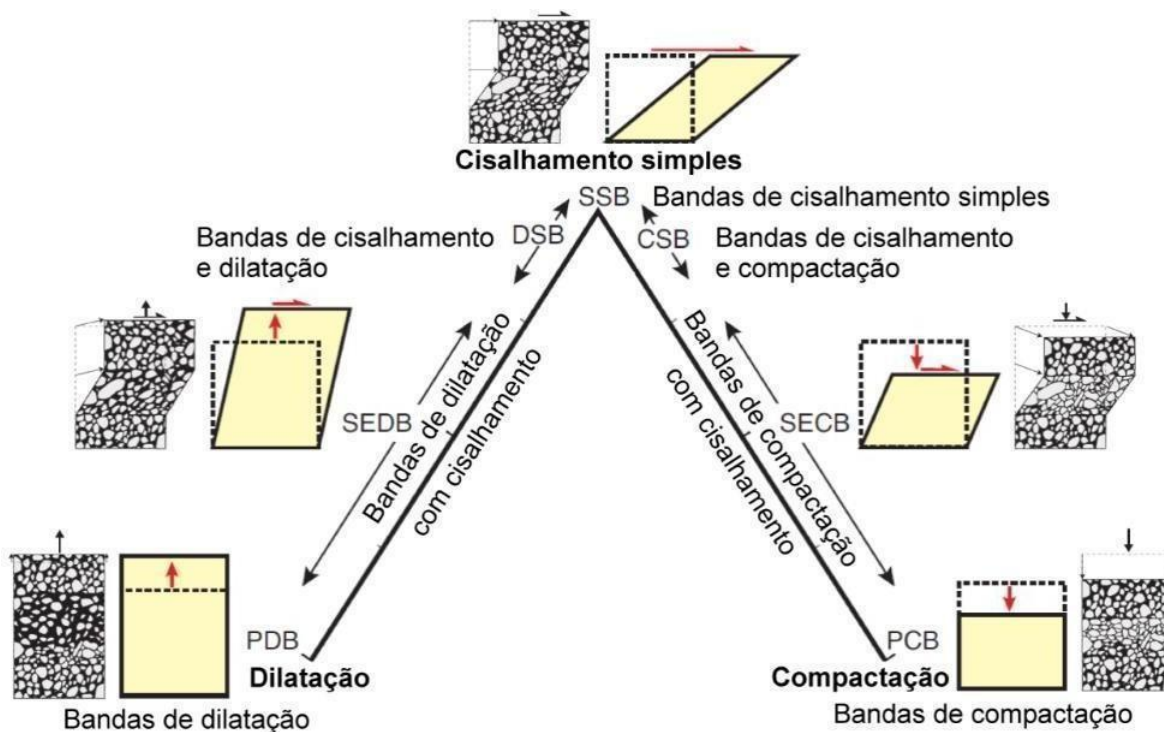


Figura 2 - Classificação cinemática de bandas de deformação. PDB: *pure dilation bands* (bandas de dilatação); SEDB: *shear-enhanced dilation bands* (bandas de dilatação com cisalhamento); DSB: *dilation shear bands* (bandas de cisalhamento e dilatação); SSB: *simple shear bands* (bandas de cisalhamento simples); CSB: *compaction shear bands* (bandas de cisalhamento e compactação); SECB: *shear-enhanced compaction bands* (bandas de compactação com cisalhamento); PCB: *pure compaction bands* (bandas de compactação). Fonte: Bassi (2022 - adaptado de Fossen *et al.*, 2007 e Fossen *et al.*, 2017).

Quanto aos mecanismos de deformação, as bandas podem ser classificadas em quatro tipos principais (Fossen *et al.*, 2007 - Figura 3): (a) bandas de desagregação, formadas a partir do fluxo granular em arenitos pouco consolidados; (b) bandas filossilicáticas, que se formam em arenitos com alto teor de filossilicatos, concentrando e alinhando esses minerais dentro da banda; (c) bandas cataclásticas, formadas por cataclase e/ou fluxo cataclástico, com rotação, deslizamento e fraturamento significativo dos grãos; e (d) bandas de dissolução e cimentação, que se formam durante ou após o processo deformacional, atuando como locais preferenciais para geração de cimentação e dissolução durante a diagênese.

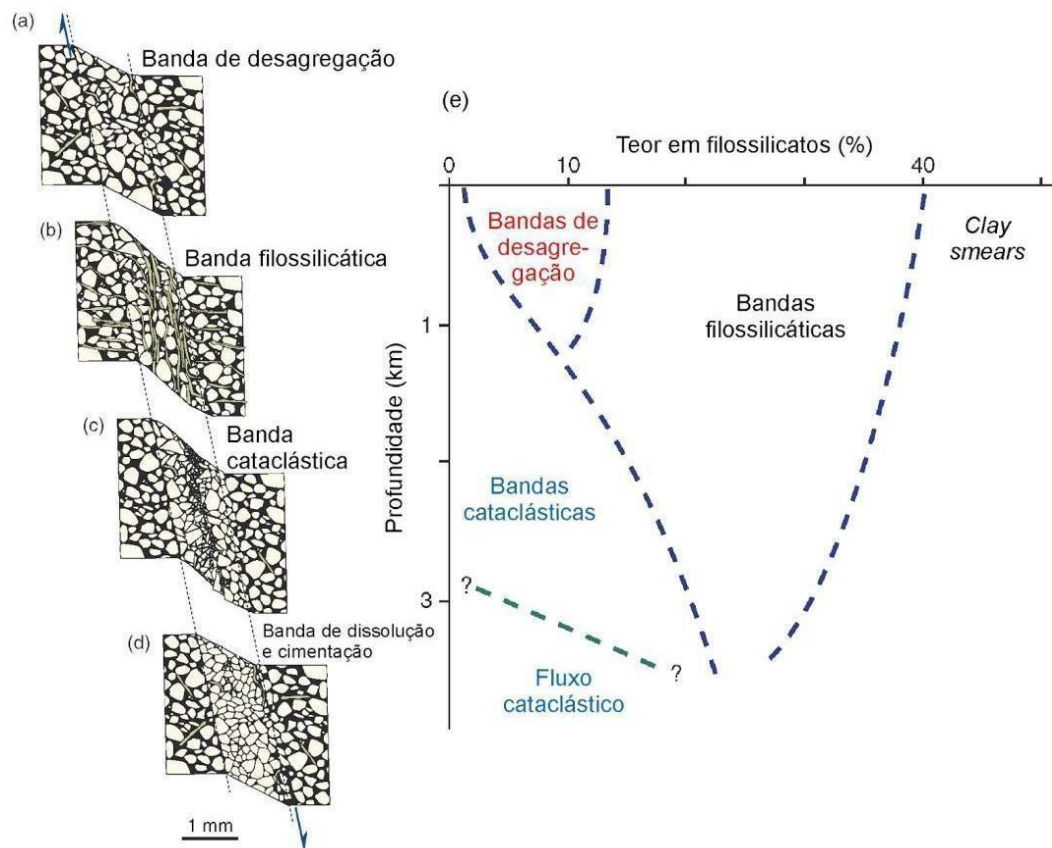


Figura 3 - (a–d) Principais tipos de bandas de deformação baseados no mecanismo de deformação. (e) Gráfico mostrando os tipos de bandas formadas de acordo com a profundidade e o teor em filossilicatos (limites aproximados e graduais, devido à influência de outros fatores). Fonte: Bassi (2022, adaptado de Fossen, 2012).

As bandas de deformação do tipo cataclásticas são as mais comuns, geralmente envolvendo uma maior compactação e redução de porosidade da rocha. Os grãos apresentam-se fragmentados e fraturados, devido ao processo de deformação rúptil. Nesses casos, os grãos estão fraturados e pobremente selecionados, e a deformação é localizada, com limites distintos entre a zona de fragmentação de grãos e a zona de grãos não deformados. Pode haver evidências de cimentação por dissolução (Gibson, 1998; Fossen, 2012).

A formação das bandas cataclásticas ocorre geralmente a uma profundidade mínima de cerca de 1 km, embora essa profundidade crítica possa variar devido a diferentes parâmetros intrínsecos e extrínsecos. Além da profundidade, a presença de uma concentração de argilominerais e filossilicatos abaixo de 15% é considerada um requisito para a formação dessas bandas cataclásticas. Durante o processo de cataclase, o tamanho dos grãos diminui por meio do fluxo cataclástico, e o atrito causado pelo rolamento dos grãos os alinha subparalelos à direção de cisalhamento, resultando em compactação e redução de porosidade da rocha naquela faixa específica (Fossen, 2012; Pei *et al.*, 2015).

Em alguns casos, quando há presença de filossilicatos, pode se formar um filme destes minerais dentro da banda, resultando em bandas filossilicáticas.

As bandas de desagregação envolvem deformação sem fraturamento, e o processo de desagregação ocorre por meio de fluxo granular, que gera atrito ao longo das superfícies de contato dos grãos. A única expressão visual é uma trama local fraca e, em alguns casos, a ausência completa de fraturas nos grãos (Gibson, 1998). As bandas de desagregação são sutis e podem ser difíceis de identificar em escala macroscópica, pois não apresentam sinais óbvios de trituração de grãos ou mudanças na porosidade. A permeabilidade nas bandas de desagregação é geralmente alta em comparação com outros tipos de bandas. Essas estruturas eram frequentemente negligenciadas ou não interpretadas como estruturas tectônicas. É importante diferenciar as bandas de desagregação relacionadas à deformação tectônica das bandas de desagregação sinsedimentares, que são comuns em arenitos e se formam durante ou logo após a deposição (Fossen, 2012). Uma diferença importante é que as bandas relacionadas à deformação tectônica se agrupam e definem a zona de dano em cada lado de uma eventual superfície de falha (Aydin, 1978; Fossen *et al.*, 2007).

Os tipos de bandas de deformação e os mecanismos de deformação envolvidos variam de acordo com a distribuição local das tensões diferenciais, que está relacionada ao regime tectônico, e com as características das rochas afetadas, como profundidade de soterramento, grau de litificação, pressão de fluidos, composição do cimento, arredondamento e seleção dos grãos, mineralogia, teor de filossilicatos, entre outros (Fossen *et al.*, 2017 – Figura 4).

Variável	Fluxo Granular	→	Catáclase
Profundidade de soterramento	Rasa	→	Profunda
Litificação	Inconsolidada	→	Bem litificada
Pressão de fluidos	Alta	→	Baixa
Cimento (composição)	FeO(OH)	→ CaCO ₃ →	SiO ₂
Arredondamento dos grãos	Angulosos	→	Arredondados
Seleção dos grãos	Pobre	→	Bem selecionados
Mineralogia (resistência ao fraturamento)	Alta	→	Baixa
Teor de filossilicatos	Alto	→	Nulo
Regime tectônico	Distensivo	→	Compressivo

Figura 4 – Principais fatores que controlam os processos envolvidos no desenvolvimento de bandas de deformação (*in* Bassi, 2022, a partir de Fossen *et al.*, 2017).

3.2 A influência de bandas de deformação no fluxo de fluidos

Os arenitos podem ser excelentes rochas reservatórios de água e hidrocarbonetos quando possuem porosidade e permeabilidade adequadas para armazenar e transmitir fluidos. No entanto, bandas de deformação têm o potencial de afetar a porosidade original dessas rochas e, conseqüentemente, impactar o fluxo de fluidos (Pei *et al.*, 2015).

Embora as bandas de deformação sejam estruturas relativamente delgadas, com rejeitos e comprimentos milimétricos a centimétricos, sua distribuição espacial e os mecanismos envolvidos em sua formação, assim como sua relação temporal com processos diagenéticos e de litificação, podem influenciar significativamente as propriedades porosas originais dos arenitos (Figura 5).

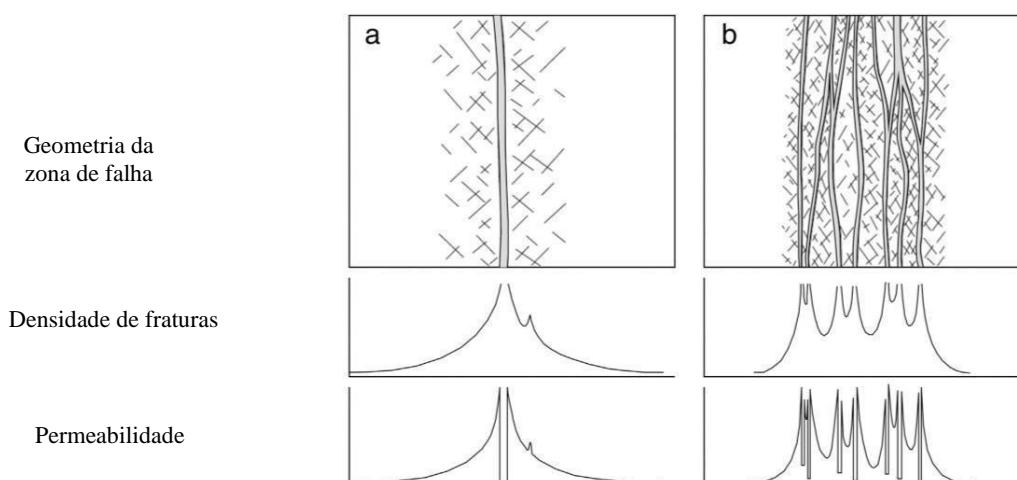


Figura 5 – Variação das propriedades petrofísicas de uma zona de falha. a) Zona representada por uma única superfície; b) zona com múltiplos planos (Pei *et al.*, 2015).

Portanto, a presença de bandas de deformação pode atuar como selante ou compartimentar reservatórios de hidrocarbonetos ou aquíferos, resultando em porções com valores de porosidade e permeabilidade notavelmente menores do que o arenito não deformado.

Pelo fato de as bandas de deformação geralmente não serem identificadas em levantamentos sísmicos, pelo tamanho reduzido e rejeitos sutis, caracterizar zonas de bandas de deformação em arenitos análogos a reservatórios pode ser útil na prospecção e perfuração de poços de hidrocarbonetos ou água subterrânea. Essa caracterização pode auxiliar na identificação de reservatórios compartimentados. Ressalta-se que o efeito selante só pode ser atribuído às bandas de deformação cataclásticas, pois essas estruturas são capazes de reduzir efetivamente as propriedades petrofísicas dos arenitos, embora de forma localizada.

4. ÁREA DE ESTUDO

4.1 Localização

A Bacia de Volta Redonda está localizada na região oeste do estado do Rio de Janeiro, no médio vale do rio Paraíba do Sul, englobando terrenos situados nos municípios de Volta Redonda, Barra Mansa, Pinheiral, e Barra do Piraí. A principal rota de acesso à região da Bacia de Volta Redonda é a Rodovia Presidente Dutra (BR-116), que conecta o Rio de Janeiro a São Paulo. A partir dessa rodovia, é possível acessar a bacia por meio da Rodovia dos Metalúrgicos (VRD-001), da Rodovia Lúcio Meira (BR-393) ou pela RJ-157. Além disso, existem outras vias de acesso à região, como a BR-494 e a Rodovia Volta Redonda-Pinheiral (VRD-101).

O afloramento estudado está situado em uma propriedade privada às margens da Rodovia do Contorno, no município de Volta Redonda (Figura 6). As coordenadas UTM (datum WGS84) da localidade são: W 0597428 e S 7507066, fuso 23. O acesso à Rodovia do Contorno pode ser feito a partir da Rodovia dos Metalúrgicos (VRD-001), próximo ao bairro Jardim Vila Rica-Tiradentes, ou pela região do bairro Três Poços, utilizando as rodovias Lúcio Meira (BR-393) ou Volta Redonda-Pinheiral (VRD-101).

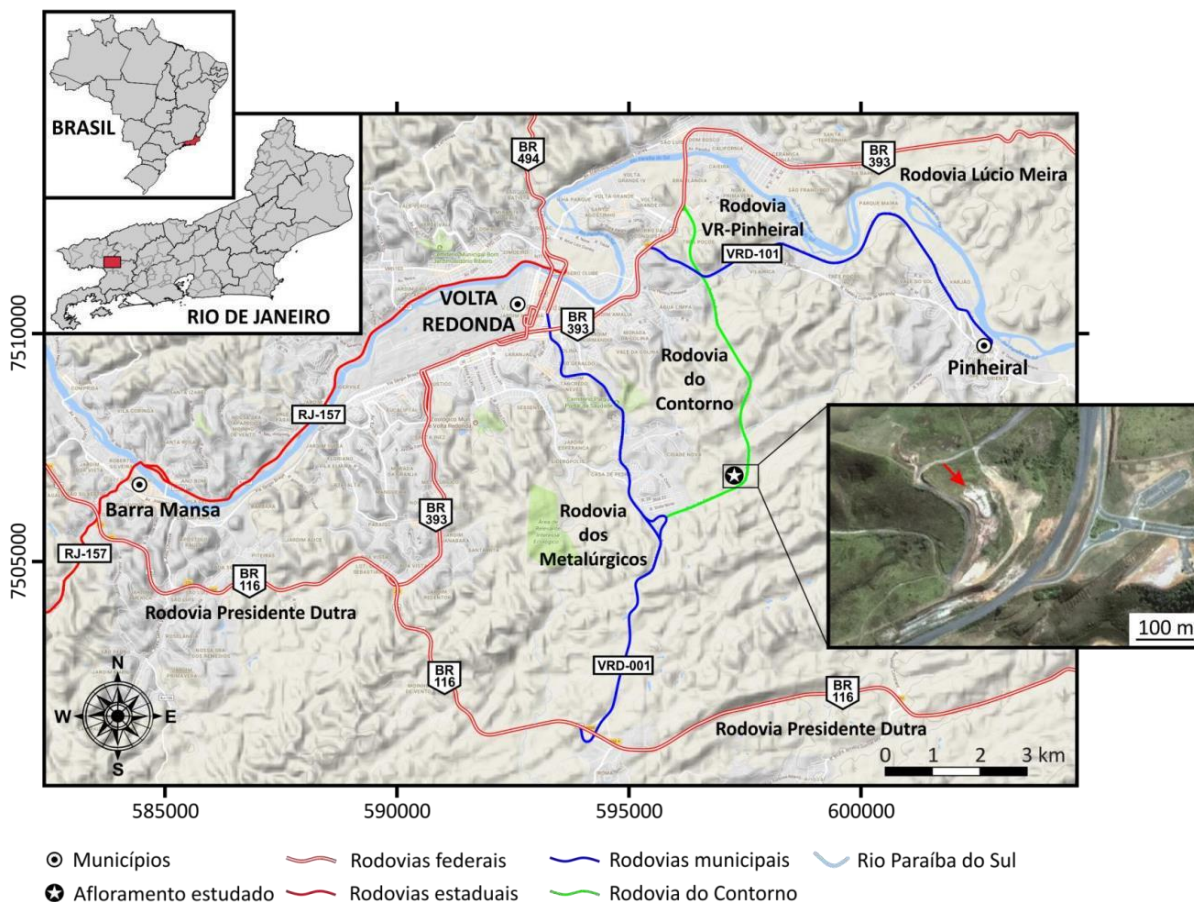


Figura 6 – Mapa de localização do afloramento estudado, destacando as principais vias de acesso para a área de estudo. Fonte: Fiuza (2019).

4.2 Geologia Regional

O *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) abrange uma extensão de cerca de 900 km e é dividido em três segmentos distintos: oriental, ocidental e central (Riccomini, 1989). A Bacia de Volta Redonda está inserida no segmento central do RCSB, em conjunto com as bacias de Resende, Taubaté e São Paulo (Figura 7).



Figura 7 - Rift Continental do Sudeste do Brasil (figura modificado a partir de Melo *et al.*, 1985, retirada de Rotava, 2017), destacando as principais bacias sedimentares envolvidas nesta feição geotectônica. No seu segmento central, estão as bacias de São Paulo, Taubaté, Resende e Volta Redonda.

A reativação de falhas proterozoicas de direção ENE-WSW durante o Eoceno, gerou hemigrábens e assim criou condições favoráveis para a erosão das áreas vizinhas e deposição de sedimentos (Riccomini *et al.*, 2004).

O embasamento dessa região (Figura 8) de idade principalmente neoproterozoica, foi formado durante o evento de colisão entre as massas continentais que atualmente compõem a América do Sul e a África, resultando na formação de rochas metamórficas e ígneas que compõem o segmento central da Faixa Ribeira. Essas rochas são predominantemente orto e paragneisses (milonitizados), migmatitos, granulitos e granitoides, sendo fortemente orientadas ao longo de um *trend* NE-SW (Heilbron *et al.*, 2004).

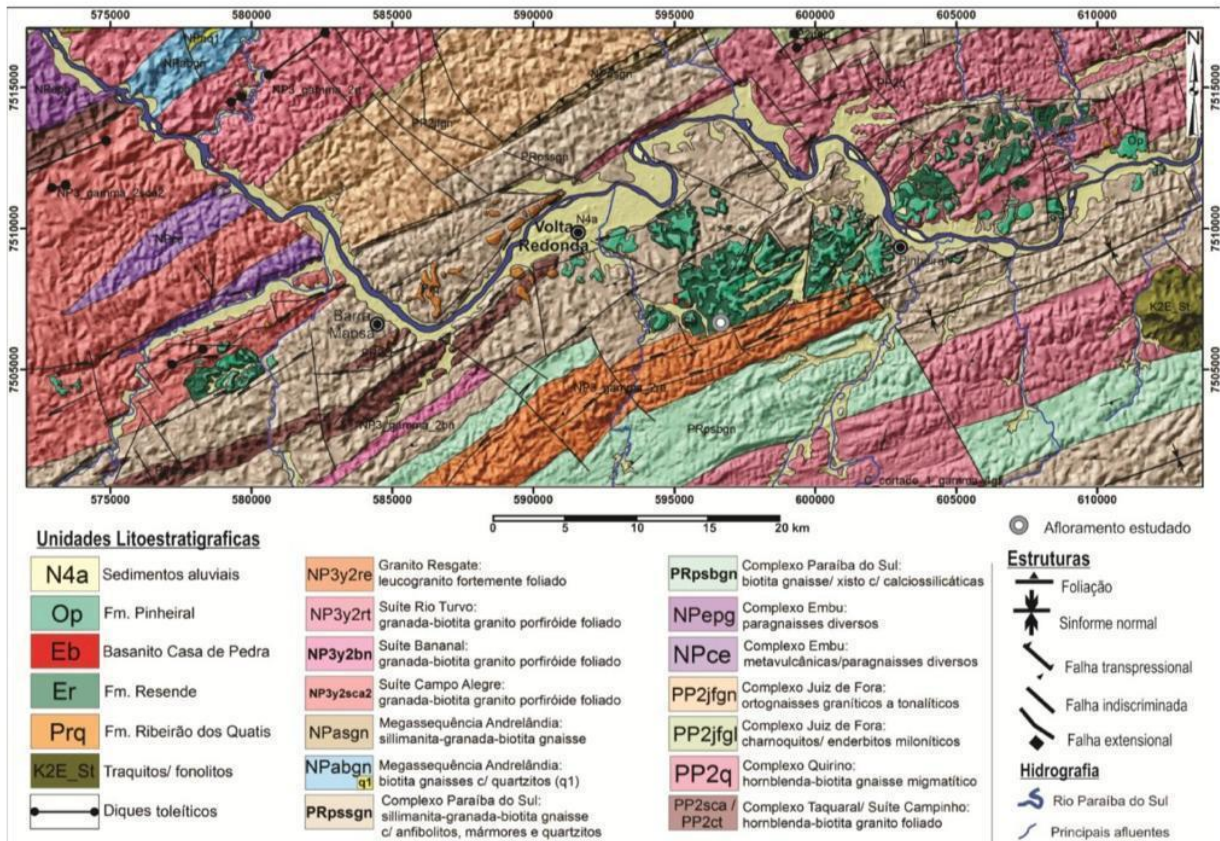


Figura 8 – Mapa geológico da Bacia de Volta Redonda e do embasamento adjacente (adaptado de Negrão, 2014 *in* Maciel, 2016).

No final do Jurássico/início do Cretáceo, a separação das placas Sul-Americana e Africana, como parte do processo de rifteamento do Gondwana, resultou no atual Rife do Atlântico Sul. Esse processo permitiu a erosão e, posteriormente, a exposição do embasamento da região Sudeste do Brasil (Trouw *et al.*, 2000). Diques toleíticos de orientação predominantemente NE-SW estão associados a este evento tectônico.

O embasamento da região inclui ainda plútons compostos principalmente por sienitos e nefelina sienitos (como os maciços alcalinos de Itatiaia e de Passa Quatro, a noroeste da Bacia de Resende, e da Serra dos Tomazes, a leste da Bacia de Volta Redonda) e diques associados, datados do final do Mesozoico, como resultado de um evento magmático que levou à formação de diversos corpos intrusivos em um alinhamento que vai de Poços de Caldas a Cabo Frio (Figura 9).

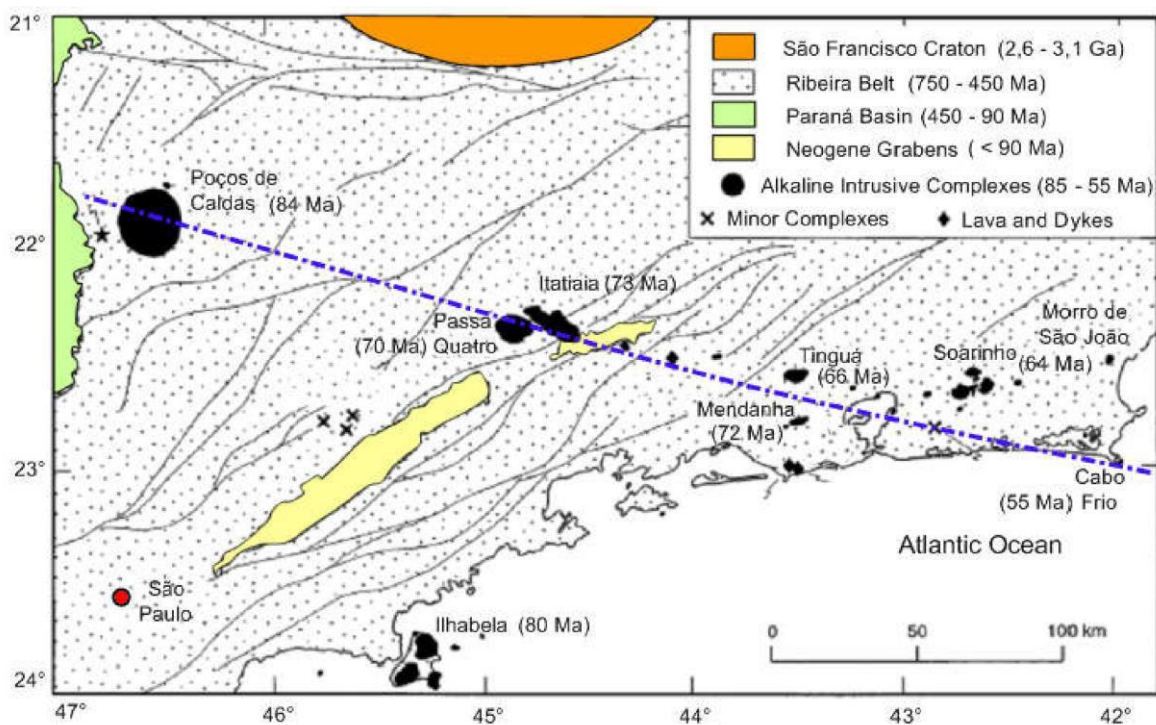


Figura 9 - Alinhamento entre Poços de Caldas (MG) e Cabo Frio (RJ) de intrusões alcalinas datadas do final do Mesozoico/início do Cenozoico. Fonte: Negrão (2014) modificado de Riccomini *et al.* (2004).

4.3 Evolução Tectônica da Bacia de Volta Redonda

A gênese do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) está relacionada a esforços distensivos paleogênicos de direção NNW-SSE (Riccomini *et al.*, 2004). No final do Cretáceo e início do Paleógeno, de acordo com esses autores, o acúmulo de sedimentos na Bacia de Santos (porção oceânica adjacente ao sudeste brasileiro) que ocorreu posteriormente à formação do rifte oceânico (Rifte do Atlântico Sul) foi responsável pelo desequilíbrio isostático da região em questão. Este desequilíbrio acarretou na reativação de zonas de cisalhamento proterozoicas, de direção ENE-WSW, possibilitando assim a formação de hemigrábens que receberam um notável volume de sedimentos durante o Cenozoico (Asmus & Ferrari, 1978).

Considerando Riccomini (1989) e Riccomini *et al.* (2004), a evolução do RCSB é composta por cinco fases tectônicas. A primeira fase (E1), datada do Eoceno, corresponde à distensão NNW-SSE que resultou na abertura e principal preenchimento sedimentar e vulcanismo associado (Figura 10).

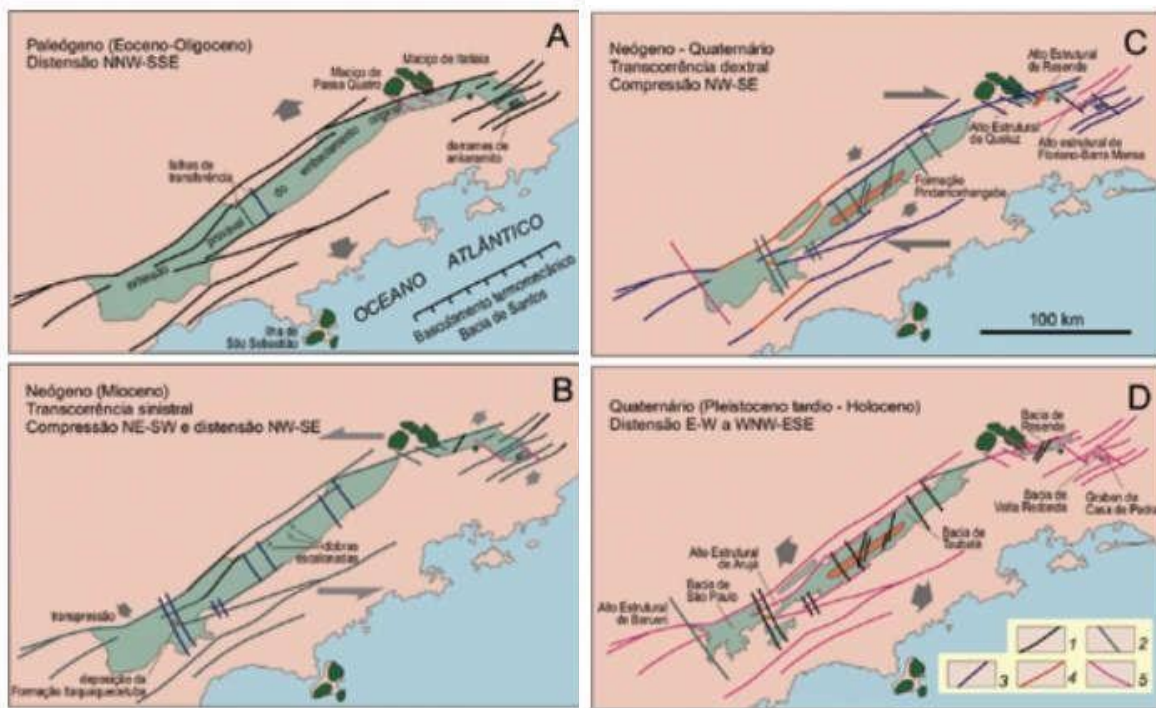


Figura 10 - Esboços paleotectônicos da evolução do segmento central do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil - Legenda no quadro D: 1) falhas de componente predominante normal; 2) falha de componente transcorrente sinistral; 3) falha de componente transcorrente dextral; 4) falha de componente predominante reversa; 5) falha com movimentação não caracterizada. Fonte: Riccomini *et al.* (2004).

As fases seguintes (TS, TD, E2 e C) têm caráter deformador. A primeira (TS) corresponde a uma transcorrência sinistral E-W de idade entre o Oligoceno final e o Mioceno. Nessa fase, a tectônica afetou somente depósitos paleogênicos, não atingindo outros depósitos (neogênicos e quaternários). A fase TD, similarmemente correlacionada com uma transcorrência E-W, contudo dextral, apresenta estruturas afetando depósitos paleogênicos e neogênicos. A fase E2 é relacionada a uma distensão NW-SE e afetou todo o registro cenozoico até o Holoceno. A última fase (C) corresponde a uma compressão E-W atual.

Segundo Negrão *et al.* (2015), pode-se destacar três principais momentos tectonossedimentares significativos na evolução da Bacia de Volta Redonda (Figura 11). O primeiro, associado ao pré-rifte, apresenta esforços distensionais na direção NNW-SSE, responsáveis pela reativação de zonas de cisalhamento proterozoicas ENE-WSW. Esta fase teria ocorrido durante o final do Cretáceo e o início do Paleógeno e seu registro é correlacionado a sistemas fluviais entrelaçados de alta energia, correspondendo à Formação Ribeirão dos Quatis, sucessão sedimentar mais antiga na coluna estratigráfica da bacia.

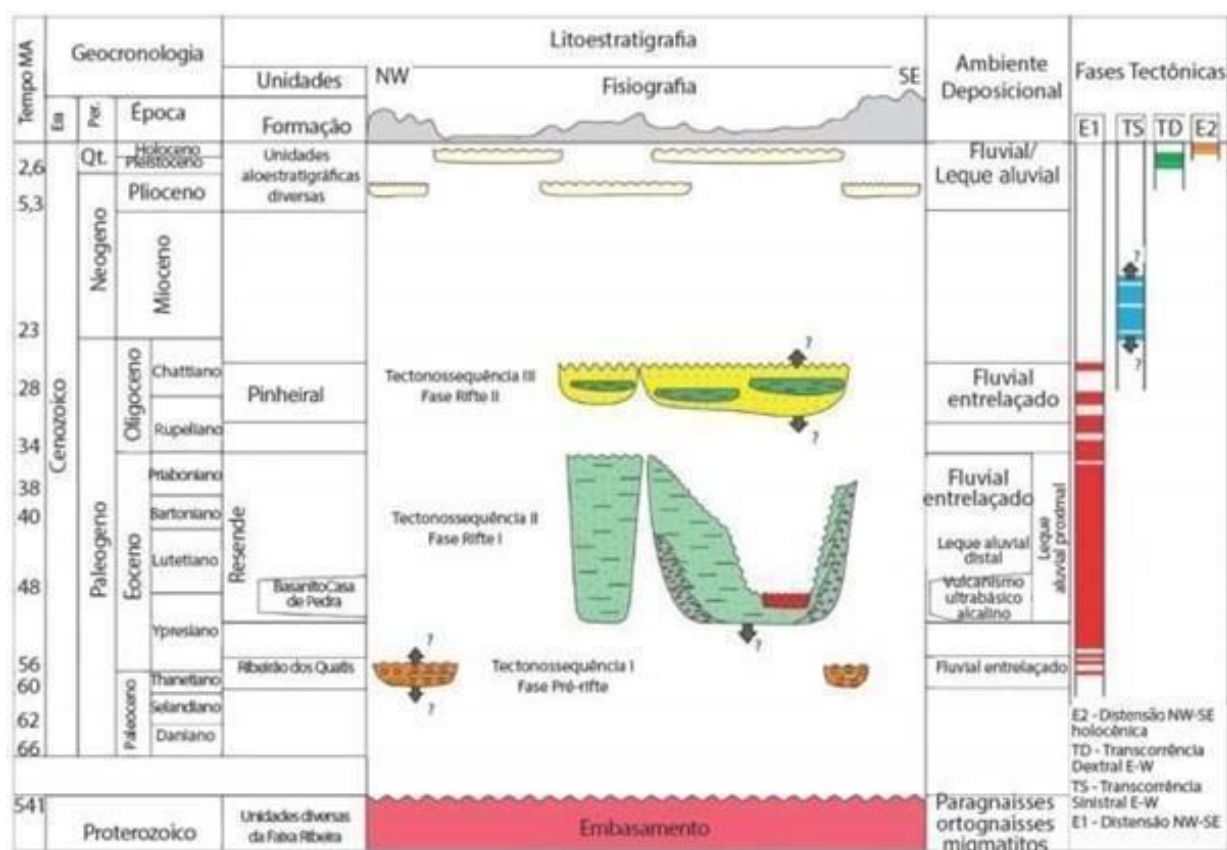


Figura 11 - Coluna litoestratigráfica e fases tectônicas propostas para a região da Bacia de Volta Redonda por Negrão *et al.* (2015 - modificada por Fiuza, 2019).

O segundo momento está relacionado à fase Rifte I. Ele é caracterizado por ter sido o principal estágio de abertura que levou à reativação da trama litoestrutural proterozoica, resultando em hemigrábens que acumularam os registros fluviais e de leques aluviais da Formação Resende. Os depósitos desta unidade encontram-se dispostos em inconformidade com o embasamento cristalino pré-cambriano. Durante este evento, a reativação de falhas transversais foi responsável por derrames ultramáficos alcalinos que formaram o Basanito Casa de Pedra.

A fase Rifte II teve taxas de subsidência relativamente menores que a fase de Rifte I, estando associada a um sistema fluvial entrelaçado, com possível formação de corpos lacustres restritos, que corresponde à Formação Pinheiral, em desconformidade com o Basanito Casa de Pedra e a Formação Resende.

Negrão *et al.* (2015) também reconhecem as fases tectônicas E1, TS, TD e E2 propostas por Riccomini *et al.* (2004). A fase E1 corresponde aos estágios Rifte I e II, sendo responsável pela configuração de um hemigráben (Figura 12). As fases tectônicas deformadoras (TS, TD e E2) resultaram na configuração de depocentros isolados que caracteriza a região da Bacia de Volta Redonda.

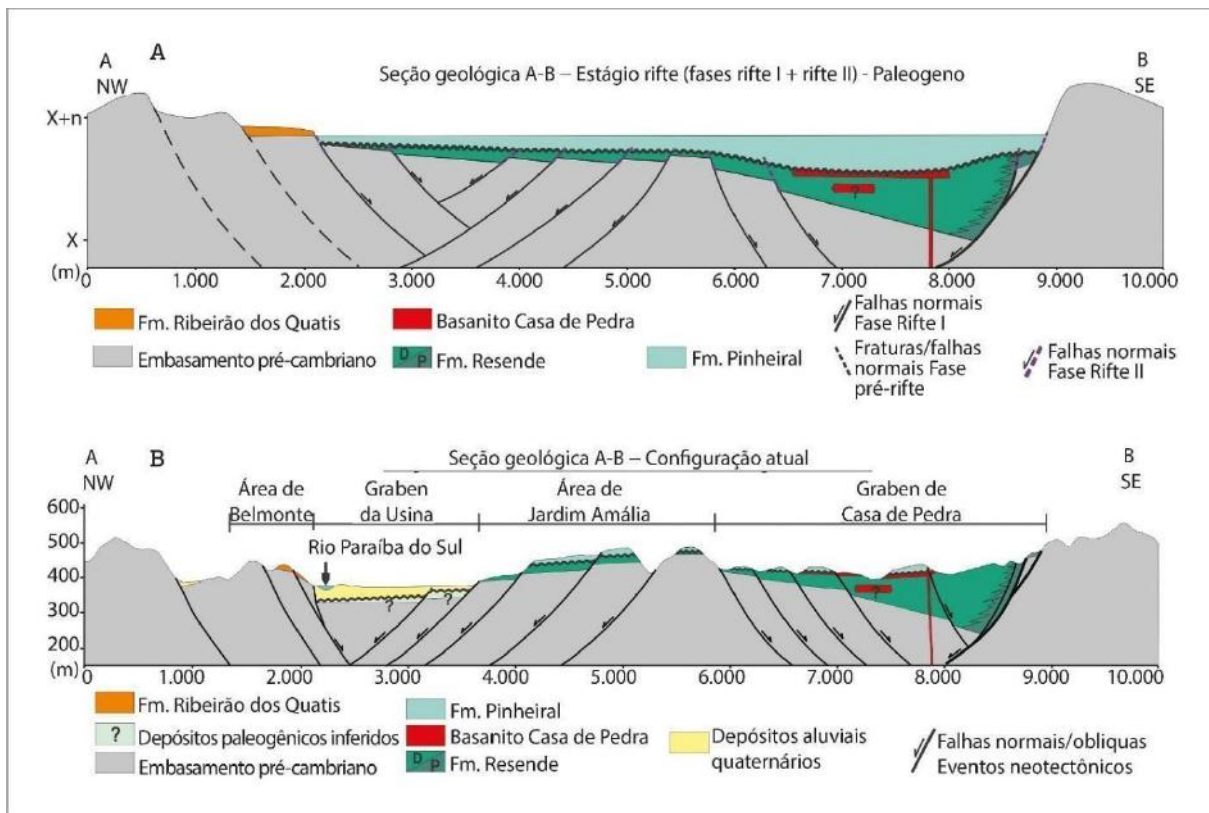


Figura 12 – Seções geológicas representativas da evolução tectônica da Bacia de Volta Redonda, segundo Negrão *et al.* (2015). (A) Seção geológica representativa do hemigráben produzido no estágio Rifte. (B) Seção geológica representativa da configuração atual em depocentros e áreas de ocorrência distintas após as fases tectônicas deformadoras.

4.4 Estratigrafia da Bacia de Volta Redonda

O preenchimento da Bacia de Volta Redonda, segundo Sanson *et al.* (2006) e Negrão *et al.* (2015), foi distinguido em quatro unidades litoestratigráficas (Figura 11): Formação Ribeirão dos Quatis, Formação Resende, Basanito Casa de Pedra e Formação Pinheiral.

A Formação Ribeirão dos Quatis ocorre em inconformidade com o embasamento e tem idade mínima atribuída ao Eoceno. É caracterizada essencialmente pela superposição de camadas conglomeráticas com intercalações de camadas de arenitos feldspáticos, além de raras lentes pelíticas. Na sua base predominam camadas amalgamadas de cascalhos finos a grossos, maciços ou com estratificação mal definida, depositadas por fluxos hidrodinâmicos episódicos de alta energia. Camadas de arenitos grossos laminados ou com estratificações cruzadas acanaladas se intercalam com os conglomerados, representando um momento de menor energia do agente de transporte. Segundo Sanson *et al.* (2006), essa sucessão corresponde ao registro de um sistema fluvial entrelaçado e conglomerático com espessura total de aproximadamente oito metros.

Os depósitos da Formação Resende registram sistemas de leques aluviais e canais fluviais axiais (Sanson *et al.*, 2006). Tais sistemas foram gerados através da reativação de falhas proterozoicas que formaram hemigrábens e são caracterizados pela alternância de ciclos granodescrescentes, formados, na base, por conglomerados finos a médios, sotoposto a arenitos feldspáticos de coloração entre branco e cinza com estratificações cruzadas acanaladas. No topo, há presença de unidades tabulares pelíticas maciças de coloração esverdeada, apresentando-se de maneira relativamente extensa.

O Basanito Casa de Pedra é caracterizado por rochas vulcânicas ultramáficas alcalinas, que apresentam textura afanítica, microfenocristais, vesículas e amígdalas, e feições que sugerem, pelo menos, dois derrames superpostos. A espessura descrita para a unidade é de aproximadamente 11 m, com idades de $49,5 \pm 0,4$ Ma pelo método Ar-Ar (Ramos *et al.*, 2008), posicionando-as no Eoceno inicial (Lutetiano)

A Formação Pinheiral ocorre em desconformidade com o Basanito Casa de Pedra e com a Formação Resende, de provável idade oligocênica. Seus depósitos ocorrem tipicamente no topo de colinas de conformação íngreme, com espessuras entre 20 e 30 m. São caracterizados por apresentar ciclos de até 3 m de espessura, marcados na base por *lags* de cascalhos e acúmulos de brechas intraformacionais e no topo um padrão rítmico de sedimentação entre fácies arenosas e rudáceas, de origem trativa (Sanson *et al.*, 2006). Além disso, também são registradas nesta unidade camadas pelíticas maciças e laminadas que por vezes alcançam espessuras métricas. Seu registro corresponde ao de canais fluviais entrelaçados, com expressiva sedimentação pelítica em períodos de afogamento do complexo de canais ou enchentes importantes (Sanson *et al.*, 2006).

4.5 Revisão de trabalhos anteriores

Maciel (2016) e Maciel *et al.* (2017) realizaram os primeiros estudos de caracterização do afloramento da Formação Resende considerado no presente estudo (Figura 13a), analisando os conjuntos de falhas/estrias. Esses estudos interpretaram três regimes de paleotensões, associando-os aos propostos por Negrão *et al.* (2015): transcorrência sinistral E-W (TS), transcorrência dextral E-W (TD) e distensão NW-SE (E2).

Fiuza (2019) apresentou uma seção estratigráfica-estrutural mais detalhada da porção inferior do afloramento (Figura 13b).

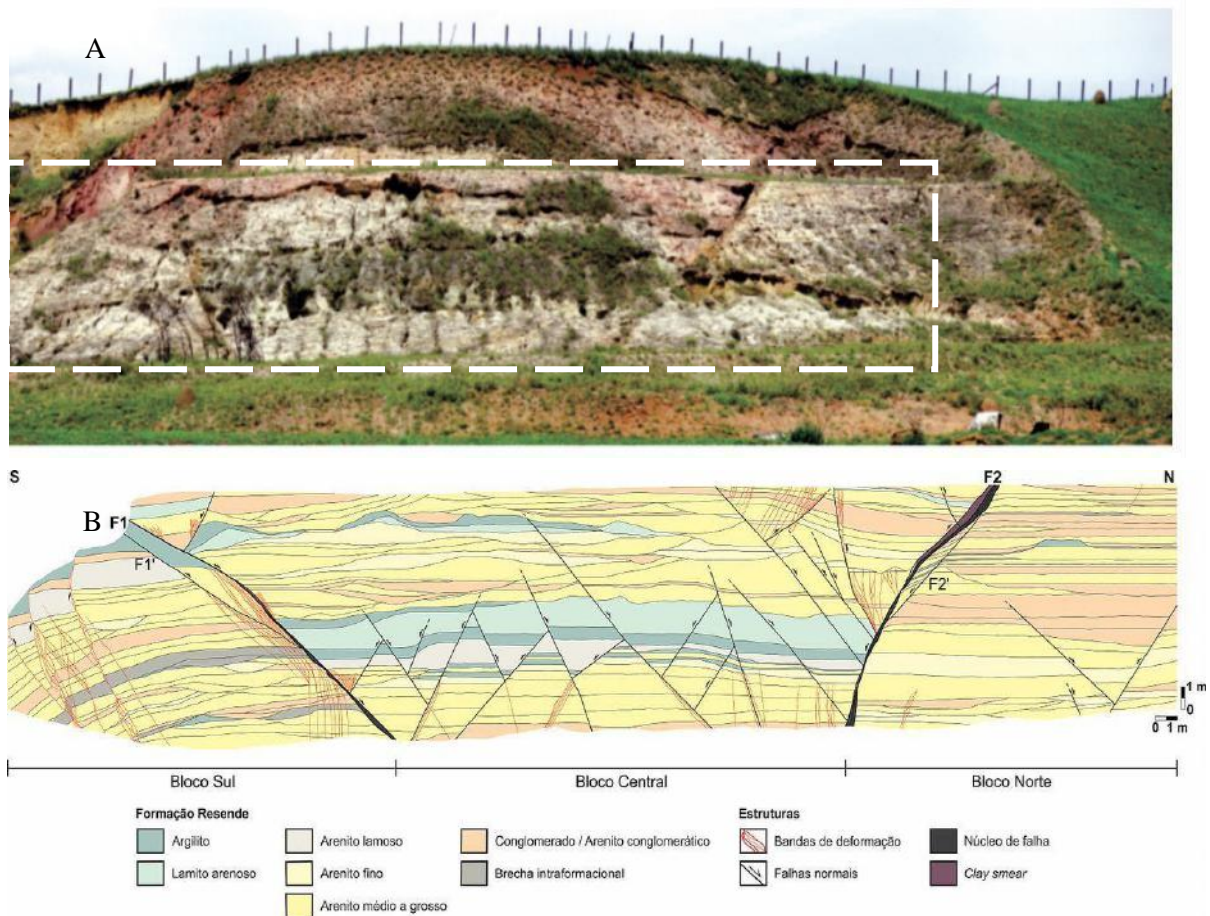


Figura 13 – (A) Afloramento da Formação Resende na Bacia de Volta Redonda considerado no presente estudo, descrito inicialmente por Maciel (2016). (B) Seção estratigráfica-estrutural produzida por Fiuza (2019) para a porção inferior do afloramento.

Rotava (2017) prosseguiu com os estudos das bandas de deformação identificadas por Maciel (2016) e Maciel *et al.* (2017), classificando-as em dois tipos a partir de análises microscópicas (Figura 14): bandas cataclásticas, devido à redução de porosidade e o fraturamento de grãos; e bandas de desagregação, caracterizadas pela reorientação dos grãos e ausência de fraturamento. A redução de porosidade nestas faixas controla a percolação de fluidos, o que pode ser observado pela cimentação por óxido/hidróxido de ferro paralela a essas estruturas.

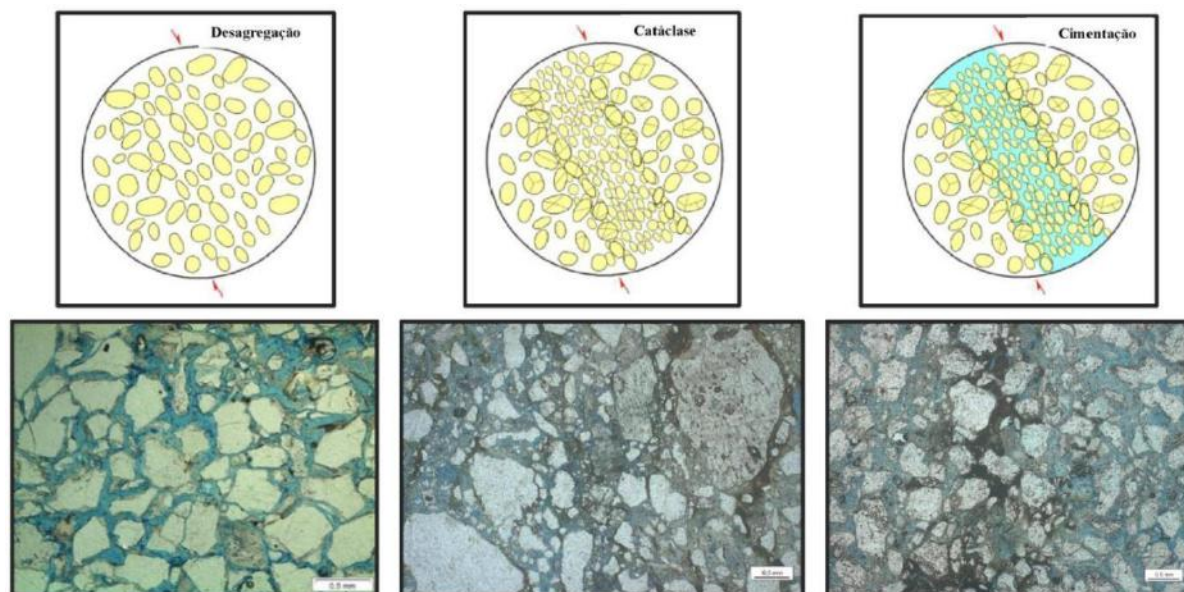


Figura 14 - Representações esquemáticas de bandas de desagregação, bandas cataclásticas e cimentação associada a bandas de deformação (a partir de Pei *et al.*, 2015), relacionando-as a cada uma dessas feições identificadas por Rotava (2017) em arenitos da Formação Resende na Bacia de Volta Redonda – extraída de Fiuza (2019).

Rotava (2017) também realizou a quantificação dos aspectos texturais e composicionais dos arenitos da Formação Resende, analisando lâminas petrográficas de arenitos não deformados e deformados. Os resultados revelaram uma redução da porosidade nas rochas com maior grau de deformação (F1#3A_CP1 e F1#3B_BP1), atribuída ao aumento do teor de matriz e de cimentação por óxido/hidróxido de ferro, em comparação com amostras com menor ou nenhuma deformação (BD#1/2_AP1, BD#1/2_BP1, P1#3, P1#4 e P1#5) – Tabela

1. Quanto aos aspectos composicionais, a autora concluiu que os arenitos com bandas de deformação (BD#1/2_AP1, BD#1/2_BP1) apresentaram resultados similares aos não deformados (P1#3, P1#4 e P1#5), sendo classificados como arcóseos líticos (Tabela 2), enquanto os arenitos mais deformados (F1#3A_CP1 e F1#3B_BP1) são definidos como arcóseos. Tais resultados foram atribuídos à atuação da deformação na cominuição dos litoclastos e na fragmentação dos grãos de feldspatos.

A quantificação dos aspectos texturais e composicionais, realizada por Rotava (2017) foi baseada na análise das lâminas petrográficas como um todo, representando uma média para cada lâmina. No entanto, como essas rochas apresentam faixas com diferentes graus de deformação, torna-se necessária a quantificação destes aspectos em cada faixa de deformação.

Tabela 1 – Aspectos texturais dos arenitos deformados (por bandas de deformação e falhas) e não deformados em afloramento da Formação Resende na Bacia de Volta Redonda (Rotava, 2017).

	Arenitos deformados				Arenitos não-deformados		
	BD#2_API	BD#2_BP1	F1#3A_CP1	F1#3B_BP1	P1#3	P1#4	P1#5
Arcabouço	56,5%	60,7%	56%	45,4%	62,7%	65,4%	57,5%
Matriz	10%	7,4%	23%	27,7%	15,5%	8,1%	13%
Cimentação (óxido de ferro)	7,4%	10%	15%	15,7%	-	-	1,4%
Porosidade Total	26,1%	22,1%	6%	11,2%	21,8%	26,5%	28,1%
Primária	15%	11,7%	0,3%	-	16%	17,4%	20%
Secundária	11,1%	10,4%	5,7%	-	5,8%	9,1%	8,1%
<i>Fratura</i>	6,4%	6,7%	5%	-	3,4%	4,4%	5,4%
<i>Móldica</i>	4,7%	3,7%	0,7%	-	2,4%	4,7%	2,7%
Total	100%	100,2%	100%	100%	100%	100%	100%

Tabela 2 – Aspectos composicionais dos arenitos deformados (por bandas de deformação e falhas) e não deformados em afloramento da Formação Resende na Bacia de Volta Redonda (Rotava, 2017).

	Arenitos deformados				Arenitos não-deformados		
	BD#2_API	BD#2_BP1	F1#3A_CP1	F1#3B_BP1	P1#3	P1#4	P1#5
Quartzo total	67,3%	70%	66,7%	58,2%	66,7%	60,8%	61,7%
Qtzo. monocristalino	54,9%	57,2%	54,8%	-	59,7%	41,9%	49,5%
Qtzo. policristalino	12,4%	12,8%	11,9%	-	7%	18,9%	12,2%
Feldspato total	24,9%	23,6%	28,9%	37,4%	23,1%	27%	24%
Microclina	11,3%	9,9%	10,7%	-	7%	10,7%	9,4%
Ortoclásio	5,3%	3,9%	5,4%	-	9,1%	7,6%	6,4%
Plagioclásio	3,5%	4,9%	3,2%	-	2,2%	4,6%	3,5%
Não classificado	4,8%	4,9%	9,6%	-	4,8%	4,1%	4,7%
Fragmentos líticos total	4,7%	3,9%	1,4%	4,4%	4,3%	10%	8,3%
Lítico plutônico	4,2%	3,9%	0,7%	4,4%	3,2%	6%	5,9%
Lítico metamórfico	0,5%	-	0,7%	-	1,1%	4%	2,4%
Lítico vulcânico	-	-	-	-	-	-	-
Mica total	3%	2,3%	3%	-	5,9%	2,2%	6%
Muscovita	1,8%	0,7%	3%	-	5,9%	0,7%	4,7%
Biotita	1,2%	1,6%	-	-	-	1,5%	1,3%
Total	100%	99,8%	100%	100%	100%	100%	100%

Vogel (2018) identificou os aspectos texturais que estão relacionados à deformação desses arenitos da Formação Resende através da análise de imagens tomográficas e microtomográficas, associando a análises petrofísicas para que houvesse uma maior compreensão do impacto da deformação rúptil na porosidade e permeabilidade dos arenitos analisados. Essas análises revelaram que nas faixas de deformação ocorre redução no tamanho dos grãos e do espaço poroso, aumento do grau de compactação e concentração de óxidos e hidróxidos de ferro. Os resultados confirmaram a correlação entre a concentração de faixas mais deformadas nas rochas e os menores valores de porosidade e permeabilidade.

Os estudos realizados por Fiuza (2019) indicaram que os arenitos grossos e conglomerados finos apresentavam uma menor densidade de bandas de deformação, sendo porém mais espessas nessas litologias. Em contraste, nos arenitos finos a médios, a densidade de bandas de deformação era maior e a espessura menor.

Bassi (2022) quantificou os aspectos texturais por faixas de deformação em amostras de arenitos não deformado e deformados, anteriormente analisadas por Rotava (2017). A autora verificou que as faixas de maior deformação são caracterizadas por valores mais altos de matriz e cimento, e conseqüente redução da porosidade (Figura 15). Constatou também que as lâminas com maior grau de deformação apresentam mais faixas cataclásticas e características texturais mais heterogêneas. Em seu estudo, Bassi (2022) não abordou os aspectos composicionais.

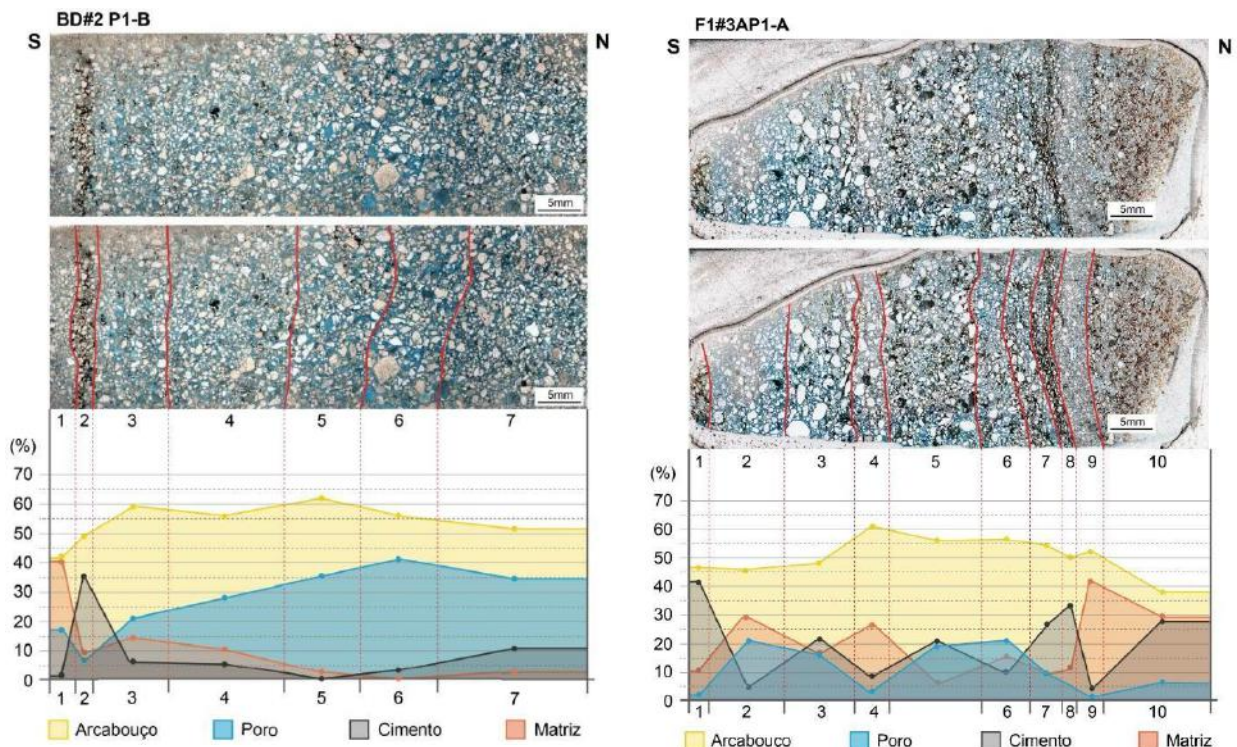


Figura 15 – Aspectos texturais quantificados por Bassi (2022) para as diferentes faixas de deformação reconhecidas em lâminas de arenitos da Formação Resende coletados em zona de bandas de deformação (BD#2 P1-B) e em zona de falha (F1#3AP1-A) em afloramento na Bacia de Volta Redonda.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente estudo, foram conduzidas análises em três lâminas petrográficas de amostras de arenitos da Formação Resende provenientes do afloramento investigado na Bacia de Volta Redonda (Figura 16): uma de arenito não deformado (ND#3) e duas de arenitos deformados (BD#1/2 e F1#3A). As amostras BD#1/2 e F1#3A também foram analisadas em estudos anteriores realizados por Rotava (2017), Vogel (2018), Fiuza (2019) e Bassi (2022). A amostra ND#3 foi analisada anteriormente por Bassi (2022) e provém da mesma camada de amostra analisada anteriormente por Rotava (2017).

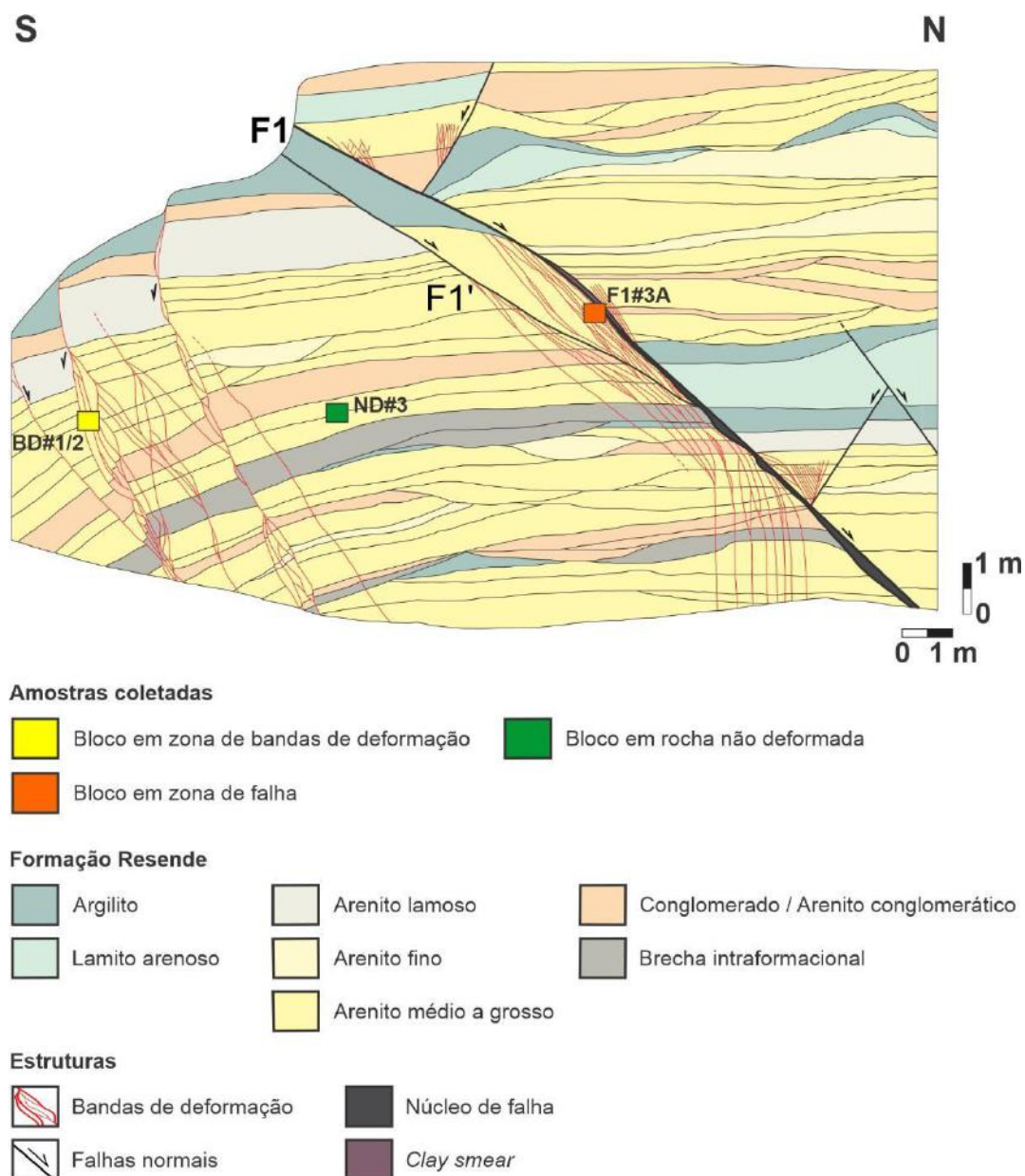


Figura 16 – Localização das amostras na seção estratigráfica-estrutural elaborada por Fiuza (2019), com enfoque na porção sul do afloramento estudado.

Após a coleta, os blocos de arenito foram submetidos a um tomógrafo médico no Laboratório de Tomografia do CENPES/PETROBRAS. Com base nas imagens obtidas, foram selecionadas áreas específicas nos blocos para a extração de *plugs* (Figura 17) destinados a ensaios petrofísicos, conforme descrito por Vogel (2018). Os *plugs* foram orientados perpendicularmente e paralelamente às principais bandas de deformação e falhas observadas. As capas desses *plugs* foram utilizadas para a confecção das lâminas petrográficas, após impregnação com resina líquida e corante azul para facilitar a identificação dos poros da rocha (Figura 18).

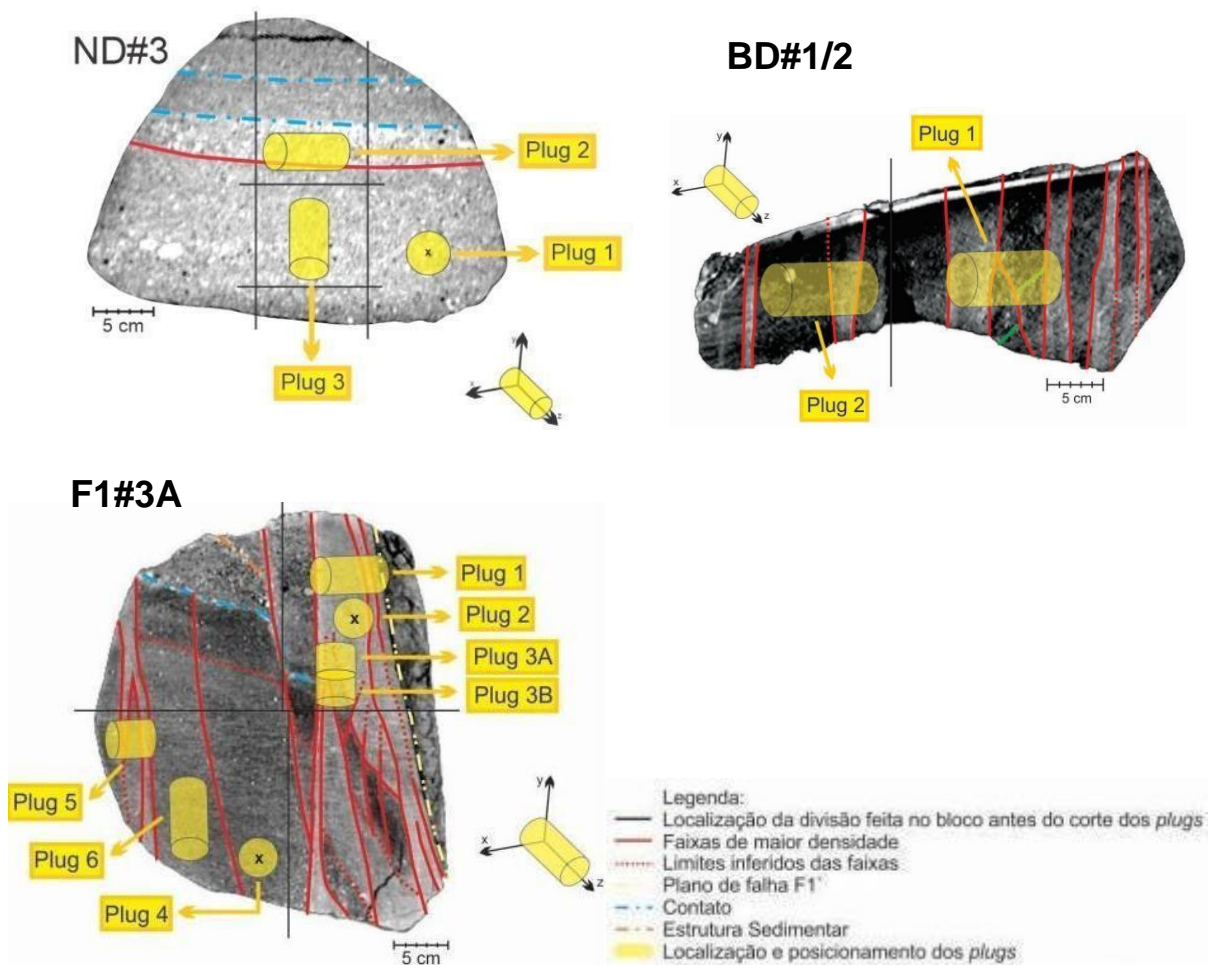


Figura 17 – Imagens tomográficas dos blocos de arenitos ND#3, BD#1/2 e F1#3A, com orientação dos *plugs* confeccionados por Vogel (2018).

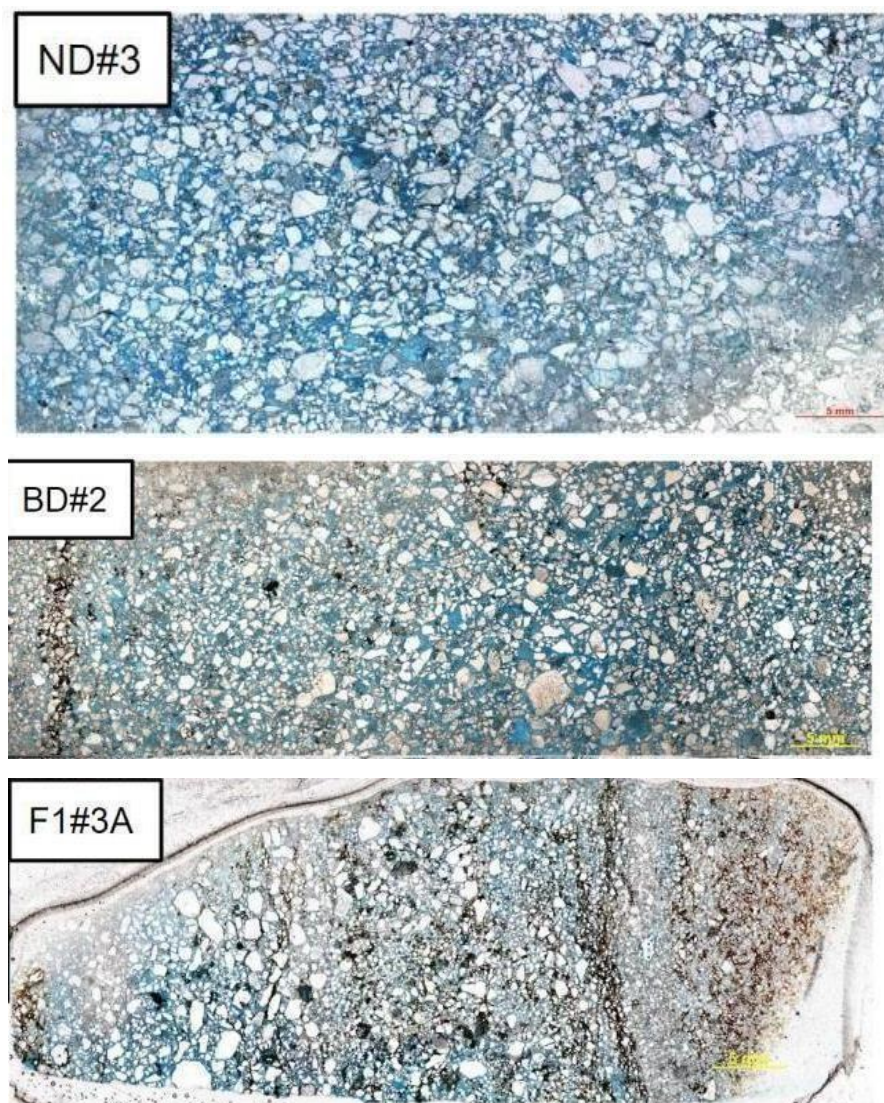


Figura 18 - Imagens das lâminas dos arenitos analisados: A) lâmina confeccionada no bloco ND#3_plug 2; B) lâmina confeccionada no bloco BD#1/2_plug 1; C) lâmina confeccionada no bloco F1#3A_plug 1.

A descrição textural foi realizada utilizando imagens completas das lâminas petrográficas, adotando-se o método Gazzi-Dickinson (Dickinson, 1970), com a contagem de 500 pontos em uma malha no *software CoreIDRAW* 2019. Foram quantificados os seguintes aspectos texturais: granulometria, matriz, cimento e porosidade. A contagem de pontos no arenito não deformado (ND#3) foi feita ao longo de toda a imagem da lâmina. Nas imagens das lâminas dos arenitos deformados (BD#1/2 e F1#3A) foram reconhecidas faixas milimétricas (Figura 19) a partir de diferenças nas características texturais. Utilizando a malha, foram distribuídos pontos em cada uma dessas faixas, proporcionalmente à quantidade de faixas identificadas. Por exemplo, se foram identificadas dez faixas, foram distribuídos simetricamente 50 pontos em cada uma delas, totalizando pelo menos 500 pontos para a contagem.

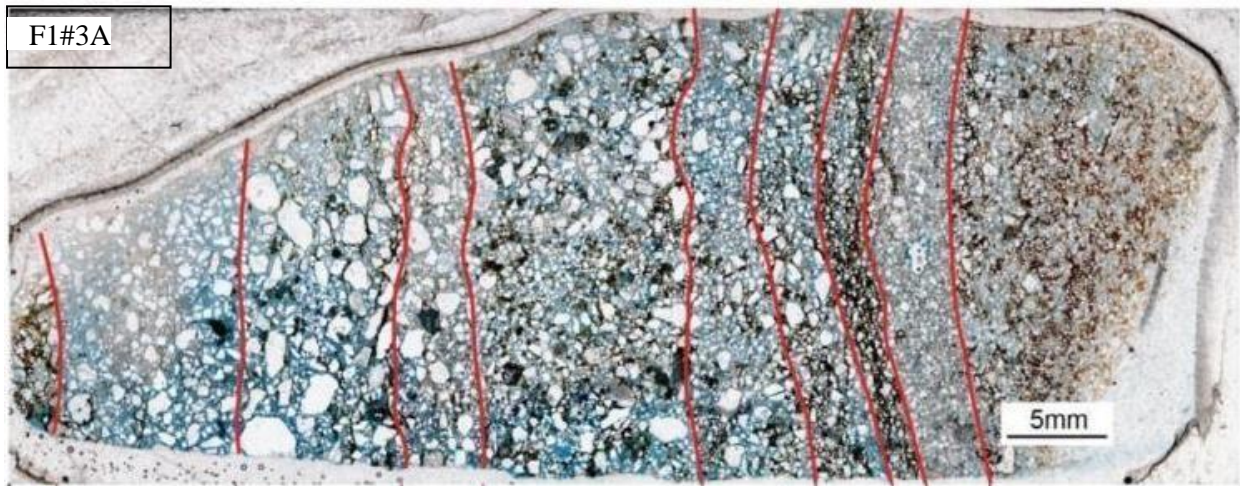
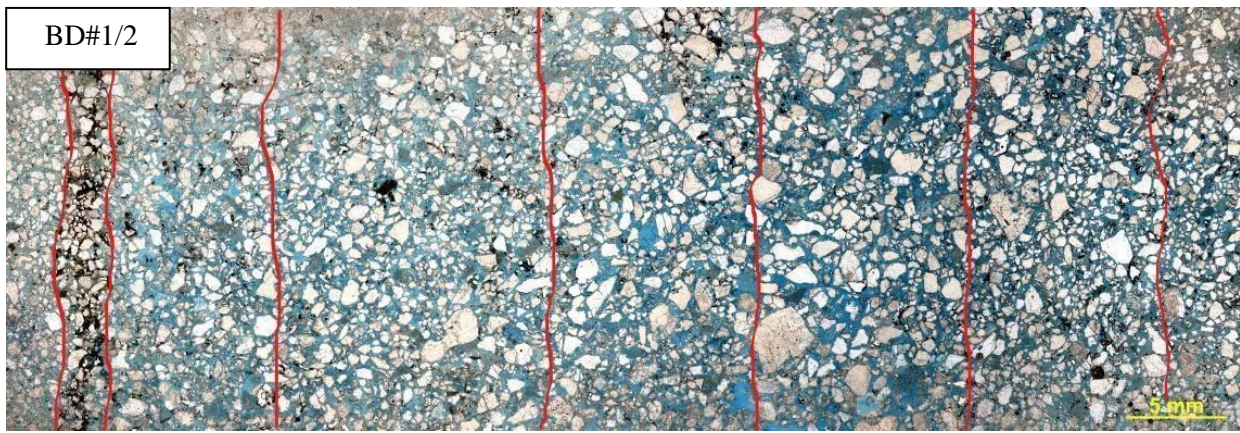


Figura 19 – Imagens da lâminas petrográficas de arenitos deformados (BD#1/2 e F1#3A), com a interpretação de faixas milimétricas com diferentes características texturais.

A descrição dos aspectos composicionais nas lâminas de arenitos deformados e não deformados foi realizada utilizando microscópio binocular de luz transmitida da marca OLYMPUS (modelo CX31), pertencente ao Cenozoico/Grupo de Pesquisas em Geologia Sedimentar e Tectônica do Departamento de Geologia/UFRJ. As análises também foram baseadas no método Gazzi-Dickinson (Dickinson, 1970) e seguiram os mesmos procedimentos aplicados na descrição dos aspectos texturais com relação à contagem de pontos nas lâminas de arenitos não deformado (lâmina toda) e deformados (considerando as faixas de diferentes graus de deformação).

6. RESULTADOS

6.1 Análise textural do arenito não deformado

A amostra ND#3 consiste em um arenito grosso a muito grosso (Figura 20), moderadamente selecionado, com grãos angulosos a subangulosos e circularidade predominantemente baixa (Figura 21a), exibindo alinhamentos de grãos associados a estruturas sedimentares primárias, como estratificações cruzadas. A composição predominante é de quartzo, com destaque para a alteração dos grãos de feldspato, resultando na formação de uma matriz argilosa (epimatriz) e porosidade móldica (Figura 21b).

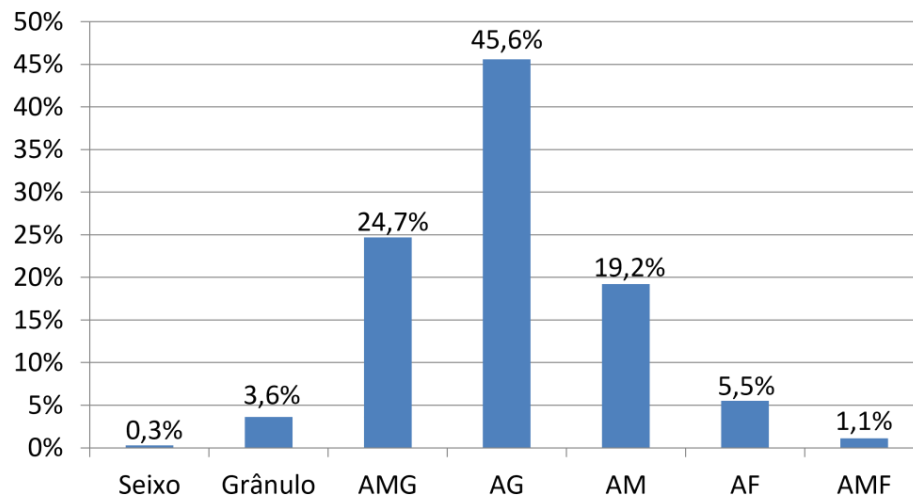


Figura 20 – Padrão granulométrico do arcabouço do arenito ND#3.

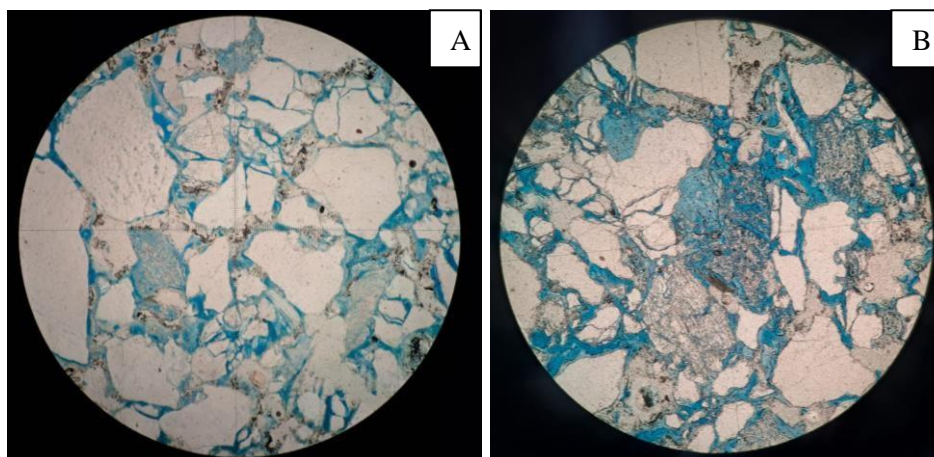


Figura 21 – Fotomicrografias obtidas do arenito ND#3. A) Arenito médio a grosso, moderadamente selecionado, com grãos angulosos (nicóis paralelos, aumento de 4x, diâmetro do campo de 5 mm); B) destaque, no centro da imagem, para grão de ortoclásio alterado, produzindo porosidade móldica e matriz argilosa (epimatriz), contornando os grãos (nicóis paralelos, aumento de 4x, diâmetro do campo de 5 mm).

Os contatos entre os grãos são principalmente pontuais e longos (Figura 21a), indicando uma baixa compactação desses depósitos. É comum encontrar grãos sem contatos diretos, conhecidos como "grãos flutuantes", devido à alteração dos grãos de feldspato.

De acordo com a análise realizada para a amostra ND#3, o arenito não deformado apresenta baixas proporções de matriz (7%) e de cimento por óxido/hidróxido de ferro (6%). A porosidade calculada para essa amostra é de 22% (Figura 22).

A matriz predominante é do tipo epimatriz, caracterizada como uma matriz de origem secundária, resultante de processos não deposicionais, como a alteração dos feldspatos para argilominerais, como a illita e a caulinita. Essa matriz ocorre ao redor dos grãos, infiltrando-se nos poros intergranulares da rocha.

A porosidade é principalmente de origem secundária, resultante da expansão e contração da matriz e também da dissolução de grãos de feldspatos (porosidade móldica).

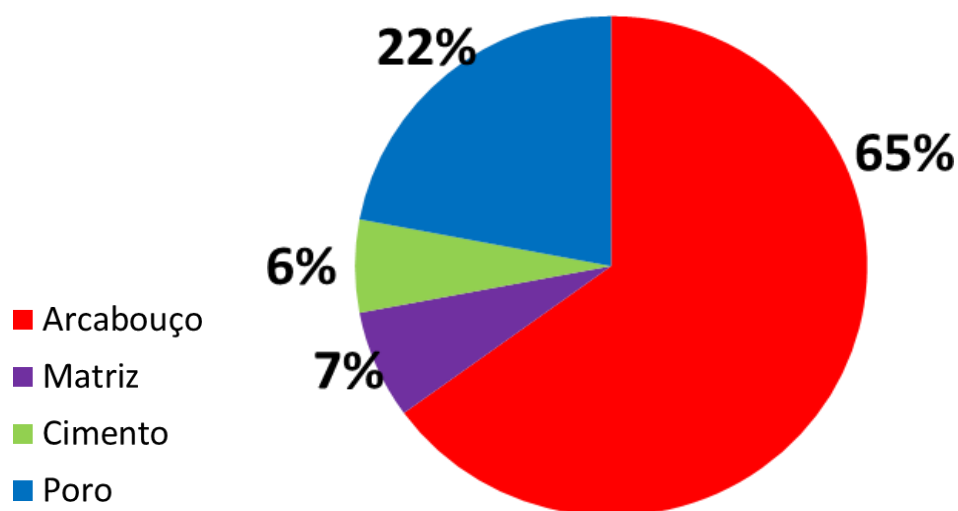


Figura 22 – Percentuais de arcabouço, matriz, cimento e porosidade do arenito ND#3.

6.2 Análise textural dos arenitos deformados

- Amostra BD#1/2

A amostra de arenito deformado BD#1/2 foi coletada em uma zona de bandas de deformação. Essa amostra é classificada como um arenito grosso a médio (Figura 23), moderadamente a pobremente selecionado, com grãos angulosos a muito angulosos e com baixa circularidade.

A análise textural para a lâmina como um todo indicou uma composição de 56,5% de arcabouço, 25,5% de poro, 9,5% de cimento e 8,5% de matriz (Figura 24). Nessa amostra, é possível observar a presença de epimatriz caulínica e pseudomatriz. Os grãos estão bastante fraturados (Figura 25a), em especial quartzo e microclina, porém alguns grãos ainda estão intactos.

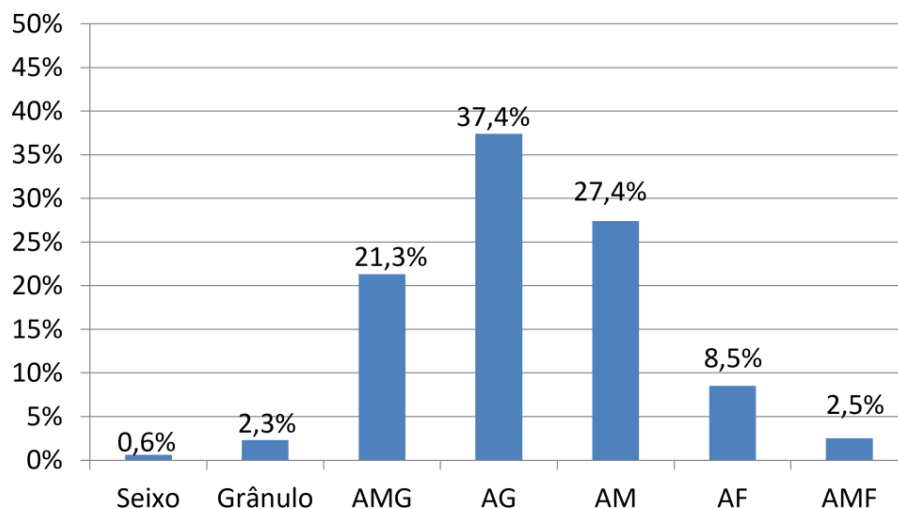


Figura 23 - Padrão granulométrico do arcabouço do arenito BD#1/2.

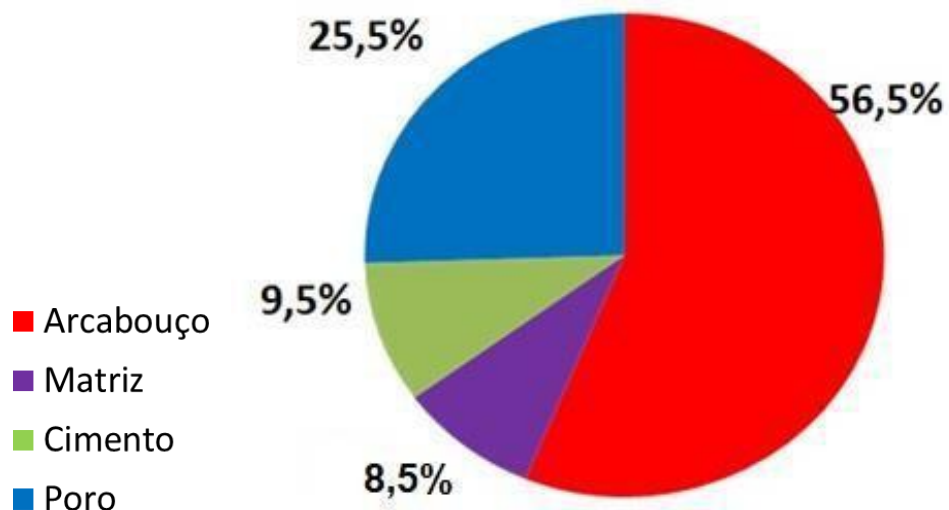


Figura 24 – Percentuais de arcabouço, matriz, cimento e porosidade do arenito BD#1/2.

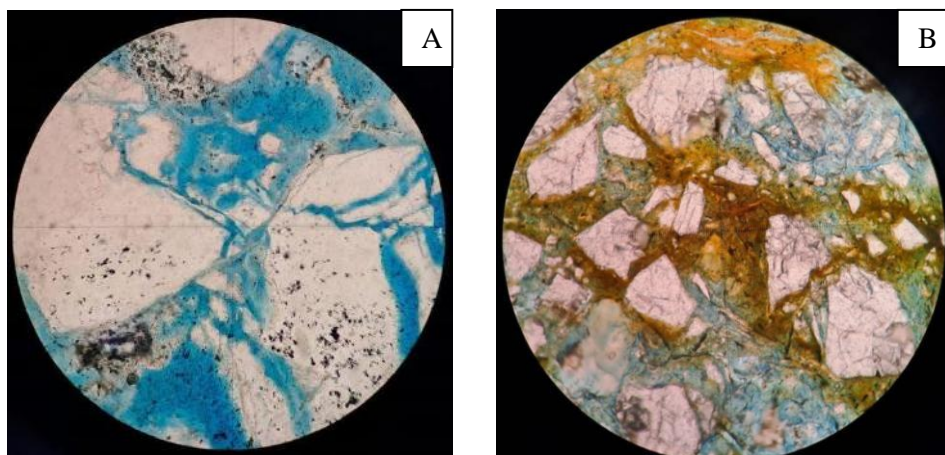


Figura 25 – A) Fotomicrografia obtida na amostra BD#1/2, destacando a fragmentação da borda de grãos de quartzo (nicóis paralelos, aumento de 20x, diâmetro do campo de 1 mm). B) Fotomicrografia obtida na amostra BD#1/2, destacando a cimentação por óxidos/hidróxidos de ferro (nicóis paralelos, aumento de 20x, diâmetro do campo de 1mm).

A análise da lâmina petrográfica da amostra BD#1/2 levou à identificação de oito faixas milimétricas verticais a subverticais com base nas diferenças texturais (Figura 26), associadas a variações no grau de deformação dútil na rocha. As faixas mais deformadas são caracterizadas por uma redução no tamanho dos grãos do arcabouço, maior quantidade de matriz e menor porosidade (Figura 27). Além disso, adjacente a essas faixas, foi observada uma maior concentração de cimento por óxidos/hidróxidos de ferro (Figura 25b).

Nas faixas 1 e 2, respectivamente, destacam-se os valores mais altos de matriz e cimento (Figura 27). A faixa 2, em particular, demonstra uma diminuição marcante na porosidade em relação às outras faixas da lâmina. A diminuição da porosidade na faixa 1 está relacionada ao aumento da quantidade de matriz e ao empacotamento dos grãos, enquanto na faixa 2 está associada à elevada porcentagem de cimento. A faixa 8 também revela uma diminuição na porosidade, com um aumento considerável na quantidade de matriz.

A diminuição da granulometria na faixa 1 está relacionada ao processo de cominuição da rocha associado à deformação tectônica, sendo esta faixa considerada como a mais deformada da lâmina. Os teores elevados de cimento na faixa 2 podem ser relacionados a uma barreira imposta pela baixa porosidade da faixa 1 à passagem dos fluidos meteóricos, levando à precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro. Esses processos também podem ser observados na faixa 8, com a diminuição da porosidade e o aumento da matriz. Isso sugere que o padrão textural apresentado nas faixas 1, 2 e 3, em relação ao aumento da matriz e do cimento, respectivamente, poderia ser esperado em faixas subsequentes à faixa 8.

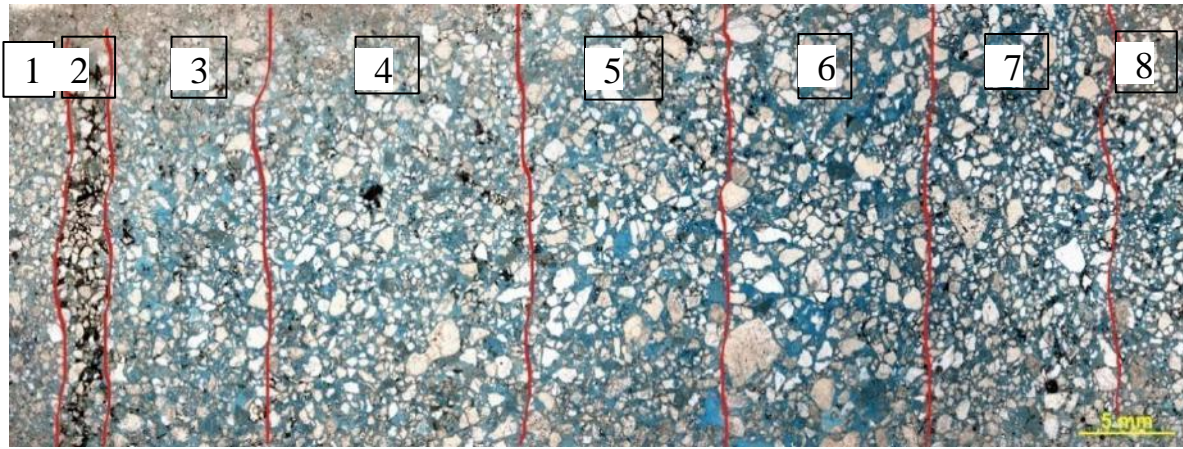


Figura 26 – Imagem da lâmina BD#1/2, com a interpretação de faixas milimétricas (1 a 8) com diferentes características texturais.

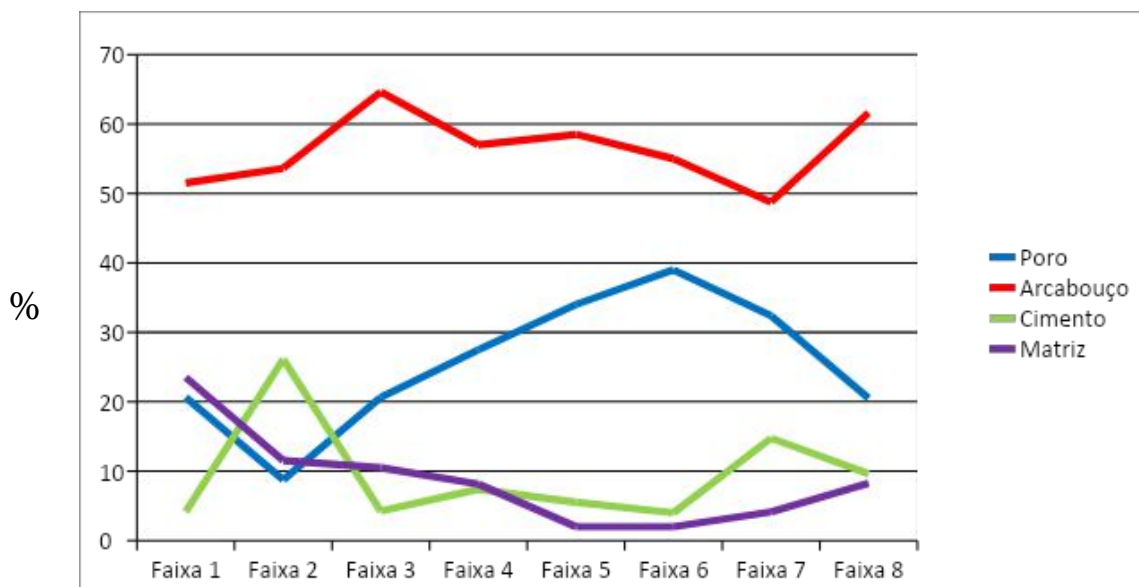


Figura 27 – Variações de porosidade, arcabouço, cimento e matriz no arenito BD#1/2 conforme as faixas com diferentes características texturais.

Estruturas como sutis alinhamentos de grãos estão presentes na lâmina. Também é possível perceber que existem poucos grãos fraturados, podendo indicar que essa rocha também apresenta bandas do tipo de desagregação.

- Amostra F1#3A

A amostra de arenito F1#3A foi coletada em uma zona de falha com grande concentração de bandas de deformação. Essa amostra é classificada como um arenito médio a muito grosso (Figura 28), pobremente selecionado, com grãos muito angulosos e com baixa circularidade.

A análise textural indicou uma composição de 58% de arcabouço, 7,5% de poro, 13,5% de cimento e 21% de matriz (Figura 29).

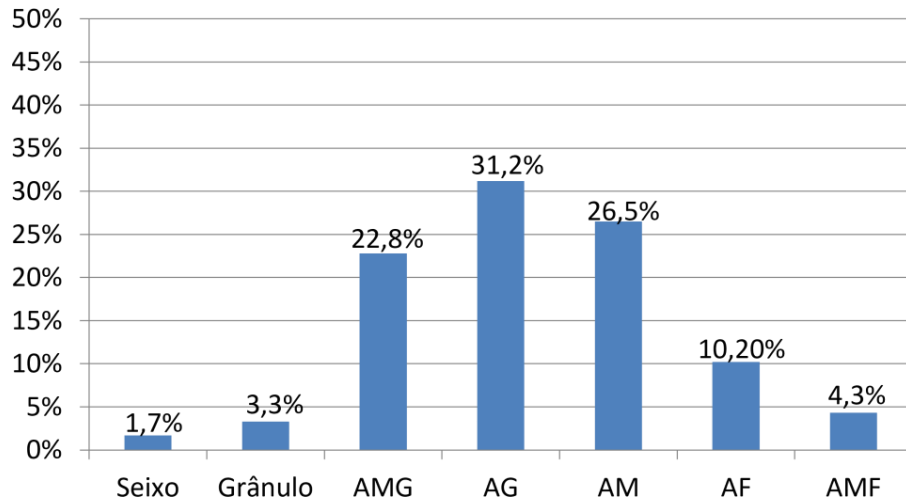


Figura 28 - Padrão granulométrico do arcabouço do arenito F1#3A.

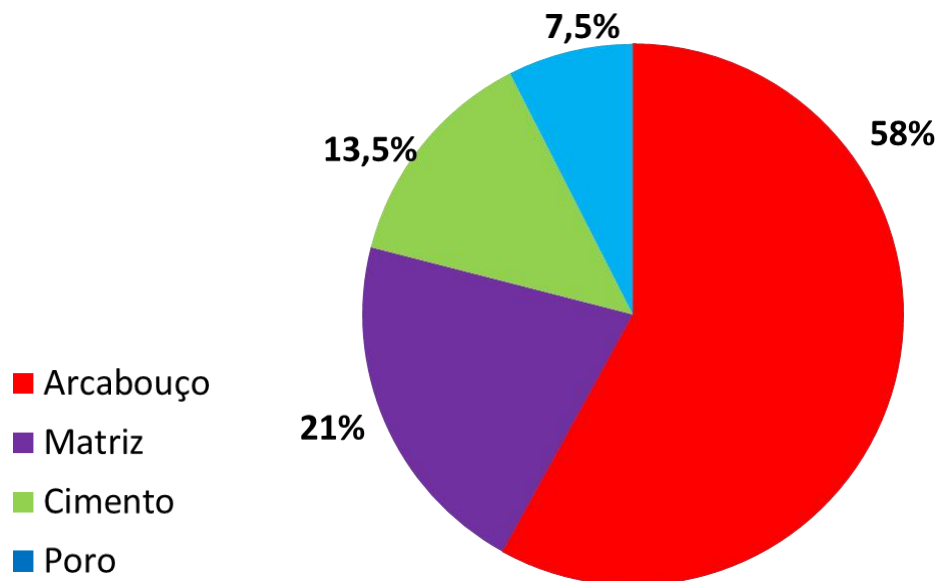


Figura 29 – Percentuais de arcabouço, matriz, cimento e porosidade do arenito F1#3A.

Foram identificadas e interpretadas dez faixas milimétricas, com diferentes padrões texturais, indicando maior ou menor concentração de deformação (figuras 30 e 31). As faixas 4 e 9 são interpretadas como as mais deformadas, especialmente a faixa 9, tendo em vista o aumento no percentual de matriz, redução da granulometria do arcabouço, grãos mais empacotados em relação a outras faixas e uma distribuição granulométrica mais homogênea.

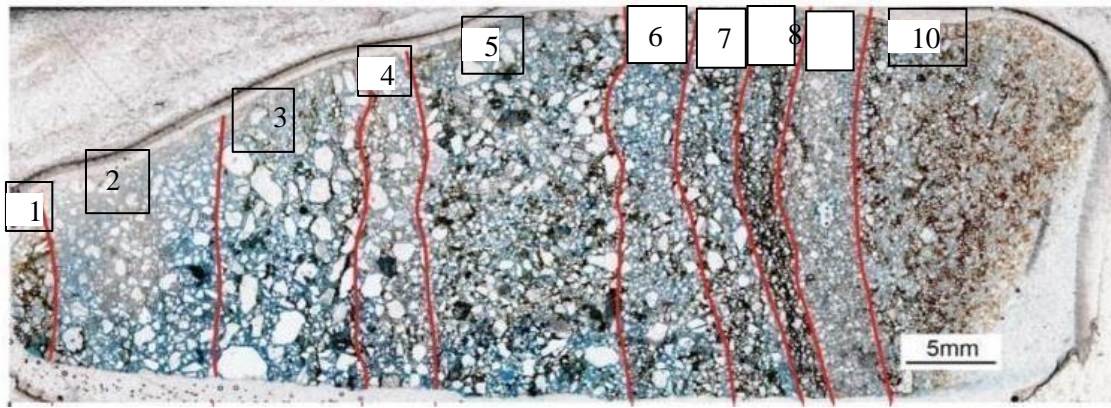


Figura 30 – Lâmina F1#3A, com a interpretação de faixas milimétricas (1 a 10) com diferentes características texturais.

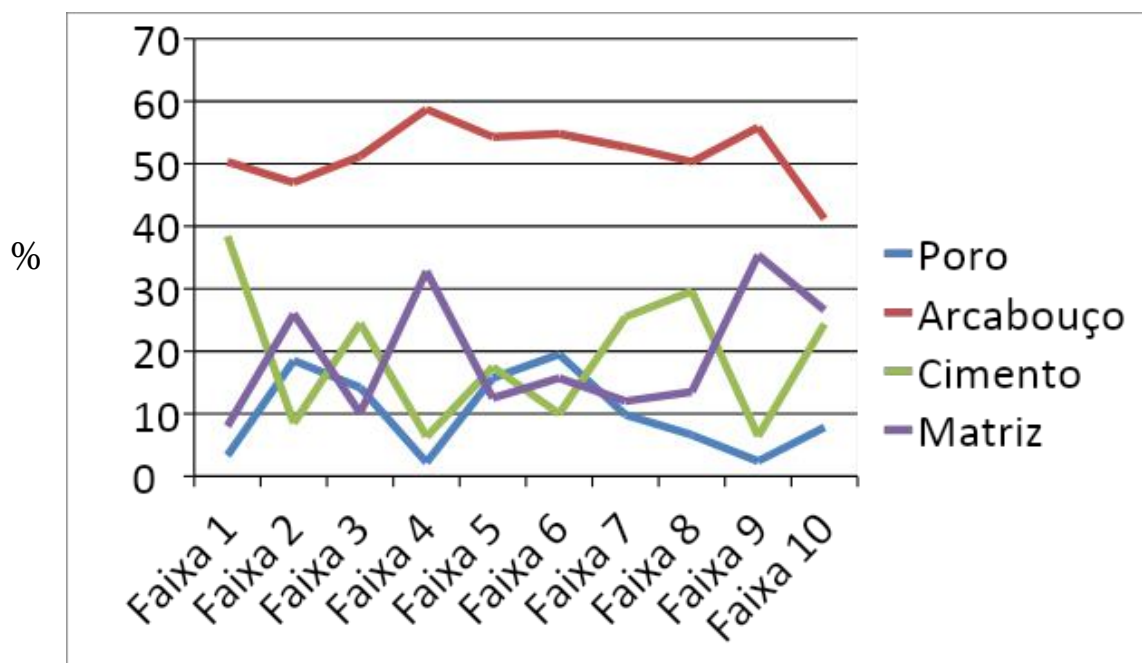


Figura 31 – Variações de porosidade, arcabouço, cimento e matriz no arenito F1#3A conforme as faixas com diferentes características texturais.

Adjacente às faixas mais deformadas, há uma maior concentração de cimento de óxidos/hidróxidos de ferro (faixas 3, 5, 8 e 10), o que também foi verificado na faixa 1. A maior concentração de cimento nas faixas 8 e 10 está associada à presença de banda de deformação cataclástica, com maior porcentagem de matriz e redução da porosidade, ou seja, a faixa mais deformada (faixa 9) atuou como uma barreira para a percolação de fluido meteórico. O mesmo processo de deformação pode ser observado na faixa 4, assim como seus efeitos nas faixas adjacentes (3 e 5).

6.3 Aspectos composicionais do arenito não deformado

Em relação aos aspectos composicionais do arenito não deformado (amostra ND#3), o principal constituinte é o quartzo (58,4%), seguido pelos feldspatos (28,9%), micas (6,4%) e litoclastos (6,4%) - Tabela 3.

Tabela 3 – Aspectos composicionais do arenito ND#3.

	ND#3
Quartzo total	58,4%
Feldspato total	28,9%
Microclina	12,5%
Ortoclásio	9,3%
Plagioclásio	7,1%
Mica total	6,4%
Muscovita	3,0%
Biotita	3,4%
Fragmentos líticos	6,4%

Dentre os feldspatos, destaca-se a microclina, com geminação tartan bem marcada, grãos localmente dissolvidos, formando, assim, porosidade móldica. Ortoclásio e plagioclásio (Figura 32a) apresentam-se bem característicos, também com alterações que geram porosidade móldica; a presença de inclusões de quartzo pôde ser observada em alguns grãos deste grupo. Em relação às micas, biotita e muscovita apresentam-se sem grandes alterações, porém uma leve deformação por compactação está presente em alguns grãos (Figura 32b). Os litoclastos são em sua maioria de rochas ígneas plutônicas, onde em sua mineralogia são encontrados grãos de quartzo associados aos diferentes tipos de feldspatos. Outros litoclastos são de origem metamórfica.

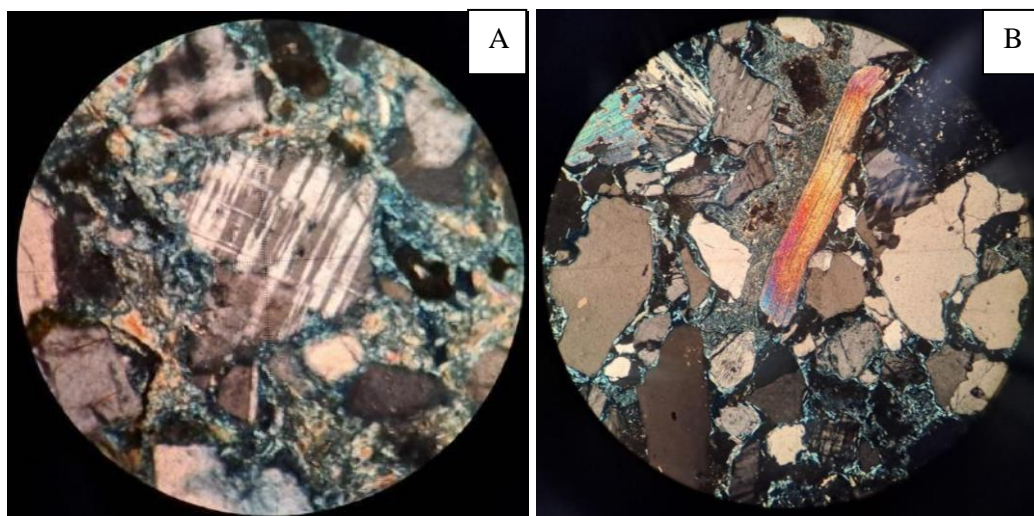


Figura 32 – A) Fotomicrografia obtida na amostra ND#3, destacando um grão de plagioclásio, (nicóis cruzados, aumento de 20x, diâmetro do campo de 1 mm). B) Fotomicrografia obtida na amostra ND#3, destacando um grão de biotita levemente deformado por compactação (nicóis cruzados, aumento de 20x, diâmetro do campo de 1 mm).

6.4 Aspectos composicionais dos arenitos deformados

- Amostra BD#1/2

Os aspectos composicionais do arenito BD#1/2 (Tabela 4), coletado em uma zona de bandas de deformação, foram analisados de forma geral e individualizada nas faixas milimétricas distintas identificadas através dos aspectos texturais.

Tabela 4 – Aspectos composicionais do arenito BD#1/2.

BD#1-2									
	Total (%)	Faixa 1 (%)	Faixa 2 (%)	Faixa 3 (%)	Faixa 4 (%)	Faixa 5 (%)	Faixa 6 (%)	Faixa 7 (%)	Faixa 8 (%)
Quartzo total	68,8	73,5	70,4	65,7	65,1	64,8	64,2	67,2	71,8
Feldspato total	20,5	17,4	19,4	22,6	23,0	23,1	23,5	21,6	18,5
Microclina	9,5	8,1	9,0	10,5	10,7	10,7	10,9	10,0	8,6
Ortoclásio	5,4	4,6	5,1	5,9	6,0	6,1	6,2	5,7	4,9
Plagioclásio	5,6	4,7	5,3	6,2	6,3	6,3	6,4	5,9	5,0
Mica total	6,3	5,4	6,0	6,9	7,0	7,1	7,2	6,6	5,7
Muscovita	2,9	2,5	2,8	3,2	3,2	3,3	3,3	3,0	2,6
Biotita	3,4	2,9	3,2	3,7	3,8	3,8	3,9	3,6	3,1
Fragmentos líticos	4,4	3,7	4,2	4,8	4,9	5,0	5,1	4,6	4,0

Para o arenito BD#1/2 como um todo, foi verificado um percentual de 68,8% de quartzo, 20,5% de feldspatos (sendo 9,5% de microclina, 5,4% de ortoclásio e 5,6% de plagioclásio), 6,3% de micas (sendo 2,9% de muscovita e 3,4% de biotita) e 4,4% de litoclastos (principalmente plutônicos). Comparativamente à amostra de arenito não-deformado (ND#3), o arenito BD#1/2 apresenta maior percentual de quartzo e menores percentuais de feldspato total, mica total e litoclastos.

Quando são analisados os aspectos composicionais de cada uma das oito faixas milimétricas distintas identificadas no arenito BD#1/2 através dos aspectos texturais, nota-se maiores percentuais de quartzo e menores percentuais de feldspato total, mica total e litoclastos nas faixas 1, 2 e 8, cujos aspectos texturais sugerem ser as faixas com maior deformação. As demais faixas, menos deformadas de acordo com os aspectos texturais descritos, apresentam menores percentuais de quartzo e maiores percentuais de feldspato total, mica total e litoclastos em relação à composição observada para a amostra como um todo.

Os minerais, em geral, apresentam-se pouco fraturados e alterados, formando porosidade móldica. Os plagioclásios nesse arenito possuem a sua geminação polissintética não contínua, resultado da deformação. Os grãos de quartzo ocorrem de forma muito angulosa e baixa circularidade (Figura 25a). As micas apresentam-se alongadas e alteradas, eventualmente fraturadas ao longo dos planos de clivagem (Figura 33).

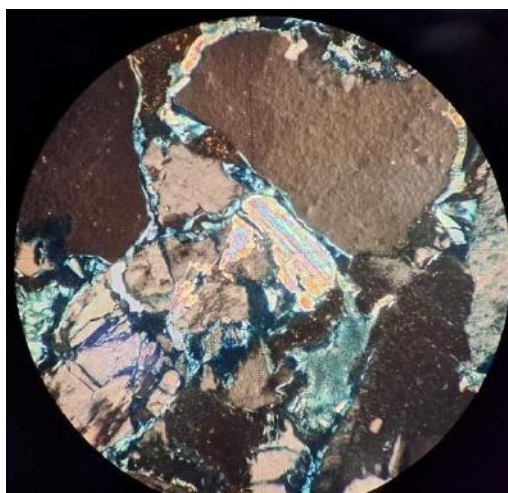


Figura 33 - Fotomicrografia obtida na amostra BD#1/2, destacando, no centro, um grão de muscovita quebrado no plano de clivagem (nicóis cruzados, aumento de 20x, diâmetro do campo de 1 mm).

- Amostra F1#3A

Os aspectos composicionais do arenito F1#3A (Tabela 5), coletado na zona de falha F1, também foram quantificados de forma geral e individualizada nas faixas milimétricas distintas identificadas com base nos aspectos texturais.

Tabela 5 – Aspectos composicionais do arenito F1#3A.

F1#3A											
	Total (%)	Faixa 1 (%)	Faixa 2 (%)	Faixa 3 (%)	Faixa 4 (%)	Faixa 5 (%)	Faixa 6 (%)	Faixa 7 (%)	Faixa 8 (%)	Faixa 9 (%)	Faixa 10 (%)
Quartzo total	68,8	71,9	64,1	62,5	70,7	63,5	70,4	67,2	71,7	72,2	71,3
Feldspato total	21,8	19,6	25,1	26,2	20,5	25,5	20,7	22,9	19,8	19,4	20,1
Microclina	13,7	12,3	15,8	16,4	12,9	16,0	13,0	14,4	12,5	12,2	12,6
Ortoclásio	4,3	3,9	4,9	5,2	4,0	5,0	4,1	4,5	3,9	3,8	4,0
Plagioclásio	3,8	3,4	4,4	4,6	3,6	4,5	3,6	4,0	3,4	3,4	3,5
Mica total	7,5	6,8	8,6	9,0	7,0	8,8	7,1	7,9	6,8	6,7	6,9
Muscovita	6,2	5,6	7,1	7,4	5,8	7,3	5,9	6,5	5,6	5,5	5,7
Biotita	1,3	1,2	1,5	1,6	1,2	1,5	1,2	1,4	1,2	1,2	1,2
Fragmentos líticos	1,9	1,7	2,2	2,3	1,8	2,2	1,8	2,0	1,7	1,7	1,7

Como um todo, a análise composicional do arenito F1#3A indicou um percentual de 68,8% de quartzo, 21,8% de feldspatos (sendo 13,7% de microclina, 4,3% de ortoclásio e 3,8% de plagioclásio), 7,5% de micas (sendo 6,2% de muscovita e 1,3% de biotita) e 1,9% litoclastos (principalmente plutônicos). Os valores totais dos principais minerais são bastante próximos aos encontrados para a amostra BD#1/2, apresentando igualmente maior percentual de quartzo e menores percentuais de feldspatos e micas quando comparados à amostra de arenito não-deformado (ND#3). O total de litoclastos, no entanto, é significativamente menor do que na amostra BD#1/2 e ainda mais reduzido quando comparado à amostra ND#3.

Assim como observado no arenito BD#1/2, as faixas cujos aspectos texturais sugerem maior deformação (faixas 4 e 9) apresentam maiores percentuais de quartzo e menores percentuais de feldspatos, micas e litoclastos. Tais aspectos composicionais também foram verificados nas faixas 1, 6, 8 e 10. As demais faixas (2, 3, 5 e 7) apresentam menores percentuais de quartzo e maiores percentuais de feldspatos, micas e litoclastos em relação à composição observada para a amostra como um todo.

Assim como no arenito BD#1/2, aspectos relacionados à deformação, como fraturamento, e alterações estão presentes, contudo são mais frequentes, o que indica o aumento na deformação da rocha. Um exemplo é a microclina (principal constituinte do grupo dos feldspatos na rocha) que apresenta-se muito fraturada (Figura 34), assim como os grãos de quartzo e litoclastos, refletindo o resultado da deformação.

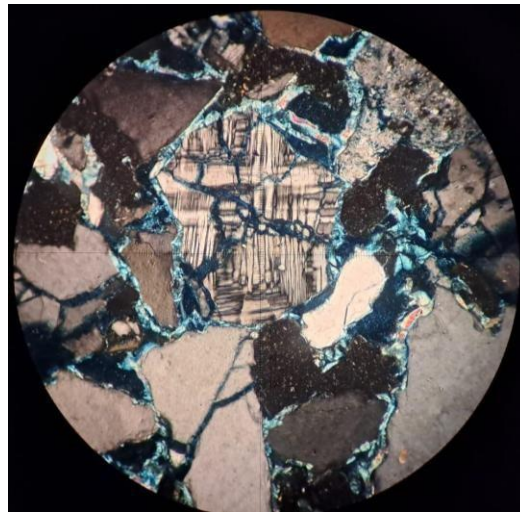


Figura 34 – Fotomicrografia obtida na amostra F1#3A, destacando um grão de microclina fraturado (nicóis cruzados, aumento de 20x, diâmetro do campo de 1 mm).

6.5 Classificação petrográfica dos arenitos analisados

De acordo com os valores composicionais gerais obtidos, as amostras analisadas de arenito não-deformado e de arenitos deformados podem ser classificadas como arcóseos (Figura 35), observando-se um aumento relativo no percentual de quartzo nos arenitos deformados, ao mesmo tempo em que ocorre uma diminuição nos percentuais de feldspatos e litoclastos (Tabela 6), tendendo a subarcóseos, especialmente o arenito F1#3A. Algumas faixas nos arenitos deformados, inclusive, são classificadas como subarcóseos, incluindo as mais deformadas (faixas 1, 2 e 8 no arenito BD#1/2 - Figura 36; faixas 1, 4, 6, 8, 9 e 10 no arenito F1#3A - Figura 37).

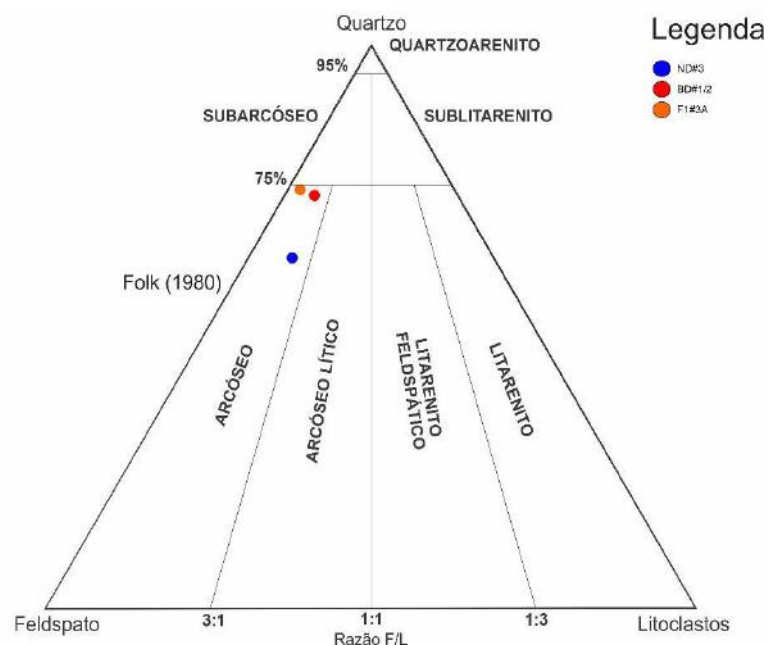


Figura 35 - Classificação petrográfica das amostras estudadas no diagrama triangular de Folk (1980).

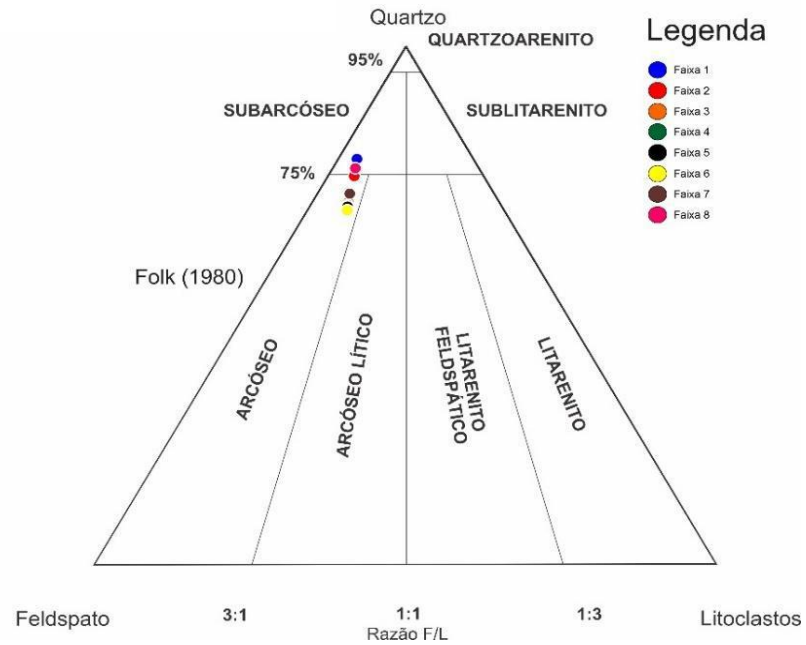


Figura 36 – A) Classificação petrográfica das faixas estudadas no arenito BD#1/2 no diagrama triangular de Folk (1980). B)

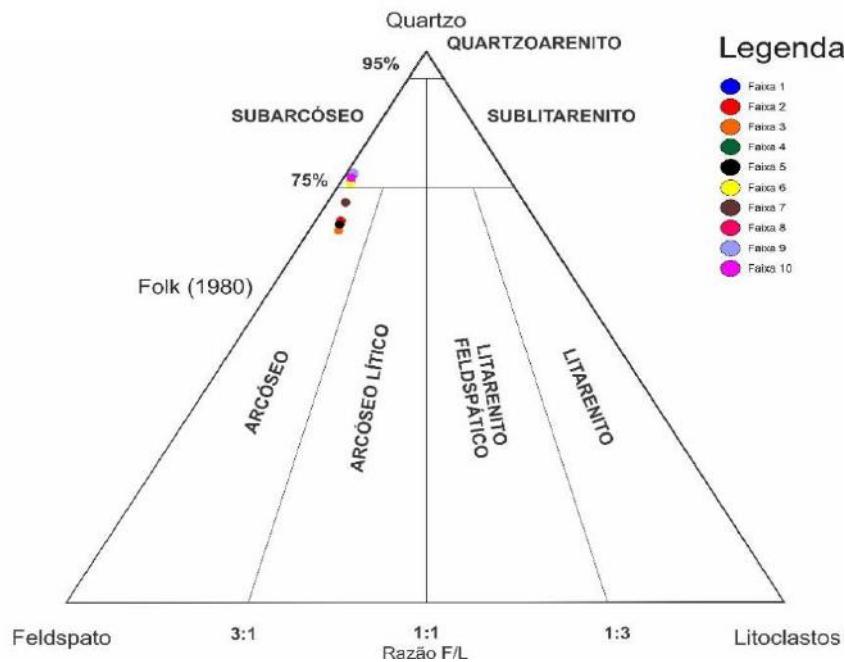


Figura 37 – A) Classificação petrográfica das faixas estudadas no arenito F1#3A no diagrama triangular de Folk (1980). B)

Tabela 6 – Comparação entre os aspectos composicionais totais dos arenitos ND#3, BD#1/2 e F1#3A.

	ND#3	BD#1/2	F1#3A
Quartzo total	58,4%	68,8%	68,8%
Feldspato total	28,9%	20,5%	21,8%
Microlina	12,5%	9,5%	13,7%
Ortoclásio	9,3%	5,4%	4,3%
Plagioclásio	7,1%	5,6%	3,8%
Mica total	6,4%	6,3%	7,5%
Muscovita	3,0%	2,9%	6,2%
Biotita	3,4%	3,4%	1,3%
Fragmentsos líticos	6,4%	4,4%	1,9%

7 DISCUSSÃO

Assim como descrito em trabalhos anteriores (Rotava, 2017; Bassi, 2022), a deformação rúptil dos arenitos pouco consolidados da Formação Resende ocasionou um fraturamento dos grãos, levando à sua cominuição e distribuição em faixas de granulometria mais fina. Essas características estão ausentes no arenito não deformado, em que os grãos, mesmo angulosos, são preservados com uma variação gradual na granulometria. Ainda com relação aos aspectos texturais, além de variações significativas na granulometria e na seleção, os arenitos deformados mostraram maior quantidade de matriz e menor percentual de porosidade.

Rotava (2017) quantificou os aspectos texturais e composicionais dos arenitos deformados da Formação Resende, analisando as lâminas como um todo, sem avaliar as variações associadas às diferentes faixas milimétricas com características texturais distintas resultantes da deformação. A autora destacou que, texturalmente, os arenitos deformados próximos à falha F1 apresentam maior conteúdo de matriz e menor porosidade em relação aos arenitos com bandas de deformação, cujos valores se assemelham aos de arenitos não deformados. Os resultados obtidos no presente estudo reforçam a maior variação nos aspectos texturais entre o arenito não deformado e o arenito deformado na região da falha F1, com significativo aumento na quantidade de matriz (de 7% para 21%) e expressiva redução na porosidade (de 22% para 7,5%). Com relação ao arenito investigado na zona de bandas de deformação (BD#1/2), a diferença foi pouco significativa em relação ao arenito não deformado, com aumento da quantidade de matriz (de 7% para 8,5%) e também da porosidade (de 22% para 25,5%) no arenito deformado, o que pode ser atribuído, no caso da porosidade, a bandas de desagregação.

Bassi (2022), quantificou os aspectos texturais analisando as faixas milimétricas com diferentes características. A autora também atribuiu ao arenito F1#3A a maior diferença entre os aspectos texturais, sendo definido como o arenito que sofreu a deformação mais intensa, enquanto o bloco BD#1/2 apresenta resultados mais homogêneos, o que reforça o fato de a deformação ser mais localizada na região em que essa amostra foi extraída. Os resultados obtidos no presente estudo estão alinhados com as análises e conclusões apresentadas por Bassi (2022).

Em relação às características composicionais, Rotava (2017) classificou os arenitos não deformados e os arenitos com bandas de deformação como arcóseos líticos, enquanto os arenitos próximos à falha F1 foram classificados como arcóseos. Os resultados aqui obtidos classificam os arenitos deformados e não deformado como arcóseos, com tendência dos arenitos deformados para subarcóseos.

Confirmando Rotava (2017), as faixas de deformação apresentam, principalmente, características de bandas cataclásticas, como descritas por Gibson (1998), Fossen (2012) e Pei *et al.* (2015), tendo também sido identificadas bandas de desagregação. Durante o fluxo cataclástico, ocorreu o alinhamento dos grãos angulosos, que se posicionaram de forma subparalela à direção de cisalhamento, gerando uma redução da porosidade e o colapso dos poros, condicionando a distribuição da cimentação por óxidos/hidróxidos de ferro.

8. CONCLUSÃO

Pôde-se identificar dois tipos de bandas de deformação nos arenitos da Formação Resende: bandas cataclásticas e bandas de desagregação. As bandas cataclásticas apresentam-se como faixas compostas por grãos muito fraturados, compactados e cominuídos, apresentando maior porcentagem de matriz, baixa porosidade, menor percentual de feldspato total. As características texturais resultam em barreiras físicas à percolação de fluidos, influenciando a cimentação por óxidos/hidróxidos de ferro. Nas bandas de desagregação, os grãos estão orientados, porém apresentam-se pouco fraturados.

O arenito F1#3A, coletado em uma zona de falha, apresentou a maior diferença nos aspectos texturais (porosidade, matriz, cimento e granulometria) e composicionais em uma mesma amostra, devido à intensidade da deformação na região do afloramento em que a amostra foi extraída. Diferenças texturais e composicionais significativas também encontram-se no arenito BD#1/2. Entretanto, a deformação de menor intensidade sofrida na região do afloramento em que foi extraída, faz com que as bandas sejam mais bem marcadas no arenito F1#3A.

Associando as questões composicionais com alguns aspectos texturais, como o leve alinhamento de grãos, a alta porosidade e os grãos pouco fraturados, foram interpretadas bandas de desagregação no arenito BD#1/2, além de bandas cataclásticas. O arenito F1#3A, por sua vez, está relacionado às bandas do tipo cataclástica, devido a sua baixa porosidade e grãos muito cominuídos/fraturados.

Com isso, mesmo os arenitos deformados sendo considerados similares composicionalmente, apresentam diferenças nos tipos de bandas de deformação, onde no arenito BD#1/2 estão bandas dos tipos cataclástica e de desagregação, enquanto no arenito F1#3A as bandas são do tipo cataclástica. Tal fato é atribuído à intensidade diferente da deformação dútil.

Desta forma, fica clara a importância do levantamento associado das questões texturais e composicionais para o entendimento das bandas de deformação, que influenciam na percolação do fluxo de fluidos em arenitos que são considerados análogos às rochas encontradas nas bacias marginais brasileiras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASMUS, H.E. & FERRARI, A.L. 1978. Hipótese sobre a causa do tectonismo cenozóico na região sudeste do Brasil. Projeto REMAC, 4, p.75-88.

AYDIN, A.; JOHNSON, A. M. 1978. Development of faults as zones of deformation bands and asslip surfaces in sandstone. *Pure and Applied Geophysics*, **116**: 931-942.

AYDIN, A. 1978. Small faults formed as deformation bands in sandstone. *Pure and Applied Geophysics*, **116**: 913-930.

BASSI, T. 2022. *Análise microestrutural de bandas de deformação em arenitos pouco consolidados da Formação Resende (Eoceno, Bacia de Volta Redonda, RJ) e seus efeitos nos aspectos permoporosos*. Trabalho Final de Curso Rio de Janeiro: Instituto de Geociências – UFRJ.58 f.

DICKINSON, W. R. 1970. Interpreting detrital modes of greywacke and arkose. *Journal of Sedimentary Petrology*, **40**(2):695 -707.

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. 87 f.

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.

FOSSEN, H.; SCHULTZ, R. A.; SHIPTON, Z. K.; MAIR, K. 2007. Deformation bands In sandstone:a review.*Journal of the Geological Society*, **164**(4):755769.

FOSSEN, H. 2012. *Geologia Estrutural* (trad. F.R.D. de Andrade). Editora Oficina de Textos. São Paulo. 584 p.

FOSSSEN, H.; SOLIVA, R.; BALLAS, G.; TRZASKOS, B.; CAVALCANTE, C.; SCHULTZ, R. A. 2017. A review of deformation bands in reservoir sandstones: Geometries, mechanisms and distribution. *Geological Society London Special Publications*. 459. 25 p.

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. 173p.

GIBSON, R. G. 1998. Physical character and fluid-flow properties of sandstone-derived fault zones. In: M. P. Coward, T. S. Daltaban, H. Johnson. *Structural Geology in Reservoir Characterisation*, 127, 83-97. London: Geological Society, Special Publications.

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: Mantesso- Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C. D. R.; Brito Neves, B. B. (eds.). *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca, p. 203 - 234.

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.

MELO, M. S.; RICCOMINI, C.; HASUI, Y.; ALMEIDA, F. F. M.; COIMBRA, A. M. 1985. Geologia e evolução do sistema de bacias tafrogênicas continentais do sudeste do Brasil. *Rev. Brasileira de Geociências*, 15(3):193 -201.

NEGRÃO, A. P. 2014. *Evolução tectonossedimentar e deformação rúptil cenozoica da região da Bacia de Volta Redonda (Segmento Central do Rift Continental do Sudeste do Brasil, RJ)*. Tese (Doutorado). Rio de Janeiro: Instituto de Geociências – UFRJ. 249p.

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 Rift Continental do Sudeste do Brasil): identificação de novos grábens e ocorrências descontínuas e caracterização de estágios tectonossedimentares. *Brazilian Journal of Geology*, **45**: 273-291.

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.

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.

RAMOS R.R.C., ÁVILA C. A., VASCONCELOS P., THIEDE P., VASQUES F.S.G., ROCHA F.M. 2008. Magmatismo meso-cenozóico na região das bacias de Resende e de Volta Redonda. In: 44º Congresso Brasileiro de Geologia. Curitiba, Anais, p. 559, CD-ROM

RICCOMINI, C. 1989. O *Rift* Continental do Sudeste do Brasil. São Paulo, 256p. (Tese de Doutorado, Dept. Geologia, IG/USP).

RICCOMINI, C. ; SANT'ANNA, L. G.; FERRARI, A. L. 2004. Evolução geológica do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil. In: V. Mantesso Neto; Bartorelli, A.; Carneiro, C. D. R.; Brito Neves, B. B. *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*..São Paulo: Beca. pg.383-405.

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.

SANSON M.S.R., RAMOS R R.C., MELLO C.L. 2006. Bacias Sedimentares Brasileiras - Bacia de Volta Redonda. *Phoenix*, 88: 1 - 6.

TROUW R.A.J., HEILBRON M., RIBEIRO A., PACIULLO F.V.P., VALERIANO C.M., ALMEIDA J.C.H., TUPINAMBÁ M. , ANDREIS R.R. 2000. The central segment of the Ribeira Belt. In: U.G. Cordani, E.J. Milani, A. Thomaz Filho (eds.) Tectonic Evolution of South America. Rio de Janeiro, p. 287-310.

VOGEL, S. N. 2018. *Caracterização macroscópica e microscópica de aspectos texturais e estruturais relacionados à deformação dútil de arenitos pouco consolidados (Formação Resende, Bacia de Volta Redonda) e aspectos permoporosos associados*. Dissertação (Mestrado). Rio de Janeiro: Instituto de Geociências-UFRJ. 89p.

VOGEL, S. N.; MELLO, C. L. ; SILVA, A. T. 2019. Aspectos tomográficos e microtomográficos de feições de deformação dútil em arenitos pouco consolidados da Formação Resende (Bacia de Volta Redonda-RJ). *Anuário do Instituto de Geociências-UFRJ*, **42**:759-768.