

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

Thamirez Nascimento Bassi

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  
(Geologia)

UFRJ  
Rio de Janeiro  
2022

**Thamirez Nascimento Bassi**

**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 de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Geóloga.

Orientadores:

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

*M.Sc. Suelen do Nascimento Vogel*  
(IGEO/UFRJ)

UFRJ  
Rio de Janeiro  
2022

Nascimento Bassi, THAMIREZ

**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.** / Thamirez

Nascimento Bassi - - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2022.

xii. 58 f.

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. Petrografia Sedimentar. I. Limeira Mello, CLAUDIO, orientador. II. do Nascimento Vogel, SUELEN, orientadora. III. Título.

**Thamirez Nascimento Bassi**

**ANÁLISE MICROESTRUTURAL DE BANDAS DE DEFORMAÇÃO EM ARENITOS  
POUCO CONSOLIDADOS DA FORMAÇÃO RESENDE (EOCENO, BACIA DE  
VOLTA REDONDA, RJ) E SEUS EFEITOS NOS ASPECTOS PERMOPOROS**

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  
Geóloga.

Orientadores:

Prof. Dr. Claudio Limeira Mello

(Departamento de Geologia, IGEO/UFRJ)

M.Sc. Suelen do Nascimento Vogel

(IGEO/UFRJ)

Aprovada em: 25 / 08 / 2022

Por:

---

Orientador: Claudio Limeira Mello (IGEO/UFRJ)

---

Aline Theophilo Silva (PETROBRAS/CENPES)

---

Renato Rodriguez Cabral Ramos (MN/UFRJ)

UFRJ  
Rio de Janeiro  
2022

Dedicado à Lilian, Ricardo, John, Victor,  
Helena e Tamila.  
Minha família.

## **Agradecimentos**

À Universidade Federal do Rio de Janeiro, por toda a infraestrutura presente nos meus anos de graduação junto ao corpo docente do Departamento de Geologia.

À Petrobras e ao projeto “Caracterização da Deformação e de Propriedades Mecânicas e Permoporosas de Arenitos Pouco Consolidados”, pela bolsa de Iniciação Científica durante os anos de 2018 a 2020, assim como a disponibilização dos equipamentos necessários para a aquisição das imagens tomográficas, microtomográficas e ensaios de petrofísica básica realizados no Laboratório do CENPES/PETROBRAS.

A todo o corpo de pesquisadores do projeto “Caracterização da Deformação e de Propriedades Mecânicas e Permoporosas de Arenitos Pouco Consolidados”, que foram sempre solícitos as minhas dúvidas e auxiliaram em diversas etapas, tanto desse trabalho quanto da minha graduação, em especial Verônica Batista e Bernardo Fiuza.

Aos meus orientadores, Claudio Limeira Mello e Suelen do Nascimento Vogel, que sempre estiverem presentes desde a minha primeira Jornada de Iniciação Científica em 2018, até a finalização desse trabalho. Agradeço toda a paciência, carinho e todos os conselhos que impactaram positivamente tanto a minha vida profissional quanto minha vida pessoal.

Aos meus amigos João Victor Pereira, Paula Sant’Ana, Camila Gomes, Nathalie Díaz, por todo o companherismo durante esses longos seis anos e ao Lucas Rocha e Gabriela Lobão, pela ajuda na revisão desse trabalho.

À minha família, por toda a estrutura e apoio sobre a decisão de cursar Geologia. Sem vocês eu não teria mantido essa graduação até o final. Essa conquista é para todos nós.

## Resumo

BASSI, Thamirez Nascimento. **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**. 2022. xii, 58 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

A bacia de Volta Redonda, localizada no sul do estado do Rio de Janeiro, tem como seu principal preenchimento sedimentar os depósitos da Formação Resende, de idade eocênica, compostos predominantemente por arenitos feldspáticos pouco consolidados intercalados a pelitos esverdeados e conglomerados. A evolução tectônica da bacia é marcada por diferentes fases de deformação, no contexto do Segmento Central do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil, resultando em diversos conjuntos de estruturas rúpteis (falhas e juntas). Maciel *et al.* (2017) destacaram, pela primeira vez, a presença de estruturas do tipo bandas de deformação nas rochas sedimentares da Formação Resende. Essas estruturas são tidas na literatura como influentes no controle da percolação de fluidos em reservatórios areníticos pouco consolidados, por modificarem suas propriedades permoporosas. O objetivo do trabalho aqui apresentado é aprofundar a análise da influência das estruturas de bandas de deformação nas propriedades texturais e permoporosas dos arenitos da Formação Resende, tidos como análogos geomecânicos de reservatórios do pós-sal das bacias de Campos e Santos. A metodologia adotada no presente estudo envolveu a interpretação de imagens tomográficas de dois blocos de arenitos deformados (F1#3A e BD#1/2) e dois blocos de arenitos não-deformados (ND#1 e ND#3), e de imagens microtomográficas de nove *plugs* de arenitos deformados e quatro *plugs* de arenitos não-deformados retirados desses blocos com base na interpretação das imagens tomográficas. Também foi realizada a análise de dados de permeabilidade e porosidade, obtidos em permoporosímetro a gás, dos 13 *plugs*. Foram feitas as descrições dos aspectos texturais (quantidade de arcabouço, matriz, poro e cimento) e granulométrica de três lâminas petrográficas, duas de arenitos deformados e uma de arenito não-deformado (ND#3). Nessa etapa, foi realizada a contagem de 500 grãos em cada lâmina, segundo o método proposto por Dickinson (1970). Os resultados demonstram que as faixas mais deformadas possuem menor granulometria e maior percentual de matriz, aspectos relacionados aos esforços cisalhantes e da compactação da rocha. Além disso, pode-se concluir que as faixas mais deformadas atuam como “barreiras” do fluxo, resultando na cimentação ao longo destas, nas zonas menos deformadas. As análises petrofísicas possibilitam a separação dos diferentes *plugs* analisados em três grupos distintos, conforme a diminuição ou o aumento dos seus valores de porosidade e permeabilidade. Os aspectos microtomográficos permitem atribuir a variação dos valores de permoporosidade à maior fragmentação do arcabouço e ao aumento da quantidade de matriz, com a conseqüente redução da porosidade e da permeabilidade das rochas.

Palavras-chave: deformação tectônica rúptil; petrografia; densidade de estruturas de deformação.

## **Abstract**

BASSI, Thamirez Nascimento. **MICROSTRUCTURAL ANALYSIS OF DEFORMATION BANDS IN POORLY LITHIFIED SANDSTONES OF THE RESENDE FORMATION (EOCENO, VOLTA REDONDA BASIN, RJ) AND THEIR EFFECTS ON PERMOPOROUS ASPECTS**. 2022. xii, 58 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

*The Volta Redonda Basin, located in the south of the state of Rio de Janeiro, has as its main sedimentary fill the deposits of the Resende Formation, of Eocene age, predominantly composed of poorly lithified feldspathic sandstones interbedded with greenish lutites and conglomerates. The tectonic evolution of the basin is marked by different phases of deformation, in the context of the Central Segment of the Continental Rift of Southeastern Brazil, resulting in several sets of brittle structures (faults and joints). Maciel et al. (2017) highlighted, for the first time, the presence of deformation bands structures in the sediments of the Resende Formation. These structures are considered in the literature as influential in controlling fluid percolation in poorly lithified sandstone reservoirs, as they modify their permoporous properties. The objective of the work presented here is to deepen the analysis of the influence of deformation band structures on the textural and permoporous properties of the sandstones of the Resende Formation, considered as geomechanical analogues of post-salt reservoirs in the Campos and Santos basins. The methodology adopted in the present study involved the interpretation of tomographic images of two deformed sandstone blocks (F1#3A and BD#1/2) and two non-deformed sandstone blocks (ND#1 and ND#3), taken from an outcrop from the Resende Formation in the Volta Redonda Basin, and the analysis of microtomographic images of 9 deformed sandstone plugs and 4 non-deformed sandstone plugs taken from these blocks based on the interpretation of the tomographic images. The analysis of permeability and porosity data, obtained in a gas permoporosimeter, of the thirteen plugs was also performed. Descriptions of textural aspects (amount of framework, matrix, pore and cement) and granulometry of three petrographic thin sections, two of deformed sandstones (F1#3A and BD#1/2) and one of non-deformed sandstone (ND#3) were performed. At this stage, 500 grains were counted on each thin section (DICKINSON, 1970). The results show that the most deformed bands have smaller granulometry and a higher percentage of matrix, aspects related to shear forces and rock compaction. In addition, it can be concluded that the most deformed bands act as “barriers” to the flow, resulting in cementation along these, in the less deformed zones. The petrophysical data make it possible to separate the different plugs analyzed into three distinct groups, according to the decrease or increase in their porosity and permeability values. The microtomographic aspects allow attributing the variation of the permoporosity values to the greater fragmentation of the framework and the increase in the amount of matrix, with the consequent reduction of porosity and permeability of the rocks.*

*Key-Words: brittle tectonic deformation, petrography, deformation structures density.*



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Exemplos de bandas de deformação em regime extensional. (a) Cluster de bandas transicionando para uma superfície de deslize na areia fina/siltito na parte inferior da imagem. (b) Diferença da espessura das bandas entre camadas finas e grossas. (FOSSSEN *et al.*, 2017)..... 4
- 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: adaptado de FOSSSEN *et al.* (2007) e FOSSSEN *et al.* (2017). ..... 5
- Figura 3 - (a) Principais tipos de bandas de deformação baseados nos mecanismos de deformação. (b) Ilustração esquemática de como os diferentes tipos de bandas de deformação estão relacionadas ao conteúdo de filossilicatos e à profundidade de soterramento (FOSSSEN *et al.*, 2007). ..... 6
- Figura 4 – Principais fatores que controlam o grau de cataclase nas bandas de deformação (FOSSSEN *et al.*, 2017). ..... 7
- Figura 5 - Rift Continental do Sudeste do Brasil (MELO *et al.*, 1985; modificado por Rotava, 2017), destacando as bacias sedimentares envolvidas nesta feição geotectônica. No segmento central se encontram as bacias de São Paulo, Taubaté, Resende e Volta Redonda. .... 9
- Figura 6 - Mapa geológico da região da bacia de Volta Redonda (Negrão, 2014; modificado por Maciel *et al.*, 2017), destacando a localização da região de estudo (polígono em contorno amarelo)..... 10
- Figura 7 - Coluna litoestratigráfica e fases tectônicas propostas para a região da bacia de Volta Redonda por Negrão *et al.* (2015 — modificada por Fiuza, 2019)..... 11
- Figura 8 – A) Localização geográfica do afloramento, indicado pelo ícone em cor azul, ao Sul da cidade de Volta Redonda (RJ). B) Visão em detalhe da localização do afloramento estudado, indicado pelo ícone em cor azul, à margem da Rodovia do Contorno, Volta Redonda (RJ). Imagens retiradas do *Google Earth* em agosto de 2022. .... 12
- Figura 9 - Seção geológico-estrutural de um afloramento da Formação Resende na bacia de Volta Redonda produzida por Maciel (2017). ..... 13
- Figura 10 - 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). ..... 14
- Figura 11 – Passo a passo da metodologia aplicada. .... 16
- Figura 12 - A) Seção estratigráfica-estrutural de um afloramento da bacia de Volta Redonda, segundo Fiuza (2019), destacando (em contorno amarelo) a porção do afloramento investigada no presente estudo. B) Localização das amostras analisadas: ND#1 e ND#3 (amostras de arenitos não deformados); BD#1/2 (amostra de arenito deformado, próxima à zona de bandas de deformação); F1#3A (amostra de arenito deformado, próxima à zona de

falha F1); e amostras BA#(0-7) e BB#(0-5), analisadas com base em dados obtidos por Galvão (2018).....	17
Figura 13 - A) bloco de rocha não deformada ND#3 em mesa de descrição orientada conforme posição de extração do afloramento. B) Croqui com a interpretação macroscópica do bloco ND#3.....	18
Figura 14 - Imagens tomográficas dos quatro blocos analisados, sendo os blocos ND#1 e ND#3 referentes a arenitos não deformados e os blocos BD#1/2 e F1#3A referentes a arenitos deformados. ....	19
Figura 15 - Orientação dos plugs confeccionados nos blocos de rocha ND#1 e ND#3 a partir da interpretação das imagens tomográficas.....	20
Figura 16 - A) Aspersão de água sobre o bloco ND#3; B) congelamento do bloco em um recipiente contendo nitrogênio líquido a aproximadamente -203°C; C) orientação no bloco congelado dos cortes a serem efetuados para a confecção dos plugs; D) obtenção dos plugs; E) orientação do plug P1 confeccionado dentro do bloco de rocha não deformada; F) representação da posição dos três plugs confeccionados a partir do bloco de rocha ND#3.21	21
Figura 17 - A) Localização dos <i>plugs</i> P1 e P2 confeccionados no bloco de arenito deformado BD#1/2 (Vogel, 2018); B) imagem de um <i>slice</i> (fatia) do modelo microtomográfico 3D do <i>plug</i> P1 observado com o auxílio do <i>software AvizoFire 8.1</i> ; C) imagem de um <i>slice</i> do modelo microtomográfico 3D do <i>plug</i> P1 observado no <i>software Fiji: imageJ</i> . ....	22
Figura 18 - A) Localização dos plugs no bloco de arenito não-deformado ND#3; B) orientação do <i>plug</i> P1 confeccionado dentro do bloco de rocha não deformada; C) capa do <i>plug</i> P1 orientada para a confecção da lâmina; D) orientação E-W representa o local para a confecção da lâmina antes de ser encaminhada ao Laboratório de Laminação do Departamento de Geologia/IGEO/UFRJ. ....	23
Figura 19 - Imagens dos mosaicos compostos por fotomicrografias com o aumento de 2,5x: 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.....	23
Figura 20 - A) Mapa de poros do <i>plug</i> F1#3A P1 observado no <i>software AVIZO</i> ; B) <i>slice</i> do <i>plug</i> F1#3A P1 mesclado ao mapa de poros no <i>software AVIZO</i> ; C) <i>slice</i> do <i>plug</i> F1#3A P1 no <i>software Fiji: imageJ</i> ; D) <i>slice</i> do <i>plug</i> F1#3A P1 com a ferramenta de contraste para o cálculo da porosidade ativa.....	25
Figura 21 - Foto do bloco de rocha do arenito não-deformado ND#1 com sua localização na seção estratigráfica do afloramento. ....	26
Figura 22 - Foto do bloco de rocha do arenito não-deformado ND#3 com sua localização na seção estratigráfica do afloramento. ....	27
Figura 23 - Foto do bloco de rocha do arenito deformado BD#1/2.....	28
Figura 24 - Foto do bloco de rocha do arenito deformado F1#3A. Nota-se a direita do bloco uma crescente densidade de estruturas rúpteis em direção à F1.. ....	28
Figura 25 - Imagem tomográfica do bloco ND#1 no qual se destacam camadas horizontais associadas ao acamamento sedimentar.....	30

Figura 26 - Imagem tomográfica do bloco ND#3 no qual se destacam camadas horizontais associadas ao acamamento sedimentar. ....	31
Figura 27 - Imagem tomográfica do bloco BD#1/2 no qual se destacam faixas verticalizadas que são associadas a feições do tipo bandas de deformação. ....	32
Figura 28 - Imagem tomográfica do bloco F1#3A no qual se destacam faixas verticalizadas que são associadas a feições do tipo bandas de deformação. É possível observar o deslocamento do contato sedimentar, interpretado em azul, originado a partir de falhas menores que ocorrem em grande concentração na região do afloramento próxima a falha F1. ....	33
Figura 29 - Imagem microtomográfica do <i>plug</i> p1 do bloco de rocha F1#3A. Nele é possível observar na faixa destacada pela coloração laranja uma zona de concentração da porosidade, associada ao alinhamento de grãos verticalizados. ....	34
Figura 30 - Imagem microtomográfica do <i>plug</i> p1 do bloco de rocha BD#1/2. Nele se destacam faixas verticais a subverticais que são associadas a feições do tipo bandas de deformação, com compactação dos grãos nessas regiões, assim como a redução da granulometria dos grãos e remobilização de uma epimatriz (grãos de feldspatos alterados). ....	35
Figura 31 - Imagem da lâmina utilizada no estudo petrográfico da rocha ND#3. ....	36
Figura 32 - Lâmina BD#1/2, com a interpretação de faixas milimétricas (1 a 7) com diferentes características texturais e gráfico percentual dos elementos texturais (arcabouço, poro, cimento e matriz) reconhecidos em cada faixa, quantificados através do método da contagem de pontos (figura elaborada por Bernardo Oliveira Fiuza a partir dos dados obtidos neste trabalho). ....	38
Figura 33 - (a-d) Recortes, em detalhe, de regiões da lâmina BD#1/2 ilustrando diferentes características texturais nas faixas interpretadas. (a) Destaca-se a maior quantidade de matriz na faixa 1 e de cimento (óxidos e hidróxidos de ferro) na faixa 2. (b-c) Observa-se um aumento da porosidade e da granulometria dos grãos do arcabouço da faixa 3 à faixa 6, além de um empacotamento cada vez mais aberto. (d) Notar, na faixa 7, a redução da granulometria e da porosidade em relação à faixa 6 (figura elaborada por Bernardo Oliveira Fiuza a partir dos dados obtidos por mim). ....	39
Figura 34 - Lâmina F1#3A, com a interpretação de faixas milimétricas (1 a 10) com diferentes características texturais e gráfico percentual dos elementos texturais (arcabouço, poro, cimento e matriz) reconhecidos em cada faixa, quantificados através do método da contagem de pontos (figura elaborada por Bernardo Oliveira Fiuza a partir dos dados obtidos por mim). ....	41
Figura 35 - (a-d) Recortes, em detalhe, de regiões da lâmina F1#3A ilustrando diferentes características texturais nas faixas interpretadas. (a) Destaque para a granulometria significativamente menor dos grãos do arcabouço nas faixas 8, 9 e 10 do que no restante da lâmina. A faixa 9 apresenta maior quantidade de matriz, estando acompanhada por faixas com concentração de cimento de óxidos e hidróxidos de ferro (faixas 8 e 10). (b) Observa-se uma concentração de matriz na faixa 4 e faixas adjacentes com concentração de cimento (faixas 3 e 5). (c) Há indícios de fragmentação dos grãos do arcabouço nas faixas 5, 6 e 7, sinalizada pela presença significativa de grãos de menor granulometria; apesar disso, o empacotamento é mais aberto, a porosidade é mais elevada e a quantidade de matriz é menor do que as faixas de concentração de deformação. (d) Nota-se que a faixa 2 apresenta uma quantidade de matriz relativamente alta, estando acompanhada por uma	

faixa com concentração de cimento (faixa 1); a porosidade, entretanto, é mais elevada e o empacotamento mais aberto na faixa 2 do que nas faixas de maior deformação (figura elaborada por Bernardo Oliveira Fiuza a partir dos dados obtidos por mim). .....	42
Figura 36 - Histograma com a distribuição granulométrica da rocha ND#3. ....	45
Figura 37 -- Histograma com a distribuição granulométrica da rocha BD#1/2 por faixa interpretada (faixas 1 a 7). ....	46
Figura 38 - Histograma com a distribuição granulométrica da rocha F1#3A por faixa interpretada (faixas 2 a 10). ....	47
Figura 39 - - Histogramas com a distribuição granulométrica de uma camada do bloco alto a partir dos dados de Galvão (2018). ....	48
Figura 40 - Histogramas com a distribuição granulométrica de uma camada do bloco baixo a partir dos dados de Galvão (2018). ....	48
Figura 41 - Gráfico de correlação entre os valores de permeabilidade absoluta (em escala logarítmica), em relação aos valores de porosidade. Fonte: projeto “Caracterização da Deformação e de Propriedades Mecânicas e Permoporosas de Arenitos Pouco Consolidados”.....	50
Figura 42 - Imagens microtomográficas dos plugs da amostra F1#3A, alteradas de Voguel (2018), sobrepostas ao grupos 2 e 3 identificados no gráfico de correlação entre os valores de permeabilidade absoluta (em escala logarítmica), em relação aos valores de porosidade. ....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aspectos texturais dos arenitos deformados (por bandas de deformação e falhas) e não deformados em afloramento da Formação Resende, bacia de Volta Redonda (Rotava, 2017). .....	15
Tabela 2 – Distribuição das amostras em suas respectivas escalas de amostragem.....	20
Tabela 3 - Tabela de aspectos texturais para a amostra ND#3 com as porcentagens de arcabouço, matriz, cimento e poro. ....	37
Tabela 4 - Aspectos texturais ND#3 e média dos aspectos BD#1/2 e F1#3A. ....	43
Tabela 5 - Porosidades calculadas nas amostras ND#3, BD#1/2 e F1#3A conforme as respectivas metodologias. ....	53

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVO</b> .....	<b>3</b>
<b>3. BASES CONCEITUAIS</b> .....	<b>4</b>
<b>4. CONTEXTO GEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>9</b>
<b>5. REVISÃO DE TRABALHOS ANTERIORES</b> .....	<b>13</b>
<b>6. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>166</b>
<b>6.1. Seleção de amostras</b> .....	<b>177</b>
<b>6.2. Descrição macroscópica das amostras selecionadas</b> .....	<b>188</b>
<b>6.3. Análise de imagens tomográficas</b> .....	<b>188</b>
<b>6.4. Confeção de quatro <i>plugs</i> de arenitos não deformados</b> .....	<b>200</b>
<b>6.5. Análise de imagens microtomográficas</b> .....	<b>211</b>
<b>6.6. Caracterização petrográfica</b> .....	<b>222</b>
<b>6.7. Quantificação dos aspectos granulométricos</b> .....	<b>23</b>
<b>6.8. Quantificação dos aspectos de porosidade x permeabilidade</b> .....	<b>255</b>
<b>7. RESULTADOS</b> .....	<b>266</b>
<b>7.1. Aspectos macroscópicos</b> .....	<b>266</b>
<b>7.2. Aspectos tomográficos</b> .....	<b>29</b>
<b>7.3. Aspectos microtomográficos</b> .....	<b>34</b>
<b>7.4. Caracterização petrográfica</b> .....	<b>355</b>
<b>7.4.1. ANÁLISE DOS ASPECTOS TEXTURAIIS (CIMENTO, MATRIZ, PORO, GRÃOS)</b> .....	<b>36</b>
6	
<b>7.5. Análise granulométrica</b> .....	<b>444</b>
7.5.1. ANÁLISE EM LÂMINA PETROGRÁFICA.....	<b>444</b>
7.5.2. ANÁLISE A PARTIR DOS DADOS DE GALVÃO (2018).....	<b>477</b>
<b>7.6. Quantificação dos aspectos de porosidade x permeabilidade</b> .....	<b>49</b>
7.6.1. DADOS OBTIDOS EM PERMOPOROSÍMETRO.....	<b>50</b>
7.6.2. POROSIDADE CALCULADA NOS <i>SOFTWARE AVIZO</i> e <i>Fiji: imageJ</i> .....	<b>522</b>
<b>8. CONCLUSÕES</b> .....	<b>544</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>566</b>

## 1. INTRODUÇÃO

É consenso na indústria do petróleo e na academia que estruturas rúpteis como juntas e falhas possuem grande influência no fluxo de fluidos em reservatórios siliciclásticos. Essas feições podem afetar as propriedades texturais e permoporosas das rochas de modo que dificultam ou facilitam a percolação do fluido (FOSSEN *et al.*, 2007; PEI *et al.*, 2015), podendo estar diretamente ligadas à exploração em reservatórios de hidrocarbonetos. Apesar de a indústria ter desenvolvido técnicas e equipamentos que possibilitam a exploração e estudo de rochas em subsuperfície, esses métodos apresentam limitações em análises que são essenciais para a compreensão da dinâmica do fluxo de fluidos em rochas reservatório, devido às grandes profundidades nas quais eles podem estar situados (WIBBERLEY & SHIPTON, 2010).

O estudo de rochas análogas às rochas dos reservatórios em subsuperfície tem se tornado cada vez mais comum, devido ao acesso mais fácil ao material (HOWELL *et al.*, 2014). Com a investigação dos aspectos estratigráficos, estruturais, petrográficos, petrofísicos, geofísicos e geomecânicos das rochas, é possível estimar o melhor modelo de exploração para o reservatório (PEI *et al.*, 2015). Para o caso dos depósitos maastrichtianos, areníticos e pouco consolidados do intervalo pós-sal das bacias de Campos e Santos vêm sendo estudados como análogos os depósitos siliciclásticos da Formação Resende, na bacia de Volta Redonda.

A bacia de Volta Redonda, localizada no sul do estado do Rio de Janeiro, tem como seu principal preenchimento sedimentar os depósitos da Formação Resende, de idade eocênica, compostos predominantemente por arenitos feldspáticos pouco consolidados, intercalados a pelitos esverdeados e conglomerados (RAMOS *et al.*, 2006). A evolução tectônica da bacia é marcada por diferentes fases de deformação (NEGRÃO *et al.*, 2015; NEGRÃO *et al.*, 2020), no contexto do Segmento Central do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (RCSB - RICCOMINI *et al.*, 2004), resultando em diversos conjuntos de estruturas rúpteis (falhas e juntas).

Maciel (2016) destacou, pela primeira vez, a presença de estruturas do tipo bandas de deformação nos depósitos da Formação Resende. Essas feições podem ocorrer como estruturas milimétricas individuais, o que dificulta sua caracterização em subsuperfície. Essas estruturas influenciam os aspectos permoporosos da rocha, pois modificam sua textura, podendo estar associadas à abertura de espaço (bandas

de desagregação), ou à redução da porosidade da rocha através dos processos de compactação (bandas de compactação) e cataclase (cominuição dos grãos por cisalhamento), em bandas de deformação (AYDIN & JOHNSON, 1978). Desde então, diversos trabalhos (MACIEL *et al.*, 2017; ROTAVA, 2017; GALVÃO, 2018; VOGEL, 2018; VOGEL *et al.*, 2019; FIUZA, 2019; FIUZA *et al.*, 2020) vêm sendo desenvolvidos em um afloramento da Formação Resende no gráben de Casa de Pedra (bacia de Volta Redonda) para compreender melhor a influência dessas estruturas nas propriedades da rocha. A partir desses trabalhos, o presente estudo tem como motivação a caracterização dessas estruturas em diferentes escalas.

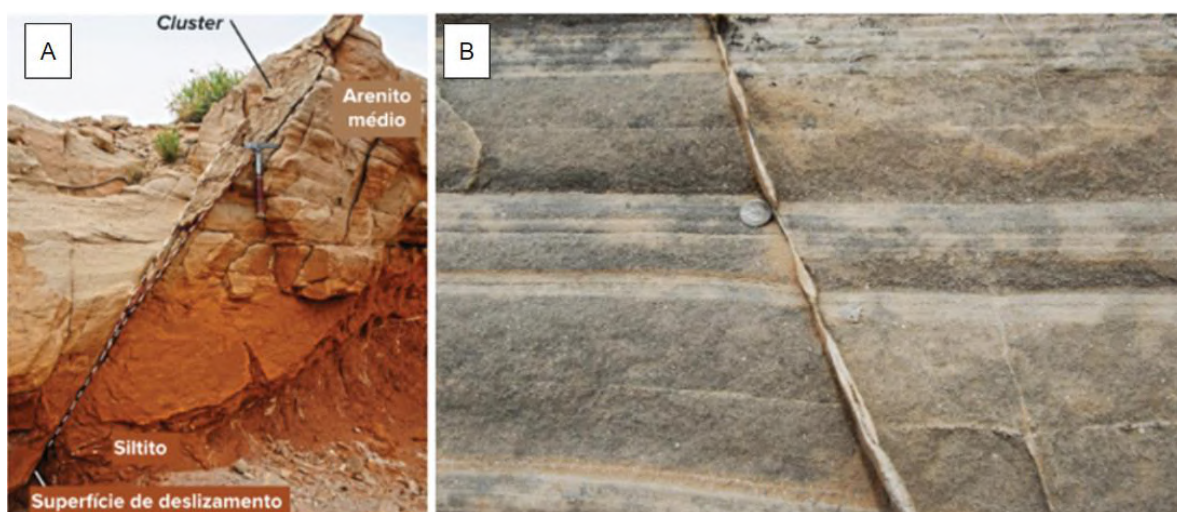


## 2. OBJETIVO

O presente estudo tem como objetivo aprofundar a caracterização dos aspectos texturais de arenitos pouco consolidados com estruturas do tipo bandas de deformação da Formação Resende (Eoceno), bacia de Volta Redonda, que já haviam sido identificadas 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), visando caracterizar a influência dessas estruturas nos aspectos texturais (matriz, cimento, poro e grãos) e permorosos desses arenitos, que são tidos como análogos a reservatórios areníticos pouco consolidados das bacias do Sudeste brasileiro.

### 3. BASES CONCEITUAIS

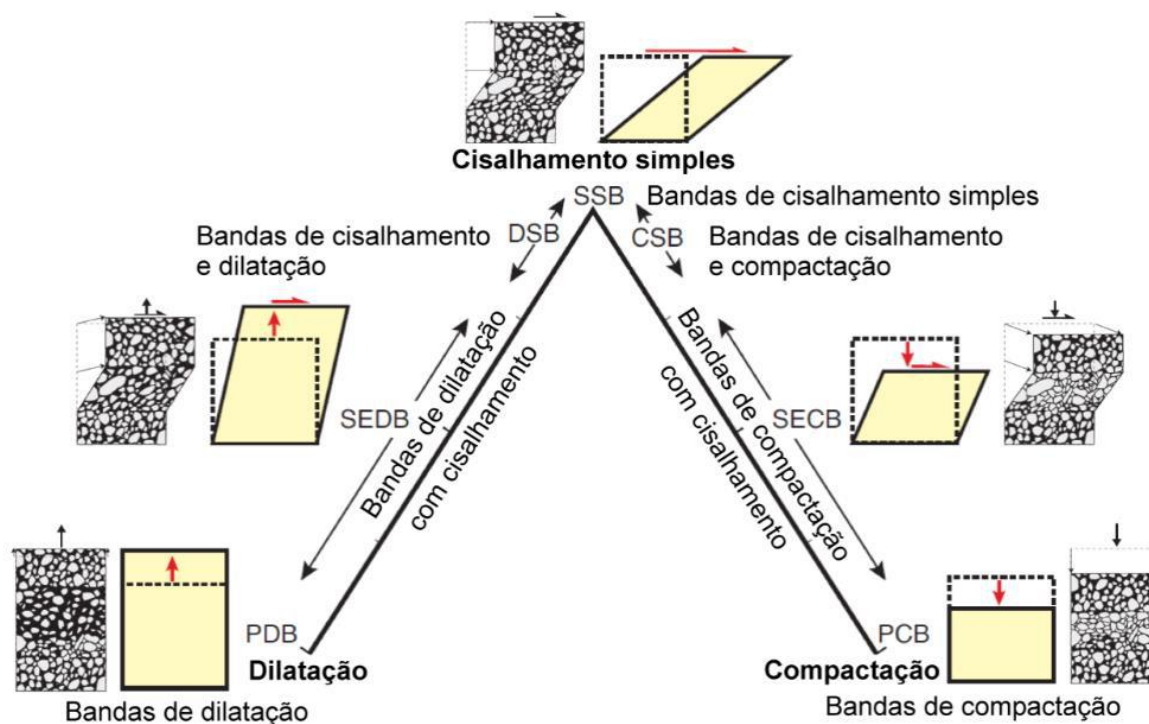
Bandas de deformação são tidas na literatura como estruturas tectônicas de geometria tabular, com espessuras que variam de milimétrica a centimétrica, e se desenvolvem em rochas porosas (essencialmente arenitos e conglomerados) (Figura 1a), resultado de uma deformação altamente localizada em regime rúptil (AYDIN, 1978; FOSSEN *et al.*, 2007). São estruturas que se apresentam como feições elevadas (Figura 1b) quando observadas em afloramento, o que ocorre devido à resistência à erosão que essas estruturas possuem, resultado da sua tendência de reduzir a porosidade e permeabilidade da rocha (*strain hardening*) (AYDIN, 1978). Podem ocorrer de forma individual no afloramento ou em conjuntos complexos de diversas faixas subparalelas (*cluster*). Quando há o aumento do *strain*, essas zonas podem se desenvolver para uma superfície de deslizamento.



**Figura 1** - Exemplos de bandas de deformação em regime extensional. (a) Cluster de bandas transicionando para uma superfície de deslizamento em areia fina/siltito na parte inferior da imagem. (b) Diferença da espessura das bandas entre camadas finas e grossas (FOSSEN *et al.*, 2017).

Fossen *et al.* (2007) classificam as bandas de deformação com base em dois principais critérios: sua cinemática e seus mecanismos de deformação (sob os quais elas foram formadas). Para a classificação quanto à sua cinemática, são considerados os componentes: cisalhamento simples, compactação e dilatação, podendo apresentar membros intermediários que combinam cisalhamento com dilatação ou cisalhamento com compactação (Figura 2). Os tipos mais comuns de

bandas de deformação são normalmente formadas entre os espectros cinemáticos de cisalhamento à compactação (FOSSEN *et al.*, 2017).

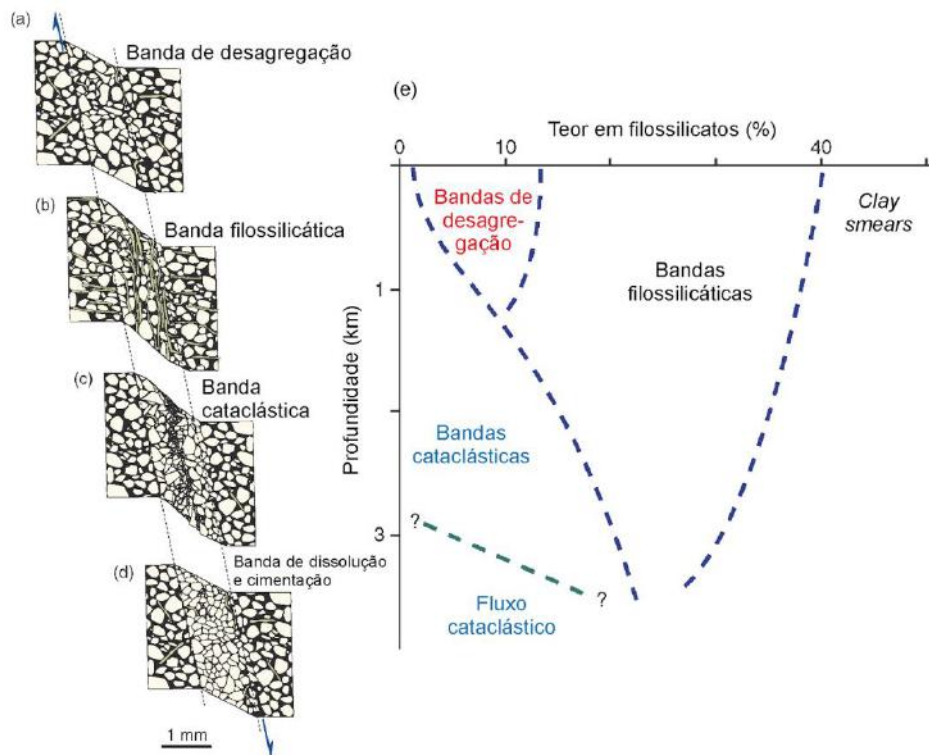


**Figura 2** - Classificação cinemática de bandas de deformação. PDB: pure dilation bands (bandas de dilatação); SEDB: shear-enhanced dilation bands (bandas de dilatação com cisalhamento); DSB: dilation shear bands (bandas de cisalhamento e dilatação); SSB: simple shear bands (bandas de cisalhamento 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: adaptado de Fossen *et al.* (2007) e Fossen *et al.* (2017).

Na classificação quanto ao tipo de mecanismo, definida por Fossen *et al.* (2007), as bandas de deformação podem ser divididas em quatro tipos, sendo estes: bandas de desagregação, bandas filossilicáticas, bandas cataclásticas e bandas de dissolução e cimentação (Figura 3). Diferentes tipos de mecanismo irão gerar bandas com propriedades petrofísicas distintas. É importante também observar que os tipos de mecanismos dependem de condições externas e internas da rocha como: mineralogia, granulometria, forma e "seleção dos grãos", cimentação, porosidade, grau de litificação, pressão de fluidos e regime tectônico (Figura 4).

Bandas de desagregação estão associadas ao mecanismo de fluxo granular, onde há a rotação e o deslizamento dos grãos, e ocorrem geralmente em arenitos pouco consolidados (PEI *et al.*, 2015). As bandas filossilicáticas podem aparecer em arenitos que possuem o teor de filossilicatos maior do que 10-15%, e resultam no alinhamento desses filossilicatos dentro das bandas conforme a orientação do

cisalhamento (FOSSSEN *et al.*, 2007). Caso os arenitos possuam mais do que 40% de filossilicatos em sua composição, a estrutura deixa de ser considerada uma banda filossilicática e passa a ser classificada como *clay smear* (FISHER & KNIPE, 1998). Os mecanismos associados à formação das bandas cataclásticas podem ser catáclase ou fluxos cataclásticos, associados ao fraturamento dos grãos, rotação e deslizamento. Aydin (1978) e Fossen *et al.* (2007) indicam que a textura dessas bandas é normalmente caracterizada pela má seleção do arcabouço, com a presença de grãos angulos, e alto teor de matriz (originada no processo de fraturamento dos grãos) e baixa porosidade. As bandas de dissolução e cimentação estão normalmente associadas à deformação durante o processo diagenético, no qual a banda atua como meio preferencial para a cimentação ou dissolução.



**Figura 3** - (a) Principais tipos de bandas de deformação baseados nos mecanismos de deformação. (b) Ilustração esquemática de como os diferentes tipos de bandas de deformação estão relacionadas ao conteúdo de filossilicatos e à profundidade de soterramento (FOSSSEN *et al.*, 2007).

Variável	Fluxo Granular	→	Catáclase
Profundidade de soterramento	Rasa	→	Profunda
Litificação	Inconsolidada	→	Bem litificada
Pressão de fluidos	Alta	→	Baixa
Cimento (composição)	FeO(OH)	→ CaCO <sub>3</sub> →	SiO <sub>2</sub>
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 o grau de catáclase nas bandas de deformação (FOSSEN *et al.*, 2017).

A formação dessas feições pode sofrer a influência de um ou mais tipos de mecanismos de deformação, o que resulta nas variações texturais e permoporosas das bandas, e esses mecanismos variam conforme a distribuição das tensões relacionadas ao regime tectônico (FOSSEN *et al.*, 2017).

As bandas de deformação cataclásticas são as mais comuns, geralmente associadas à compactação e redução da porosidade (GIBSON, 1998; FOSSEN, 2010). A redução da porosidade nessas bandas se dá pela compactação e reorganização dos grãos que são fraturados e pobremente selecionados. É caracterizada por uma deformação bem localizada, com limites acentuados entre a zona de fragmentação de grãos e de grãos não deformados, podendo apresentar nos seus limites zonas de cimentação por dissolução. Para esses tipos de bandas serem gerados, normalmente são necessárias profundidades mínimas de cerca de 1 km (FOSSEN, 2010; PEI *et al.*, 2015), que variam conforme os outros fatores externos e internos da rocha, assim como uma concentração de filossilicatos de no máximo 15%. Sendo essas condições atendidas, as bandas são formadas pelo fluxo cataclástico, que reduz a granulometria dos grãos através do processo cataclástico, e compactadas com a reorganização desse grãos mais finos, devido ao rolamento dos grãos causados pelo atrito, subparalelos à direção do cisalhamento.

Para as bandas de desagregação, a deformação ocorre sem fraturamento (PEI *et al.*, 2015). O mecanismo de formação desse tipo de banda é o fluxo granular, e ele é considerado um processo não destrutivo. O atrito gerado durante esse mecanismo de deformação se acomoda no contato primários dos grãos, sem a presença de fragmentação (FOSSEN, 2010). Essas bandas são sutis, e ocorrem geralmente em rochas areníticas pouco consolidadas (PEI *et al.*, 2015). Sua identificação depende da análise da trama local em escala microscópica, visto que essas estruturas não

apresentam textura expressiva, assim como a ausência completa de fratura nos grãos (GIBSON, 1998). A presença de filossilicatos pode formar filmes de micas na banda, gerando bandas filossilicáticas (FOSSEN, 2010; PEI *et al.*, 2015).

Anteriormente, as bandas de desagregação eram comumente negligenciadas (MALTMAN, 1988) ou não interpretadas como estruturas tectônicas, porém as bandas de desagregação sinsedimentares são bastante comuns em arenitos, sendo formadas durante ou logo após a deposição, devendo ser separadas das bandas relacionadas à deformação tectônica (FOSSEN, 2010). Uma diferença importante é que as bandas relacionadas à deformação tectônica, em rochas altamente porosas, se agrupam e definem a zona de dano em cada lado de uma eventual superfície de falha (AYDIN, 1978; FOSSEN *et al.*, 2007).

#### 4. CONTEXTO GEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia de Volta Redonda está inserida no Segmento Central do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (RCSB). O RCSB é a feição tectonossedimentar cenozoica mais importante do território brasileiro e se estende desde o Paraná, na cidade de Tijucas do Sul, até Barra de São João, no estado do Rio de Janeiro, por cerca de 900 km (RCSB – Riccomini, 1989; Riccomini *et al.*, 2004) (Figura 5). No seu segmento central está inserido o mais expressivo conjunto de bacias sedimentares (bacias de Volta Redonda, Resende, Taubaté e São Paulo).



**Figura 5** - Rift Continental do Sudeste do Brasil (MELO *et al.*, 1985; modificado por Rotava, 2017), destacando as bacias sedimentares envolvidas nesta feição geotectônica. No segmento central se encontram as bacias de São Paulo, Taubaté, Resende e Volta Redonda.

As rochas que compõem o embasamento da bacia estão incluídas no domínio da Faixa Ribeira (Figura 6), como produto final da amalgamação da porção ocidental do paleocontinente Gondwana, durante a Orogênese Brasileira (790 a 520 Ma) (DELGADO *et al.*, 2003). Essas rochas são compostas por complexos metamórficos (ortoderivados e paragnáissicos) proterozoicos e suítes intrusivas de idades neoproterozoicas a eopaleozoicas, que caracterizam terrenos litotectônicos variados, e apresentem uma forte trama estrutural NE-SW (HEILBRON *et al.*, 2004).

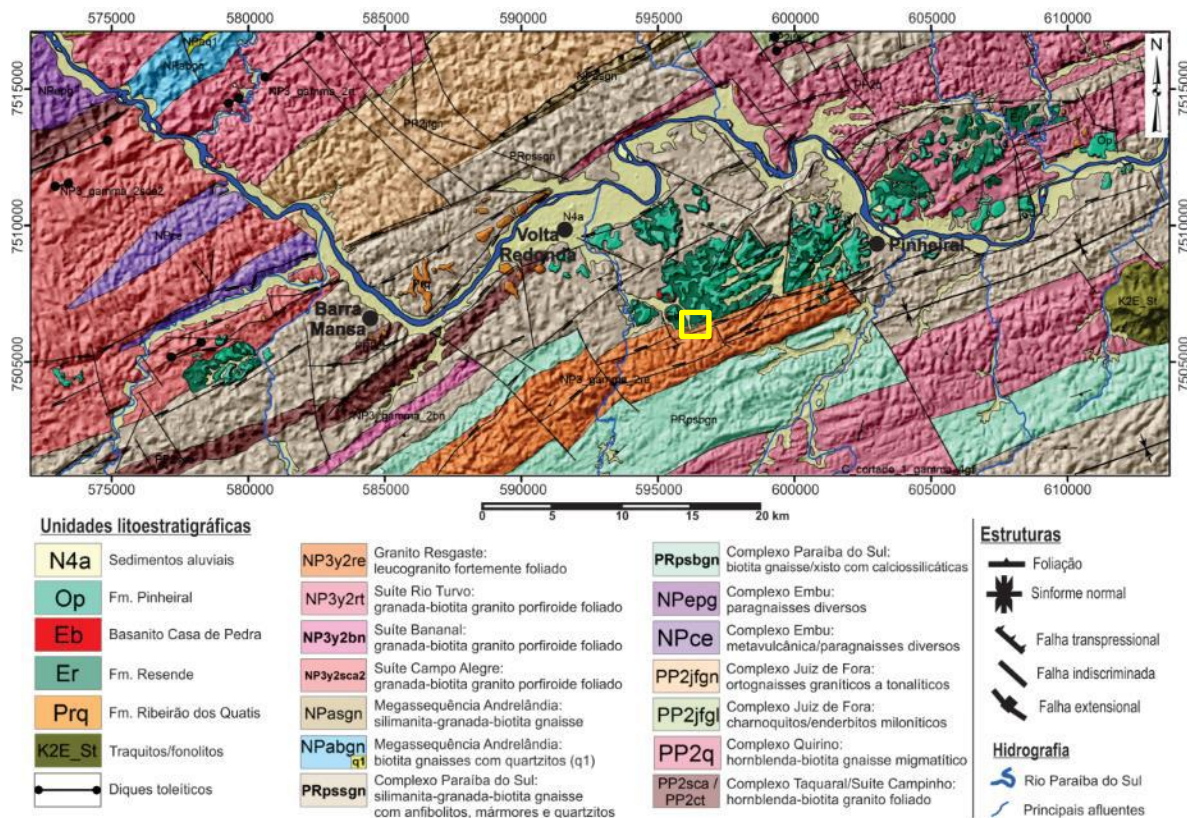


Figura 6 - Mapa geológico da região da bacia de Volta Redonda (Negrão, 2014; modificado por Maciel et al., 2017), destacando a localização da região de estudo (polígono em contorno amarelo).

A evolução tectônica da bacia é subdividida em quatro eventos tectônicos principais identificados por Negrão (2014) e Negrão et al. (2015) (Figura 7).

O primeiro evento (E1) é caracterizado como distensão NW-SE, no Eoceno, e é relacionado à abertura do *rifte*, com a criação de espaço para a acomodação de sedimentos em grábens paleogênicos, e também há a presença de um evento magmático (SANSON, 2006).

A evolução do espaço para a acomodação dos sedimentos no evento E1 estabeleceu três fases distintas para a deposição das unidades litoestratigráficas. Na fase pré-rifte são identificados os depósitos do sistema fluvial entrelaçado compostos pela Formação Ribeirão dos Quatis. Em seguida, associado à fase Rife I, estão os depósitos da Formação Resende (principal preenchimento sedimentar da bacia), que são resultado de um sistema fluvial entrelaçado com a influência de leques aluviais de borda de falha e, além disso, é nessa fase que são observadas as rochas do Basanito Casa de Pedra (rochas ultrabásicas alcalinas), registro de máxima distensão crustal do Eoceno (SANSON, 2006). Por fim, na fase Rife II, o sistema fluvial entrelaçado marcou o final do ciclo de deposição com os depósitos



Formação Pinheiral. Arelado a essa dinâmica de abertura do rifte são identificados sistemas de falhas normais com orientação NE-SW, produto da reativação das zonas de cisalhamento preexistentes (RICCOMINI, 1989; RICCOMINI *et al.*, 2004).

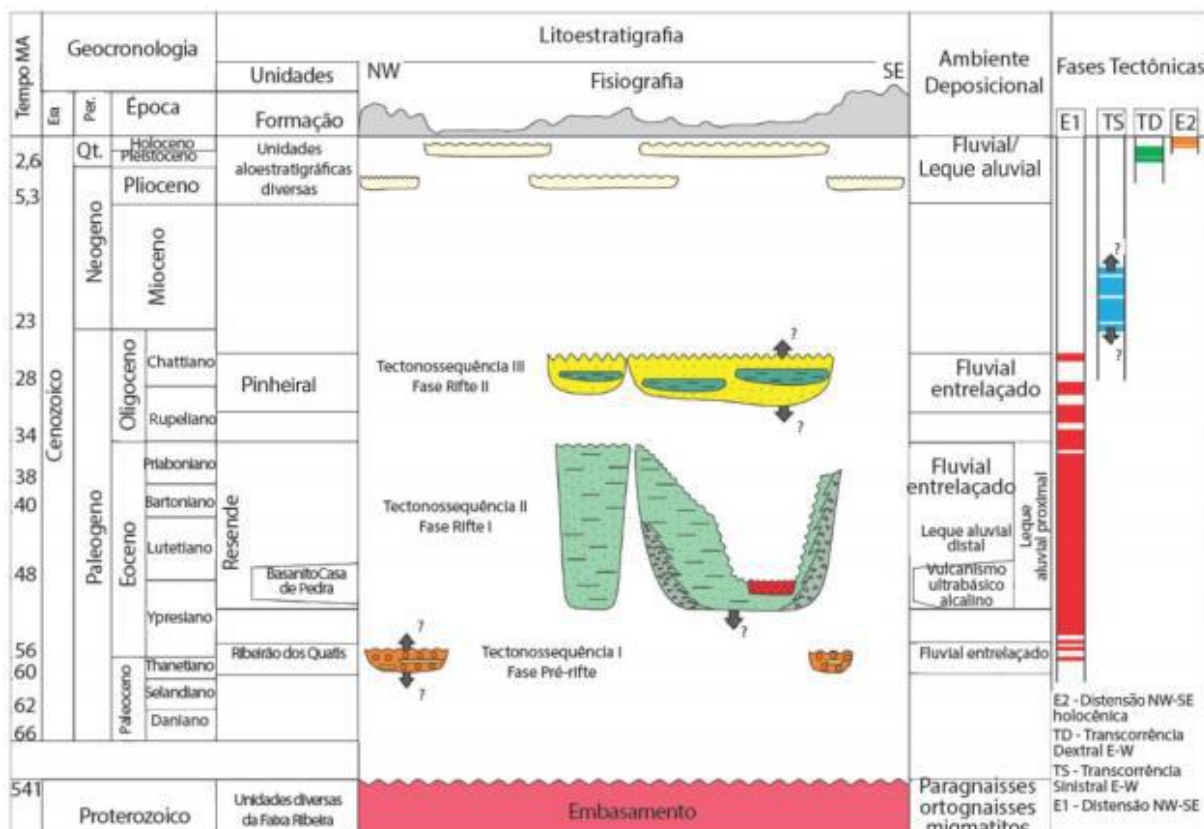


Figura 7 - Coluna litoestratigráfica e fases tectônicas propostas para a região da bacia de Volta Redonda por Negrão *et al.* (2015 — modificada por Fiuza, 2019).

Os três eventos seguintes são classificados como deformadores. O evento TS (neogênico) é uma transcorrência sinistral de orientação E-W que resultou no conjunto de falhas normais siniais e sinistrais normais de direção NE-SW a ENE-WSW, de falhas normais dextrais e dextrais normais com direção variando de NE-SW a NNW-SSE; e falhas normais NE-SW. O evento TD (transcorrência dextral), de idade pleistocênica, apresenta orientação E-W, afetando os depósitos paleogênicos, neogênicos e pleistocênicos (SANSON, 2006; NEGRÃO *et al.*, 2015), sendo representado por falhas normais NW-SE; 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. A fase E2 é caracterizada por uma distensão WNW-ESE, holocênica, que gerou conjunto de falhas normais de direção

ENE-WSW, NE-SW e NNE-SSW e é considerado o evento mais recente da evolução tectônica da bacia (SANSON, 2006; NEGRÃO *et al.*, 2015).

O afloramento estudado está localizado na borda sul do Gráben de Casa de Pedra, que é o principal depocentro da bacia de Volta Redonda (Figura 8). Nele são encontrados depósitos da Formação Resende, que representa o principal preenchimento sedimentar da bacia. Essa unidade é caracterizada por arenitos feldspáticos estratificados, pouco consolidados, intercalados a lamitos esverdeados, e subordinadamente intervalos conglomeráticos. O afloramento se encontra em um terreno particular, às margens da Rodovia do Contorno, no município de Volta Redonda (RJ), nas coordenadas UTM (datum WGS84): W 0597428 / S 7507066, fuso 23 (Figura 4). O acesso é feito pela Rodovia dos Metalúrgicos (VRD-001, ao sul) ou pela Rodovia Lúcio Meira (BR-393, ao norte).

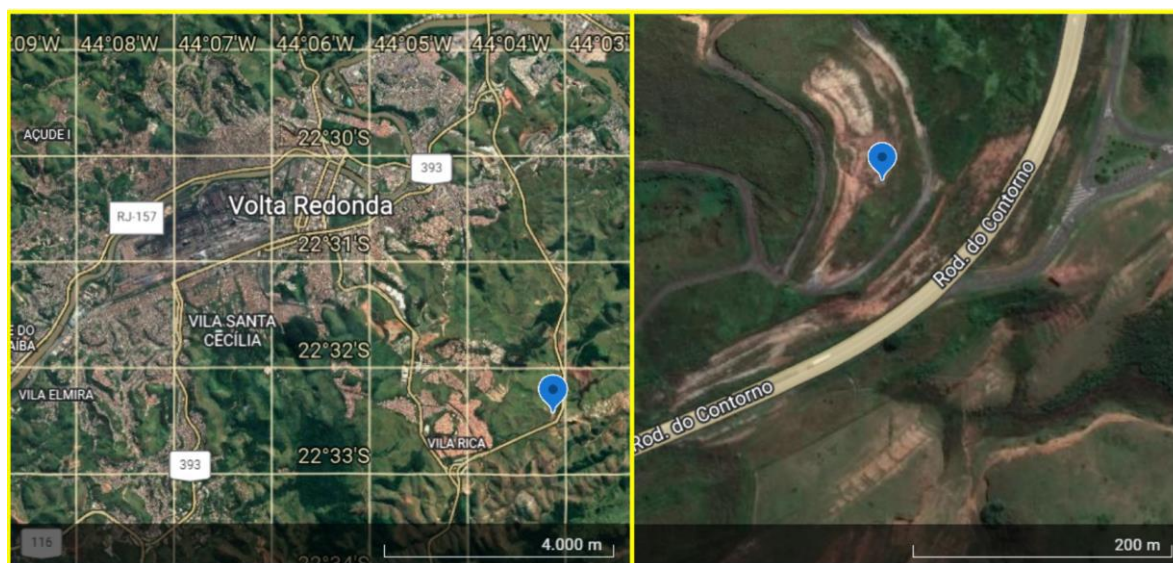


Figura 8 – A) Localização geográfica do afloramento estudado, indicado pelo ícone em cor azul, ao sul da cidade de Volta Redonda (RJ). B) Visão em detalhe da localização do afloramento estudado, indicado pelo ícone em cor azul, à margem da Rodovia do Contorno, Volta Redonda (RJ). Imagens retiradas do *Google Earth* em agosto de 2022.

## 5. REVISÃO DE TRABALHOS ANTERIORES

Maciel (2016) e Maciel *et al.* (2017) iniciaram a caracterização do afloramento da Formação Resende também considerado no presente estudo (Figura 9), a partir da análise dos conjuntos de pares falha/estria. Os resultados desses estudos identificaram três regimes de paleotensões que estão presentes na evolução tectônica da bacia (NEGRÃO *et al.*, 2015): transcorrência sinistral E-W (TS), transcorrência dextral E-W (TD), e distensão NW-SE (E2). Associados a esses eventos, foram assinalados elementos estruturais e identificadas estruturas do tipo bandas de deformação.

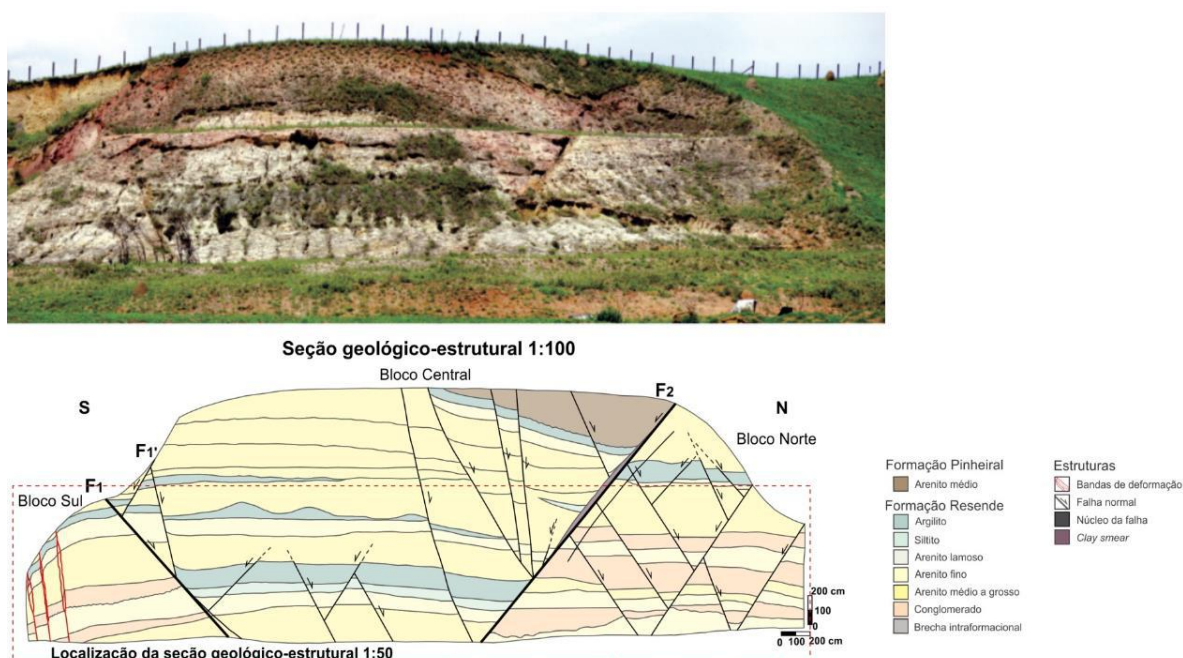


Figura 9 - Seção geológico-estrutural produzida por Maciel (2017) de afloramento da Formação Resende na bacia de Volta Redonda considerado no presente estudo.

Rotava (2017) realizou a análise microestrutural dessas bandas de deformação, cuja análise resultou na classificação destas em dois tipos: bandas cataclásticas e bandas de desagregação. As bandas de desagregação foram associadas às faixas nas quais os grãos se apresentam reorientados e sem fraturas. Já as bandas cataclásticas foram associadas às faixas milimétricas nas quais os grãos de quartzo se apresentam fraturados. A influência da concentração do cisalhamento nessas faixas corrobora a interpretação de que as bandas exercem controle na percolação

de fluidos, e isso pode ser observado na cimentação por óxido de ferro (Figura 10) que é condicionada por essas estruturas.

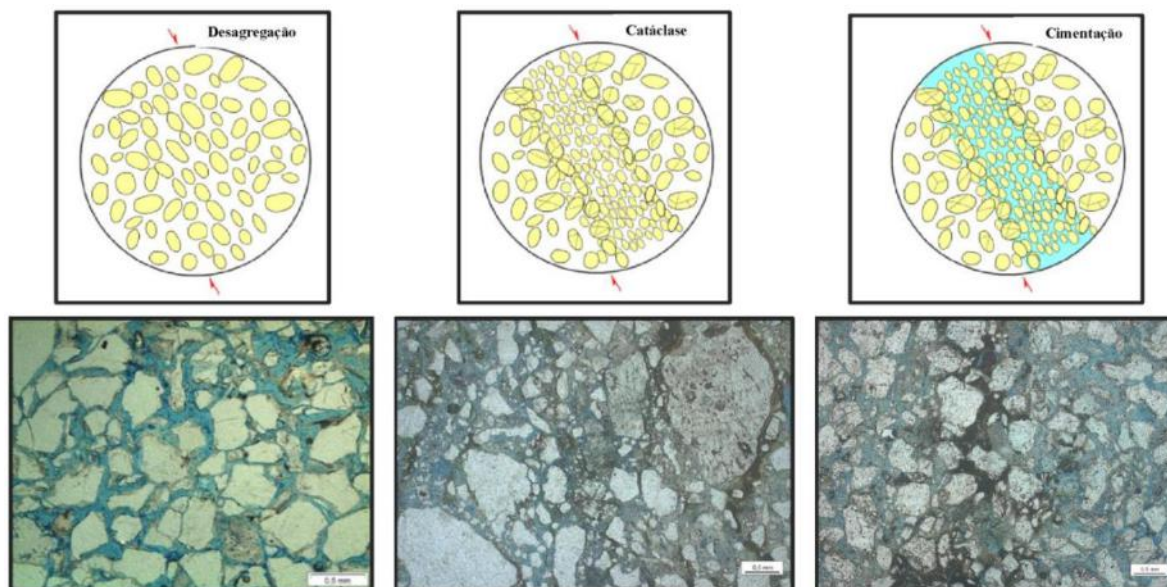


Figura 10 - Representações esquemáticas de bandas de desagregação, bandas cataclásticas e cimentação associada a bandas de deformação (a partir de PEI et al., 2015), relacionando-as a cada uma dessas feições identificadas por Rotava (2017).

O estudo de Rotava (2017) incluiu a quantificação dos aspectos texturais dos arenitos da Formação Resende, com a análise de lâminas petrográficas confeccionadas em diferentes zonas do afloramento aqui estudado. Nos seus resultados, foi possível observar a redução da porosidade nas rochas que apresentam maior grau de deformação (F1#3A\_CP1 e F1#3B\_BP1) (Tabela 1), relacionada ao aumento da quantidade de matriz e cimentação de óxido de ferro, do que as amostras que apresentaram menor ou nenhum grau de deformação (BD#1/2\_AP1, BD#1/2\_BP1, P1#3, P1#4 e P1#5). Esses resultados foram importantes para o atual estudo pois, a partir deles, foi observada a necessidade de compreender melhor a dinâmica da deformação em escala milimétrica e como ela afeta a diferenciação dos aspectos texturais, assim como compreender a razão do resultado de alguns arenitos deformados (BD#1/2\_AP1 e BD#1/2\_BP1) apresentar porosidades mais próximas às de arenitos não-deformados, considerando o fato de que também são rochas que sofreram deformação.

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

	Arenitos deformados				Arenitos não-deformados		
	BD#2_AP1	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%
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>100,2%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

Vogel (2018) avançou na caracterização dos aspectos estruturais e texturais relacionados à deformação rúptil nesses arenitos da Formação Resende, utilizando a análise de imagens tomográficas e microtomográficas, associadas a dados de petrofísica básica, para compreender o efeito que essas feições exercem sobre a porosidade e permeabilidade da rocha. Em seus resultados macroscópicos, foram identificados os padrões e geometrias dessas feições (bandas de deformação e falhas), e em sua análises microscópicas foram caracterizados em maior detalhe os tipos de bandas de deformação (compactação, cisalhamento e de dilatação), com a observação da redução da granulometria, do grau de compactão, da redução do espaço poroso e da concentração de óxidos e hidróxidos de ferro, que são aspectos atribuídos às faixas mais densas observadas nas imagens. Com a associação dessas análises aos dados de petrofísica básica, os resultados corroboraram a correlação de que nas rochas com maior concentração de faixas densas são encontrados os menores valores de porosidade e permeabilidade, já os maiores valores de porosidade e permeabilidade são encontrados em rochas que apresentaram menor densidade dessas estruturas.

Galvão (2018) verificou o papel das falhas e bandas de deformação na modificação do *fabric* dos arenitos, a partir do estudo de aspectos texturais e composicionais de uma camada guia no afloramento da Formação Resende estudado pelas autoras anteriores. Os resultados obtidos indicaram que o bloco abatido sofreu maior deformação, com a maior variação dos aspectos analisados, e que a falha estudada (F1) exerceu maior impacto na modificação do *fabric* dos arenitos do que a zona de bandas de deformação localizada no bloco sul.

## 6. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos do trabalho foram organizados conforme as seguintes etapas (Figura 11):

- I. seleção no afloramento investigado da Formação Resende de duas amostras de arenitos não deformados (ND#1 e ND#3), onde se observam estruturas sedimentares primárias, e duas amostras de arenitos (BD#1/2 e F1#3A) que apresentam feições de deformação dútil (falhas e bandas de deformação);
- II. descrição macroscópica das amostras selecionadas;
- III. análise das imagens tomográficas das amostras selecionadas;
- IV. confecção de 4 *plugs* a partir das amostras de arenitos não deformados;
- V. análise de imagens microtomográficas de *plugs* das amostras de arenitos deformados (confeccionados anteriormente por Vogel, 2018);
- VI. caracterização petrográfica de três lâminas delgadas, sendo uma de amostra de arenito não deformado (ND#3) e duas de amostras de arenitos com deformação dútil (BD#1/2 e F1#3A), com a quantificação dos aspectos texturais (cimento, matriz, poro e grãos);
- VII. quantificação dos aspectos granulométricos das amostras descritas na etapa anterior e a partir da análise dos dados obtidos por Galvão (2018);
- VIII. quantificação dos aspectos de porosidade e permeabilidade a partir da análise em permoporosímetro e da análise de imagens microtomográficas nos softwares *AVIZO* e *Fiji: imageJ*;

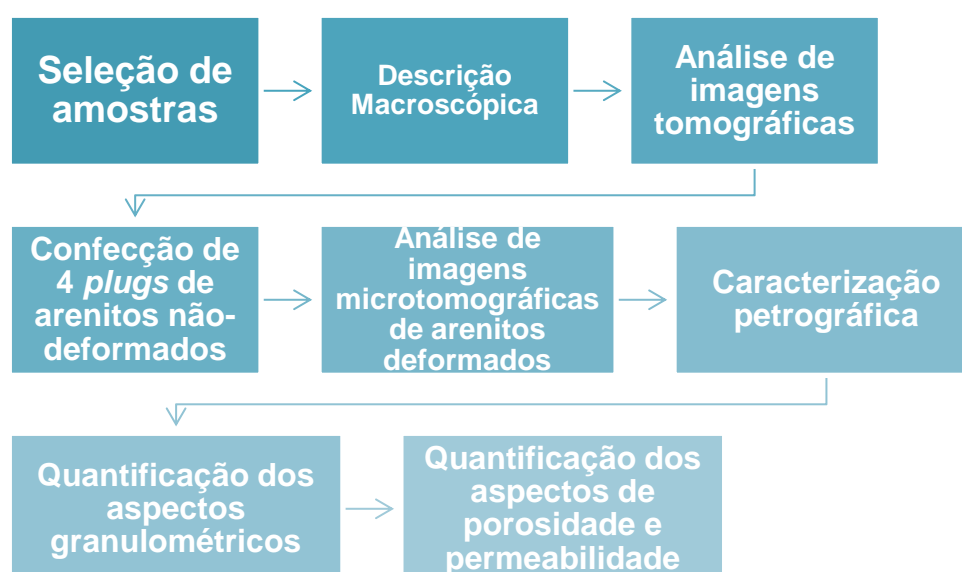


Figura 11 – Fluxograma com as etapas da metodologia aplicada.

## 6.1. Seleção de amostras

O estudo incluiu inicialmente a análise de quatro blocos de arenitos pouco consolidados da Formação Resende, extraídos do afloramento investigado (Figura 12). Os blocos selecionados podem ser individualizados através da observação de dois aspectos: o primeiro aspecto, observado nos blocos ND#1 e ND#3, é a presença de estruturas sedimentares primárias, como estratificações cruzadas, sem a identificação de feições de deformação rúptil; o segundo aspecto, observado nos blocos F1#3A e BD#1/2, é a presença de estruturas que identificam a influência da deformação rúptil em diferentes concentrações no afloramento. Nesse aspecto, uma amostra é referente à zona de deformação associada à falha F1 (F1#3A), e a outra é retirada de uma zona composta por arenitos deformados por estruturas do tipo bandas de deformação (BD#1/2).

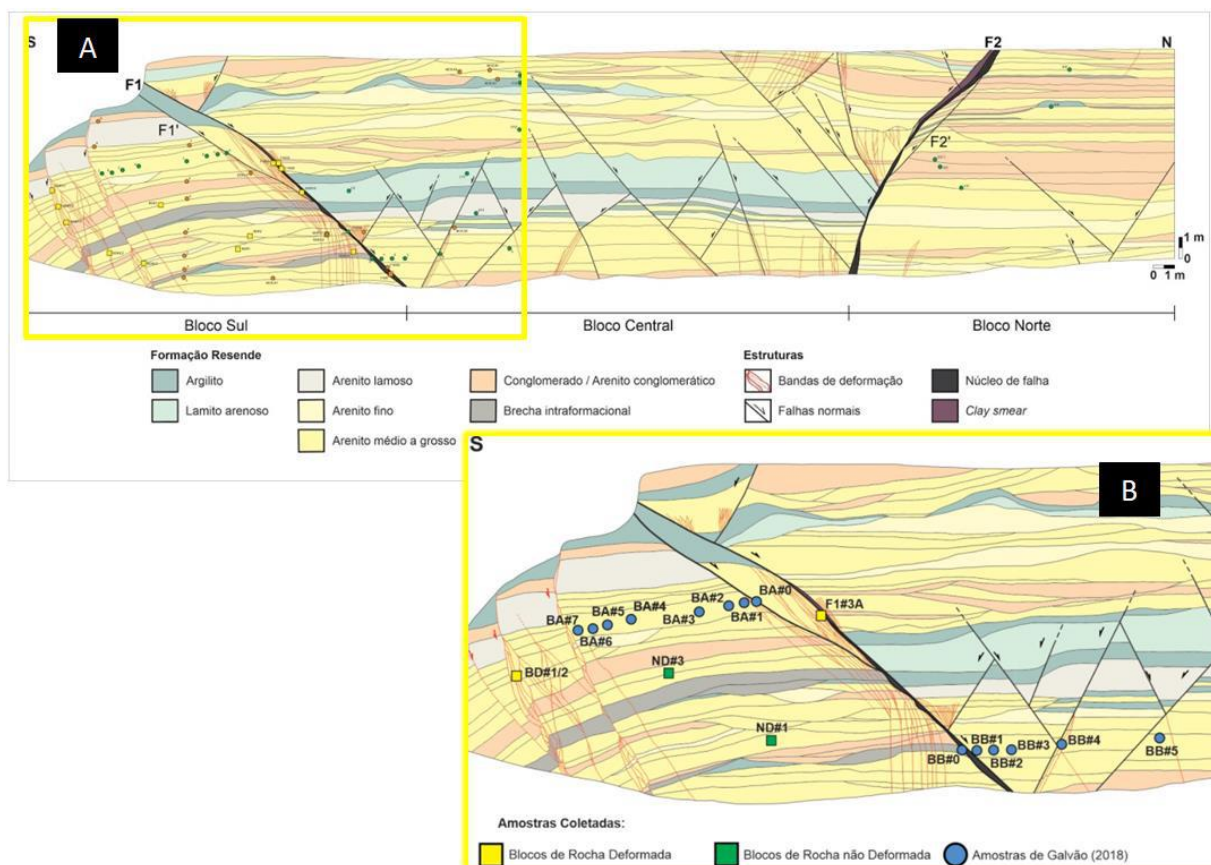


Figura 12 - A) Seção estratigráfica-estrutural de um afloramento da bacia de Volta Redonda, segundo Fiuza (2019), destacando (em contorno amarelo) a porção do afloramento investigada no presente estudo. B) Localização das amostras analisadas: ND#1 e ND#3 (amostras de arenitos não deformados); BD#1/2 (amostra de arenito deformado, em uma zona de bandas de deformação); F1#3A (amostra de arenito deformado, na zona de falha F1); amostras BA#(0-7) e BB#(0-5), analisadas com base em dados obtidos por Galvão (2018).

## 6.2. Descrição macroscópica das amostras selecionadas

O objetivo dessa etapa foi descrever macroscopicamente (Figura 13) os principais aspectos texturais e estruturais das amostras de arenitos estudadas, como granulometria, seleção, estruturas sedimentares, feições de estruturas rúpteis (fraturas, falhas e bandas de deformação), para poder estabelecer uma base para as análises seguintes.

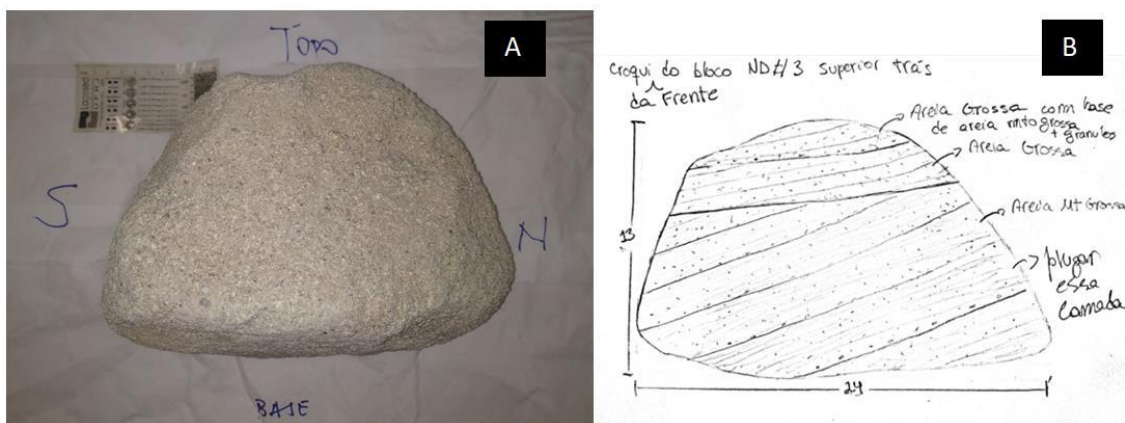


Figura 13 - A) Bloco de arenito não deformado (amostra ND#3) em mesa de descrição, orientado conforme posição de extração do afloramento. B) Croqui com a interpretação macroscópica do bloco ND#3.

## 6.3. Análise de imagens tomográficas

Nessa etapa foram selecionados dois blocos de arenitos deformados (F1#3A e BD#1/2), para a análise do comportamento da deformação rúptil, e dois blocos de arenitos não deformados (ND#1 e ND#3), buscando-se estabelecer critérios comparativos entre a rocha não deformada e a rocha deformada. As imagens tomográficas foram obtidas através de um tomógrafo médico no Laboratório de Tomografia do CENPES/PETROBRAS e foram analisados por meio do *software AvizoFire 8.1 FEI*, sendo gerado o modelo tridimensional dos quatro blocos. Nas imagens (Figura 14) é possível observar o contraste na coloração dentro de cada bloco, que é resultado do coeficiente de atenuação da energia do material. As regiões mais claras possuem menor porosidade e apresentam concentração de materiais de maior densidade ou de maior número atômico. As regiões mais escuras apresentam maior porosidade, menor concentração de minerais de alta densidade ou apresentam minerais de menor número atômico.



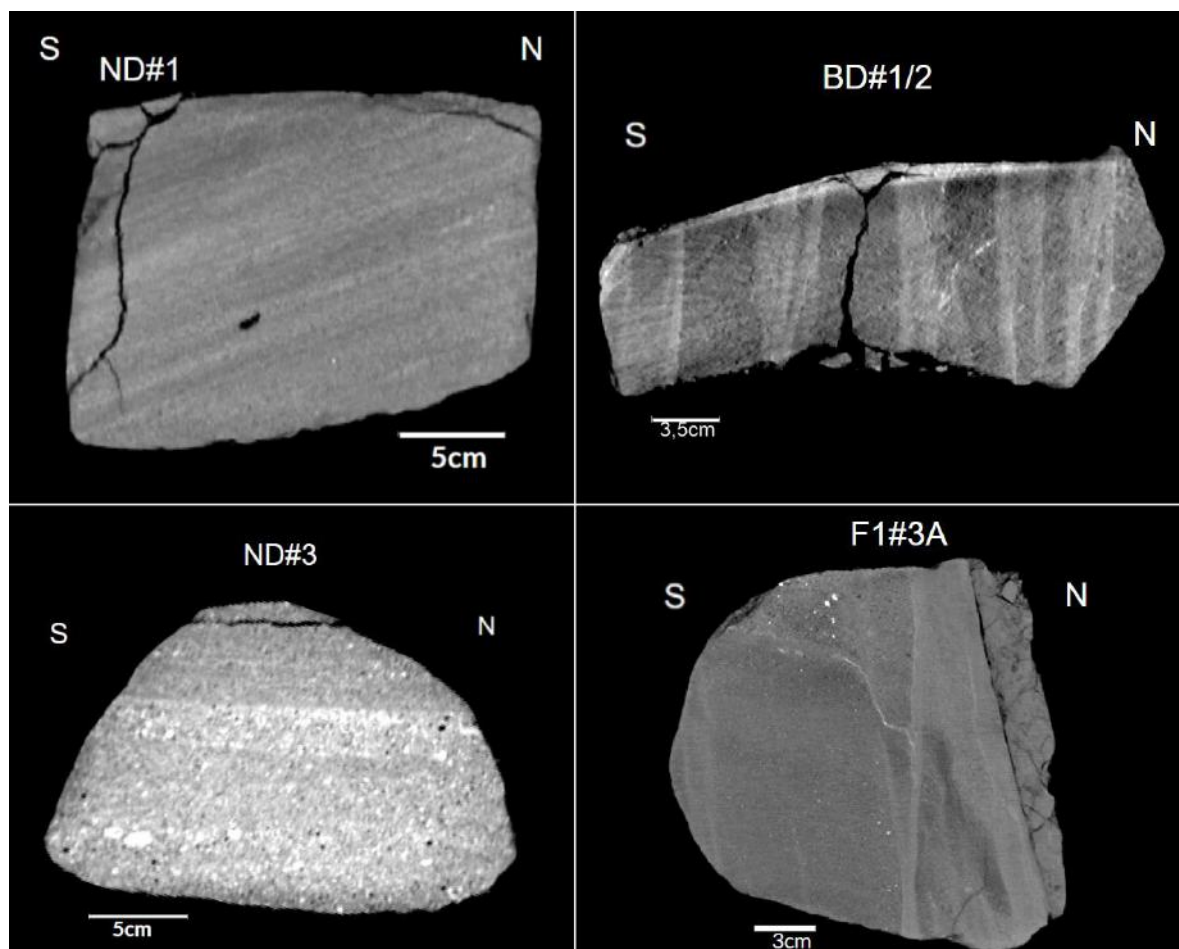


Figura 14 - Imagens tomográficas dos quatro blocos analisados, sendo os blocos ND#1 e ND#3 referentes a arenitos não deformados e os blocos BD#1/2 e F1#3A referentes a arenitos deformados.

Nas imagens foram identificadas zonas que refletem o comportamento da deformação no afloramento estudado, com a presença de faixas verticalizadas com maior grau de deformação associadas à coloração mais clara, intercaladas a faixas de menor grau de deformação, associadas à coloração mais escura.

A partir da análise das imagens tomográficas, foram selecionados nove *plugs* (já descritos anteriormente por Vogel, 2018) de arenitos deformados (sete provenientes do bloco F1#3A e dois do bloco BD#1/2) e confeccionados quatro *plugs* de arenitos não deformados (Tabela 2).

Tabela 2 – Distribuição das amostras em suas respectivas escalas de amostragem.

Bloco	Plug	Microtomografia	Petrofísica básica	Lâmina
ND#1	ND#1		X	
ND#3	P1		X	
	P2		X	X
	P3		X	
BD#1/2	P1	X	X	X
	P2	X	X	
F1#3A	P1	X	X	X
	P2	X	X	
	P3A	X	X	
	P3B	X	X	
	P4	X	X	
	P5	X	X	
	P6	X	X	

#### 6.4. Confeção de quatro *plugs* de arenitos não deformados

Assim como na metodologia utilizada por Vogel (2018), a seleção das melhores posições para a confecção dos *plugs* foi orientada com base na interpretação das imagens tomográficas (Figura 15).

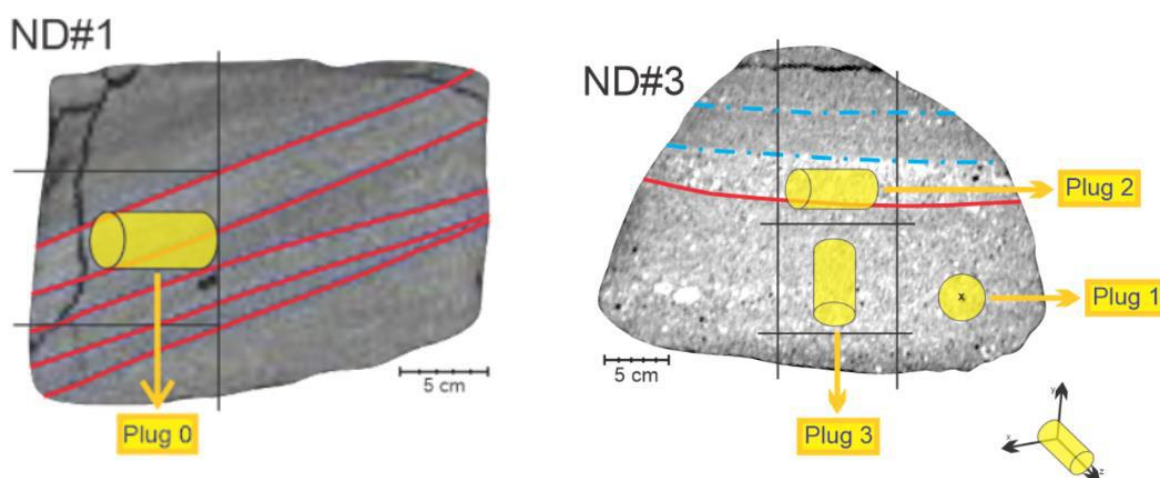


Figura 15 - Orientação dos *plugs* confeccionados nos blocos de arenitos não deformados ND#1 e ND#3 a partir da interpretação das imagens tomográficas.

Para a confecção dos *plugs* foi necessário submeter a rocha a um processo de congelamento, devido a sua característica bastante friável. Esse processo se desenvolveu com as seguintes etapas (Figura 16): aspersão de água sobre o bloco; congelamento do bloco em um recipiente contendo nitrogênio líquido a aproximadamente  $-203^{\circ}\text{C}$ ; orientação no bloco congelado dos cortes a serem efetuados; realização dos cortes para a obtenção dos *plugs*, com aproximadamente 1" ( $\sim 3\text{cm}$ ) de diâmetro e entre 3,5 e 5 cm de comprimento. Esses *plugs* de arenitos não deformados foram, em seguida, submetidos ao ensaio de petrofísica básica para a obtenção dos dados de porosidade e permeabilidade.

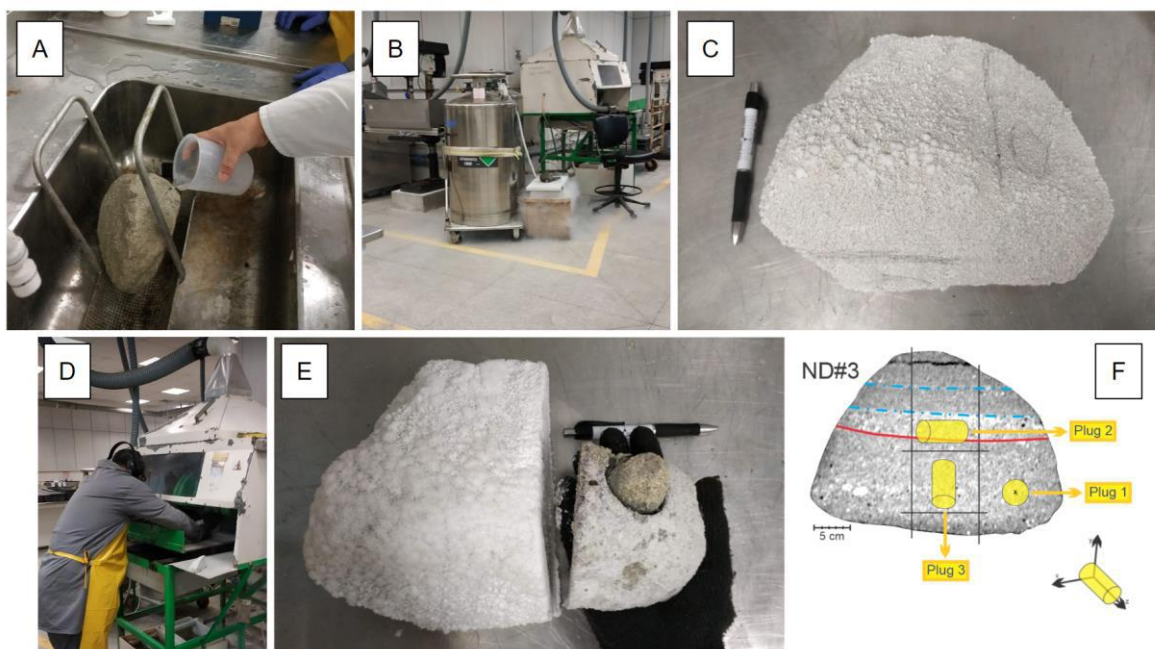


Figura 16 - A) Aspersão de água sobre o bloco ND#3; B) congelamento do bloco em um recipiente contendo nitrogênio líquido a aproximadamente  $-203^{\circ}\text{C}$ ; C) orientação no bloco congelado dos cortes a serem efetuados para a confecção dos plugs; D) obtenção dos plugs; E) orientação do plug P1 confeccionado dentro do bloco de rocha não deformada; F) representação da posição dos três plugs confeccionados a partir do bloco de rocha ND#3.

## 6.5. Análise de imagens microtomográficas

Foram considerados nove *plugs* de arenitos deformados confeccionados por Vogel (2018), buscando-se examinar o controle exercido pelas estruturas rúpteis nas propriedades permoporosas desses arenitos. Para isso, foi feita a análise de imagens microtomográficas, obtidas em laboratório do CENPES/PETROBRAS, com o uso dos softwares *AvizoFire 8.1* e *Fiji: imageJ*. Assim como nas análises

tomográficas, nas imagens microtomográficas (Figura 17) é possível observar o contraste na coloração, que é resultado do coeficiente de atenuação da energia do material. As regiões mais escuras ressaltam a maior porosidade e menor concentração de minerais de alta densidade, e as regiões mais claras registram menor porosidade e concentração de materiais de maior densidade ou de maior número atômico.

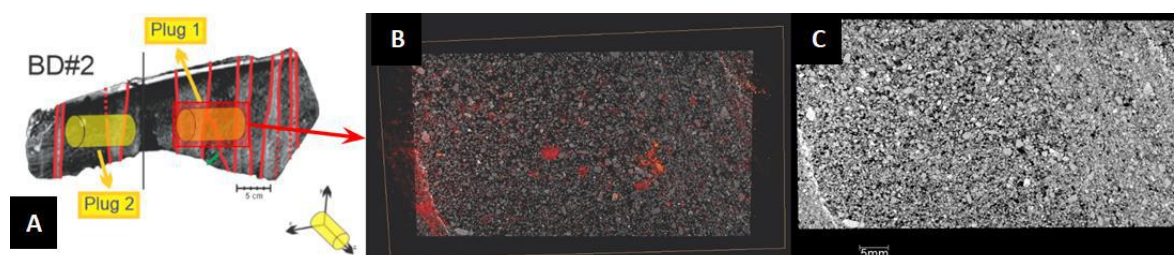


Figura 17 - A) Localização dos plugs P1 e P2 confeccionados no bloco de arenito deformado BD#1/2 (Vogel, 2018); B) imagem de um slice (fatia) do modelo microtomográfico 3D do plug P1 observado com o auxílio do software AvizoFire 8.1; C) imagem de um slice do modelo microtomográfico 3D do plug P1 observado no software Fiji: imageJ.

Os *plugs* de arenitos deformados também foram submetidos ao ensaio de petrofísica básica (VOGEL, 2018) para a melhor análise do controle exercido pelas estruturas rúpteis nas propriedades de porosidade e permeabilidade da rocha.

## 6.6. Caracterização petrográfica

O primeiro passo na etapa de caracterização petrográfica foi a confecção de uma lâmina delgada a partir da capa do *plug* P2 do bloco de arenito não-deformado ND#3 (Figura 18). Após a extração do *plug*, a sua capa foi cuidadosamente armazenada e orientada para a confecção de uma lâmina petrográfica no Laboratório de Laminação do Departamento de Geologia/IGEO/UFRJ. A amostra foi primeiramente impregnada com resina líquida e corante de coloração azul para depois ser confeccionada a lâmina conforme as orientações demarcadas na capa do *plug*. A mesma metodologia foi utilizada por Rotava (2017) para a confecção de lâminas petrográficas de arenitos deformados a partir dos blocos BD#1/2 e F1#3A. No presente estudo, uma lâmina delgada de cada um desses blocos foi selecionada para a análise das características petrográficas.

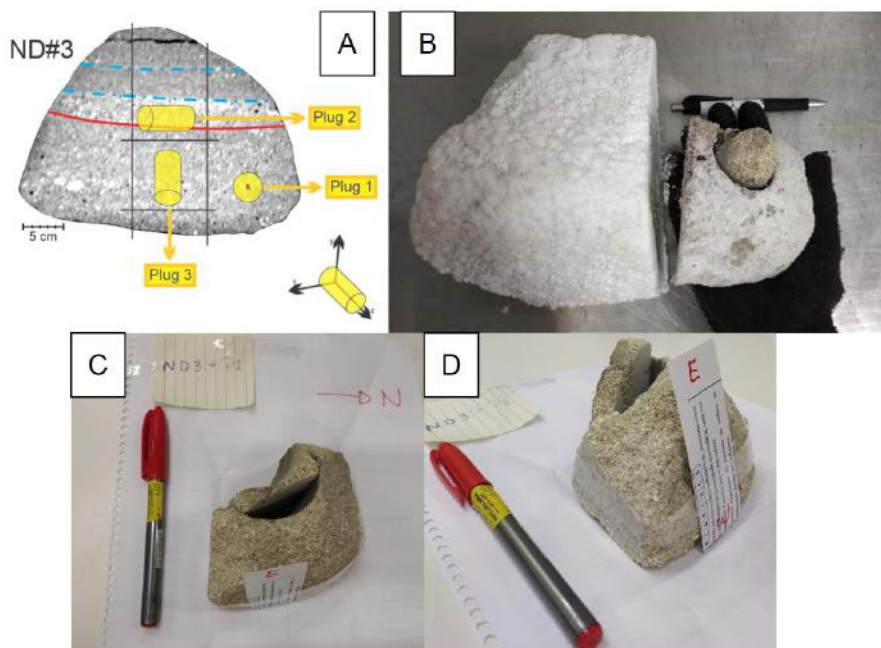


Figura 18 - A) Localização dos plugs no bloco de arenito não-deformado ND#3; B) orientação do plug P1 confeccionado dentro do bloco de rocha não deformada; C) capa do plug P1 orientada para a confecção da lâmina; D) orientação E-W representa o local para a confecção da lâmina antes de ser encaminhada ao Laboratório de Laminação do Departamento de Geologia/IGEO/UFRJ.

O método utilizado para a verificação dos aspectos texturais se baseou na análise de uma imagem de cada lâmina investigada (Figura 19), correspondendo a mosaicos compostos por fotomicrografias com o aumento de 2,5x.

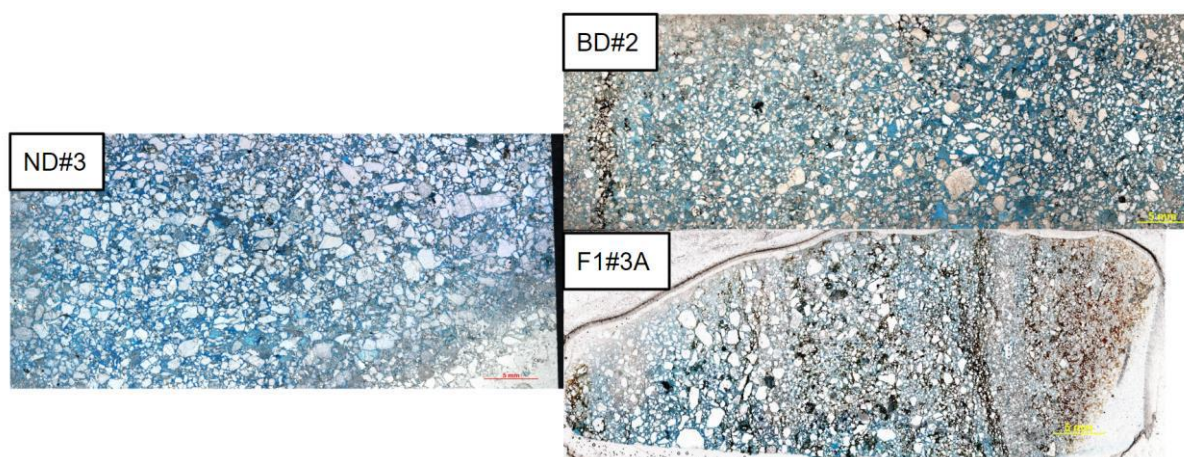


Figura 19 - Imagens dos mosaicos compostos por fotomicrografias com o aumento de 2,5x: A) lâmina confeccionada no bloco ND#3\_plug 2; B) lâmina confeccionada no bloco BD#1/2\_plug 1; C) lâmina confeccionada no bloco F1#3A\_plug 1.

A análise dos aspectos texturais (cimento, matriz, poro e grãos) na lâmina de arenito não deformado foi baseada no método Gazzi-Dickinson (DICKINSON, 1970), com a contagem de aproximadamente 500 pontos, homoganeamente distribuídos

pela imagem da lâmina com o auxílio de uma malha no *software CorelDRAW 2019*. Com isso, foi possível identificar a proporção de cada um desses aspectos. Já as lâminas de arenitos deformados (BD#1/2 e F1#3A) foram previamente interpretadas em faixas milimétricas que apresentavam diferentes características texturais provenientes da concentração da deformação. Com o auxílio do *software CorelDRAW 2019*, foram distribuídas em cada uma das faixas milimétricas identificadas as proporções de pontos a serem contabilizados conforme a quantidade de faixas, como por exemplo: para dez faixas identificadas, foram distribuídos simetricamente 50 pontos em cada uma delas, totalizando no mínimo 500 pontos para a contagem.

### **6.7. Quantificação dos aspectos granulométricos**

Nessa etapa, o mesmo método utilizado para a contagem dos aspectos texturais foi aplicado para a quantificação dos aspectos granulométricos nas imagens das lâminas de arenitos deformados e não deformados.

Com essa análise foi possível gerar histogramas de distribuição granulométrica que permitiram a interpretação do comportamento do tamanho dos grãos em função do controle exercido pela deformação dútil. Como resultados, foram gerados: um histograma de distribuição granulométrica para a amostra ND#3; sete histogramas para a amostra BD#1/2; e nove histogramas para a amostra F1#3A – nas amostras de arenitos deformados as quantidades de histogramas equivalem à quantidade de faixas milimétricas interpretadas.

A limitação gerada pelo fato de a análise ter sido concentrada em apenas três pontos do afloramento fez com que fosse necessária a procura de uma abordagem que abrangesse a continuidade lateral das camadas sedimentares, o que torna possível uma melhor interpretação do controle exercido pela deformação nos aspectos granulométricos dos arenitos investigados. Para isso, o estudo incluiu a análise dos dados granulométricos obtidos por Galvão (2018) para uma camada arenítica no mesmo afloramento. Foram reinterpretados os quatorze dados amostrados (BA#0, BA#1, BA#2, BA#3, BA#4, BA#5, BA#6, BA#7, no bloco alto da falha F1, e BB#0, BB#1, BB#2, BB#3, BB#4, BB#5, no bloco baixo da falha F1), sendo elaborados histogramas granulométricos.

### 6.8. Quantificação dos aspectos de porosidade x permeabilidade

Os ensaios de petrofísica básica foram realizados em permoporosímetro a gás nos três *plugs* confeccionados no bloco de arenito não deformado ND#3 (P1, P2 e P3) e em um *plug* do bloco ND#1, além de serem também analisados dados obtidos por Vogel (2018) em dois *plugs* do bloco BD#1/2 (P1 e P2) e em sete *plugs* do bloco F1#3A (P1, P2, P3-A, P3-B, P4, P5, P6). Com esses dados foi possível analisar a relação entre permeabilidade (mD) e porosidade (%).

Imagens microtomográficas foram utilizadas nessa etapa para compreender e correlacionar o comportamento da rocha deformada em relação à rocha não deformada. Nessas imagens (Figura 20) foram calculados os valores de porosidade nas duas amostras deformadas BD#1/2 P1 e F1#3A P1. O primeiro cálculo analisou o volume de poros no modelo 3D para ambos os *plugs* utilizando o *software* AVIZO; o segundo cálculo se baseou na análise da porosidade de *slices* (fatias) do modelo 3D selecionados de cada *plug*, utilizando o *software* Fiji: *imageJ* através do contraste de cor observado entre os espaços vazios tidos como poros (mais escuro) e os preenchidos por grãos (mais claro). Os resultados dos cálculos de porosidade foram em seguida comparados aos dados de porosidade adquiridos no ensaio petrofísico, para uma melhor avaliação da variação desse aspecto e interpretação do controle da deformação.

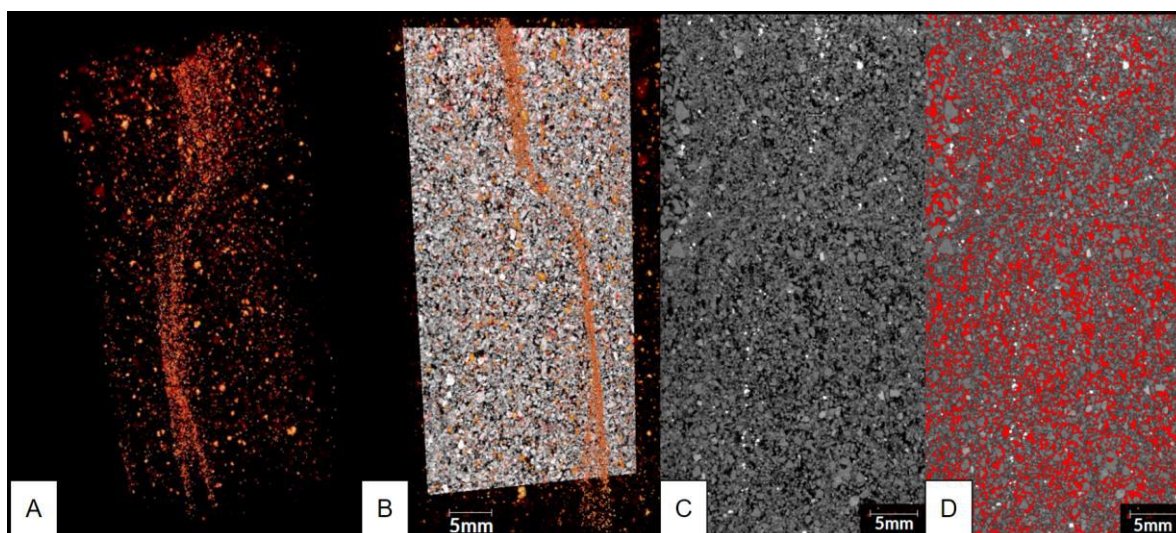


Figura 20 - A) Mapa de poros do *plug* F1#3A P1 observado no *software* AVIZO; B) *slice* do *plug* F1#3A P1 mesclado ao mapa de poros no *software* AVIZO; C) *slice* do *plug* F1#3A P1 no *software* Fiji: *imageJ*; D) *slice* do *plug* F1#3A P1 com a ferramenta de contraste para o cálculo da porosidade ativa.

## 7. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos em cada uma das análises realizadas, começando pela descrição macroscópica dos blocos e seus aspectos tomográficos, para em seguida abordar, em escala de maior detalhe, a análise dos aspectos microtomográficos dos *plugs* e a caracterização petrográfica dos aspectos texturais (cimento, matriz, poro e grãos) e granulometria. Por fim, são discutidos os dados obtidos nos ensaios petrofísicos e o comportamento geral da permeabilidade e porosidade obtidas através da metodologia aplicada.

### 7.1. Aspectos macroscópicos

Na descrição macroscópica do bloco ND#1 (Figura 21), foi reconhecida uma composição majoritariamente de grãos de quartzo no tamanho areia grossa a muito grossa, seguido por grãos de feldspato, epimatriz associada à alteração dos grãos de feldspato, muscovita, líticos e cimentação de óxido de ferro. É evidente nesse bloco o controle que o acamamento da rocha exerce na percolação de fluidos, com o condicionamento da pigmentação avermelhada (cimentação de óxidos e hidróxidos de ferro) nas estruturas sedimentares. As características relacionadas ao processo de sedimentação da rocha são identificadas pela presença de estruturas primárias (estratificações) associadas ao processo de deposição em ambiente fluvial entrelaçado da Formação Resende.

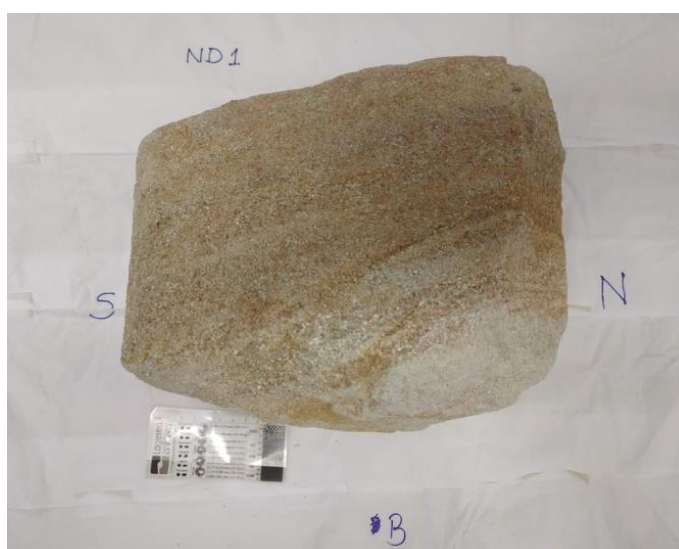


Figura 21 - Foto do bloco de arenito não deformado ND#1, destacando o padrão de cimentação por óxido de ferro acompanhando as estruturas sedimentares (estratificações cruzadas).



Na análise macroscópica do bloco ND#3 (Figura 22), foi possível observar que a rocha é composta por arenito grosso a muito grosso, que apresenta estrutura primária do tipo estratificação cruzada acanalada, composição principal de quartzo, seguido por feldspado, muscovita e líticos. A rocha apresenta característica bastante friável, que ressalta o baixo grau de consolidação dos arenitos da Formação Resende.

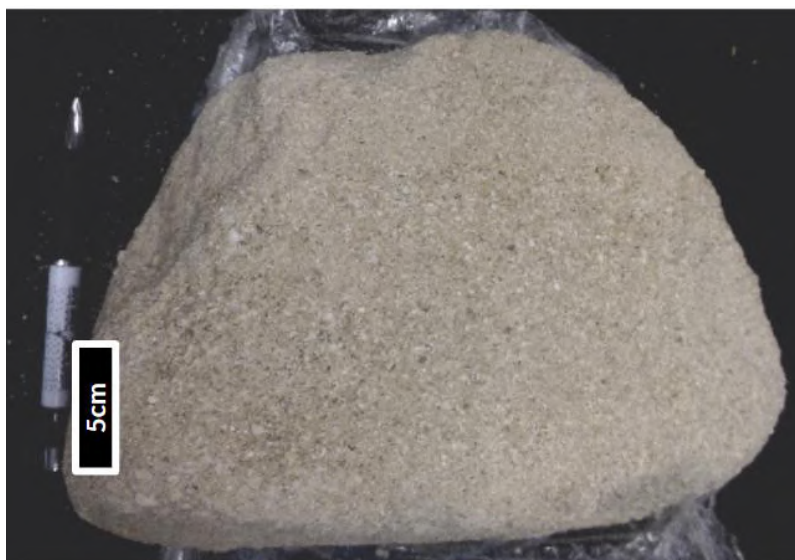


Figura 22 - Foto do bloco de arenito não deformado ND#3.

No bloco de rocha BD#1/2 (Figura 23) foi caracterizado um arenito de coloração acinzentada, de granulometria média, composto principalmente por quartzo, seguido de feldspado, muscovita e grãos líticos. É possível identificar a presença de estruturas do tipo bandas de deformação, previamente observadas por Maciel (2016). Essas estruturas aparecem orientadas verticalmente no bloco BD#1/2, em faixas delgadas de aproximadamente 1 cm de espessura e coloração cinza, que possuem uma granulometria bem menor do que o arcabouço da rocha analisada, e são mais compactadas. Estão associadas paralelamente a essas estruturas faixas avermelhadas de espessura fina, que são associadas à precipitação de óxido de ferro (Figura 23). A posição do bloco no afloramento indica as zonas nas quais são observadas diversas bandas de deformação, como *clusters* em padrão anastomosado que variam entre 30 e 60 cm de espessura, ao sul da falha F1.



Figura 23 - Foto do bloco de arenito deformado BD#1/2, destacando as faixas de cimentação por óxidos de ferro que acompanham estruturas do tipo bandas de deformação.

O bloco de rocha F1#3A (Figura 24) foi extraído nas imediações da falha F1, na porção do bloco alto de uma falha sintética à falha F1 (F1') (MACIEL, 2016), e inclui parte do plano dessa falha no qual foi identificada um feição do tipo *clay smear*. No bloco é possível observar o contato sub-horizontal entre duas camadas diferentes de arenitos. Na camada superior, foi caracterizado um arenito de granulometria grossa, com grânulos orientados em possível estratificação. Já a camada inferior, apresenta granulometria de areia média e estrutura primária menos evidente.



Figura 24 - Foto do bloco de arenito deformado F1#3A. Nota-se na porção direita do bloco uma maior densidade de estruturas rúpteis, em direção à posição onde está a falha F1.

Nessa amostra, é possível observar também uma maior densidade de estruturas rúpteis, de forma crescente em direção ao plano de falha F1 (Figura 24). Na faixa onde há maior incidência de pequenas falhas escalonadas, são observadas estruturas verticais anastomosadas identificadas como bandas de deformação. A coloração avermelhada, que destoa do padrão acinzentado dos arenitos investigados, caracteriza a presença de óxido de ferro nessa região onde há a concentração da deformação, o que corrobora para uma possível barragem do fluxo de fluidos em razão da influência dessas estruturas (*clay smear* e bandas de deformação).

## **7.2. Aspectos tomográficos**

As imagens tomográficas do bloco ND#1 foram interpretadas com o auxílio do *software AVIZO* (Figura 25). Nesse bloco se destacaram as características relacionadas ao processo de sedimentação da rocha, com a identificação de estruturas primárias do tipo estratificações cruzadas. É evidente, nesse bloco, o controle que o acamamento da rocha exerce na percolação de fluidos, pois são observadas faixas mais densas, destacadas pelas colorações mais claras, condicionadas pela orientação das estruturas primárias. Assim como observado no bloco de rocha, os materiais mais densos foram associados à cimentação por óxidos e hidróxidos de ferro.

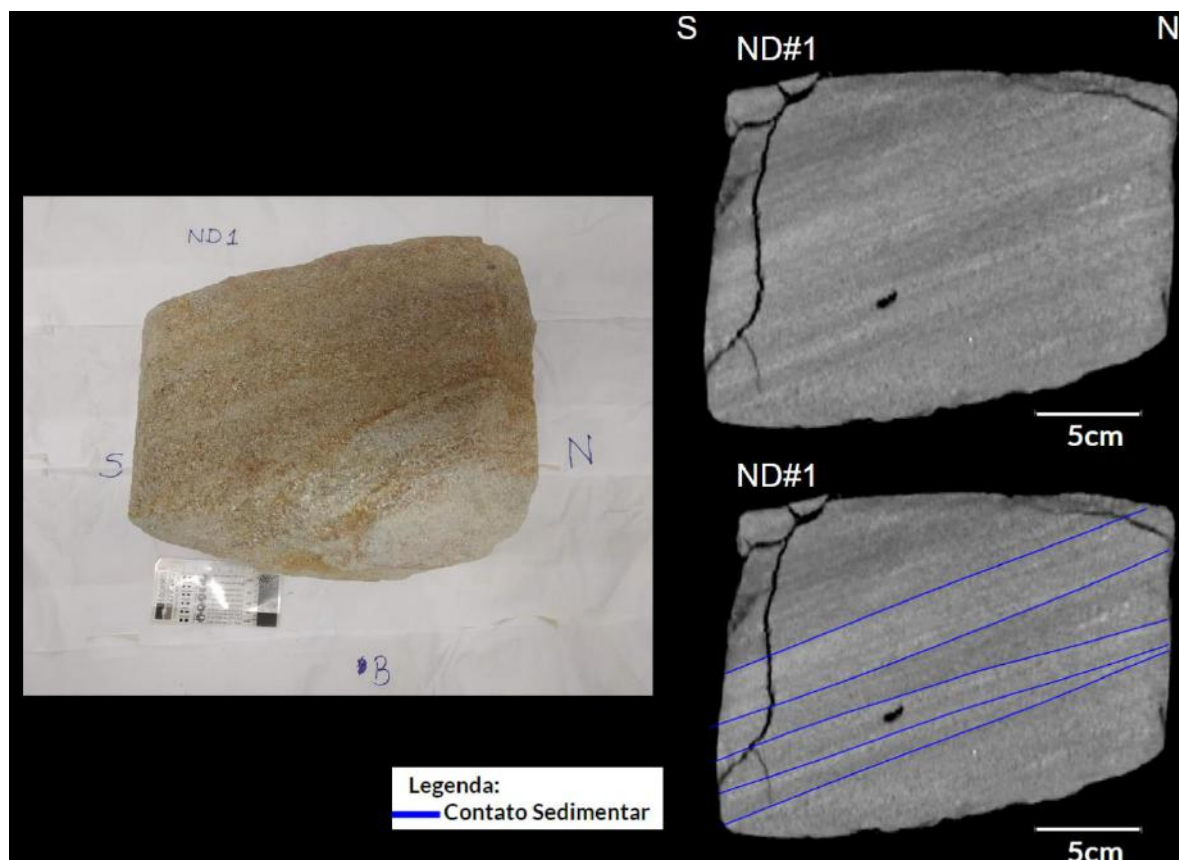


Figura 25 - Imagem tomográfica do bloco ND#1, na qual se destacam as estruturas primárias do tipo estratificações cruzadas.

Na análise das imagens tomográficas geradas pelo programa AVIZO para o bloco de arenito não deformado ND#3 (Figura 26), foi destacada a presença do acamamento sedimentar tabular, com contatos retilíneos, e a orientação dos grãos conforme a presença de estruturas primárias (estratificações cruzadas). Nessa amostra, foi possível observar a variação granulométrica entre as diferentes camadas, destacando a camada de coloração mais clara como mais densa, o que pode significar uma areia mais compacta e menos porosa quando comparada ao restante do bloco.

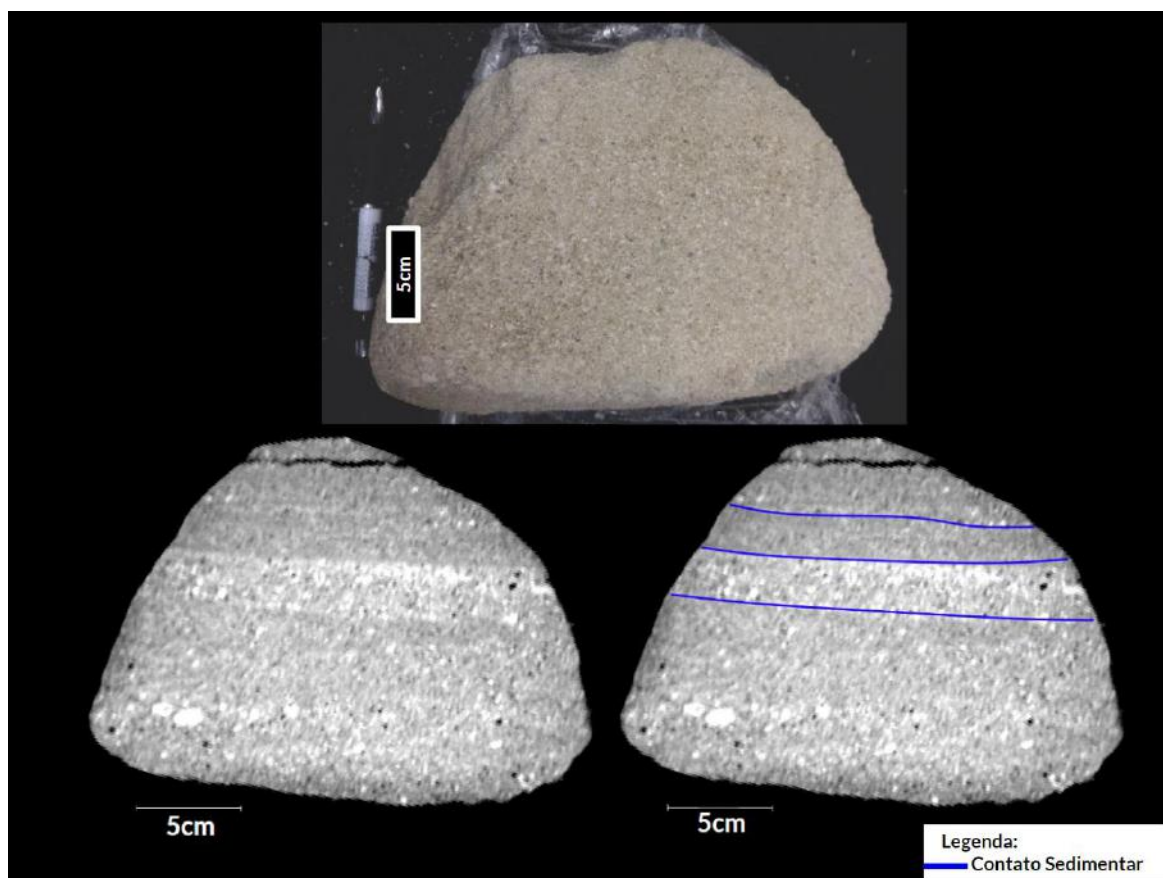


Figura 26 - Imagem tomográfica do bloco ND#3, na qual se destacam camadas horizontais associadas ao acamamento sedimentar.

Nas imagens tomográficas do bloco de arenito deformado BD#1/2 (Figura 27), foi possível observar o contraste na coloração em faixas verticalizadas, com faixas mais densas que foram interpretadas como estruturas do tipo bandas de deformação. A concentração da densidade do material nessas faixas pode estar associada ao controle que essas feições exercem na textura do material. Esse controle também está diretamente ligado à concentração de óxido de ferro (mineral mais denso) nas proximidades das bandas, pois essas atuam como “barreiras” para a percolação de fluidos que, quando estagnados paralelos às feições, precipitam o cimento (óxidos e hidróxidos de ferro), produzindo faixas avermelhadas.

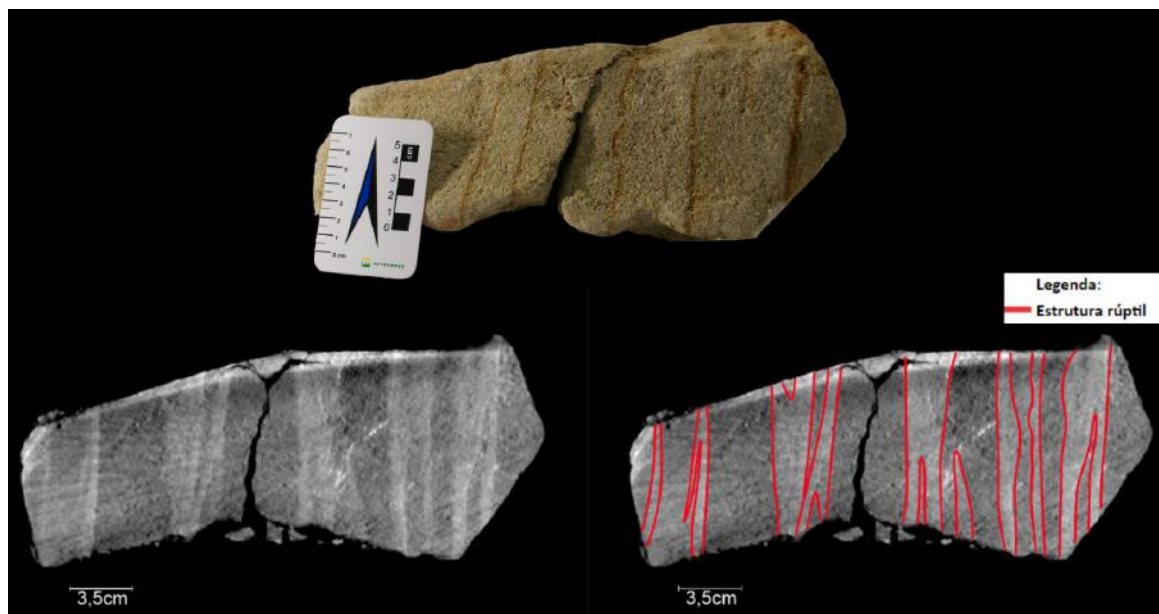


Figura 27 - Imagem tomográfica do bloco BD#1/2, na qual se destacam faixas verticalizadas que são associadas a feições do tipo bandas de deformação.

No bloco de arenito deformado F1#3A, foram interpretadas nas imagens tomográficas estruturas verticais que foram identificadas como bandas de deformação (Figura 28). A presença dessas estruturas é observada em maior concentração na porção do bloco que é mais próxima ao plano de falha F1, onde há o maior contraste de densidade no material. Já na região do bloco mais distante da falha, é observada menor incidência de estruturas, sugerindo que há maior concentração da deformação quanto mais próxima a zona falha. É possível também identificar o acamamento sedimentar com deslocamento vertical, indicando a presença de pequenas falhas normais no bloco.

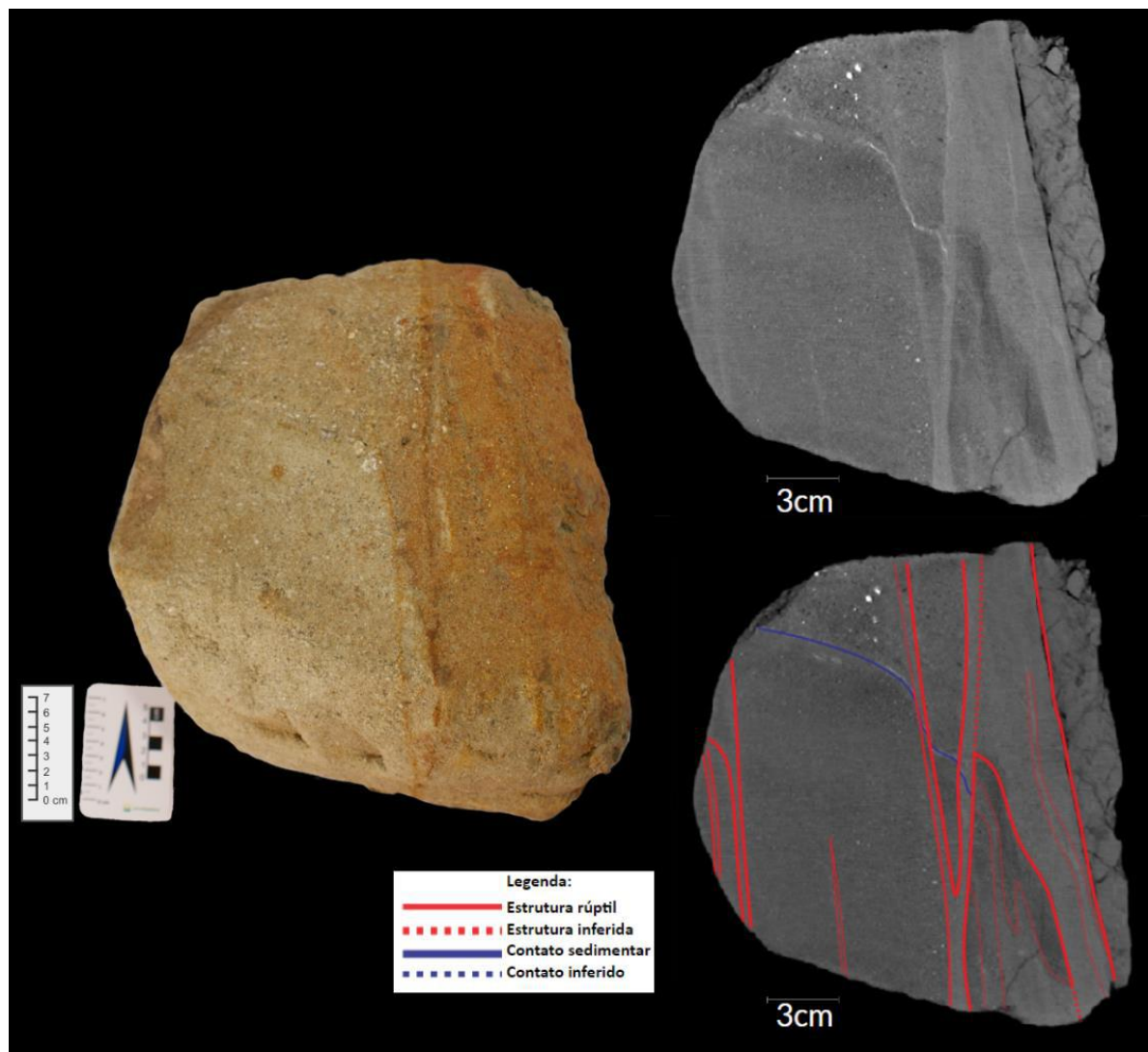


Figura 28 - Imagem tomográfica do bloco F1#3A, na qual se destacam faixas verticalizadas que são associadas a feições do tipo bandas de deformação. É possível observar o deslocamento do contato sedimentar, interpretado em azul, originado a partir de falhas menores que ocorrem em grande concentração na região do afloramento próxima à falha F1.

### 7.3. Aspectos microtomográficos

O estudo dos aspectos microtomográficos se baseou na análise das imagens de um *plug* de cada bloco de arenito deformado considerado (BD#1/2 P1 e F1#3A P1), extraídos dos blocos estudados por Vogel (2018) e selecionados após a análise das interpretações macroscópicas, com o auxílio do *software AVIZO* para uma melhor visualização do contraste de densidade dos materiais em cada amostra, e melhor compreensão da influência das feições de deformação rúptil nos arenitos. Assim como na tomografia, porém em escala de maior detalhe, esses resultados permitem a identificação da concentração de materiais mais densos e compactos nas áreas mais claras e nas regiões mais escuras das imagens é assinalada a presença de um material de maior porosidade.

Nas imagens do *plug* F1#3A-P1 (Figura 29), é possível observar uma faixa de concentração de grãos menores e porosidade em alinhamento vertical. Tal padrão é associado a uma feição do tipo banda de deformação.

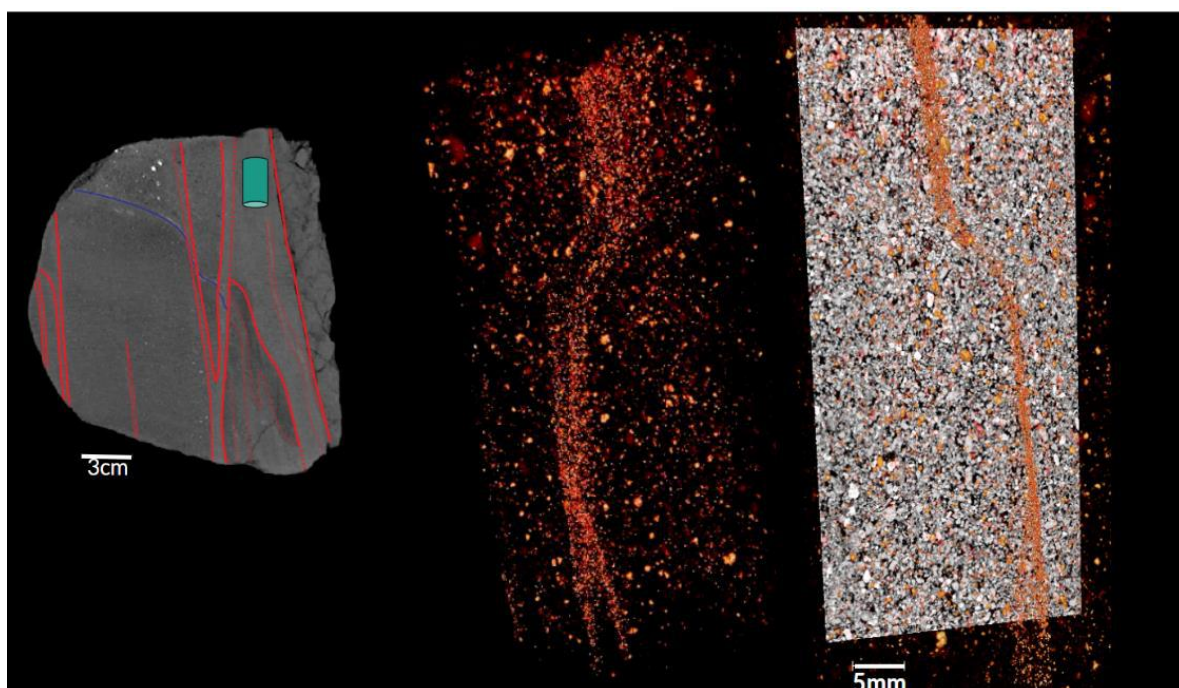


Figura 29 - Imagem microtomográfica do *plug* p1 do bloco de arenito deformado F1#3A. É possível observar na faixa destacada pela coloração laranja uma zona de concentração de grãos menores e da porosidade em alinhamento vertical.



A análise do *plug* BD#1/2-P1 (Figura 30) caracteriza a concentração da deformação nas regiões mais claras, e essas feições são interpretadas como bandas de deformação cataclásticas. Nessas feições é possível observar a concentração de material mais denso e compacto, assim como uma maior orientação dos grãos na vertical. É possível correlacionar a posição das feições de deformação na microtomografia com a posição do *plug* na tomografia.

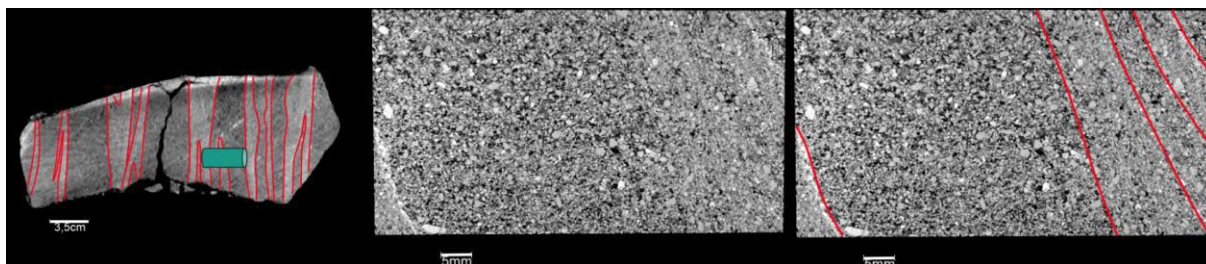


Figura 30 - Imagem microtomográfica do *plug* p1 do bloco de arenito deformado BD#1/2. Destacam-se faixas verticais a subverticais que são associadas a feições do tipo bandas de deformação, com compactação dos grãos nessas regiões, assim como a redução da granulometria e remobilização de epimatriz (grãos de feldspatos alterados).

#### 7.4. Caracterização petrográfica

Após o estudo das imagens microtomográficas, foram analisadas as imagens de três lâminas petrográficas (mosaicos compostos por fotomicrografias com o aumento de 2,5x), sendo uma confeccionada a partir da capa de *plug* de uma amostra de arenito não deformado (capa do *plug* P1 do bloco ND#3) e duas confeccionadas a partir das capas de *plugs* de arenitos deformados (BD#1/2 P1 e F1#3A P1).

O objetivo foi caracterizar as faixas de variação na deformação nas amostras de arenitos deformados, quantificando e caracterizando aspectos texturais dentro de cada uma das faixas de deformação reconhecidas, e comparar esses resultados com os de uma amostra de arenito não deformado (ND#3).

A análise também incluiu a comparação com os dados obtidos por Rotava (2017), que caracterizou o valor médio dos atributos texturais nas mesmas lâminas.

#### 7.4.1. ANÁLISE DOS ASPECTOS TEXTURAIS (CIMENTO, MATRIZ, PORO, GRÃOS)

A lâmina ND#3 (Figura 31) é composta por arenito grosso a muito grosso, que apresenta alinhamentos de grãos associados a estruturas sedimentares primárias (estratificações cruzadas), segundo a dinâmica do sistema fluvial entrelaçado da Formação Resende. Os grãos variam de angulosos a subangulosos e sua circularidade é predominantemente baixa. Sua composição é de quartzo, e destaca-se a alteração de grãos de feldspatos, produzindo matriz e porosidade móldica. É observada a presença de uma matriz argilosa (epimatriz) contornando os grãos.

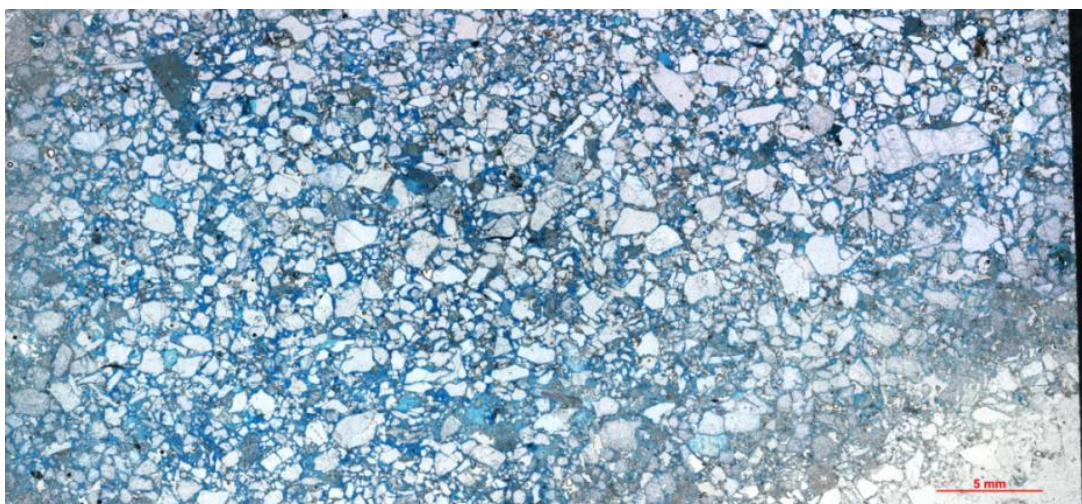


Figura 31 - Imagem da lâmina utilizada no estudo petrográfico da amostra ND#3.

Os aspectos texturais calculados com o método Gazzi-Dickinson (DICKINSON, 1970), para a amostra ND#3 demonstram que os arenitos não deformados apresentam baixas porcentagens de matriz e cimento (Tabela 3), o que caracteriza o aspecto textural de uma rocha sem influência de deformação rúptil para o estudo desse afloramento. A lâmina analisada é composta por 7% de matriz (principalmente secundária) e 6% de cimento (óxido de ferro). A porosidade encontrada na amostra foi calculada em 22%, e os outros 65% são compostos pelos grãos do arcabouço da rocha.

*Tabela 3 - Aspectos texturais reconhecidos na amostra ND#3, com as porcentagens de arcabouço, matriz, cimento e poro.*

	<b>ND3</b>
Arcabouço	65,0%
Matriz	7,0%
Cimento	6,0%
Poro	22,0%

Para a amostra de arenito deformado BD#1/2, foram inicialmente interpretadas sete faixas milimétricas verticais a subverticais (Figura 32), com base nas diferenças texturais observadas, que representam a maior ou menor concentração da deformação rúptil na rocha. Após a individualização dessas faixas, foram quantificados os aspectos texturais conforme a metodologia aplicada, que resultaram no gráfico do percentual desses aspectos em cada uma das faixas (Figura 32). Nas faixas mais deformadas, foi identificada a menor granulometria dos grãos do arcabouço, com maior concentração de matriz e menor porosidade. Essas regiões de menor porosidade podem apresentar, associadas lateralmente a elas, faixas de concentração de cimento (óxidos de ferro).

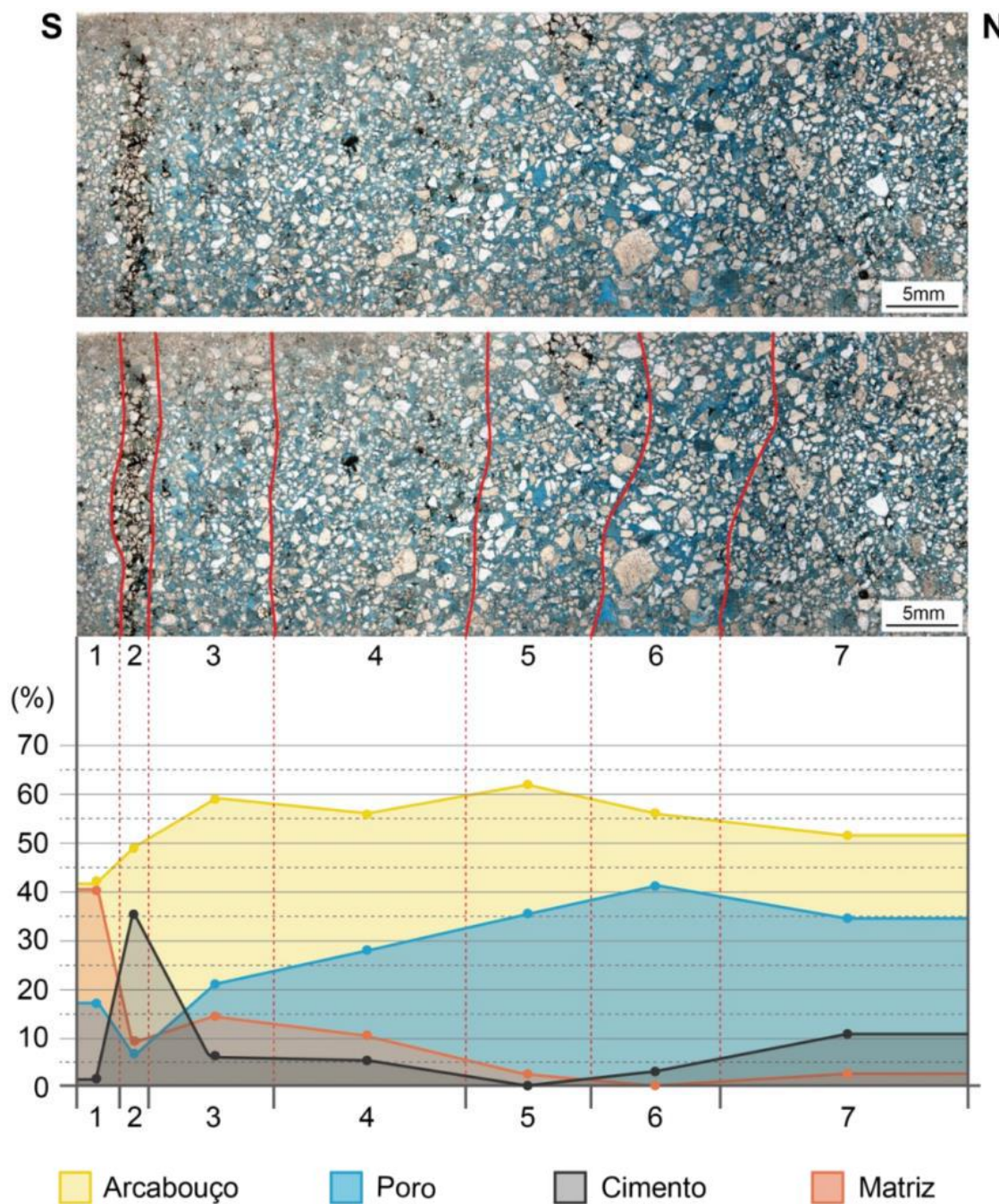


Figura 32 - Lâmina BD#1/2, com a interpretação de faixas milimétricas (1 a 7) com diferentes características texturais e gráfico percentual dos elementos texturais (arcabouço, poro, cimento e matriz) reconhecidos em cada faixa, quantificados através do método da contagem de pontos (figura elaborada por Bernardo Oliveira Fiuza a partir dos dados obtidos no presente estudo).

É possível observar que nas faixas 1 e 2 há maior presença de matriz e cimento, respectivamente. Ambas as faixas apresentam uma redução na porosidade da rocha, quando comparadas às demais porções da lâmina, sendo a perda de porosidade na faixa 1 associada à maior presença de matriz e empacotamento dos grãos, e na faixa 2 associada à alta porcentagem de cimento (Figura 33a).

A redução da granulometria da faixa 1 é associada ao processo de catáclase da rocha, na qual há redução dos grãos de quartzo. Nota-se uma remobilização e empacotamento dos grãos alterados de feldspato (epimatriz), e um empacotamento dos grãos que pode estar associado à compactação da rocha. Essa faixa é verificada como a mais deformada da lâmina. A concentração de cimento na faixa 2 associa-se à precipitação de óxidos a partir de fluidos meteóricos, que teriam sido barrados pela baixa permeabilidade da faixa 1, o que condiz com seus aspectos texturais, que possuem maior quantidade de matriz e maior redução dos poros (Figura 33a).

Nas faixas seguintes (3-7), os padrões de proporção entre os aspectos matriz, poro, cimento e arcabouço são mais homogêneos e não sofrem muitas alterações. Além disso, esses padrões se aproximam dos valores previamente estudados para a amostra não deformada ND#3, com a porosidade de no mínimo 22%, destacando-se na faixa número 6 uma maior porosidade em consequência da redução da quantidade de grãos e empacotamento dos grãos mais aberto (Figura 33c).

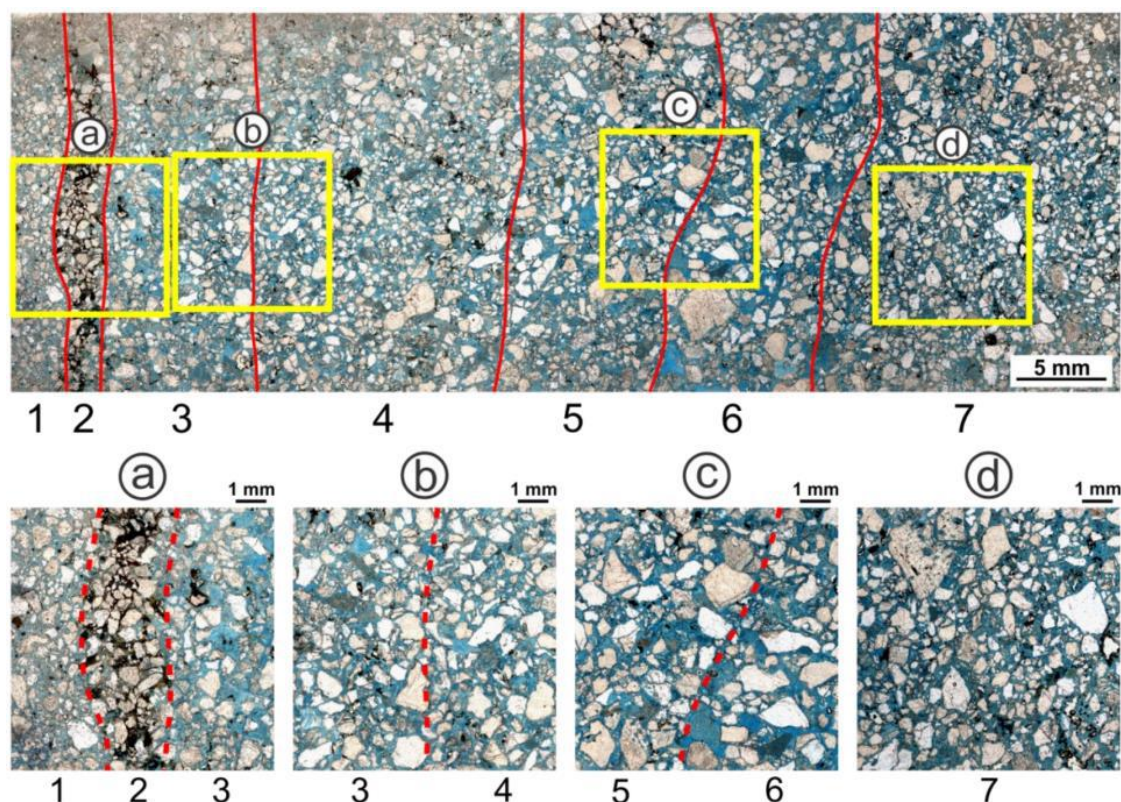


Figura 33 - (a-d) Recortes, em detalhe, de regiões da lâmina BD#1/2, ilustrando diferentes características texturais nas faixas interpretadas. (a) Destaca-se a maior quantidade de matriz na faixa 1 e de cimento (óxidos e hidróxidos de ferro) na faixa 2. (b-c) Observa-se um aumento da porosidade e da granulometria dos grãos do arcabouço da faixa 3 à faixa 6, além de um empacotamento cada vez mais aberto. (d) Notar, na faixa 7, a redução da granulometria e da porosidade em relação à faixa 6 (figura elaborada por Bernardo Oliveira Fiuza a partir dos dados obtidos no presente estudo).

Na análise da lâmina F1#3A foram interpretadas dez faixas milimétricas, conforme a diferença em suas texturas (Figura 34). Assim como na amostra BD#1/2, foram identificadas faixas de maior e menor concentração da deformação. Nesse caso, foram identificadas as faixas 4 e 9 como as mais deformadas, destacando-se a faixa 9 como a de maior concentração da deformação dútil. Nessa faixa, é possível observar aspectos antes já associados à deformação, como a concentração e remobilização de uma matriz secundária, originada a partir da alteração de grãos de feldspatos, assim como a redução da granulometria do arcabouço quartzoso e sua distribuição granulométrica mais homogênea pelo processo de cataclase, além do maior empacotamento dos grãos e matriz por compactação que influenciam na baixa porosidade da rocha nessa faixa. Essas características se tornam mais evidentes quando comparadas aos resultados das demais faixas menos deformadas.

Assim como na faixa 2 da amostra BD#1/2, há o preenchimento de espaços vazios (poros) por cimento de óxido de ferro nas faixas 8 e 10 (Figura 35a). Na faixa 8, a redução da porosidade está majoritariamente atrelada ao preenchimento do espaço por óxidos e hidróxidos de ferro, e na faixa 10 há um equilíbrio entre o preenchimento dos poros por cimento e matriz. Essa maior concentração de cimento nas faixas 8 e 10 é associada justamente à presença de uma feição do tipo bandas de deformação cataclástica, que possui a maior porcentagem de matriz, ou seja, a faixa mais deformada (faixa 9), que atua como barreira impermeabilizante da percolação do fluido meteórico.

O mesmo processo pode ser observado na faixa 4 (Figura 35b), só que em menor intensidade. Essa faixa apresenta características originadas a partir da cataclase do material, que resulta na redução da granulometria dos grãos de quartzo do arcabouço, porém não tanto quanto na faixa 9, e na compactação e remobilização da matriz formada pela alteração dos grãos de feldspato. Assim, a redução da porosidade nessa faixa influencia na cimentação nas faixas 3 e 5, tendo a menor permeabilidade da faixa 4 como condição para a precipitação de óxido de ferro nessas faixas adjacentes.

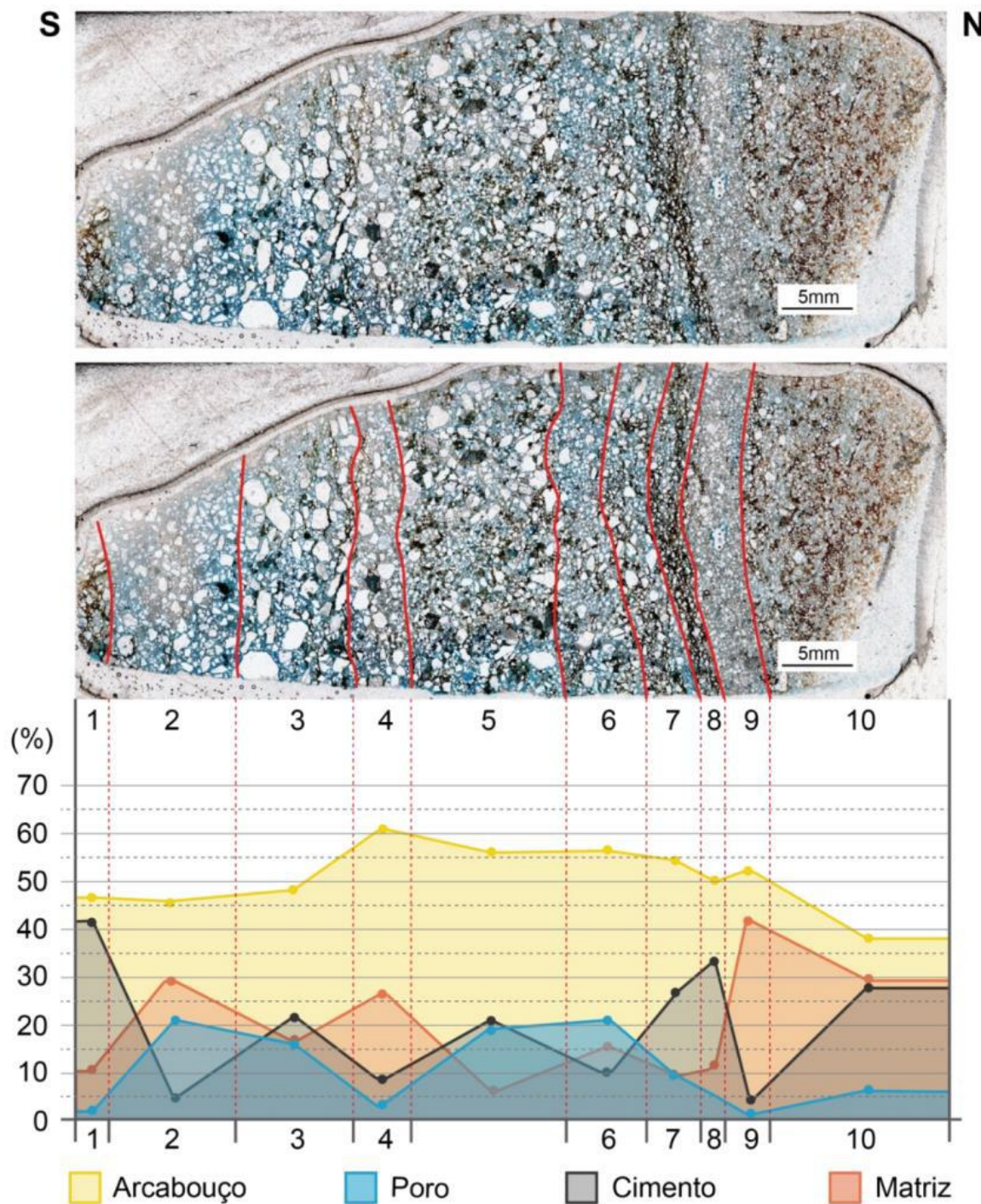


Figura 34 - Lâmina F1#3A, com a interpretação de faixas milimétricas (1 a 10) com diferentes características texturais e gráfico percentual dos elementos texturais (arcabouço, poro, cimento e matriz) reconhecidos em cada faixa, quantificados através do método da contagem de pontos (figura elaborada por Bernardo Oliveira Fiuza a partir dos dados obtidos no presente estudo).

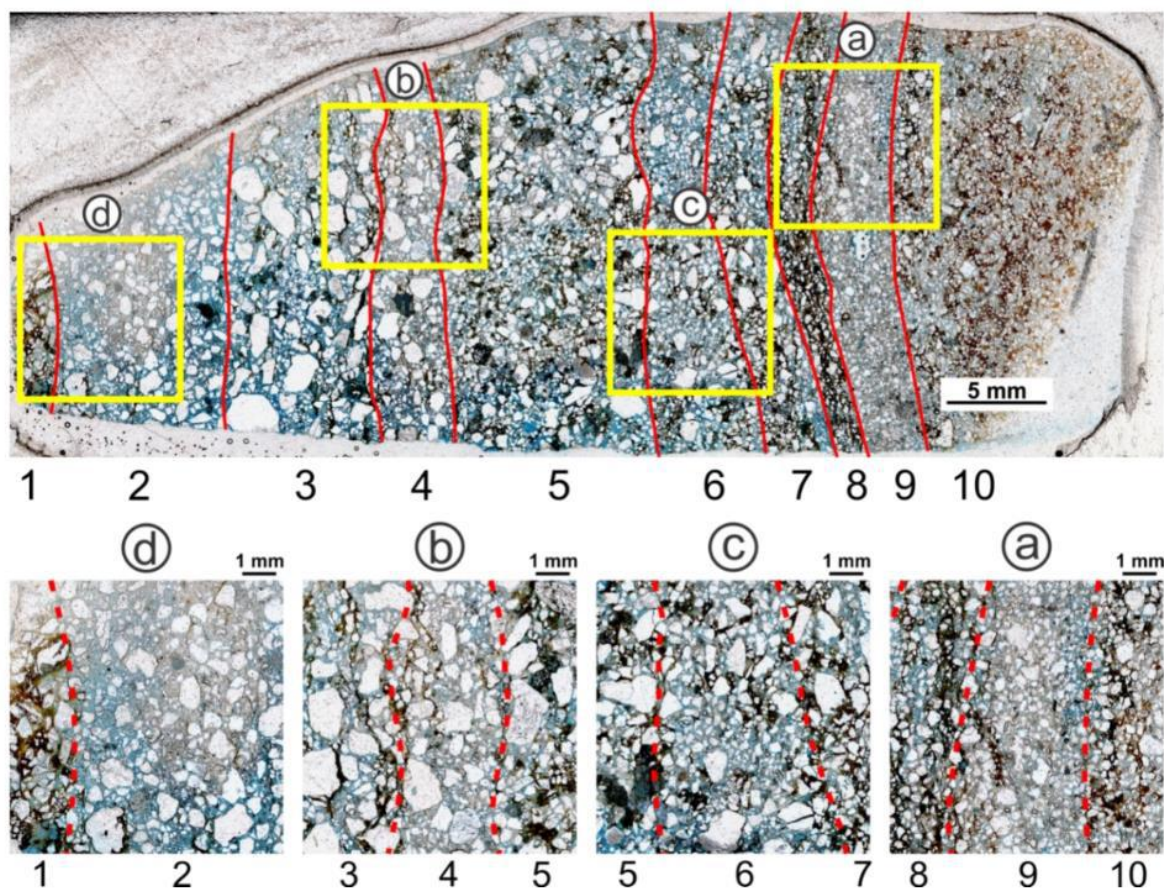


Figura 35 - (a-d) Recortes, em detalhe, de regiões da lâmina F1#3A, ilustrando diferentes características texturais nas faixas interpretadas. (a) Destaque para a granulometria significativamente menor dos grãos do arcabouço nas faixas 8, 9 e 10 do que no restante da lâmina. A faixa 9 apresenta maior quantidade de matriz, estando acompanhada por faixas com concentração de cimento de óxidos e hidróxidos de ferro (faixas 8 e 10). (b) Observa-se uma concentração de matriz na faixa 4 e faixas adjacentes com concentração de cimento (faixas 3 e 5). (c) Há indícios de fragmentação dos grãos do arcabouço nas faixas 5, 6 e 7, sinalizada pela presença significativa de grãos de menor granulometria; apesar disso, o empacotamento é mais aberto, a porosidade é mais elevada e a quantidade de matriz é menor do que as faixas de concentração de deformação. (d) Nota-se que a faixa 2 apresenta uma quantidade de matriz relativamente alta, estando acompanhada por uma faixa com concentração de cimento (faixa 1); a porosidade, entretanto, é mais elevada e o empacotamento mais aberto na faixa 2 do que nas faixas de maior deformação (figura elaborada por Bernardo Oliveira Fiuza a partir dos dados obtidos por mim).

As análises das lâminas BD#1/2 e F1#3A corroboram para a compreensão do comportamento da deformação rúptil nos arenitos pouco consolidados da Formação Resende. Destaca-se a escala da deformação, que é de caráter milimétrico, e sua influência nos aspectos texturais da rocha.

Nos resultados obtidos foi possível observar o comportamento dessas estruturas, definidas na literatura como bandas de deformação cataclásticas (FOSSEN *et al.*, 2007), atuando no controle dos aspectos texturais, com a redução da granulometria do arcabouço da rocha podendo torná-lo mais homogêneo através



do processo de catáclase, conforme observado nas faixas mais deformadas de cada amostra (faixa 1 da lâmina BD#1/2 e faixa 9 da lâmina F1#3A), assim como no realinhamento e esmagamento da matriz, que é produto da alteração dos grãos de feldspato da rocha, e no empacotamento das porções onde há a concentração da deformação, o que gera compactação. Essas características são as principais influências na redução da porosidade e permeabilidade da rocha.

Ao considerar que a deformação ocorre em escala milimétrica, foram calculadas para as lâminas deformadas a média dos aspectos texturais verificados (Tabela 4). A partir desse dado, foi possível identificar que o comportamento dos aspectos da amostra BD#1/2 se aproxima muito mais aos aspectos texturais de um arenito não deformado (ND#3), do que aos de um arenito com influência de maior deformação (F1#3A). Isso já havia sido observado por Rotava (2017), que calculou para as mesmas lâminas deformadas os aspectos texturais (Tabela 1). Nos dados de Rotava (2017), a porosidade e a quantidade de matriz dos arenitos deformados BD#1/2\_AP1 e BD#1/2\_BP1 estão mais próximas aos valores de arenitos não deformados do que aos valores de arenitos deformados próximos à zona de falha F1. Com a análise individualizada em faixas milimétricas de deformação, foi possível atribuir que esse resultado não é representativo da deformação, visto que em uma mesma lâmina podem aparecer faixas de baixíssima porosidade preenchidas por cimento e matriz, como as faixas 1 e 2 da lâmina BD#1/2, e faixas de porosidades mais altas, como a faixa 6 da lâmina BD#1/2. Logo, é possível estimar que, ao se calcular a média desses aspectos para uma lâmina inteira, o dado que caracteriza a textura da deformação é perdido, mesmo ela estando presente.

*Tabela 4 - Aspectos texturais da lâmina ND#3 e média dos aspectos texturais das lâminas BD#1/2 e F1#3A.*

		Média	
	<b>ND3</b>	<b>BD#2</b>	<b>F1#3A</b>
Arcabouço	65,0%	57,1%	55,0%
Matriz	7,0%	10,3%	13,9%
Cimento	6,0%	9,5%	18,2%
Porosidade	22,0%	23,0%	12,9%

Outro fator que merece destaque no impacto da deformação no controle desses aspectos é a localização da amostra. Análises feitas em amostras retiradas de zonas com a maior incidência de estruturas rúpteis irão apresentar maior alteração nos aspectos texturais, como observado na amostra F1#3A, que foi coletada nos intermédios da falha F1, e a interpretação da lâmina foi caracterizada pela divisão em maior quantidade de faixas verticais ou subverticais do que a amostra BD#1/2, tendo assim maior incidência de estruturas do tipo bandas de deformação.

### **7.5. Análise granulométrica**

Associada à caracterização petrográfica, a mesma metodologia foi utilizada para quantificar a granulometria em cada uma das imagens das três lâminas petrográficas analisadas, estabelecendo histogramas de distribuição granulométrica e suas possíveis interpretações. Esses histogramas também foram comparados aos dados do estudo de Galvão (2018) em arenitos de uma mesma camada do afloramento estudado, que foram reinterpretados em histogramas para a comparação direta com os dados obtidos na análise das lâminas petrográficas consideradas.

#### **7.5.1. ANÁLISE EM LÂMINA PETROGRÁFICA**

Para a amostra de rocha não deformada (ND#3), foi verificado que os arenitos são de granulometria predominantemente grossa a muito grossa (Figura 36). O histograma gerado para essa amostra foi definido no presente estudo como o padrão normal para uma amostra de um arenito fluvial, que foi estabelecido como uma distribuição de grãos com padrão simétrico a partir da moda.

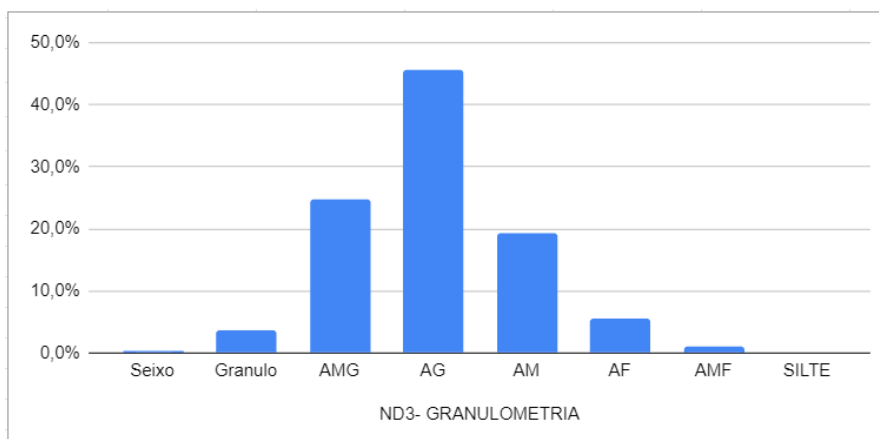


Figura 36 - Histograma com a distribuição granulométrica na lâmina petrográfica ND#3.

A distribuição granulométrica da amostra BD#1/2, analisada também individualmente em cada faixa (Figura 37), demonstra que as regiões tidas como mais deformada (faixas 1 e 2) são as que possuem os histogramas mais heterogêneos e com a distribuição mais distante do padrão assumido como normal. É possível observar que, conforme há o afastamento dessa região, a distribuição da granulometria nas faixas mais distantes passa a ser mais coerente com a distribuição do padrão normal para uma amostra de arenito não deformado, como na lâmina ND#3 (Figura 36).

Na faixa 1 da amostra BD#1/2 (Figura 37), interpretada como a mais deformada na análise dos aspectos texturais em petrografia, nota-se a menor presença de grãos de areia grossa e muito grossa, associada ao aumento na quantidade de grãos de areia média e muito fina. Esse padrão é relacionado ao processo de catáclase dos grãos de quartzo da rocha.

Nas faixas 3 a 6, há a predominância de grãos de areia grossa e média, com uma distribuição menos heterogênea.

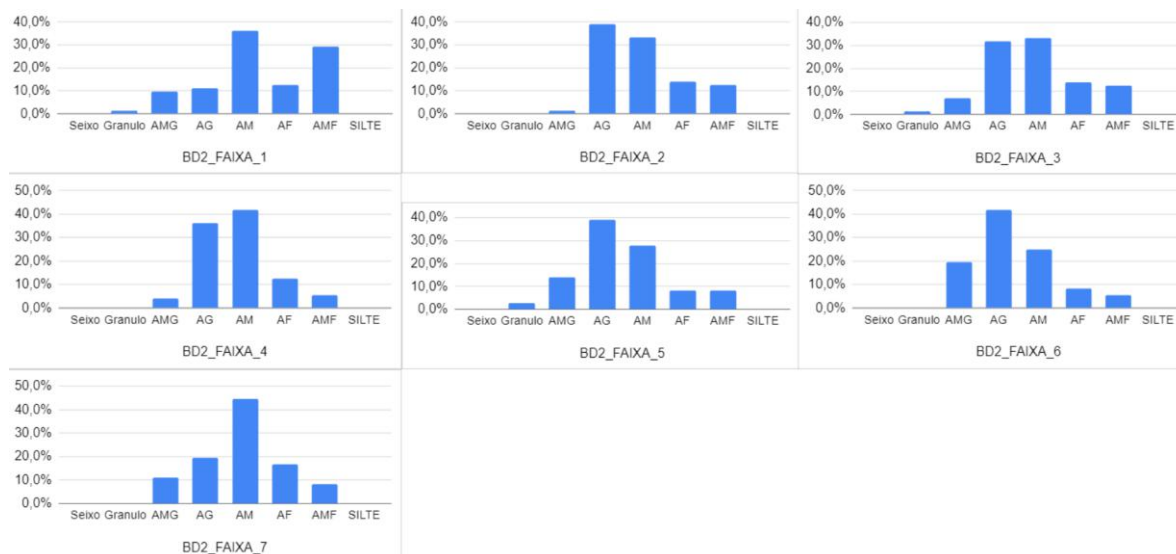


Figura 37 -- Histograma com a distribuição granulométrica na lâmina petrográfica BD#1/2 por faixa interpretada (faixas 1 a 7).

Ao comparar o histograma da amostra de arenito não deformado (ND#3) e o histograma referente à faixa mais distante da zona de maior deformação da lâmina BD#1/2 (faixa 7), é possível observar que o comportamento do gráfico em ambas as amostras é similar, o que resultaria em ambos estarem muito próximos de um padrão de distribuição granulométrica de rocha não deformada. Porém a distribuição granulométrica observada na faixa 7 também pode ser atribuída à influência da deformação, tendo a catáclase reduzindo a moda de areia grossa para areia média.

Na amostra F1#3A, a granulometria da lâmina foi caracterizada nas faixas 2 a 10, pois não foi possível contabilizar, para essa análise, grãos em quantidade suficiente na faixa 1 devido à limitação da confecção da lâmina. Cada uma das nove faixas analisadas apresenta padrões não homogêneos (Figura 38) e com maior presença de finos, principalmente a partir da faixa 7, a partir da qual os grãos de areia fina, muito fina e silte são mais representativos quando comparado às faixas 2 a 6, que possuem maior participação dos grãos de areia grossa a muito grossa. Isso difere da amostra BD#1/2, em que foi possível observar nas regiões menos deformadas o padrão normal de distribuição granulométrica de arenitos fluviais.

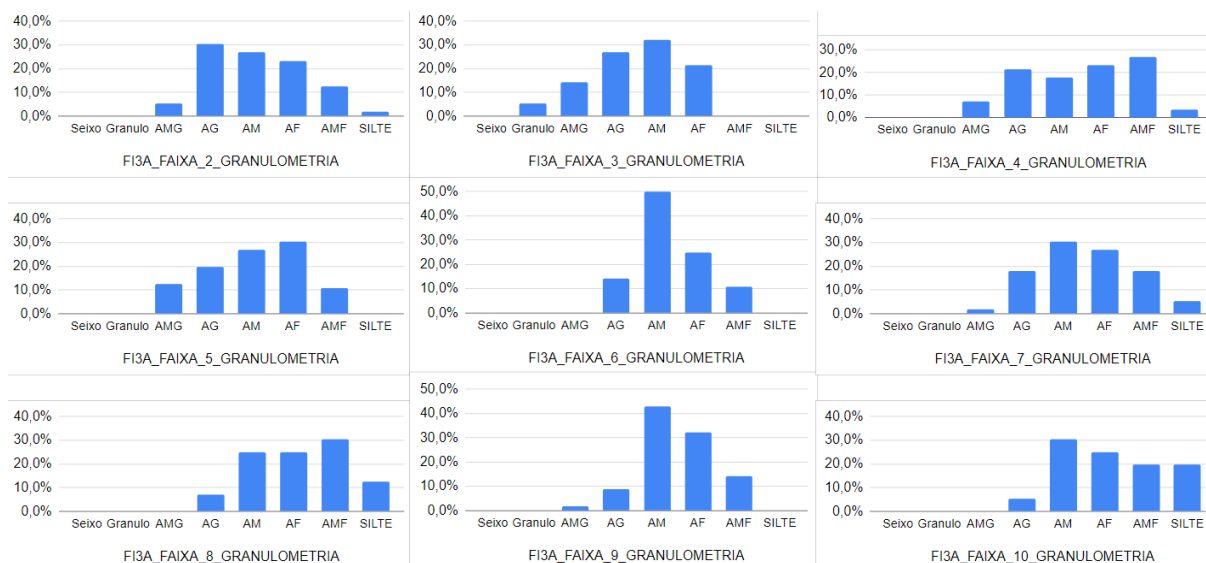


Figura 38 - Histograma com a distribuição granulométrica na lâmina F1#3A por faixa interpretada (faixas 2 a 10).

É possível identificar a diminuição da granulometria dos histogramas principalmente a partir da faixa 6, apresentando redução nos grãos de areia muito grossa que estão presentes nas faixas de 2 a 5, concomitantemente com a predominância de grãos de areia média. As faixas 7 a 10 mantêm o padrão de redução da granulometria, destacando-se a presença de maior quantidade de areia fina na faixa de número 9, faixa interpretada como a mais deformada de acordo com a análise dos aspectos texturais em petrografia.

#### 7.5.2. ANÁLISE A PARTIR DOS DADOS DE GALVÃO (2018)

A análise dos dados de Galvão (2018), reinterpretados em histogramas (Figura 39), demonstra para o bloco ao sul da falha F1 (bloco alto da falha F1) um padrão de distribuição granulométrica próximo ao normal para arenitos fluviais, no qual a granulometria predominantemente observada na maioria das amostras é de areia grossa, podendo ocasionalmente apresentar proporção igual ou predominante de areia média - amostras BA-3(A) e BA-6(A).

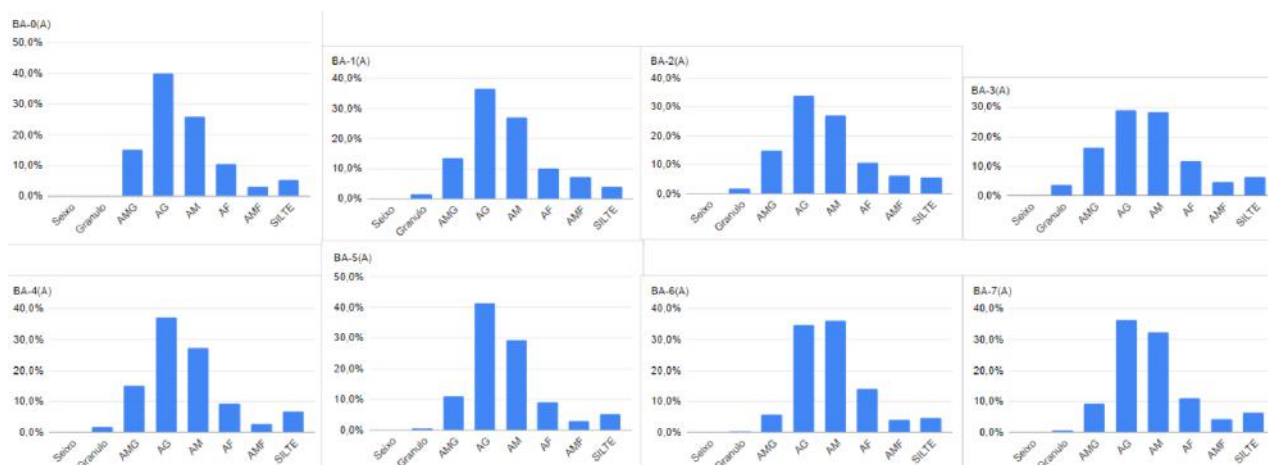


Figura 39 - Histogramas com a distribuição granulométrica de uma camada de arenito no bloco alto da falha F1 a partir dos dados de Galvão (2018).

Já nas amostras do bloco abatido é possível observar a concentração da moda no tamanho areia média (Figura 40), com exceção apenas da amostra BB-0(A), ressaltando então a diminuição da granulometria predominante quando comparados os resultados das análises do bloco abatido em relação ao bloco soerguido.

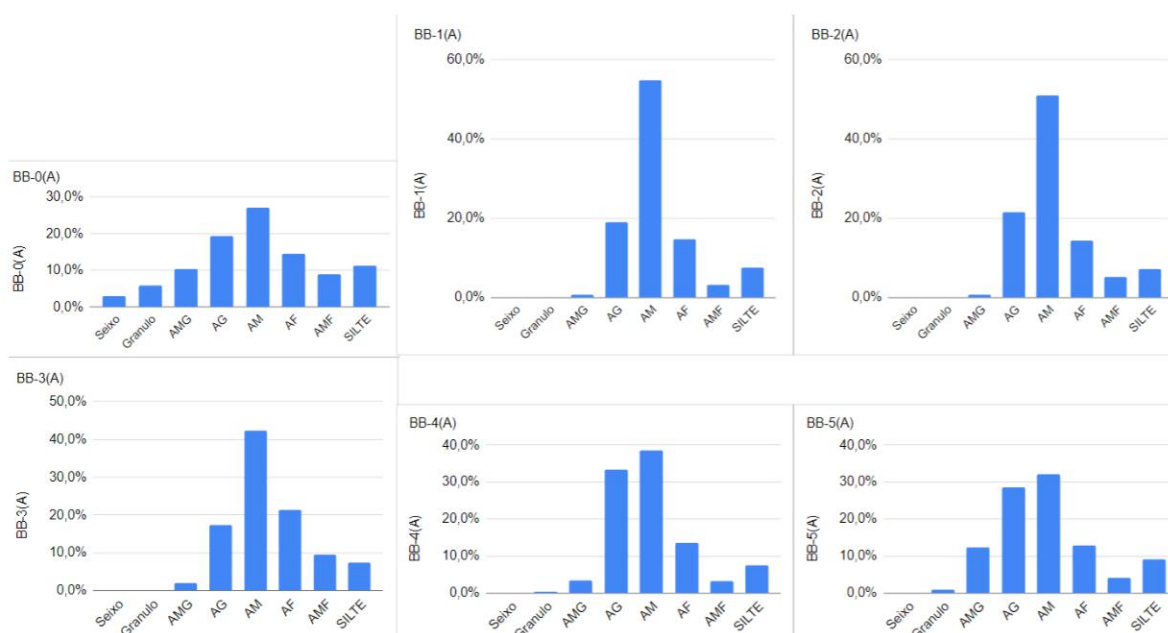


Figura 40 - Histogramas com a distribuição granulométrica de uma camada de arenito no bloco baixo da falha F1 a partir dos dados de Galvão (2018).

A influência da deformação na granulometria da rocha pode ser também observada na análise dos dados de Galvão (2018). Tendo em vista que o estudo foi realizado em uma mesma camada, é possível observar a diminuição da granulometria entre o bloco soerguido e o bloco abatido como resultado da deformação rúptil, que afeta principalmente o bloco ao norte da falha F1 (bloco baixo da falha F1). Interpreta-se que os grãos, que são predominantemente de areia grossa no bloco alto, foram fraturados até o tamanho areia média no bloco baixo, pelo processo de catáclase. Assim, associa-se a redução da granulometria da rocha ao maior impacto da deformação rúptil no bloco abatido.

Ficam estabelecidos a partir das distribuições granulométricas observadas os seguintes aspectos: a deformação atua na redução da moda; as amostras mais deformadas geralmente apresentam um padrão de distribuição mais heterogêneo, com presença de material mais fino, o que é condizente com o fraturamento dos grãos pelo mecanismo de catáclase; algumas amostras deformadas podem apresentar o padrão de distribuição da granulometria homogêneo (faixa 7 da lâmina BD#1/2), associado nesse trabalho às amostras não deformadas, porém, quando esse padrão está associado à redução da moda, a faixa também pode ser associada a uma banda de deformação cataclástica.

#### **7.6. Quantificação dos aspectos de porosidade x permeabilidade**

Na análise da quantificação dos aspectos de porosidade e permeabilidade, foram utilizados os dados calculados a partir dos ensaios petrofísicos dos 13 *plugs* extraídos dos quatro blocos de rocha considerados (ND#1, ND#3, F1#3A e BD#1/2). Além disso, foi feito o cálculo da porosidade nos dois *plugs* de arenitos deformados (F1#3A-P1 e BD#1/2-P1) com a ferramenta de cálculo de volume do *software AVIZO* e em dois *slices*, um de cada um desses dois *plugs*, com o auxílio do *software Fiji: imageJ*. Os resultados possibilitaram a separação dos diferentes *plugs* analisados em três grupos distintos, que são diretamente condicionados pelo controle exercido pelas estruturas rúpteis nas características permoporosas desses arenitos pouco consolidados.

### 7.6.1. DADOS OBTIDOS EM PERMOPOROSÍMETRO

Os dados obtidos através dos ensaios de porosidade e permeabilidade a gás, realizados sob uma pressão de confinamento de 2.000 psi, foram utilizados para a construção de um gráfico de correlação entre os valores de porosidade e permeabilidade absoluta (Figura 41). A partir da análise de cada um dos *plugs*, foi possível identificar três grupos de diferentes características conforme a correlação desses dois aspectos.

O Grupo 1 engloba amostras com valores mais altos de porosidade e permeabilidade, relacionando-se aos quatro *plugs* de rochas não deformadas (ND#1 e ND#3). Nas análises macroscópicas dos blocos desses *plugs* foi observado que a textura original do arenito é preservada.

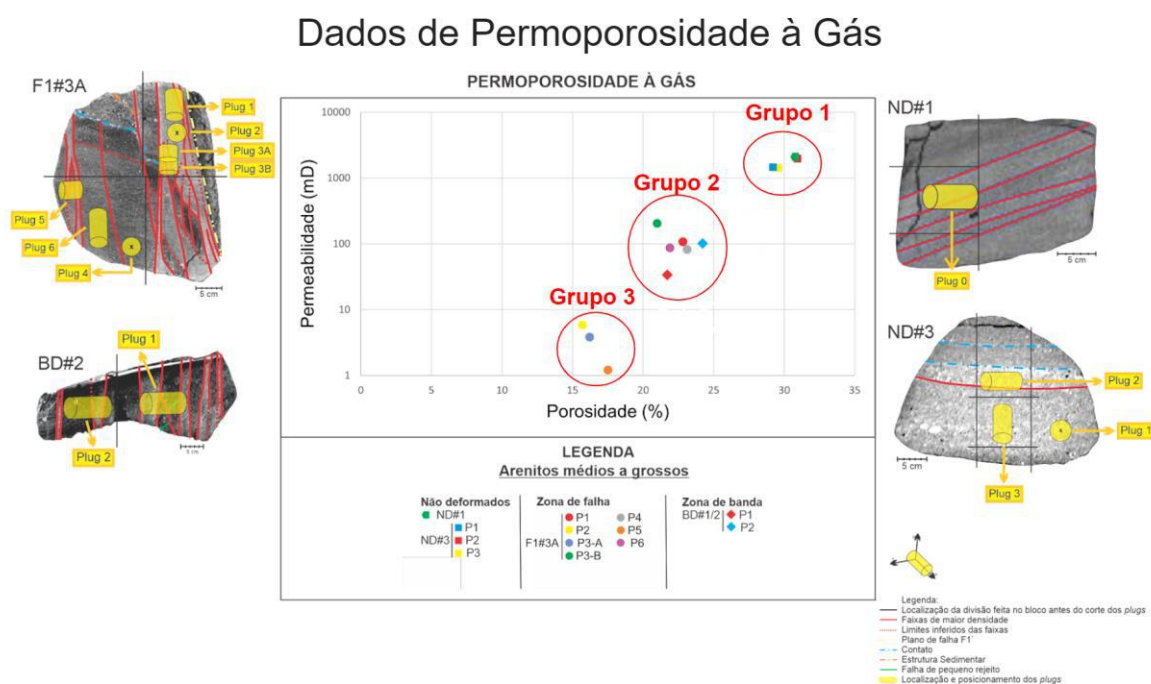


Figura 41 - Gráfico de correlação entre os valores de permeabilidade absoluta (em escala logarítmica), em relação aos valores de porosidade. Fonte: relatório final do projeto "Caracterização da Deformação e de Propriedades Mecânicas e Permoporositas de Arenitos Pouco Consolidados".

O Grupo 2 apresenta valores intermediários de porosidade e de permeabilidade, englobando amostras deformadas de diferentes blocos (F1#3A: P1, P3-B, P4, P6; e BD#1/2 P1 e P2). Na análise microscópica dessas amostras, foi possível associar a redução da porosidade e da permeabilidade à maior presença de matriz e cimento nos poros da rocha.



O Grupo 3 engloba os *plugs* P2, P3-A e P5 do bloco F1#A e é caracterizado pelos menores valores de porosidade e permeabilidade. Os aspectos microtomográficos permitem atribuir a variação dos valores de permoporosidade à maior fragmentação do arcabouço e ao aumento da quantidade de matriz, com a consequente redução da porosidade e da permeabilidade da rocha. Essas são as amostras que apresentam maior incidência de estruturas do tipo bandas de deformação e, conseqüentemente, são tidas como as mais deformadas.

O bloco F1#3A é o único que apresenta amostras que constituem dois dos grupos assinalados (grupos 2 e 3). Para compreender melhor o comportamento de cada *plug*, se fez necessária a análise das imagens tomográficas de cada um dos nove *plugs* de Vogel (2018). Nessa análise é possível identificar que nos *plugs* que fazem parte do Grupo 2 (grupo com porosidade e permeabilidade intermediária) é verificada uma menor concentração de estruturas verticalizadas do tipo bandas de deformação. Nas imagens desses *plugs* é possível observar a maior presença de coloração escura, que é traduzida como porosidade do material. Já nos *plugs* que integram o Grupo 3 (P2, P3-A e P5) há maior concentração de regiões claras nas imagens microtomográficas. Essa concentração é associada ao preenchimento dos espaços vazios por realinhamento da matriz, condicionada pela deformação rúptil, assim como a maior compactação dessas amostras. A diferença observada entre esses *plugs* é diretamente associada à heterogeneidade desse bloco, que apresenta regiões com concentração da deformação e regiões com aspectos mais porosos e permeáveis.

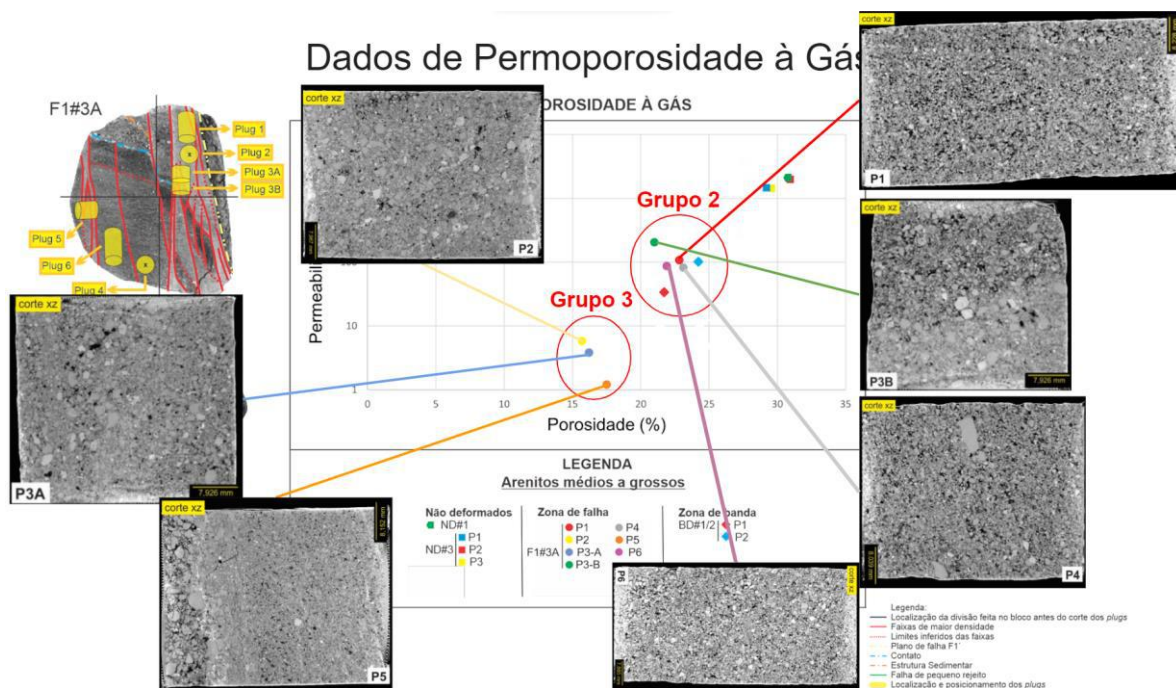


Figura 42 - Imagens microtomográficas dos plugs da amostra F1#3A, a partir de Vogel (2018), sobrepostas ao grupos 2 e 3 identificados no gráfico de correlação entre os valores de permeabilidade absoluta (em escala logarítmica) e porosidade.

### 7.6.2. POROSIDADE CALCULADA NOS SOFTWARES AVIZO e Fiji: imageJ

A partir dos dados de microtomografia também foi feita a quantificação da porosidade de dois *plugs* de amostra de arenito deformado (BD#1/2 e F1#3A). Esses resultados foram comparados aos dados obtidos no cálculo da porosidade total das lâminas, anteriormente caracterizadas, e aos resultados da porosidade efetiva obtida a partir dos ensaios de petrofísica básica (Tabela 5). Com o objetivo de comparar os distintos métodos aos dados de uma rocha não deformada, também foram incluídos os dados calculados para a lâmina ND#3 e sua porosidade efetiva.

Tabela 5 - Porosidades calculadas nas amostras ND#3, BD#1/2 e F1#3A conforme as respectivas metodologias.

Amostra	Porosidade			
	Lâmina	Plug	Slice	Porosidade Efetiva
ND#3	22%	-	-	30,9%
BD#1/2	23%	26,5%	24,1%	21,7%
F1#3A	12,9%	18,3%	21,06%	22,2%

A porosidade da amostra de arenito deformado BD#1/2 possui o valor calculado na lâminas mais próximo ao da amostra de arenito não deformado ND#3. Esse resultado ressalta novamente que a média dos resultados obtidos na lâmina não representa a deformação, que é concentrada em escala milimétrica.

Os resultados obtidos na lâmina e nos demais métodos da amostra F1#3A contrastam entre si devido à forma com que cada um foi obtido. O *plug* foi feito paralelamente às feições de deformação, já a lâmina foi confeccionada perpendicularmente a essas feições e, assim, apresenta maior quantidade de estruturas de deformação, observada com a individualização das dez diferentes faixas na análise dos aspectos em petrografia, levando a um valor calculado de porosidade menor.

## 8. CONCLUSÕES

Foram identificadas nas diversas abordagens desse trabalho as diferenças que a incidência de bandas de deformação cataclásticas exercem nos aspectos texturais e permoporosos das rochas analisadas. Nos estudos macroscópicos, foi primeiramente identificada a geometria dessas feições. As análises das imagens tomográficas colaboraram para a maior compreensão da distribuição dessas estruturas, assim como ressaltaram as faixas de maior densidade, relativas à maior compactação gerada pelas estruturas rúpteis.

Os estudos microscópicos, tanto nas análises das imagens microtomográficas quanto nas análises das imagens de lâminas, avançaram na caracterização da deformação, com a identificação de faixas verticais paralelas ou subparalelas que apresentam maior densidade do material, resultado da concentração da deformação (essencialmente bandas cataclásticas). Com essa análise, foi atribuído ao bloco F1#3A a maior diferença entre os aspectos texturais (arcabouço, poro, matriz, cimento e granulometria) de uma mesma amostra, referente ao tipo de deformação que nessa região do afloramento é mais intensa (apresenta maior contraste na intensidade da deformação). Por outro lado, as análises do bloco BD#1/2 se mostram mais homogêneas, o que reforça o fato de a deformação ser mais localizada na região em que essa amostra foi extraída.

É possível concluir, a partir da análise das lâminas petrográficas dos arenitos deformados, que as faixas que apresentam maior porcentagem de matriz correspondem a bandas de deformação cataclásticas, caracterizadas pela maior presença de matriz, fraturamento dos grãos, compactação e menor porosidade. Essas feições atuam na rocha como barreiras físicas para a percolação de fluidos, condicionando as zonas de cimentação de óxidos e hidróxidos de ferro. Os dados obtidos em uma lâmina de arenito não deformado (ND#3) complementaram a discussão com dados quantitativos dos aspectos texturais de uma rocha que não sofreu alteração pelas estruturas rúpteis presentes no afloramento.

O resultados, em geral, demonstram que a amostra F1#3A apresenta mais faixas de bandas cataclásticas e características texturais mais heterogêneas do que a amostra BD#1/2. Esse resultado corrobora com a localização das amostras na seção geológica do afloramento, onde a amostra F1#3A foi extraída nas imediações da falha F1, na qual há a maior concentração de deformação e, conseqüentemente,

a maior quantidade de estruturas rúpteis afetando a rocha. A amostra BD#1/2, ainda que possua uma faixa característica de uma zona de banda de deformação cataclástica, apresenta resultados mais homogêneos. A partir desses resultados, é possível assumir que a média dos aspectos texturais (arcabouço, cimento, matriz e poro) da lâmina BD#1/2 se aproxima mais da amostra não deformada (ND#3) do que da amostra extraída da zona de falha F1#3A.

Os resultados de petrofísica básica, atrelados às análises das imagens microtomográficas, reforçaram a relação entre a densidade das faixas de deformação e a redução da porosidade e permeabilidade. Foi constatado que os *plugs* que apresentam maior incidência de faixas de deformação, e faixas mais densas (menor granulometria e mais compacta), possuem os menores valores de porosidade e permeabilidade.

As análises granulométricas também indicam o comportamento da deformação nessas rochas. Foi identificada a redução da granulometria entre os blocos soerguido e abatido, resultado da deformação rúptil, que ao serem comparadas às análises das duas lâmina extraídas ao sul da falha F1 do afloramento (ND#3 E BD#1/2) complementaram a correlação dos dados obtidos. A partir da redução da granulometria do arcabouço, foi possível concluir que há maior concentração de deformação no bloco abatido da falha F1, e nas amostras com maior densidade de estruturas rúpteis, como a amostra F1#3A extraída no intermédio da falha F1, e que essas exercem maior impacto na diminuição da granulometria da rocha, assim como a heterogeneização dos demais aspectos texturais (matriz, poro, cimento) observados na distintas faixas paralelas/subparalelas. O bloco abatido ter sofrido maior impacto da deformação reforça o padrão de deformação em regime distensivo, que formou o gráben entre as falhas F1 e F2.

Por fim, ressalta-se a importância desse estudo para a maior compreensão da influência de bandas de deformação em rochas siliciclásticas análogas as de um reservatório.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- 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.
- DICKINSON, W. R. 1970. Interpreting Detrital Modes of Greywacke and Arkose. *Journal of Sedimentary Petrology*, **40 (2)**: 695 - 707.
- FISHER, Q. J.; KNIPE, R. J. 1998. Fault sealing processes in siliciclastic sediments. *Geological Society, Special Publications*, **147**: 117-134.
- FIUZA, B. O. 2019. *Análise multiescalar da deformação dútil 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.
- FOSSÉN, H. 2010. Deformation bands formed during softsediment deformation: observations from SE Utah. *Marine and Petroleum Geology*, **22**: 215 - 222.
- FOSSÉN, 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. 173 p.

- 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.
- GOOGLE. *Google Earth website*. 2022. Disponível em: <<http://earth.google.com/>>. Acesso em agosto 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*: 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.
- 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*: Martinius, A. W.; Howell, J. A.; Good, T. R. (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.
- MALTMAN, A. J., 1988. The importance of shear zones in naturally deformed wet sediments. *Tectonophysics*, **145**: 163 - 175.
- 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 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.I.], **104**: 895-9811.

- 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.
- 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*: In: Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C. D. R.; Brito Neves, B. B. *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.
- SANSON M. S. R. 2006. Sistemas deposicionais aluviais e tectônica cenozóica na região de Volta Redonda (RJ) – *Rift Continental do Sudeste do Brasil*. Dissertação (Mestrado). Rio de Janeiro: Instituto de Geociências - UFRJ. 151 p.
- 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. 89 p.
- 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.
- WENTWORTH, C. K. 1922. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, **30**: 377-392.
- WIBBERLEY, C.; SHIPTON, Z. 2010. Fault zones: A complex issue. *Journal of Structural Geology*, **32**: 1554-1556.