



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

LUÍS FELIPE MACHADO DA COSTA

**MAPEAMENTO GEOLÓGICO-ESTRUTURAL DA REGIÃO DA SERRA DAS
RUSSAS: zona de cisalhamento Pernambuco Leste, nordeste do Brasil**

Recife
2020

LUÍS FELIPE MACHADO DA COSTA

**MAPEAMENTO GEOLÓGICO-ESTRUTURAL DA REGIÃO DA SERRA DAS
RUSSAS: zona de cisalhamento Pernambuco Leste, nordeste do Brasil**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Geologia da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Gorki Mariano.

Coorientador: Tiago Augusto Soares dos Santos.

Recife

2020

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

C837m Costa, Luís Felipe Machado da.
Mapeamento geológico-estrutural da região da Serra das Russas: zona de cisalhamento Pernambuco Leste, Nordeste do Brasil / Luís Felipe Machado da Costa. - 2020.
99 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Gorki Mariano.
Coorientador: Tiago Augusto Soares dos Santos.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Geologia, 2020.
Inclui Referências e Anexos.

1. Geologia. 2. Zona de cisalhamento Pernambuco Leste. 3. Deformação dúctil-rúptil. 4. Milonito. I. Mariano, Gorki (Orientador). II. Santos, Tiago Augusto Soares dos (Coorientador). III. Título.

UFPE

551 CDD (22. ed.)

BCTG/2021- 141

LUÍS FELIPE MACHADO DA COSTA

**MAPEAMENTO GEOLÓGICO-ESTRUTURAL DA REGIÃO DAS SERRAS DAS
RUSSAS: zona de cisalhamento Pernambuco Leste, nordeste do Brasil**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Geologia da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociência, como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel em Geologia.

Aprovado em: 13/11/2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gorki Mariano (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Tiago Siqueira de Miranda (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Sérgio Pacheco Never (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Geólogo Tiago Augusto Soares dos Santos
Programa de Pós-Graduação em Geociências - Universidade Federal de Pernambuco
(Examinador Interno)

Aos meus avós, meus antepassados, (em memória) Itamar e Eva Rita, Alair (em memória) e Christina.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus criador do cosmos, da Terra, de toda natureza da qual o ser humano faz parte, pela minha vida e alegria de chegar neste momento da graduação em Geologia.

Aos meus pais, Luís Fernando e Alzira, pela criação, cuidado, amor, amizade, exemplo de vida digna, honesta e trabalhadora, por todo o apoio nessa caminhada longe de casa em busca dos meus sonhos. Ao meu irmão, Luís Gustavo, pelo companheirismo de vida. Aos meus avós, e todos os demais familiares pelo amor, apoio e confiança.

Aos geólogos, geógrafos e demais profissionais do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) que tive o prazer de conviver de 2012 e 2014 durante um estágio e que me fizeram encantar pela geologia e me apoiaram em recomeçar a graduação em busca de uma nova oportunidade e caminho de vida. Em especial, ao geólogo Jorge Pimentel, que foi meu supervisor, pelos conselhos e ensinamentos.

À minha futura colega de profissão, companheira de vida e melhor amiga, com quem divido alegria e tristezas e fez dessa caminhada mais fácil e feliz de viver, a mulher que amo, Gabriella Melo.

Aos professores do Departamento de Geologia da UFPE, em especial, ao prof. Gorki Mariano, pelo apoio, amizade, ensinamentos de vida, poesias, estímulos de CORAGEM, pela iniciação na pesquisa científica e orientação deste trabalho. Agraço também, aos professores Sérgio P. Neves e Tiago S. de Miranda pela colaboração nos trabalhos da minha iniciação científica e pela amizade e acolhimento. E também ao prof. Andrés Bustamante pelos ensinamentos de geologia metamórfica e amizade.

Ao amigo geólogo Tiago Augusto, por também ter coorientado e ajudado na realização deste trabalho, sobre tudo durante a pandemia do COVID-19 que assola no momento presente da realização deste trabalho.

À Geolab Soluções em Geologia, nas pessoas de João, Rafinha e Jailson, pela colaboração neste estudo com o trabalho primoroso da confecção das lâminas delgadas, deram brilho especial as microestruturas das rochas.

À bióloga Dra. Sônia Maria Agostinho, pelo carinho, amizade, acolhimento e apoio, sobretudo na fase da conclusão deste trabalho, sem deixar um dia sequer de estar ao meu lado.

A todos os colegas de curso e amigos, que fizeram parte desta caminhada da graduação, compartilhando campos, estudos e copos de cervejas, em especial, André, Cayo, Cristiano, Daniel, Diniz, Gabriel (baiano), Gabriel Albuquerque, Gisely, Ian, Ingrid, Mariana, Matheus, Mirella, Pamela, Pierre, Rafael, Rodrigo, Salviano, Stephany, Will.

Agradecimento também são devidos aos queridos Lucas “Amigão”, Dona Júlia e Zezé pelos almoços especiais que se tornaram parte fundamental dessa caminhada, momento de compartilhar muita alegria e carinho.

À Olga, também pelo apoio e carinho com todos os alunos do Prof. Sérgio.

Agradeço à Mary, minha senhoria, pela atenção, cuidado e prestatividade de sempre com seu inquilino.

Enfim, agradeço imensamente ao nordeste, ao povo pernambucano e recifense que fizeram parte da minha vida ao longo destes seis anos, agradeço pela acolhida, pelos aprendizados que certamente transformaram vida, e pelas muitas alegrias vividas e compartilhadas por aqui. Muito obrigado!

Fomos nos alienando desse organismo de que somos parte, a Terra, e passamos a pensar que ele é uma coisa e nós, outra: A Terra e a humanidade. Eu não percebo onde tem alguma coisa que não seja natureza. Tudo é natureza. O cosmos é natureza. Tudo em que eu consigo pensar é natureza. Ailton Krenak (Ideias para Adiar o Fim do Mundo, 2019)

RESUMO

A Zona de Cisalhamento Pernambuco Leste (ZCPE), na região da Serra das Russas (Gravatá-PE), consiste de uma faixa milonítica anastomosada, limitada a norte pelo Complexo Surubim-Caroalina e a sul por granitoides brasileiros. Este trabalho visa o mapeamento geológico, com foco na análise estrutural de macro- a microescala dessa porção da ZCPE, afim de determinar a evolução da deformação dúctil-rúptil local. A área de estudo é amplamente afetada pela deformação transcorrente Neoproterozoica, o que conferiu uma foliação regional ENE-WSW com alta intensidade de mergulho e gerou a ZCPE nesta mesma direção e Z.C subordinadas na direção NE-SW. A cinemática destal da transcorrência é claramente definida por indicadores como trama S-C e tipo-C', foliação oblíqua de quartzo, porfiroclastos assimétricos de feldspato e mica fish. Apenas uma Z.C subordinada, na região NW da área, apresenta cinemática sinistral. O Complexo Surubim-Caroalina é composto por paragneisses quartzo-feldspáticos com granada e sillimanita e mica-xistos com granada; que foram deformados e rotacionados pela deformação transcorrente. A ZCPE é caracterizada por uma porção de ultramilonitos bandados de composição granítica a diorítica; e uma porção milonítica essencialmente granítica. Os dois litotipos de granitoides são classificados como anfibólio-biotita-granito com enclaves intermediários/máficos associados e biotita-muscovita-granito. As estruturas observadas sugerem que foram alojados e deformados pela deformação transcorrente, assim, são definidos como plútons sin- a tarditectônicos. Em imagens de satélite e aerogeofísicas, foram obtidas direções preferenciais de lineamentos ENE-WNW e NW-NE. Em mesoescala, os ultramilonitos apresentam (i) dobras sinformes e antiformes, normais com eixo sub-horizontal e as superfícies axiais subparalelas à foliação, sugerindo que as dobras são resultantes da deformação progressiva; (ii) sistema de falhas transcorrentes com direções NW-NE (destal), NNE-SSW (sinistral) e ENE-WSW (destal), que foram interpretadas, respectivamente, como as falhas R, R' e D do modelo de cisalhamento de Riedel. A análise microtectônica mostrou que o quartzo possui intensa recristalização por *bulging* nos ultramilonitos e mais proeminente por rotação de subgrão nos milonitos. E o feldspato ocorre como porfiroclastos, predominantemente, fraturados e cominuídos nos ultramilonitos, enquanto que nos milonitos, deformados plasticamente com recristalização incipiente por *bulging*, e menos frequente, apresentam microestrutura manto-e-núcleo e mirmequita. Além disso, foi observado bandas de cisalhamento (C') e microfalhas sintéticas e antitéticas, que correspondem ao par conjugado R e R', respectivamente. Assim, os resultados mostram que: (a) as microestruturas associadas ao comportamento reológico dúctil-rúptil dos minerais sugerem que

a deformação ocorreu de forma gradativa, de condições metamórficas de médio para baixo grau, equivalente à fácies xisto verde; sendo o baixo grau de deformação, em temperatura média de 400°C, o registro predominante; (ii) considerando que as estruturas em diferentes escalas de observação possuem direções similares; que as bandas de cisalhamento representam uma transição de regime dúctil-rúptil (evolução de C' para falhas sintéticas) e que as microfalhas estão localmente deformadas ao longo da foliação, indicando que foram afetadas pelo cisalhamento; estas estruturas possuem evidências de que são sintectônicas. Portanto, os dados corroboram para a interpretação de que a deformação ocorreu em regime de transição dúctil-rúptil, de forma evolutiva dentro do mesmo evento tectônico da Orogênese Brasileira.

Palavras-chave: Zona de Cisalhamento Pernambuco, zona de cisalhamento; deformação dúctil-rúptil; milonito; Província Borborema.

ABSTRACT

The East Pernambuco Shear Zone (EPSZ), in the Serra das Russas region (Gravatá-PE), consists of an anastomosed mylonitic band, limited to the north by Surubim-Caroalina Complex and to the south by Brasileiro granitoids. This work aims at geological mapping, focusing on the macro- to microscale structural analysis of this portion of EPESZ, in order to determine the evolution of local ductile-brittle deformation. The study area is affected by Neoproterozoic deformation, which resulted in a regional ENE-WSW high dip foliation, associated with the development of EPESZ in the same direction, and subordinate shear zones in the NE-SW direction. The dextral kinematics of the EPESZ is clearly defined by indicators such as S-C and type-C ' , oblique quartz foliation, asymmetric feldspar and mica fish porphyroclasts. Only one subordinate S.Z kinematic indicator, in the northwest region of the area, has sinistral behaviour. The Surubim-Caroalina Complex is composed of quartz-feldspathic paragneisses with garnet and sillimanite and mica-schists with garnet; that were deformed and rotated by the transcurrent deformation. The EPESZ is characterized by a portion of banded ultramylonites of granitic to dioritic composition; and an essentially granitic mylonitic portion. The two granitoids lithotypes are amphibole-biotite-granite with associated intermediate/mafic enclaves and biotite-muscovite-granite. The observed structures suggest that they were emplaced and deformed by the transcurrent deformation, thus, they are syn- to tarditectonic plutons. In satellite/aerogeophysical images, preferential directions of lineaments ENE-WNW and NW-NE were obtained. At mesoscale, the ultramylonites present (i) synform and antiform normal folds with a sub-horizontal axis and strike of the axial surfaces subparallel to the tectonic foliation, suggesting that the folds are the result of progressive deformation; (ii) system of transcurrent faults with directions NW-NE (dextral), NNE-SSW (sinistral) and ENE-WSW (dextral), which were interpreted, respectively, as R, R' faults and D to the Riedel shear model. Microtectonic analysis showed that quartz has intense recrystallization by bulging in ultramylonites and a more prominent recrystallization by subgrain rotation in mylonites. Feldspar occurs as porphyroclasts, predominantly fractured and comminuted in ultramylonites, while in mylonites, plastic deformed with incipient recrystallization by bulging, and less frequently, they present mantle-and-core microstructure and myrmekite. In addition, shear bands (C ') and synthetic and antithetical micro-faults were observed, which correspond to the conjugated pair R and R', respectively. Therefore, the results show that: (a) the microstructures associated with the ductile-brittle rheological behaviour of minerals suggest that the

deformation occurred gradually, from medium to low grade metamorphic conditions equivalent to green schist facies, being the low-grade deformation at $\sim 400^{\circ}\text{C}$ the predominant record; (ii) considering that the structures in different scales of observation have similar directions; that the shear bands represent a transition between the ductile and brittle regime (evolution of C 'for synthetic faults) and that the micro-faults are locally deformed along the main tectonic foliation, indicating that they were affected by the shearing; evidences that they are syntectonic. Therefore, the conclusion corroborates for the interpretation that the deformation occurred in a ductile-brittle transition regime, following an evolutionary pattern within the same tectonic event of the Brasiliano Orogenesis.

Keywords: Pernambuco shear zone; shear zone; ductile-brittle deformation; mylonite; Borborema Province

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma das etapas realizadas durante o desenvolvimento deste estudo.....	18
Figura 2 - Mapa de localização da área de estudo	22
Figura 3 - Mapa geológico simplificado da Província Borborema	24
Figura 4 - Mapa geológico simplificado das subprovíncias central e sul (porção nordeste) da Província Borborema.....	26
Figura 5 - Mapa esquemático exibindo a geometria de recobrimento à direita para a ZCPE ..	28
Figura 6 - Imagens obtidas por aerogamaespectrometria da área de estudo.....	29
Figura 7 - Domínios gamaespectrométricos individualizados na área de estudo.....	30
Figura 8 - Imagens obtidas por aeromagnetometria da área de estudo	31
Figura 9 - Padrão anastomosado dos lineamentos magnéticos estruturais interpretados a partir da imagem do campo magnético anômalo	32
Figura 10 – A: Lineamentos magnéticos estruturais interpretados a partir da imagem da primeira derivada vertical; B – Lineamentos magnéticos estruturais e zonas litológicas interpretados a partir da imagem da amplitude de sinal analítico	33
Figura 11: Imagem MDE (SRTM), com resolução espacial de 30m, da área de estudo utilizada para interpretação de rede de drenagem e estruturas.....	34
Figura 12: Mapa de rede de drenagem interpretada e curvas de nível da região na área de estudo	35
Figura 13: Imagens MDE com efeitos de iluminações nas direções 0Az (A), 45Az (B), 90Az (C) e 315Az (D), utilizadas para interpretação de lineamentos estruturais	36
Figura 14: Lineamentos identificados sobreposto ao MDE de iluminação 0Az (A), com as direções preferenciais interpretadas em diagrama de roseta (B)	36
Figura 15: Mapa geológico-estrutural simplificado sobreposto ao MDE	37
Figura 16: Fotografias dos afloramentos dos paragneisses do Complexo Surubim-Carolina	39

Figura 17: Fotografias dos afloramentos dos xistos do Complexo Surubim-Caroalina.....	40
Figura 18: Fotomicrografia das lâminas delgadas das rochas metassedimentares com textura lepidogranoblástica (LFM38).....	41
Figura 19: Fotografias dos afloramentos dos milonitos/ultramilonitos bandados (porção norte da ZCPE)	43
Figura 20 - Fotomicrografia dos ultramilonitos bandados (porção norte da ZCPE) da faixa milonítica.....	45
Figura 21 - Fotografias dos afloramentos miloníticos de protólito granítico (porção sul da ZCPE).....	46
Figura 22 - Fotomicrografia dos milonitos graníticos (porção sul da ZCPE)	48
Figura 23 - Fotografias dos afloramentos dos granitoides sintranscorrentes tipo 1	50
Figura 24 - Fotomicrografia das amostras dos granitoides tipo 1	51
Figura 25 - Fotografias dos afloramentos dos granitoides sintranscorrentes tipo 2	52
Figura 26 - Fotomicrografia das amostras dos granitoides tipo 2	53
Figura 27 - Projeções estereográficas dos polos das foliações das unidades litológicas.....	54
Figura 28 - Estereograma de polos das foliações e lineações da área de estudo.....	55
Figura 29 - Fotografia dos indicadores cinemáticos da ZCPE	56
Figura 30 - Fotografias das dobras antiformes e sinformes nos ultramilonitos da Serra das Russas, Gravatá – PE (SR01)	57
Figura 31 - Estereograma de polos dos flancos e eixo β dos dobramentos nos milonitos da ZCPE	58
Figura 32 - Dobras intrafoliais	58
Figura 33 - Diques pegmatíticos deformados.....	59
Figura 34 - Fotografia dos indicadores cinemáticos do sistema de falhas	60

Figura 35 - Ortofotografia em perfil do afloramento-chave dos ultramilonitos bandados contendo o sistema de falhas, localizado na Serra das Russas (SR02).....	61
Figura 36 - Ortofotografia em planta do afloramento-chave dos ultramilonitos bandados contendo o sistema de falhas, localizado na denominada Serra das Russas (SR02).....	62
Figura 37 - Sistema de fraturas da área de estudo	63
Figura 38 - Fotomicrografias ilustrando os critérios cinemáticos da tectônica transcorrente destrai regional (ZCPE).....	64
Figura 39 - Fotomicrografias ilustrando os critérios cinemáticos da zona de cisalhamento sinistral	65
Figura 40 - Fotomicrografia ilustrando as microfaihas R (destrai) e R' (sinistral) presentes nos ultramilonitos bandados da ZCPE (SR02)	66
Figura 41 - Mapa geológico simplificado com as áreas de recursos minerais requeridas.....	68
Figura 42 - Diagrama simplificado ilustrando a variação vertical de deformação em zonas de cisalhamento	71
Figura 43 - Modelo de evolução esquemático da Zona de Cisalhamento Pernambuco Leste .	72

LISTA DE ABREVIATURAS

Nomenclatura de mecanismos de recristalização dinâmica:

BLG	Bulging
GBM	Migração de Limite de Grão
SGR	Rotação de Subgrão

Nomenclatura de minerais:

Act	Actinolita	Kf	Feldspato Potássico
Af	Anfibólio	Mc	Microclina
All	Allanita	Ms	Muscovita
Ap	Apatita	Opc	Opaco
Bt	Biotita	Pl	Plagioclásio
Czo	Clinozoisita	Qtz	Quartzo
Ep	Epidoto	Sil	Sillimanita
Grt	Granada	Ttn	Titanita
Hbl	Hornblenda		

Imagens aerogeofísicas e sensoriamento remoto:

ASA	Amplitude de Sinal Analítico
CMA	Campo Magnético Anômalo
DZ	Primeira Derivada Vertical
MDE	Modelo Digital de Elevação
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission

Outros:

CPRM	Serviço Geológico do Brasil
USGS	United States Geological Survey
ZCPE	Zona de Cisalhamento Pernambuco Leste

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS	18
1.2	MATERIAIS E MÉTODOS	18
1.2.1	Revisão bibliográfica e organização de banco de dados.....	19
1.2.2	Interpretação de imagens.....	19
1.2.3	Mapa geológico preliminar.....	20
1.2.4	Etapa de campo.....	20
1.2.5	Modelagem 3D de afloramentos chaves.....	20
1.2.6	Análise petrográfica e microtectônica.....	21
1.2.7	Integração dos dados e mapa geológico.....	21
1.3	LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO	21
1.4	ASPECTOS FISIOGRÁFICOS.....	22
2	GEOLOGIA REGIONAL	23
2.1	PROVÍNCIA BORBOREMA	23
2.2	DOMÍNIO RIO CAPIBARIBE	25
2.3	DOMÍNIO PERNAMBUCO-ALAGOAS	26
2.4	ZONA DE CISALHAMENTO PERNAMBUCO LESTE.....	27
3	GEOFÍSICA E SENSORIAMENTO REMOTO	29
3.1	AEROGAMAESPECTROMETRIA	29
3.1.1	Interpretação de dados aerogamaespectrométricos.....	30
3.2	AEROMAGNETOMETRIA	31
3.2.1	Interpretação de dados aeromagnetométricos.....	32
3.3	SENSORIAMENTO REMOTO.....	34
3.3.1	Interpretação de Imagens.....	34
4	GEOLOGIA LOCAL.....	37
4.1	COMPLEXO SURUBIM-CAROALINA	38
4.2	FAIXA MILONÍTICA	42
4.3	GRANITOIDES	49
5	GEOLOGIA ESTRUTURAL E MICROESTRUTURAS	54
5.1	FOLIAÇÃO E LINEAÇÃO	54
5.2	ESTRUTURAS DÚCTEIS E INDICADORES CINEMÁTICOS.....	55

5.2.1	Tramas S/C e bandas de cisalhamento (C').....	55
5.2.2	Dobras.....	57
5.2.3	Diques <i>boudinados</i> e <i>en echelon</i>	59
5.3	ESTRUTURAS RÚPTEIS	60
5.3.1	Falhas.....	60
5.3.2	Sistema de fraturas.....	62
5.4	ANÁLISE MICROESTRUTURAL	63
5.4.1	Indicadores cinemáticos.....	63
5.4.2	Microfalhas.....	65
6	MAGMATISMO E METAMORFISMO	67
7	RECURSOS MINERAIS	68
8	DISCUSSÃO	69
8.1	ASPECTOS TECTÔNICO E GEOLÓGICO	69
8.2	ASPECTOS ESTRUTURAIS DA TRANSIÇÃO DÚCTIL-RÚPTIL.....	70
9	CONCLUSÃO.....	74
	REFERÊNCIAS	75
	APÊNDICE A - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DE PONTOS	78
	APÊNDICE B - TABELAS DE PONTOS E DADOS ESTRUTURAIS	79
	APÊNDICE C - DESCRIÇÕES PETROGRÁFICAS	82
	APÊNDICE D – MAPA GEOLÓGICO DA REGIÃO DA SERRA DAS RUSSAS, GRAVATÁ - PE	97
	APÊNDICE E – MAPA GEOLÓGICO – ESTRUTURAL DA REGIÃO DA SERRA DAS RUSSAS, GRAVATÁ – PE	98

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta os resultados obtidos do mapeamento geológico-estrutural da região da Serra das Russas, entre os municípios de Gravatá, Chã Grande e Pombos, no leste do Estado de Pernambuco. O relatório, também, integra a disciplina Geologia de Campo 4 (GE337) do Departamento de Geologia, da Universidade Federal de Pernambuco, a qual é requisito necessário para a obtenção do grau de bacharel em Geologia.

1.1 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

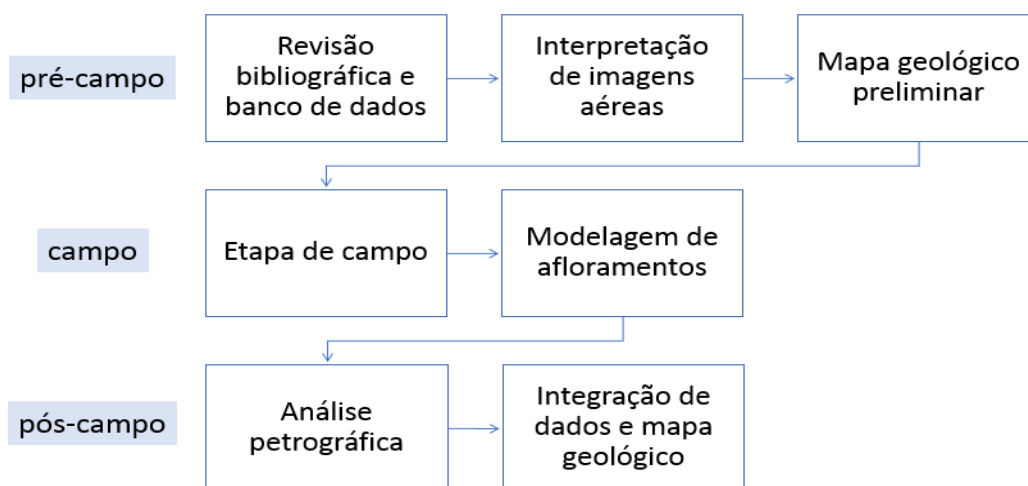
A Serra das Russas faz parte da estrutura geológica de idade brasileira denominada Zona de Cisalhamento Pernambuco Leste (ZCPE). Trata-se de uma transcorrência de cinemática destal, de grande importância para a evolução geológica da Província Borborema, no nordeste do Brasil, durante a Orogênese Brasileira no Neoproterozoico.

Este estudo é motivado diante da relevância da ZCPE e da necessidade de maior compreensão dessa estrutura através de estudos geológicos de detalhe na região. O principal objetivo deste estudo, portanto, é gerar um mapa geológico na escala 1:50.000, de uma área com aproximadamente 100 km², e contribuir com o conhecimento geológico-estrutural da região, visando a caracterização microtectônica e estrutural na ZCPE, e também estabelecer a relação de evolução das deformações dúctil e dúctil-rúptil nessa estrutura.

1.2 MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema de métodos para elaboração deste trabalho consistiu em três etapas principais (Figura 1), cujas atividades realizadas são descritas detalhadamente nos tópicos a seguir.

Figura 1 - Fluxograma das etapas realizadas durante o desenvolvimento deste estudo



Fonte: O Autor, 2020.

1.2.1 Revisão bibliográfica e organização de banco de dados

A primeira etapa do trabalho consistiu na revisão bibliográfica afim de se adquirir um conhecimento prévio sobre a área e os tópicos geológicos a serem abordados. Assim, foi realizado uma revisão na literatura (artigos, dissertações, teses, cartas geológicas, etc) a respeito da região, com ênfase na geologia (litologia, geocronologia, geotectônica, recursos minerais) e tópicos de geologia estrutural (deformação dúctil-rúptil e zonas de cisalhamentos). Após isso, as informações obtidas foram compiladas em um banco de dados para melhor assimilação e relação entre os tópicos.

1.2.2 Interpretação de imagens

Durante essa etapa foram analisadas imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), modelos digitais de elevação (MDE) e imagens aerogeofísicas, em ambiente GIS. As imagens SRTM, com resolução espacial de 30 m, obtidas gratuitamente do banco de dados da USGS (*United States Geological Survey*), foram utilizadas para gerar curvas de nível, identificação e interpretação das redes de drenagem e relevo e, também, gerar as imagens dos modelos digitais de elevação. As imagens MDE, por sua vez, foram utilizadas para extração de lineamentos estruturais. Foram elaboradas quatro imagens do MDE a partir do efeito de iluminação interativa em quatro direções de azimutes distintas – 0Az, 45Az, 90Az e 315Az – e ângulo de elevação de 45° para todas, visando identificar o padrão de direções preferências dos lineamentos estruturais conforme os diferentes ângulos de sombreamento; posteriormente, foi extraído a atitude preferencial dos lineamentos em cada imagem através do *software* QGIS 3.14, para construção de diagrama de roseta, afim de compará-los com os dados estruturais em meso- e microescala.

As imagens aéreas obtidas pelos métodos geofísicos de magnetometria e gamaespectrometria (canais Th, U e K), cedidas gratuitamente do Projeto Pernambuco-Paraíba (2009), pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), foram utilizadas para delimitação prévia de corpos litológicos e estruturais. Estes dados são caracterizados por altura de voo de 100m, espaçamento de linhas de voo (N-S) de 500 m, e espaçamento das linhas de controle (E-W) de 10.000 m. Os dados dos canais de K, Th e U foram previamente interpolados com os métodos da curvatura mínima, enquanto os dados do campo magnético anômalo, primeira derivada vertical e amplitude do sinal analítico foram interpolados via técnica bidirecional. Em ambos os casos, o tamanho de célula de 125 m foi usado.

Adicionalmente foram utilizadas imagens de alta resolução espacial (<15 m) obtidas gratuitamente através do aplicativo *Google Earth* para interpretação e identificação de rodovias, estradas, áreas urbanas, e seleção das rotas de acesso à área e perfis a serem feitos.

1.2.3 Mapa geológico preliminar

A produção do mapa geológico preliminar consiste na última fase da etapa do pré-campo. O mapa foi produzido a partir da integração das interpretações das imagens de sensoriamento remoto, aerogeofísicas e dados geológicos previamente cartografados. A partir disso, foi selecionado os perfis a serem feitos no mapeamento, na escala 1:50.000. O objetivo deste é auxiliar na etapa de campo seguinte.

1.2.4 Etapa de campo

Nas etapas de campo foram visitados ao todo 63 afloramentos (APÊNDICE A). Os dados estruturais das feições planares e lineares, presentes nas litologias da área de estudo, foram coletados por bússolas tipo *Brunton* e *Clar*, e pelo aplicativo *Field Move Clino*, via *smartphones*. Foram coletadas cerca de 40 amostras dos litotipos encontrados em campo, que foram sistematicamente orientadas, quando necessário, para posterior análise cinemática das deformações presentes.

O mapa geológico preliminar foi utilizado na versão digital, a partir do aplicativo *Avenza Maps* para *smartphones* para a localização geográfica – além de aparelho de GPS –, plotagem dos afloramentos visitados e definição de contatos litológicos.

1.2.5 Modelagem 3D de afloramentos chaves

A modelagem 3D de afloramentos trata-se de uma etapa adicional de campo com o objetivo de fazer um imageamento de afloramentos chaves ao longo da ZCPE, dentro da área de estudo, que possuam estruturas relevantes ao tema do trabalho, como dobras em escala métrica e sistema de falhas, objetivando a caracterização estrutural em mesoescala, através da identificação e obtenção das direções dessas estruturas, e posteriormente correlacioná-las com os demais dados estruturais obtidos em macro e microescala.

Para isto, foi selecionado um afloramento com cerca de 50 m de comprimento e 15 m de altura, em um corte da rodovia BR-232. O imageamento foi realizado com VANT, modelo DJI Mavic 2. Ao todo foram obtidas 64 fotos do afloramento, em duas alturas de voos paralelas ao corte; posteriormente, tratadas no *software Agisoft Metashape* e gerados o modelo 3D e ortomosaico.

1.2.6 Análise petrográfica e microtectônica

Foram selecionadas 13 amostras representativas das litologias para confecção de lâminas delgadas. Foram confeccionadas, também, 11 lâminas referentes ao afloramento chave da ZCPE, utilizados na modelagem 3D, para ênfase na análise microtectônica. Nesta etapa, foi realizado a descrição petrográfica (mineralogia e texturas) e microtectônica (relação dúctil-rúptil, mecanismos de deformação e recristalização, entre outras microestruturas) das diferentes unidades litológicas presentes na área mapeada, através de microscópios de luz transmitida, disponíveis no Departamento de Geologia - UFPE.

1.2.7 Integração dos dados e mapa geológico

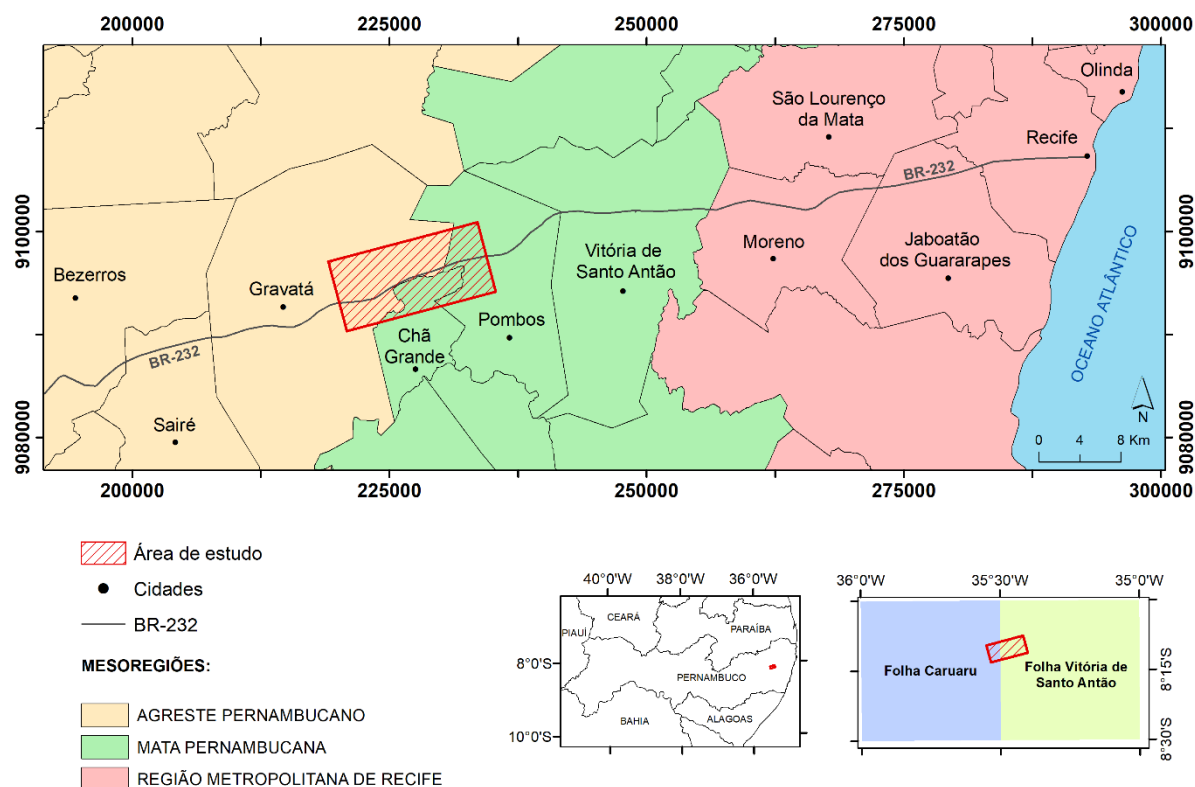
Esta última etapa consiste no processamento, interpretação dos dados obtidos nas fases anteriores, redação deste relatório e geração do mapa geológico da área em escala 1:50.000.

Os dados estruturais, inicialmente, foram processados nos *softwares Stereonet* e *OpenStereo* para confecção das projeções estereográficas e diagramas de roseta, e posteriormente, georreferenciados para ambiente GIS. A compilação destes dados estruturais com a análise petrográfica e descrição de campo foram utilizadas para confecção do mapa geológico final, processado no *software* QGIS 3.8, onde foram realizadas correções do mapa geológico preliminar.

1.3 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A região da Serra das Russas está localizada no leste do Estado de Pernambuco, entre as mesorregiões do Agreste e Zona da Mata, abrangendo três municípios: Gravatá, Chã Grande e Pombos. O acesso principal à área se dá pela rodovia federal BR-232 (Figura 2) – que atravessa todo o polígono longitudinalmente – a partir do Recife, distando cerca de 80 km. Cartograficamente, a área de estudo está inserida entre duas cartas geológicas, estando parcialmente a leste da Folha Caruaru (SC.25-V-A-I) e a oeste da Folha Vitória de Santo Antão (SC.25-V-A-II).

Figura 2 - Mapa de localização da área de estudo



Fonte: O Autor, 2020.

1.4 ASPECTOS FISIOGRAFICOS

O clima da região é tropical úmido, sendo característico a taxa de precipitação pluviométrica superar a de evaporação. O período chuvoso ocorre entre o outono e inverno, com médias de precipitação 210 mm. Devido a região ser uma transição entre a Zona da Mata e Agreste, possui variação de vegetação, apresentando paisagens típicas da mata atlântica e da caatinga, respectivamente. O solo da região possui textura argilo-arenosa, cor castanho a amarelados, e espessuras variáveis, mas geralmente espesso em função do intenso intemperismo químico. O relevo é acidentado, com desníveis abruptos e cotas variando de 200 a 600 m, caracterizado por morros e pela Serra das Russas. A região é dividida em duas bacias hidrográficas, compreendendo, majoritariamente, a Bacia do Rio de Capibaribe na porção norte e oeste, e a Bacia do Rio Ipojuca na porção sudoeste da área.

2 GEOLOGIA REGIONAL

A área de estudo, no contexto geológico regional, está situada na porção leste da Província Borborema, entre os domínios Rio Capibaribe (Subprovíncia Central) e Pernambuco-Alagoas (Subprovíncia Sul), cujo limite é a Zona de Cisalhamento Pernambuco Leste. Aqui são apresentados brevemente os principais aspectos da geologia regional, tais como tectônica, características estruturais, litológicas e geocronológicas da Província Borborema, dos domínios tectônicos de interesse e da ZCPE.

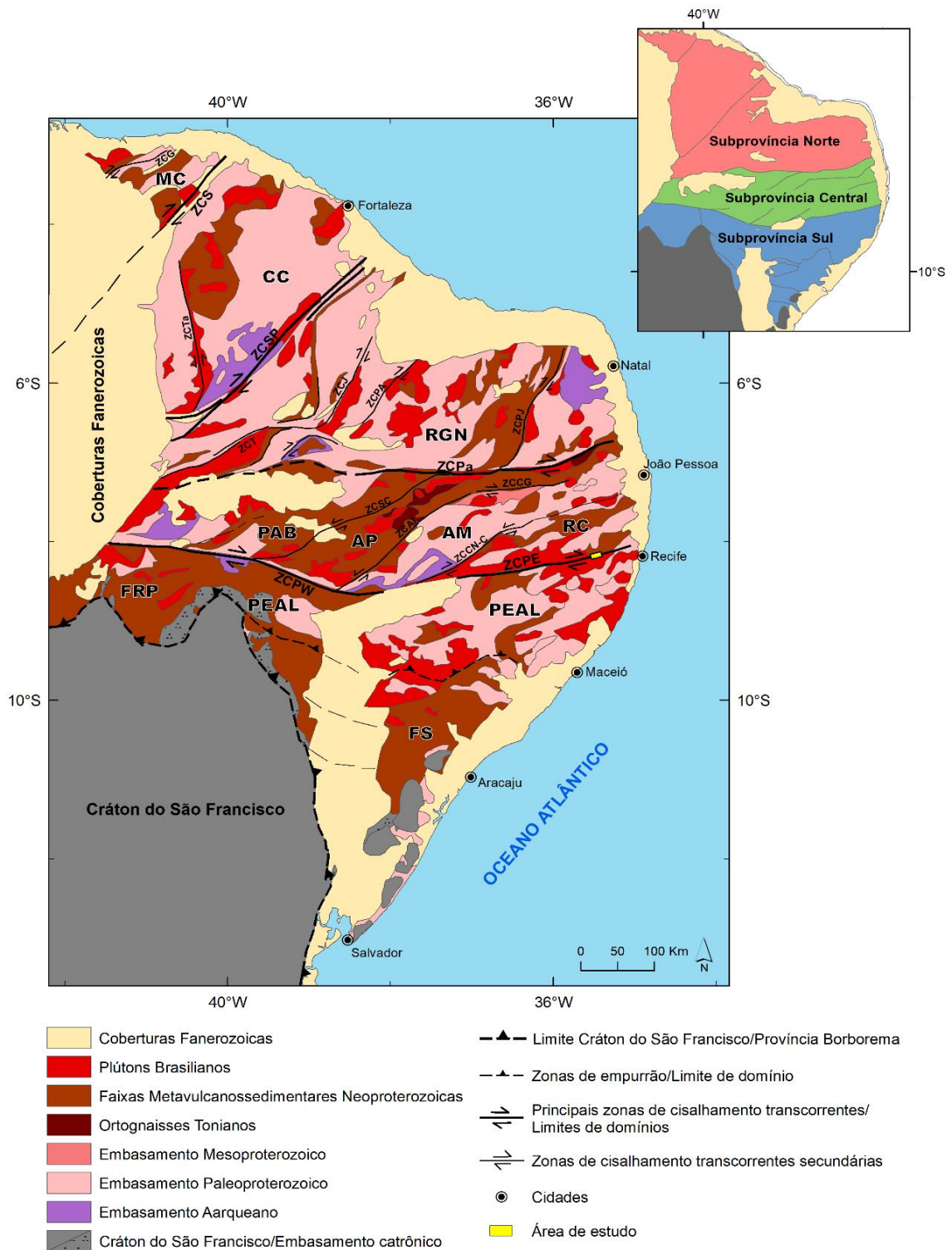
2.1 PROVÍNCIA BORBOREMA

A Província Borborema, originalmente definida por Almeida et al. (1981), faz parte de uma grande região orogênica que se estende do nordeste do Brasil ao oeste da África, de certa complexidade estrutural, com superposição de distintas deformações, eventos metamórficos e magmáticos, cuja configuração estrutural final resulta da colisão de blocos continentais arqueanos e paleo-mesoproterozoicos durante a amalgamação do continente Gondwana Ocidental – correspondente aos eventos da orogênese Brasileira/Pan-Africana (ca. 700-500 Ma) (Neves et al., 2015; França et al., 2019; Caxito et al., 2020). Seus limites são o Cráton do São Francisco, ao sul; a Bacia do Parnaíba, a oeste e as bacias costeiras do continente Sul Americano, a norte e leste (Figura 3).

A litologia da Província Borborema é composta por embasamento de gnaisses localmente migmatizados de idade paleoproterozoica, com fragmentos restritos de crosta arqueana, com sua gênese relacionada ao evento Transamazônico (2,2 Ga – 2,0 Ga), responsável pela geração e retrabalhamento de material crustal; sequências metavulcanossedimentares meso-neoproterozoicas e corpos plutônicos de idades diversas, principalmente granitoides Brasileiros, associados ao sistema de zonas de cisalhamento transcorrentes, de escala continental, resultantes da mesma orogênese (Neves e Mariano, 1999; Santos e Medeiros, 1999; Neves et al., 2003; Caxito et al., 2020).

As principais zonas de cisalhamento são convencionalmente utilizadas para a compartimentação tectônica da Província Borborema em três subprovíncias – Norte, Central e Sul – e seus respectivos domínios internos. Porém, essas divisões possuem nomenclaturas distintas de acordo com os modelos dos autores. A divisão em subprovíncias e domínios adotada aqui baseia-se na utilizadas por Van Schmus (2008) e Neves et al. (2015).

Figura 3 - Mapa geológico simplificado da Província Borborema



Fonte: O Autor, 2020. (Adaptado de Neves (2003), Van Schmus (2008), Mapa Geológico da América do Sul (Gómez, J., Schobbenhaus, C. & Montes, N. E., 2019)

Domínios: (Norte) MC – Médio Coreau, CC – Ceará Central, RGN – Rio Grande do Norte; (Central) PAB – Piancó-Alto Brígida, AP – Alto Pajeú, AM – Alto Moxotó, RC – Rio Capirabie; (Sul) FRP – Faixa Riacho do Pontal, PEAL – Pernambuco-Alagoas, FS – Faixa Sergipana. Zonas de Cisalhamento Transcorrentes: (Principais) ZCPE – Pernambuco Leste, ZCPW – Pernambuco Oeste, ZCPa – Patos, ZCSP – Senador Pompeu, ZCS – Sobral; (Secundárias) ZCCN-C – Cruzeiro do Nordeste-Congo, ZCAI – Afogados da Ingazeira, ZCCG – Campina Grande, ZCSC – Serra do Cabloco, ZCPJ – Picuí-João Câmara, ZCPA – Porto Alegre, ZCJ – Jaguaribe, ZCT – Tatajuba, ZCTa – Tauá, ZCG – Granja. Inset: Subprovíncias da Província Borborema.

2.2 DOMÍNIO RIO CAPIBARIBE

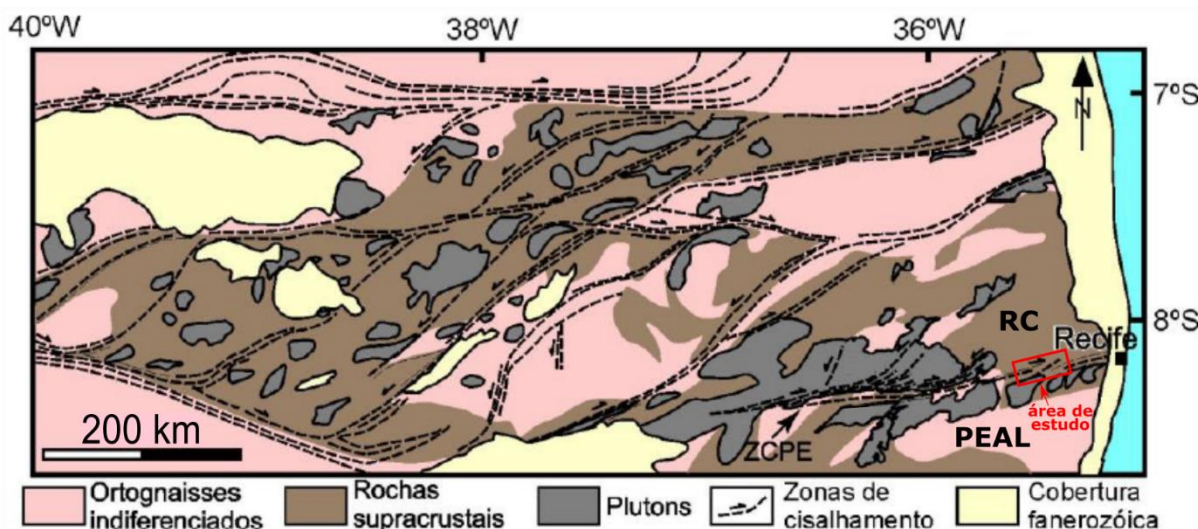
O Domínio Rio Capibaribe é a região tectônica do extremo leste da Subprovíncia Central (Figura 4), limitado a oeste e norte pelo domínio Alto Moxotó, e a leste pelas coberturas fanerozoicas da margem continental. Este domínio consiste de rochas do embasamento paleoproterozoico, rochas metavulcanossedimentares neoproterozoicas, dominadas por micaxistos e paragneisses, e plútons graníticos e sieníticos brasileiros (França et al., 2019; Neves et al. 2015; Teixeira, 2015).

O embasamento paleoproterozoico é representado por ortogneisses de composição granítica, sienítica e diorítica, com idades entre 2,2 e 2,0 Ga, principalmente, resultantes da formação da crosta e metamorfismo durante a orogênese Transamazônica (Neves et al., 2006, 2015; Teixeira, 2015).

As rochas supracrustais neoproterozoicas são representadas pelo complexo Surubim-Caroalina, composto por micaxistos e paragneisses granatíferos com sillimanita, intercalados com rochas calcissilicáticas e mármore, e com migmatizações locais (França et al., 2019; Neves et al., 2006, 2015). A idade de deposição máxima desse complexo é definida entre 680 e 642 Ma (Neves et al, 2006; 2009; Teixeira, 2015). Uma idade de 623 Ma obtida em um sobrecrecimento em zircão é interpretada como correspondendo ao pico do metamorfismo regional (zona da sillimanita, com anatexia local) (Neves et al, 2009). O metamorfismo do embasamento e do Complexo Surubim-Caroalina ocorreu em condições de alta temperatura, equivalentes à fácies anfibolito (Neves e Mariano, 1999; Neves et al., 2009; Teixeira, 2015).

As intrusões de plútons brasileiros e enxames de diques, de composição granítica, sienítica e diorítica, estão localmente associadas e/ou afetados por zonas de cisalhamento, formadas durante a transição da deformação compressional para a transcorrente (cedo a sin-tectônicos), no período de 590-560 Ma (Neves et al., 2006; Teixeira, 2015; Caxito et al., 2020).

Figura 4 - Mapa geológico simplificado das subprovíncias central e sul (porção nordeste) da Província Borborema



Fonte: Neves *et al.*, 2018.

ZCPE: Zona de Cisalhamento Pernambuco Leste; RC: Domínio Rio Capibaribe; PEAL: Domínio Pernambuco-Alagoas.

2.3 DOMÍNIO PERNAMBUCO-ALAGOAS

O domínio Pernambuco-Alagoas ocorre ao longo da parte norte da Subprovíncia Sul (Figura 4), limitado a oeste pelo domínio Riacho do Pontal e porção do Cráton do São Francisco, a sul, pelo domínio Sergipano e a leste, pelas coberturas fanerozoicas da margem continental. O PEAL consiste predominantemente de ortognaisses frequentemente migmatizados, unidades supracrustais e vários plútons e batólitos.

Na área de estudo, o embasamento deste domínio é representado pelo ortogneisse Vitória, com idade de 2,1 Ga, de composição granítica, com algumas intercalações de rochas máficas/intermediárias. A assinatura geoquímica varia entre o campo metaluminoso e o peraluminoso, com predominância deste último, e varia entre álcali-cálcica, cálcio-alcálica de alto potássio e shoshonítica (Teixeira, 2015).

Intrusões graníticas na parte oriental do domínio, intrudidas em ortognaisses migmatíticos, têm composições que variam de cálcio-alcálico de alto-K, shoshonítico, cálcio-alcálico, alcalino a peraluminoso (Silva Filho *et al.*, 2014). Os plútons brasileiros – Chã-Grande e Gravatá – que ocorrem na área de estudo são definidos como sin a tardi-transcorrentes, tendo estrutura interna tectônica e magmática que refletem esse controle de alojamento afetado por zonas de cisalhamento (Teixeira, 2011 e 2015; Neves *et al.*, 2019). O plúton Chã Grande é um granito a duas micas, com idade de 566 Ma e assinatura geoquímica peraluminosa (granito tipo S), como resultado de fusão parcial de rochas supracrustais. O plúton Gravatá é um biotita-anfibólio-granito, com idade de 560 Ma e assinatura geoquímica cálcio-alcálica e peraluminosa,

com grãos herdados de idade até 2064 Ma de fontes do embasamento, sugerindo retrabalhamento crustal com pouco adição de material juvenil.

2.4 ZONA DE CISALHAMENTO PERNAMBUCO LESTE

A Zona de Cisalhamento Pernambuco – Lineamento Pernambuco – é uma das muitas transcorrências dúcteis presentes na Província Borborema, considerada tradicionalmente como uma estrutura linear, com direção preferencial E-W, extensão em torno de 700 km (com propostas de continuidade para o continente Africano Ocidental) e rejeito direcional destal; interpretada por muitos autores como estrutura tectônica fundamental da orogenia Brasileira/Pan-africana, (Ebert, H., 1964; Jardim de Sá et al, 1995). A Zona de Cisalhamento Pernambuco possui forma sinuosa, com seus ramos leste e oeste com direções aproximadas N70-80E e N70W, respectivamente, separados pela Bacia Jatobá (Neves e Mariano, 1999). Posteriormente, Vauchez & Edygio-Silva (1992) e Neves & Vauchez (1995) sugeriram que estes dois segmentos são desconectados um do outro, como ramos independentes formando as zonas de cisalhamento Pernambuco Leste (ZCPE) e Oeste (ZCPW).

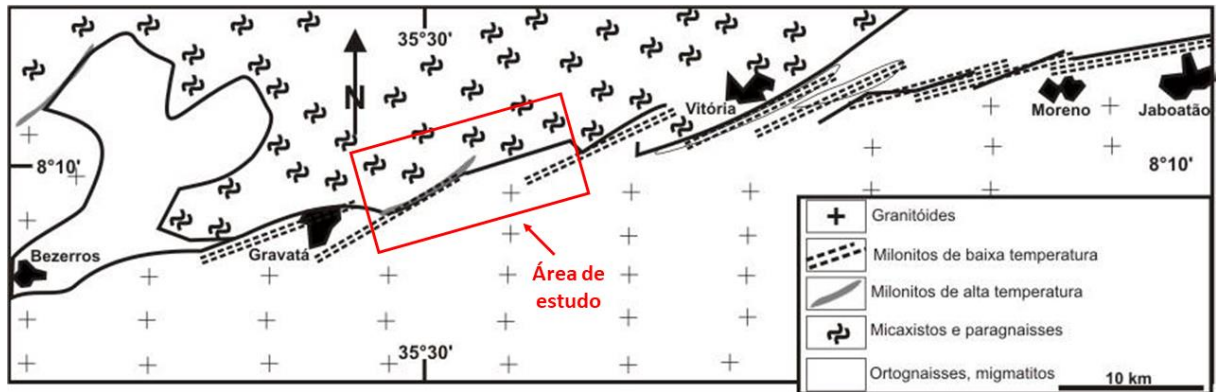
O período de atividade da ZCPE é estabelecido indiretamente pela idade de plútons e afetados por ela, assim, a idade principal é compreendida entre 590 Ma, associada ao batólito cedo-transcorrente Caruaru-Acoverde, e 560 Ma, pertinente aos plútons sintranscorrente Gravatá e Chã Grande (Teixeira, 2015; Neves et al, 2018 e 2019; França et al, 2019). A ZCPE é segmentada em várias faixas miloníticas, sendo composta por duas faixas de alta temperatura e várias de baixa temperatura, que são descontínuas lateralmente e transversalmente. As faixas miloníticas de alta temperatura estão localizados na borda sul do batólito Caruaru-Acoverde, com direção principal E-W, caracterizados por intensa deformação dúctil na fácies anfibólito. Para leste, encontram-se as faixas de baixa temperatura, deformadas na fácies xisto verde, ocorrendo de forma paralela às de alta temperatura, com geometria de recobrimento à direita (Figura 5), separadas destas por porções de rochas metamórficas (orto- e para derivadas) pouco deformadas por cisalhamento de rejeito direcional (Neves e Mariano, 1999; Teixeira, 2015).

Na área de estudo, a ZCPE constitui-se de protomilonitos a ultramilonitos desenvolvidos essencialmente sobre protólitos graníticos variados. A norte desta predominam rochas metapelíticas do Complexo Surubim-Caroalina e, ao sul, ortognaisses graníticos e granitoides (Neves e Mariano, 1999; Neves et al, 2018).

Um estudo termodinâmico recente (Castellan et al, 2020) aponta que as condições de deformação dos milonitos/ultramilonitos de mais alta temperatura e baixa temperatura ocorreram em torno de 530°C e 420°C, respectivamente. Essas observações sugerem que a

ZCPE registra acomodações distintas de deformação, marcada por um decréscimo de temperatura dos setores oeste para leste.

Figura 5 - Mapa esquemático exibindo a geometria de recobrimento à direita para a ZCPE



Fonte: Neves; Mariano, 1999; Teixeira, 2015.

3 GEOFÍSICA E SENSORIAMENTO REMOTO

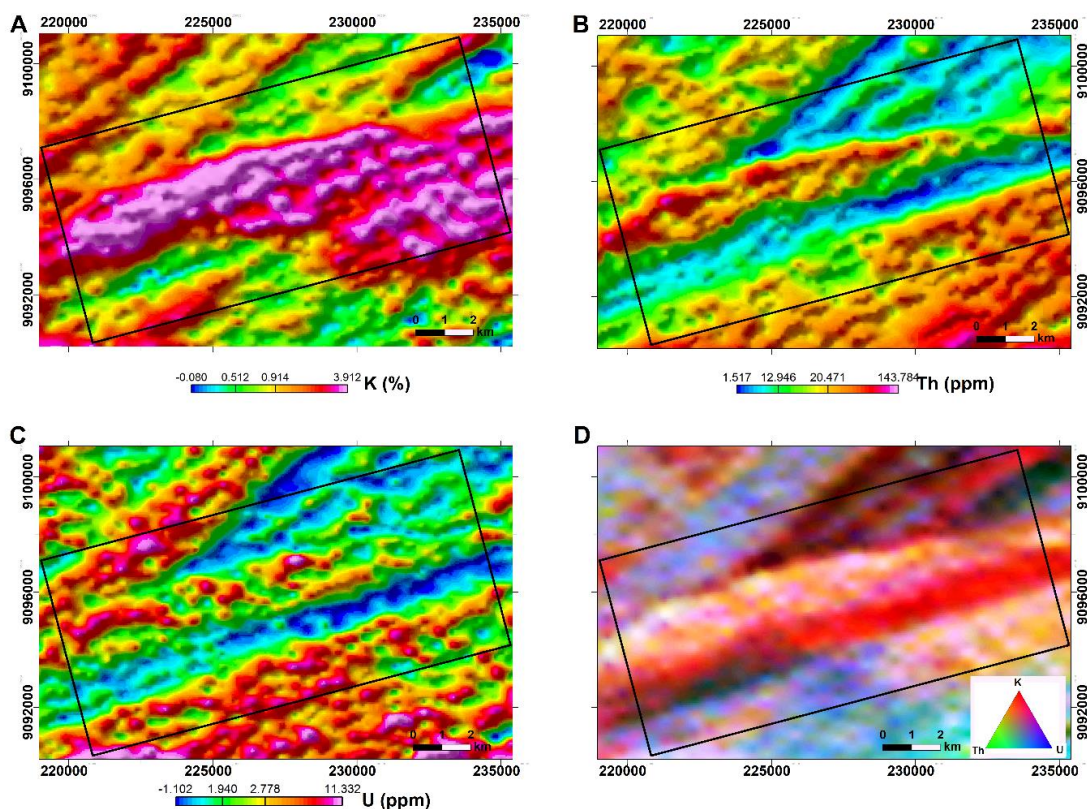
As imagens aerogeofísicas e de sensoriamento remoto foram utilizadas para análise estrutural da área de estudo, das quais foram extraídos lineamentos estruturais e topográficos, curvas de nível, entre outros, para auxiliar a confecção do mapa geológico-estrutural. Neste capítulo são apresentados esses dados discutidos para cada tipo de imagem.

3.1 AEROGAMAESPECTROMETRIA

A gamaespectrometria consiste em um método geofísico que mede a radiação gama (γ) de elementos radiométricos que emana das rochas, sedimentos e solos considerando porções rasas (~ 35 cm) (Silva e Sampaio, 2017). Este método permite medir a contagem total da radiação γ , que é obtida pela medida de todos os raios gama dentro do espectro de energia de 0,41 a 2,81 MeV, e discriminar os níveis de energia de isótopos radioativos (K, Th, U) que são utilizados para gerar mapas representativos de acordo com a concentração de cada um deles na superfície, além de mapas ternários (Ribeiro, 2013; Silva e Sampaio, 2017).

Os mapas dos canais individuais de K, Th e U, além do mapa ternário de K, Th e U no sistema de cores RGB da área de estudo estão mostrados na Figura 6.

Figura 6 - Imagens obtidas por aerogamaespectrometria da área de estudo



Fonte: Projeto Pernambuco-Paraíba, CPRM, 2009.

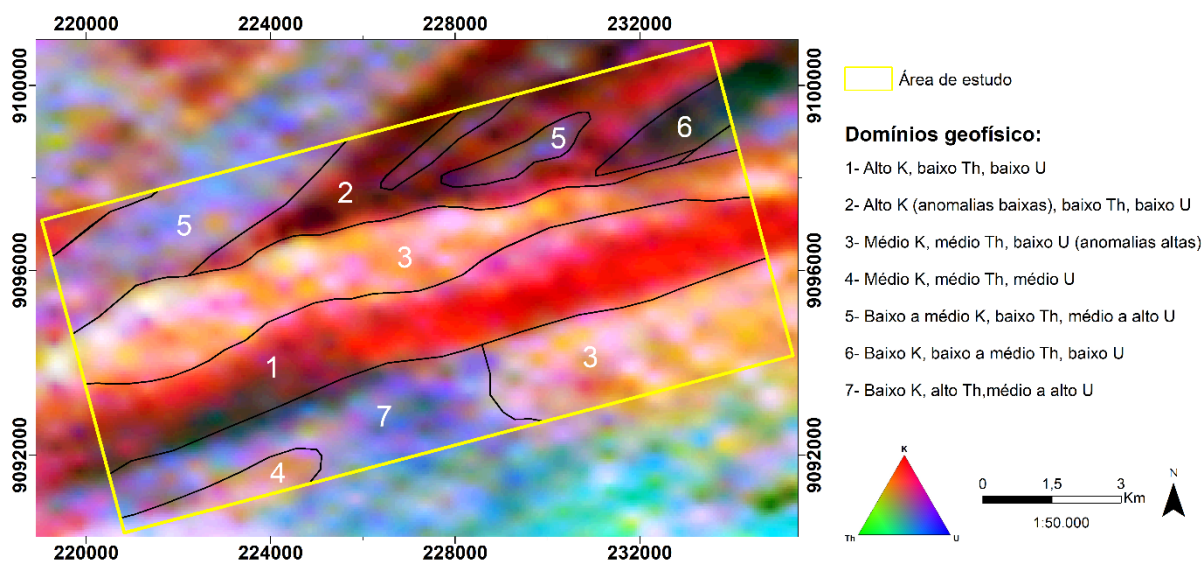
Canais individuais: K (A), Th (B) e U (C); Mapa ternário K, Th e U, no sistema de cores RGB (D).

3.1.1 Interpretação de dados aerogamaespectrométricos

A partir da interpretação qualitativa dos mapas da Figura 6, foram discriminados 7 domínios gamaespectrométricos. O domínio 1 é caracterizado por alto valor de K e baixo de Th e U, ocorre na porção central e a noroeste da área. O domínio 2, no setor norte, é marcado por valor baixo de Th e U e uma grande variação nos valores de K, de baixo a alto, que causa a variação de cor para preto quando os três elementos possuem valores baixos; entretanto, o valor alto predomina. O domínio 3 ocorre na porção central da área, e possui valor médio de K e Th, e variação de baixo a alto de U, que causa a variação de cor para branco quando os três elementos possuem valores médios similares. O domínio 4 possui valor médio para K, Th e U e ocorre em uma pequena porção no sudoeste da área. O domínio 5 é marcado por valor baixo a médios de K, baixo de Th e médio a alto de U, ocorre em todo setor norte da área. O domínio 6 é uma pequena lente a nordeste da área, marcada por valor baixo de K, baixo a médio de Th e baixo de U. O domínio 7 ocorre no setor sul, marcado por valor baixo de K, alto de Th e médio a alto de U.

Os domínios 1 e 3 representam a ZCPE, assim, os domínios a norte representam a variação litológica das faixas metassedimentares, do Complexo Surubim-Caroalina, e a sul, o ortogneisse Vitória e plútons brasileiros (Gravatá e Chã Grande). Com base no comportamento acima descrito foi elaborado o mapa gamaespectrométrico da área de estudo (Figura 7).

Figura 7 - Domínios gamaespectrométricos individualizados na área de estudo



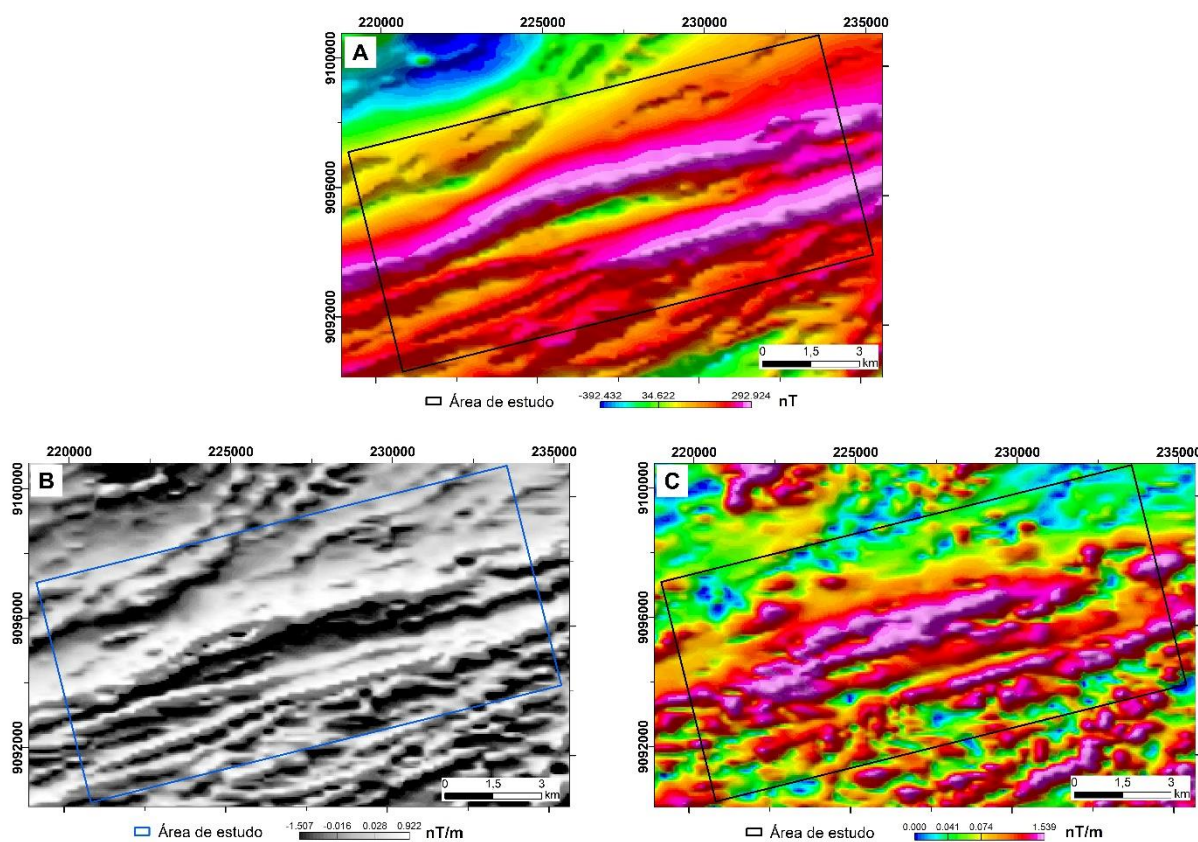
Fonte: O Autor, 2020.

3.2 AEROMAGNETOMETRIA

O magnetismo das rochas depende do conteúdo mineral magnético presente, da influência do atual campo magnético, e da remanescência (associação à história de magnetização da rocha, sobretudo durante o resfriamento da mesma) (Telford et al, 1990). Assim, a magnetometria consiste em um método geofísico que se baseia nas medidas de variações do campo magnético da Terra, geradas por diferenças de susceptibilidade magnética entre as rochas em superfície e/ou em profundidade. Os dados do campo magnético anômalo podem ser processados de forma a realçar corpos e estruturas geológicas caracterizadas por contraste de conteúdo magnético (Telford et al. 1990), através dos do uso de determinados filtros aplicados no processamento.

Os mapas mais comuns e que foram utilizados neste trabalho são o campo magnético anômalo (ASA) e os filtros da primeira derivada vertical (DZ) e a amplitude do sinal analítico (ASA) (Figura 8).

Figura 8 - Imagens obtidas por aeromagnetometria da área de estudo



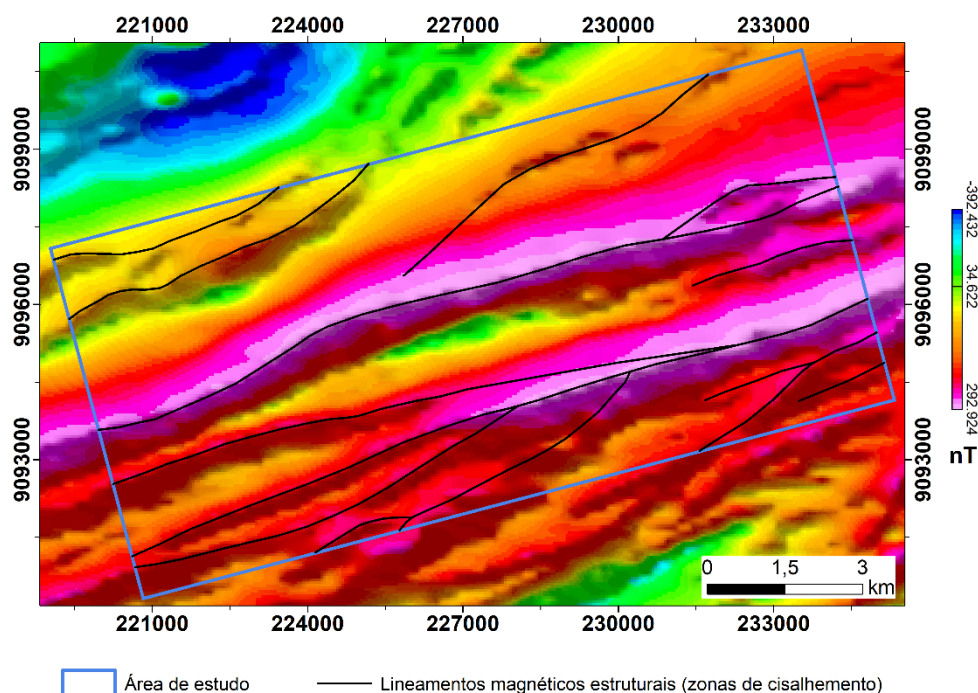
Fonte: Projeto Pernambuco-Paraíba, CPRM, 2009.

A – mapa do campo magnético anômalo; B – mapa de primeira derivada vertical; C – mapa de amplitude de sinal analítico.

3.2.1 Interpretação de dados aeromagnetométricos

A imagem de campo magnético anômalo evidencia lineamentos contínuos que podem ser correlacionados com as zonas de cisalhamento presentes na área de estudo, indicando um padrão anastomosado dessa estrutura em escala regional (Figura 9).

Figura 9 - Padrão anastomosado dos lineamentos magnéticos estruturais interpretados a partir da imagem do campo magnético anômalo



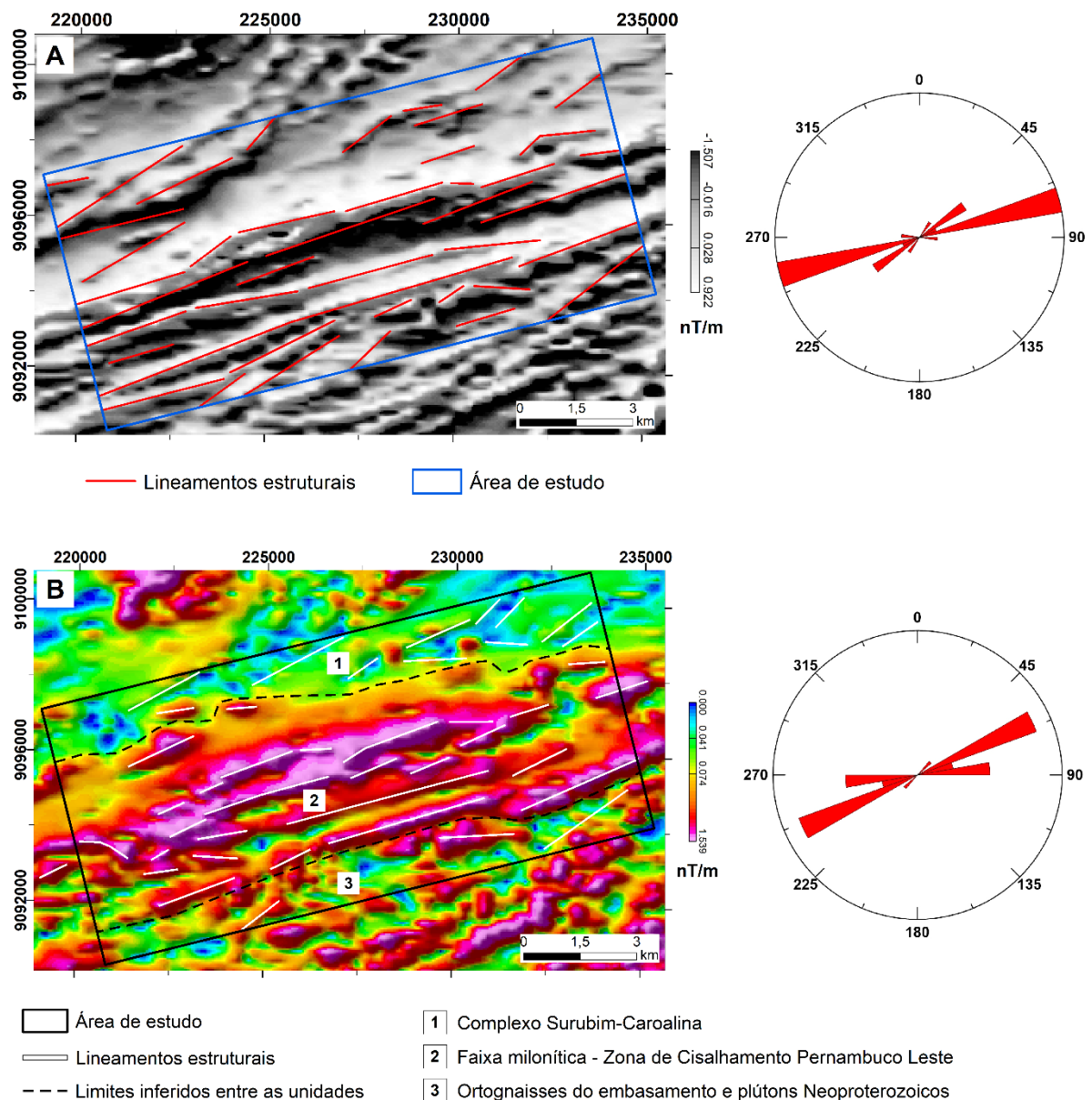
Fonte: O Autor, 2020.

A imagem da primeira derivada vertical (Figura 10A) evidencia lineamentos magnéticos com direções preferências ENE, que estão associados à deformação transcorrente da ZCPE, e alguns lineamentos menos expressivos, de direção NE, correspondentes as faixas metassedimentares a norte e embasamento/plútons a sul, que foram truncados pela ZCPE.

A imagem de amplitude de sinal analítico (Figura 10B) não possui resolução suficiente para inferir contatos litológicos, entretanto, possibilitou a diferenciação de três zonas que podem ser correlacionadas com unidades litológicas de acordo com a literatura da geologia regional. A zona 1, a norte, está associada ao complexo Surubim-Caroalina, caracterizado por baixos gradientes magnéticos. A região central compreende a zona 2 que corresponde à faixa milonítica da ZCPE, caracterizada por respostas de gradientes magnéticos de valores intermediários na borda norte e por maiores valores de gradientes magnéticos na porção central, o que pode estar associado com a variação da textura de deformação das rochas miloníticas. A zona 3, a sul, pode ser correlacionada aos ortognaisses do embasamento e plútons graníticos

neoproterozoicos, marcados por intercalação de altos e baixos gradientes magnéticos. Vale ressaltar que, assim como na imagem de derivada vertical, os lineamentos estruturais magnéticos com direções preferencias ENE associados a deformação transcorrente da ZCPE estão bem marcados.

Figura 10 – A: Lineamentos magnéticos estruturais interpretados a partir da imagem da primeira derivada vertical; B – Lineamentos magnéticos estruturais e zonas litológicas interpretados a partir da imagem da amplitude de sinal analítico



Fonte: O Autor, 2020.

Os diagramas de roseta, à direita, indicam a direção preferencial ENE-WSW dos lineamentos das suas respectivas imagens à esquerda.

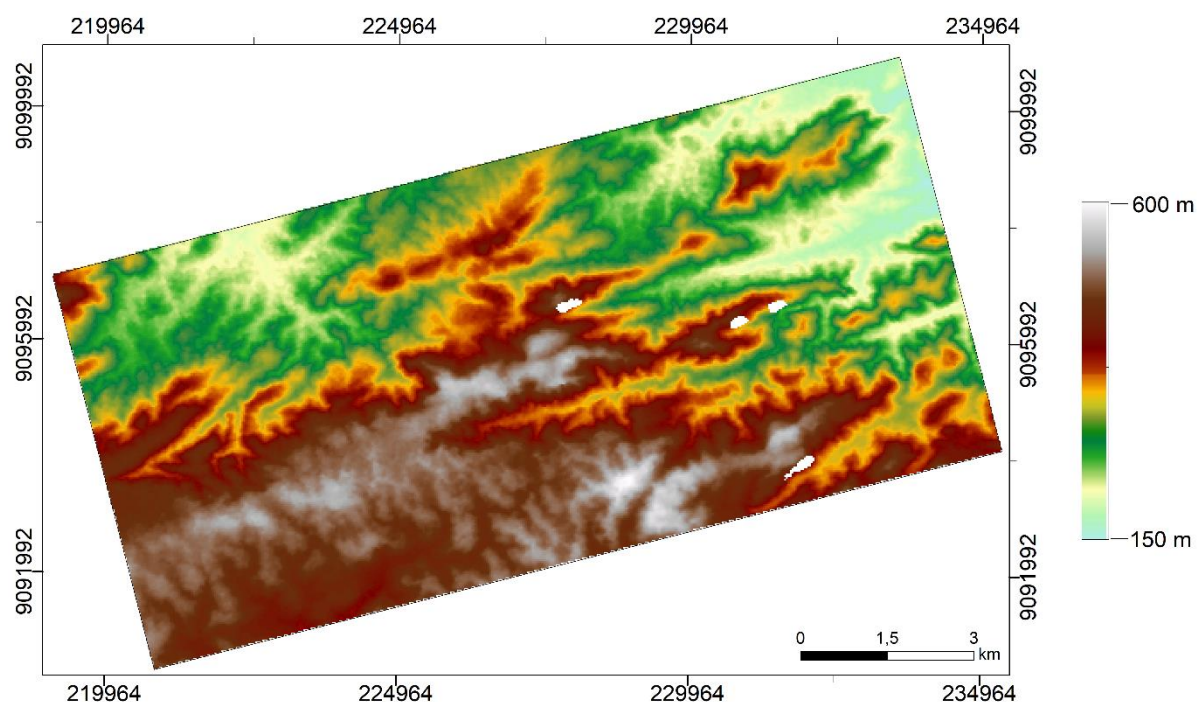
3.3 SENSORIAMENTO REMOTO

O sensoriamento remoto compreende o estudo da interação da radiação eletromagnética com alvos ou materiais terrestres, ou seja, a interação da radiação emitida pelo Sol e o subsequente registro da energia refletida pelos alvos, abrangendo a faixa espectral do visível às micro-ondas, que possibilitam a discriminação de cada material superficial imageado (Drury, 2001). Assim, as imagens óticas e de modelos digitais de elevação permitem a visão sinótica da superfície terrestre em várias direções, e, em consequência a interpretação de corpos e estruturas geológicas, auxiliando a etapa de cartografia geológica (e.g., Madrucci et al., 2003).

3.3.1 Interpretação de Imagens

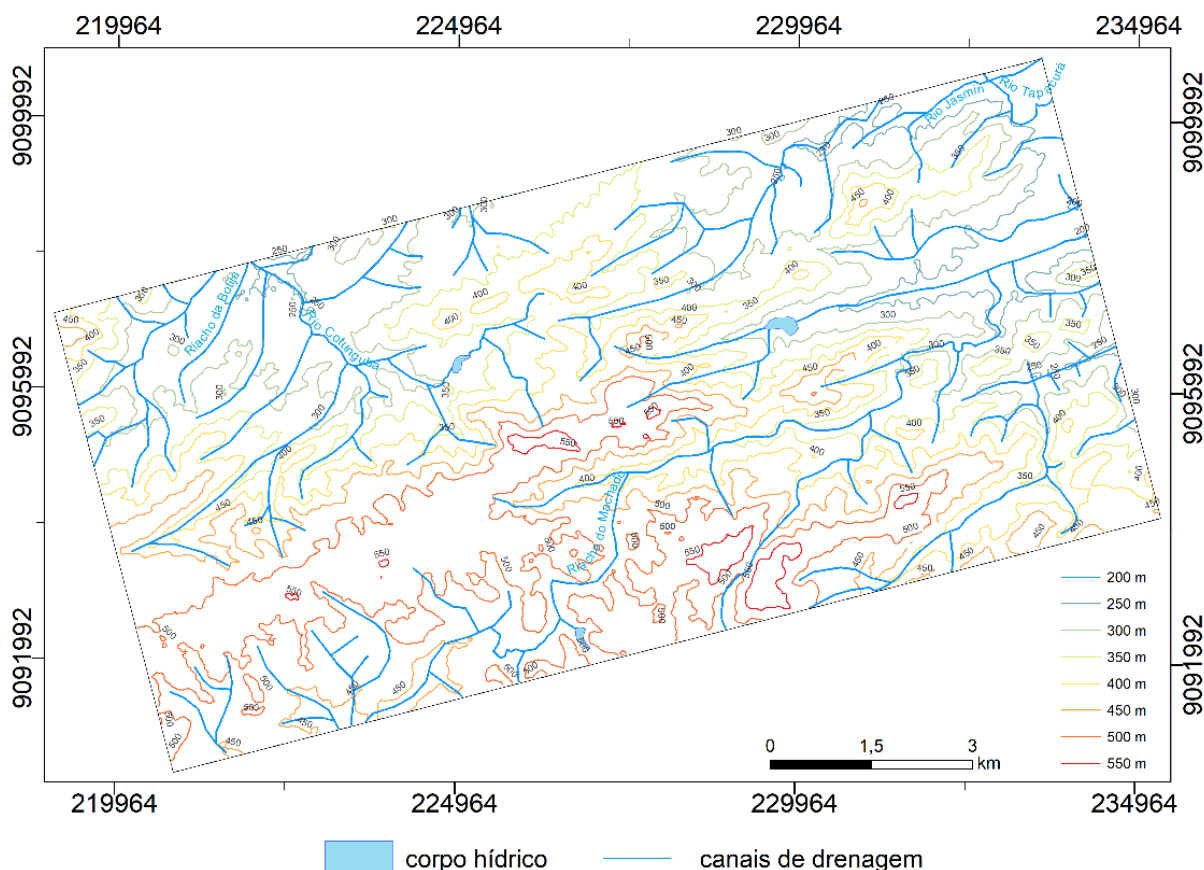
A interpretação da rede de drenagem e geração de curvas de nível foi realizada através de imagem MDE (SRTM), com resolução espacial de 30m (Figura 11). A região apresenta um padrão de drenagem de densidade média a alta do tipo dendrítico, ramificações tridirecionais; os canais principais possuem extensões na ordem de quilômetros (até 9 km), formas retilíneas, e direção preferencial ENE-WSW. Na porção noroeste, possui variação na direção NW-SE e NE-SW (Figura 12); sendo similares às direções dos lineamentos magnéticos e estruturais.

Figura 11: Imagem MDE (SRTM), com resolução espacial de 30m, da área de estudo utilizada para interpretação de rede de drenagem e estruturas



Fonte: Banco de dados da USGS, 2020.

Figura 12: Mapa de rede de drenagem interpretada e curvas de nível da região na área de estudo

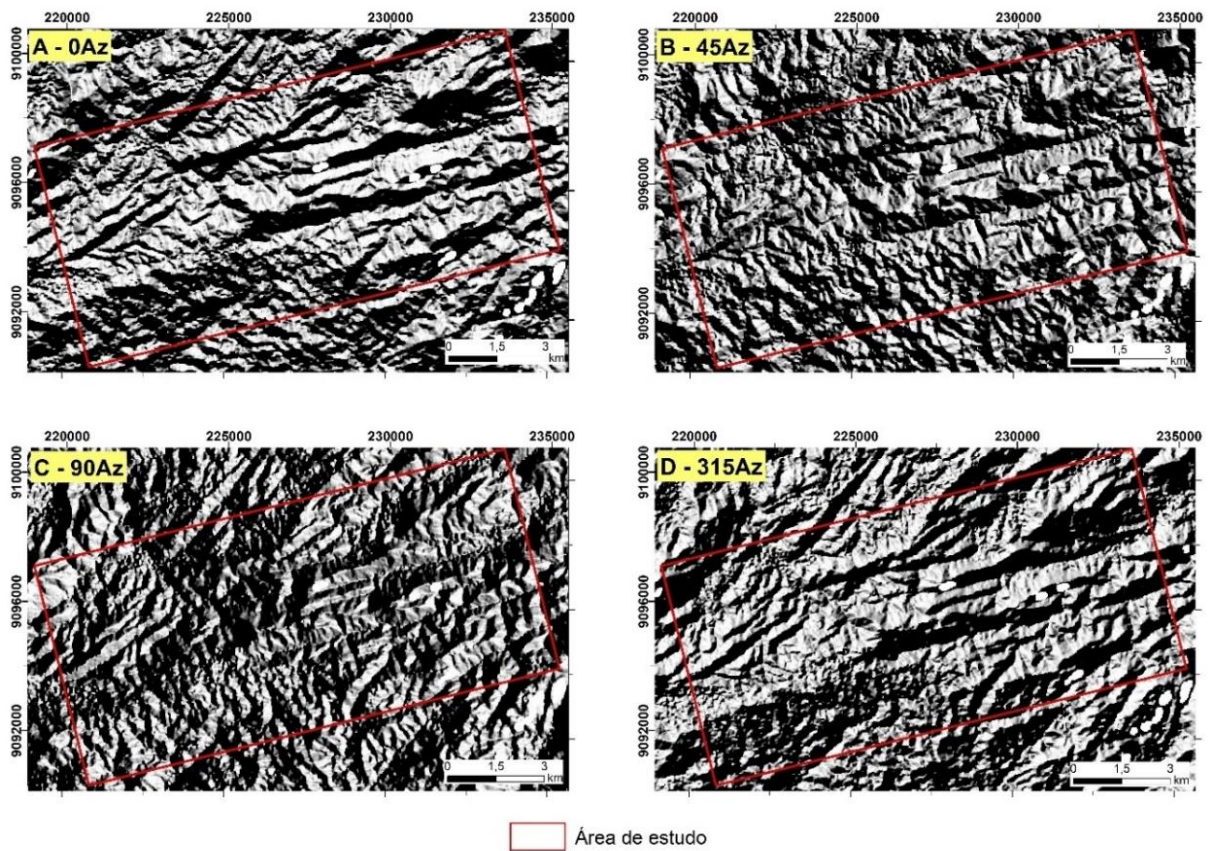


Fonte: O Autor, 2020.

Visando a interpretação de lineamentos estruturais, foram geradas quatro imagens MDE a partir de filtros de efeito de iluminação nas direções 0Az, 45Az, 90Az e 315Az (Figura 13). Através da interpretação destas imagens individualmente, foram interpretados lineamentos que foram posteriormente compilados e calculados os azimutes de forma integral. Ao todo, portanto, foram identificados 490 lineamentos dentro da área de estudo. O diagrama de roseta das direções dos lineamentos extraídos indica que há uma predominância na direção NE-SW e NW-SE, e alguns menos expressivos na direção E-W e N-S (Figura 14).

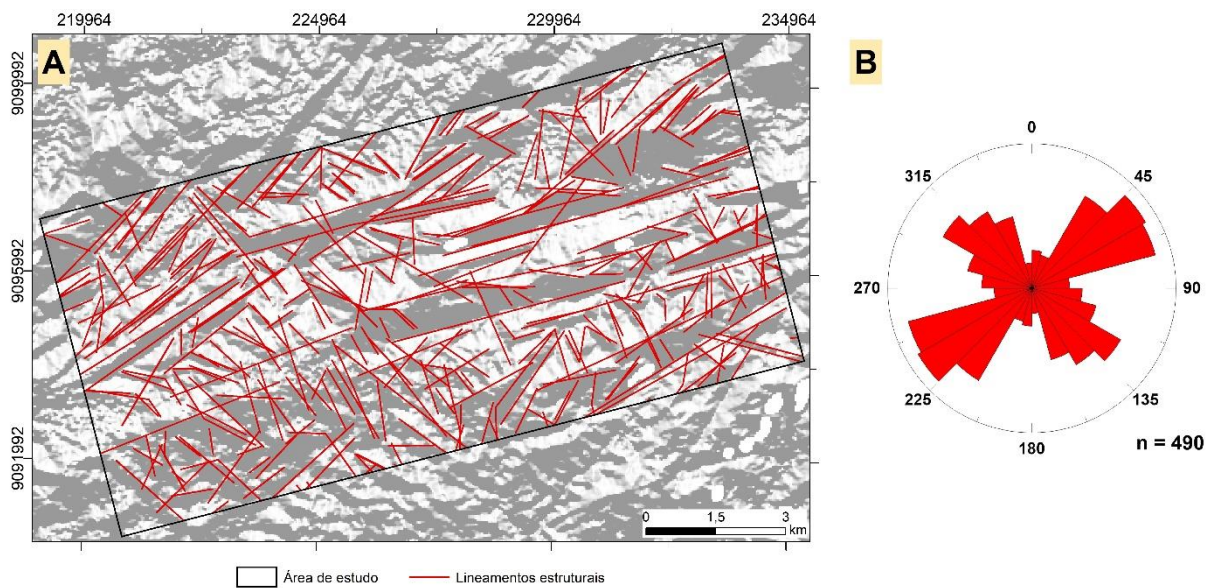
Os lineamentos de direção NE-SW são os de maior extensão e são concordantes com os lineamentos magnéticos identificados. Possuem relação com a deformação transcorrente da ZCPE de direção preferencial ENE-WSW; devido a sua geometria ser sinuosa, localmente pode haver variação das estruturas para uma direção acentuada a NE.

Figura 13: Imagens MDE com efeitos de iluminações nas direções 0Az (A), 45Az (B), 90Az (C) e 315Az (D), utilizadas para interpretação de lineamentos estruturais



Fonte: O Autor, 2020.

Figura 14: Lineamentos identificados sobreposto ao MDE de iluminação 0Az (A), com as direções preferenciais interpretadas em diagrama de roseta (B)

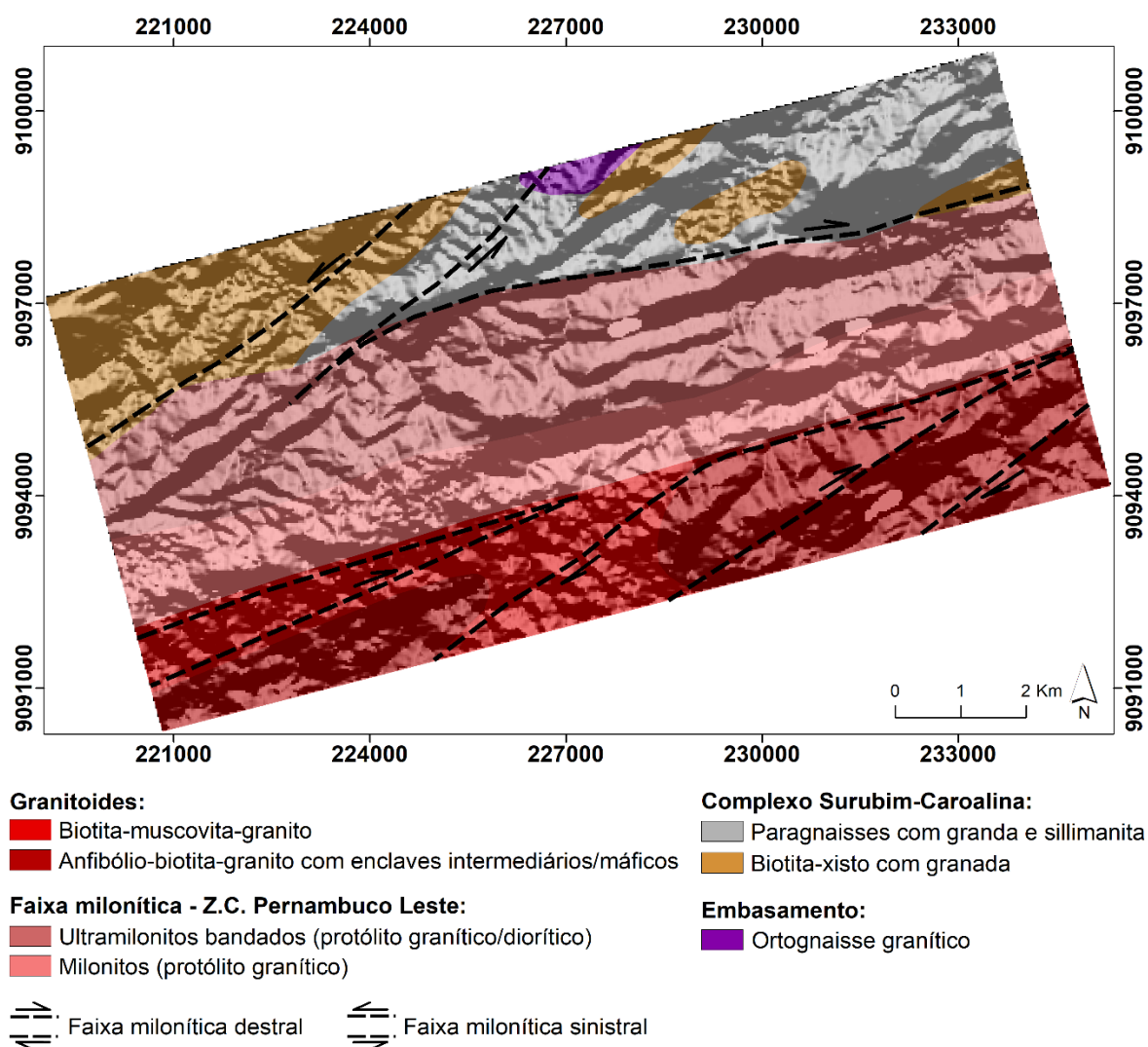


Fonte: O Autor, 2020.

4 GEOLOGIA LOCAL

A área de estudo apresenta três unidades litológicas distintas: rochas metassedimentares, faixa milonítica e plútons graníticos. As rochas metassedimentares ocorrem na porção norte do mapa. São compostas por paragneisses quartzo-feldspáticas com granada e sillimanita, e micaxistos com granada, correlacionadas ao Complexo Surubim-Caroalina. A faixa milonítica (ZCPE) ocorre na região central, possui direção ENE-WSW, e consiste de rochas que gradam de milonitos a ultramilonitos bandados, com variação composicional de granítica a diorítica, principalmente, mais raramente, metassedimentar. Os plútons graníticos ocorrem na porção sul da área, apresentam deformação associada ao processo de transcorrência destal, e são divididos em dois tipos litológicos: (1) biotita-anfibólio-granito milonitizado, associado a corpos máficos; (2) biotita-muscovita-granito, com predominância de textura isotrópica (Figura 15).

Figura 15: Mapa geológico-estrutural simplificado sobreposto ao MDE



Fonte: O Autor, 2020.

4.1 COMPLEXO SURUBIM-CAROALINA

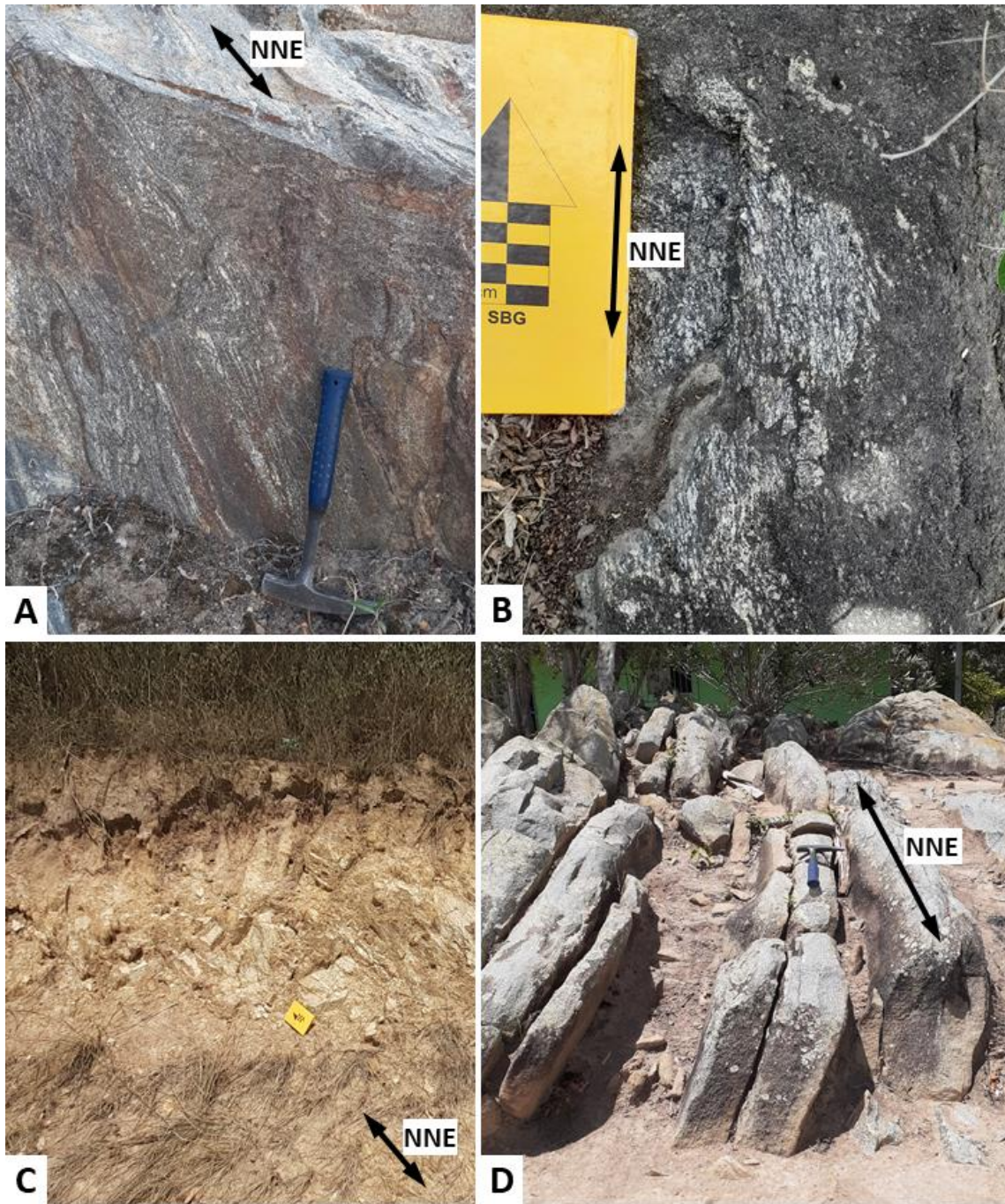
Essa unidade está localizada na porção norte da área de estudo, limitada ao sul pela faixa de rochas miloníticas da ZCPE. São corpos alongados na direção NE-SW, compostos por rochas metassedimentares que variam de paragnaisses quartzo-feldspáticos a mica-xistos, correlacionados ao Complexo Surubim-Caroalina. Processo de intemperismo avançado é característico na unidade, sendo os paragnaisses o tipo litológico melhor preservado. Diante disso, os aspectos de solo tornam-se uma contribuição importante para a diferenciação entre as litologias do complexo.

As porções gnáissicas possuem composição quartzo-feldspática predominante, com biotita abundante e presença de granada e sillimanita de forma pontual. Apresentam coloração cinza escura a clara, granulação média a grossa. O bandamento gnáissico é milimétrico a centimétrico, definido por níveis félsicos (ricos em quartzo e feldspato) e máficos (ricos em micas com anfibólio) (Figura 16A e B). O solo residual (saprólito) dos gnaisses possui coloração clara e pouco avermelhada, granulação grossa, e composição quartzo-feldspática. Localmente, são observados com boa preservação das estruturas da rocha-mãe (Figura 16C).

As porções de xisto possuem composição semelhantes às gnáissicas. Se diferenciam pela abundância de biotita, que caracteriza a xistosidade e pela menor frequência de granada. Possuem granulação média e apresentam coloração cinza a marrom acinzentado, devido ao estado de alteração (Figura 17A). O solo residual nas porções de xisto apresenta granulação média, coloração marrom acinzentado a avermelhado (Figura 17B).

Comumente essa unidade litológica encontra-se milonitizadas, por efeito da deformação transcorrente regional, que gerou zonas de cisalhamentos subordinadas à ZCPE. Além disso, veios de pegmatito são frequentemente encontrados em ambas variações litológicas. Ainda, ocorre na porção norte desta unidade um afloramento que possivelmente representa uma janela do embasamento na área, trata-se de um ortogneisse cinza, granulação média a grossa, composição quartzo-feldspática predominante, com minerais acessórios de biotita, muscovita e clorita, possui foliação verticalizada concordante com a unidade (Figura 16D).

Figura 16: Fotografias dos afloramentos dos paragneisses do Complexo Surubim-Caroalina



Fonte: O Autor, 2020.

A – Paragneisses, evidenciando a foliação de alto ângulo, direção NNE (LFM29). B – Paragneisses ilustrando o bandamento gnáissico de espessura milimétrica (LFM38). C – Saprolito do paragneisses (LFM32). D – Ortogneisse do embasamento aflorante no Complexo Surubim-Caroalina, com alto ângulo de mergulho (LFM34).

Figura 17: Fotografias dos afloramentos dos xistos do Complexo Surubim-Caroolina



Fonte: O Autor, 2020.

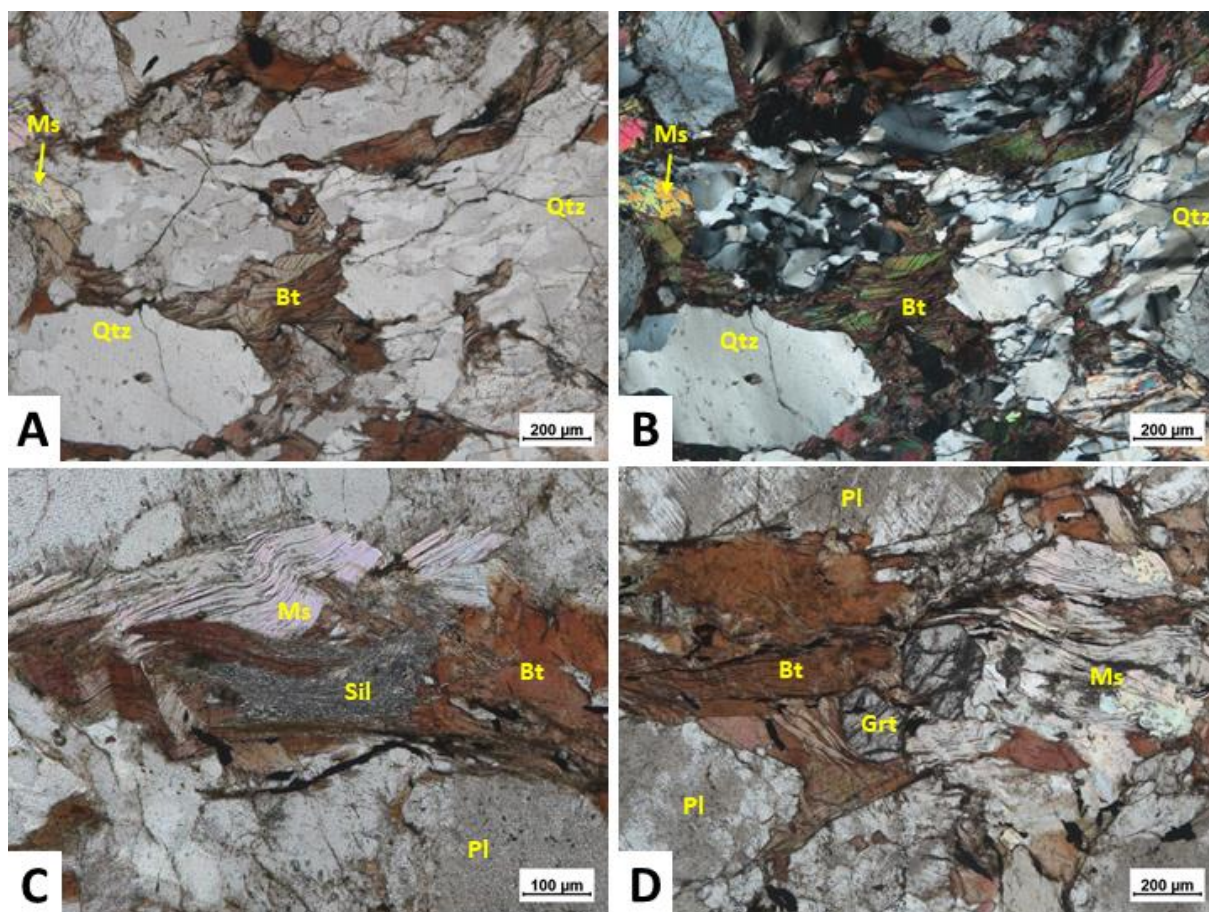
A – Xisto em afloramento no plano horizontal, ilustrando a foliação de direção NNE-SSW (LFM41). B – Solo residual da porção xistosa, com coloração marrom avermelhada (LFM37).

Petrograficamente, os paragneisses são compostos essencialmente por quartzo (25-35%), plagioclásio ($\pm 25\%$), biotita (15-25%), e em menor proporção por feldspato potássico ($\pm 5\%$), muscovita ($\pm 5\%$), granada ($\pm 2\%$), sillimanita ($\pm 1\%$), opacos ($\pm 2\%$). Possuem granulação média a grossa e apresentam microestrutura lepidogranoblástica, formada por níveis descontínuos de micas e de quartzo-feldspato (Figura 18A e B), podendo também apresentar microestrutura porfiroblástica.

O quartzo ocorre de forma alongada, contato interlobado, e mecanismos de deformação intracristalina, como extinção ondulante, bandas de deformação e formação de subgrão. Nas porções milonitizadas apresenta, adicionalmente, recristalização por rotação de subgrão (SGR) (Figura 18B). Os feldspatos ocorrem com forma xenoblástica a subidioblástica, dispostos na

matriz e localmente como porfiroblastos. Apresenta deformação caracterizada por extinção ondulante e curvamento de grãos. No plagioclásio, ainda ocorre deformação de curvamento de geminação e intensa sericitização (Figura 18C e D). As micas ocorrem com forma subidioblástica a idioblástica. A biotita possui coloração castanho avermelhada e a muscovita é incolor. Apresenta dobras (*kink band*) e *mica fish* nas porções milonitizadas (Figura 18B e C). A ocorrência de granada e sillimanita é restrita. A sillimanita ocorre na forma fibrosa (fibrolita) associada aos níveis micáceos (Figura 18C). A granada ocorre com forma subidioblástica a idioblástica (Figura 18D).

Figura 18: Fotomicrografia das lâminas delgadas das rochas metassedimentares com textura lepidogranoblástica (LFM38)



Fonte: O Autor, 2020.

A – Visão geral do paragneisse ilustrando a microestrutura lepidogranoblástica definida pelos níveis quartzo-feldspáticos e micáceos. B – Foliação gnáissica com milonitização, ilustrando os mecanismos de deformação do quartzo (extinção ondulante e bandas de deformação) e recrystalização por SGR; e a clivagem de crenulação na biotita. C – Sillimanita fibrosa (fibrolita) associada aos níveis micáceos, a dobra na muscovita e intensa sericitização do plagioclásio. D – Granada subidioblástica a idioblástica, associada aos níveis micáceos, a clivagem de crenulação na biotita e o plagioclásio sericitizado. Luz polarizada cruzada: A e B; luz polarizada plana: C e D.

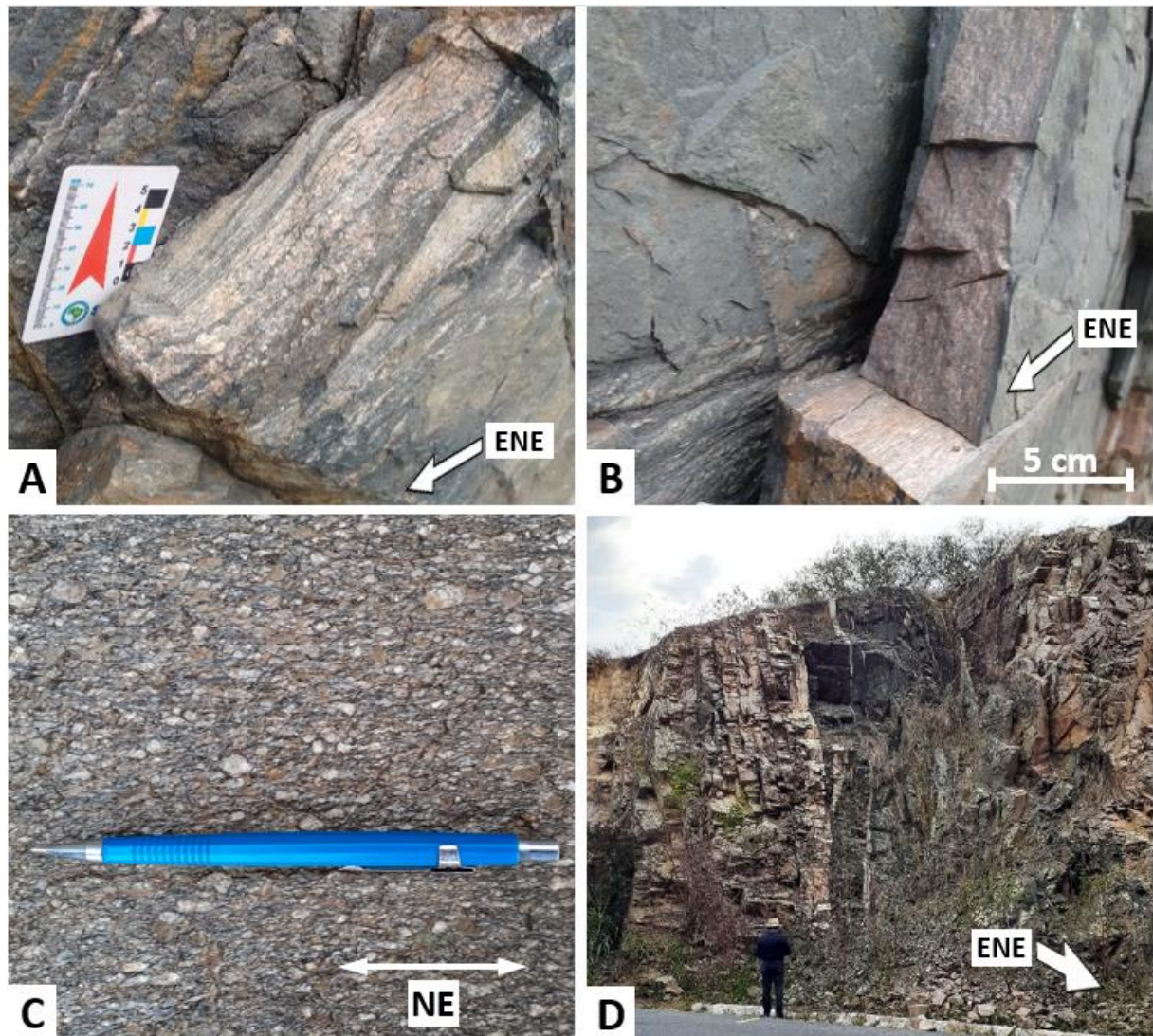
4.2 FAIXA MILONÍTICA

A região central da área é composta pelas rochas miloníticas que caracterizam a Zona de Cisalhamento Pernambuco Leste. Esta faixa possui em média 3 km de largura e uma foliação de alto ângulo (subvertical), com direção preferencial ENE. Através dos afloramentos observados no mapeamento, associado com a interpretação das imagens aerogeofísicas, é possível uma subdivisão da unidade em duas porções, baseada na composição e deformação: a norte, ultramilonitos bandados, e a sul, milonitos graníticos.

A porção norte é caracterizada pela predominância de ultramilonitos bandados, cuja composição predominante varia de granítica a diorítica. Os bandamentos variam de camadas milimétricas a decimétricas, de composição félsica e máfica. As félsicas são ricas em fitas de quartzo e feldspato, granulação muito fina a média, por vezes porfiroclástica, coloração rósea avermelhada; e as máficas são de granulação muito fina a afanítica, coloração escura esverdeada (Figuras 19A e B).

De forma mais rara, também ocorre milonitos com textura mais homogênea, de coloração cinza clara e marrom clara. Apresentam granulação fina a média e textura porfiroclástica com sigmoides de feldspato simétricos e assimétricos (Figura 19C). Além disso, intrusões de diques máficos são observadas. Os diques ocorrem milonitizados e dispostos concordantemente à foliação milonítica, sugerindo que são sintranscorrentes (Figura 19D).

Figura 19: Fotografias dos afloramentos dos milonitos/ultramilonitos bandados (porção norte da ZCPE)



Fonte: O Autor, 2020.

A – Milonito a ultramilonito bandado, com bandamento milimétrico a centimétrico, e composição granítica e diorítica (SR02). B – Ultramilonito bandado, com bandamento de espessura decimétrica e composição granítica e diorítica (SR01). C – Milonito granítico, ilustrando forte foliação, textura porfirítica com sigmoides de feldspato simétricos e assimétricos (LFM46). D – Ultramilonito bandado de composição variada ilustrando diques máficos milonitizados (≥ 1 m), concordantes à transcorrência da ZCPE (LFM15).

Petrograficamente, os ultramilonitos bandados, de forma geral, são compostos essencialmente por quartzo (30 - 35%), feldspato potássico ($\pm 25\%$), plagioclásio ($\pm 20\%$), biotita ($\pm 15\%$), e anfibólio, epidoto, clinozoisita, muscovita, titanita, apatita e minerais opacos como acessórios ($\pm 5\%$). A foliação ultramilonítica bandada é bem definida pela intercalação de bandas félsicas composta por quartzo recristalizado ($> 85\%$) e máficas compostas por biotita $\pm$ epidoto $\pm$ plagioclásio, de granulação muito fina; porfiroclastos de feldspatos ocorrem imersos na matriz bandada (Figura 20A e B).

O quartzo apresenta forma geralmente alongada, que define uma trama de foliação oblíqua indicando cinemática destal. Localmente, é observada foliação oblíqua com cinemática sinistral (Figura 20F). A recrystalização é avançada e predominantemente por processo de *bulging* (BLG) (Figura 20A e D). Mecanismos de deformação são pouco observados no quartzo devido a granulação fina, contudo, extinção ondulante pode ser observada em cristais maiores.

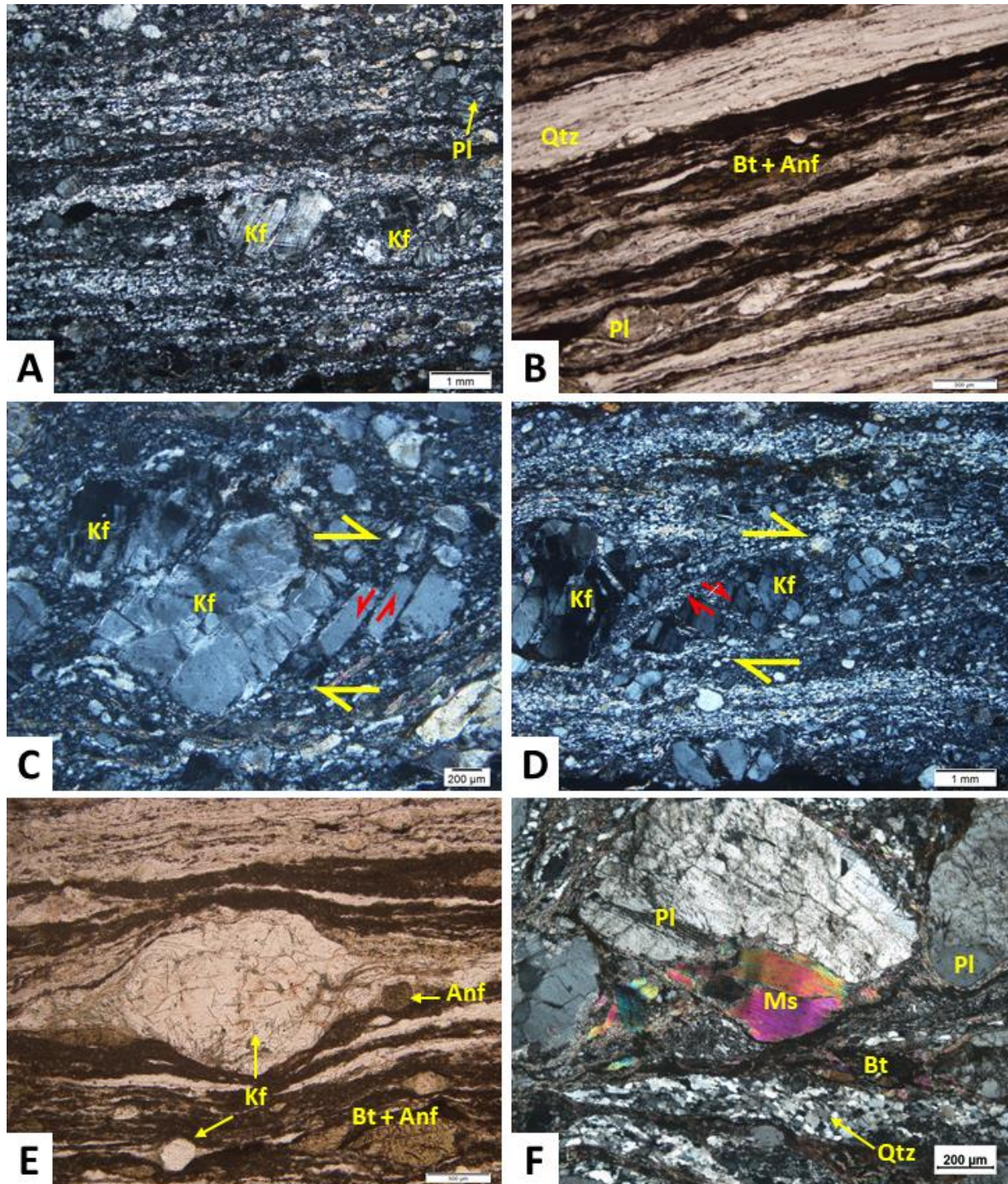
Os feldspatos (plagioclásio e microclina), geralmente, são porfiroclastos fragmentados e pouco deformados plasticamente. Os porfiroclastos fragmentados apresentam microfalhas antitéticas e sintéticas ao cisalhamento destal, e redução de grão pelo intenso fraturamento, fazendo com que se misture na matriz fina recrystalizada de quartzo, o que pode tornar difícil a distinção entre eles (Figura 20C e D). As fraturas localmente são preenchidas por epidoto e quartzo. Os porfiroclastos sigmoidais, que ocorrem localmente, apresentam forma simétrica majoritariamente, definida pelas caudas de recrystalização (Figura 20E). Na variação de milonitos mais homogêneos de textura porfiroclástica, o plagioclásio ocorre como sigmoides assimétricos, mas ainda com a forma tabular preservada, o que evidencia a origem ígnea do protólito (Figura 20F).

A biotita ocorre estirada e recrystalizada, coloração amarronzada, e formam fitas micáceas contínuas e descontínuas (Figura 20B). Localmente apresenta microestrutura *mica fish*. A muscovita também ocorre estirada e recrystalizada; como resultado da sericitização do plagioclásio e localmente como muscovita primária, esta geralmente associada ao plagioclásio, sendo envolta parcialmente pelo mesmo e com contato reto entre eles, o que evidencia a origem magmática; apresenta microestrutura *mica fish* devido à deformação (Figura 20F).

Os anfibólios ocorrem como porfiroclastos fraturados, por vezes deformados, associados com as fitas de micas, em estado de alteração para biotita e epidoto/clinozoisita (Figura 20B e E).

As microestruturas presentes nesses ultramilonitos, sobretudo as observadas no quartzo e feldspato, são indicativos de deformação em baixa temperatura (~ 400 °C) (Passchier e Trow, 2005).

Figura 20 - Fotomicrografia dos ultramilonitos bandados (porção norte da ZCPE) da faixa milonítica

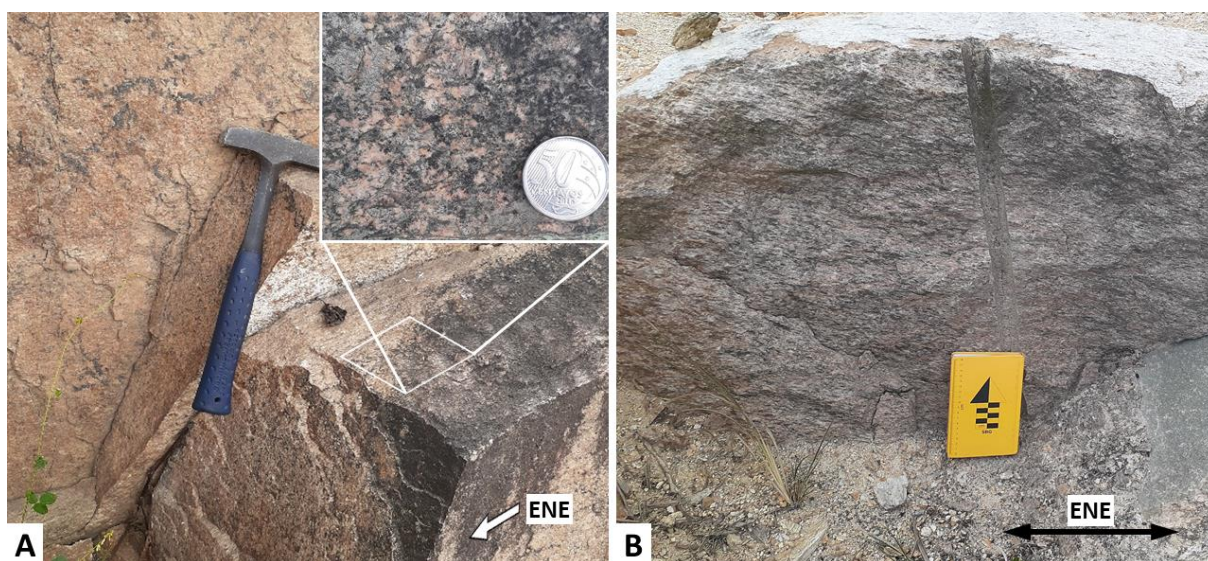


Fonte: O Autor, 2020.

A – Ultramilonito quartzo-feldspático com porfiroclastos de feldspatos potássico fraturados (SR01). B – Ultramilonito bandado, caracterizado pelas bandas félsicas rica em quartzo e máficas rica em biotita e anfibólio (SR02). C e D – Destaque para o porfiroclasto de feldspato potássico, apresentando fraturas antitéticas (C) e sintéticas (D) ao cisalhamento, envolto pela matriz fina de quartzo recristalizado e fitas de micas (SR01). E – Destaque para os porfiroclastos de feldspato potássico, em forma de sigmoide assimétricos, exibindo cauda de sombra de pressão, envolto pelo bandamentos ultramiloníticos (SR01). F – Milonito granítico ilustrando os porfiroclastos de plagioclásio com fraca deformação plástica, muscovita primária mica fish, e as fitas de micas e quartzos recristalizados por SGR, com cinemática sinistral (LFM46). Luz polarizada plana: B e D; luz polarizada cruzada: A, C, D e F.

A porção sul da faixa milonítica é composta essencialmente por protólitos graníticos, diferenciando-se dos ultramilonitos da porção norte pela predominância de composição álcali-feldspática granito; por não ser mais observado o bandamento composicional, apresentando uma textura mais homogênea; e por apresentar textura protomilonítica a milonítica. Possuem coloração variada entre rósea clara a avermelhada e cinza, e a granulação em geral é média (Figura 21).

Figura 21 - Fotografias dos afloramentos miloníticos de protólito granítico (porção sul da ZCPE)



Fonte: O Autor, 2020.

A e B – Milonito de protólito granítico, composição quartzo-feldspática. Destaque em (A), foliação milonítica marcada pela deformação de porfiroclastos de feldspato potássico e fitas de quartzo (LFM14).

Em lâmina delgada, os milonitos graníticos apresentam a seguinte composição modal: quartzo ($\pm 30\%$), feldspato potássico ($\pm 25\%$), plagioclásio ($\pm 15\%$), biotita (10-15%), anfibólio ($\pm 5\%$) e acessórios ($\pm 10\%$) de epidoto, titanita, apatita, minerais opacos. A foliação milonítica é definida pelas fitas de quartzo e micas, que envolvem porfiroclastos de feldspato. As microestruturas evidenciam a variação de protomilonitos a milonitos, de acordo com a proporção de porfiroclastos imersos na matriz (Figura 22).

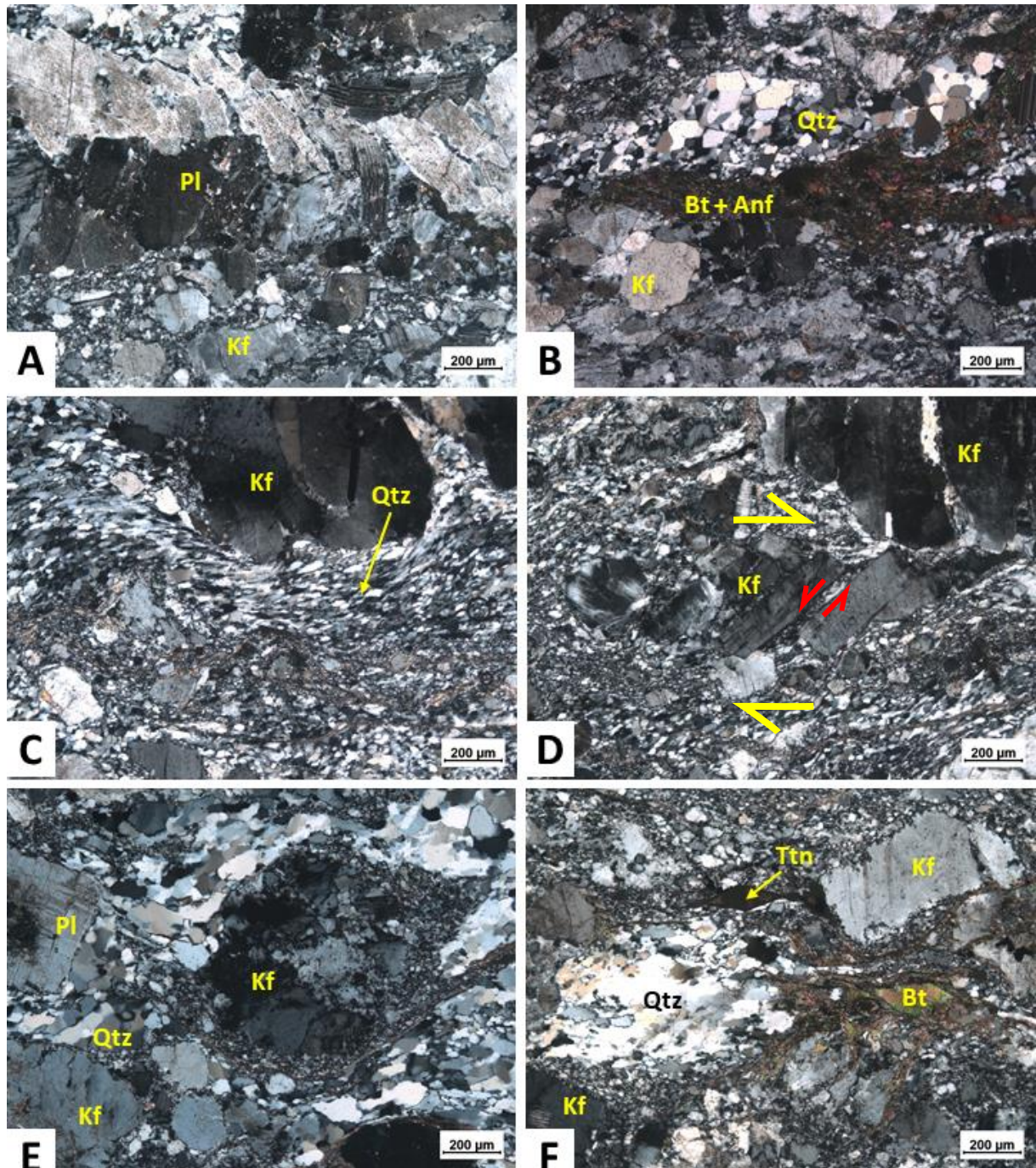
O quartzo ocorre como cristais alongados e apresenta contato interlobado. Formam fitas (foliação oblíqua) típicas de foliação milonítica, com cinemática destral. Apresenta avançada recrystalização dinâmica por *bulging* (BLG) e rotação de subgrão (SGR), predominantemente (Figura 22C-E). Localmente, apresenta redução de área indicada pela trama poligonal, indicativo de recrystalização estática (Figura 22B). Os mecanismos de deformação observados são extinção ondulante e bandas de deformação.

Os feldspatos (plagioclásio e feldspato potássico) ocorrem como porfiroclastos fragmentados e geralmente deformados plasticamente. Assim como nos ultramilonitos, os porfiroclastos fragmentados apresentam microfalhas antitéticas e sintéticas, e redução de grão (Figura 22C), curvamento de grão e *kink bands*, no caso do plagioclásio (Figura 22A). Já, os porfiroclastos sigmoidais apresentam maior deformação plástica que os da porção ultramilonítica. Ocorrem com forma assimétrica que indicam cinemática destral, e apresentam recristalização dinâmica fraca a moderada por *bulging*, observada nas bordas dos grãos (Figura 22F). Podem apresentar microestrutura manto-e-núcleo incipiente e por vezes bem desenvolvida (Figura 22E). Os mecanismos de deformação observados são extinção ondulante e bandas de deformação. Além disso, intercrescimento de pertita em chamais e mirmequita nas faces do grão paralelas à foliação de cisalhamento (C) são observadas de forma pontual.

A biotita possui coloração amarronzada, ocorre estirada e recristalizada, formando fitas descontínuas, associadas a anfibólio (Figura 22B). Localmente apresenta microestrutura *mica fish* (Figura 22F). Os anfibólios associados com as fitas de micas, apresentam alteração para biotita e epidoto/clinozoisita.

As microestruturas presentes nesses ultramilonitos, sobretudo as observadas no quartzo e feldspato, são indicativos de deformação em baixa a média temperatura (400 – 500 °C) (Passchier e Trow, 2005).

Figura 22 - Fotomicrografia dos milonitos graníticos (porção sul da ZCPE)



Fonte: O Autor, 2020.

A (LFM09) – Porção de protomilonito granítico ilustrando os porfiroclastos de feldspato fragmentados, com recristalização incipiente. O plagioclásio (centro) apresenta curvamento de grão (LFM09). B – Porção de milonito granítico ilustrando os porfiroclastos de plagioclásio fraturados e recristalizados, fitas de micas + anfibólio, e fitas de quartzo (notar forma poligonal incipiente gerada por recristalização estática) (LFM09). C – Milonito granítico ilustrando a foliação oblíqua do quartzo recristalizada por SGR, com cinemática destal, e porfiroclastos de feldspato fragmentados (LFM12). D – Destaque para o porfiroclasto de feldspato potássico, apresentando fraturas antitéticas ao cisalhamento, envolto pela matriz fina de quartzo recristalizado (LFM12). E – Milonito granítico, ilustrando a microestrutura manto-e-núcleo do porfiroclasto de feldspato potássico, com recristalização por BLG (LFM13). F – Milonito granítico, ilustrando o porfiroclasto de feldspato potássico com recristalização por BLG nas bordas (notar a formação de mirmequita na ponta inferior do Kf a NE da imagem), e microestrutura *mica fish* da biotita. Luz polarizada cruzada: A – F.

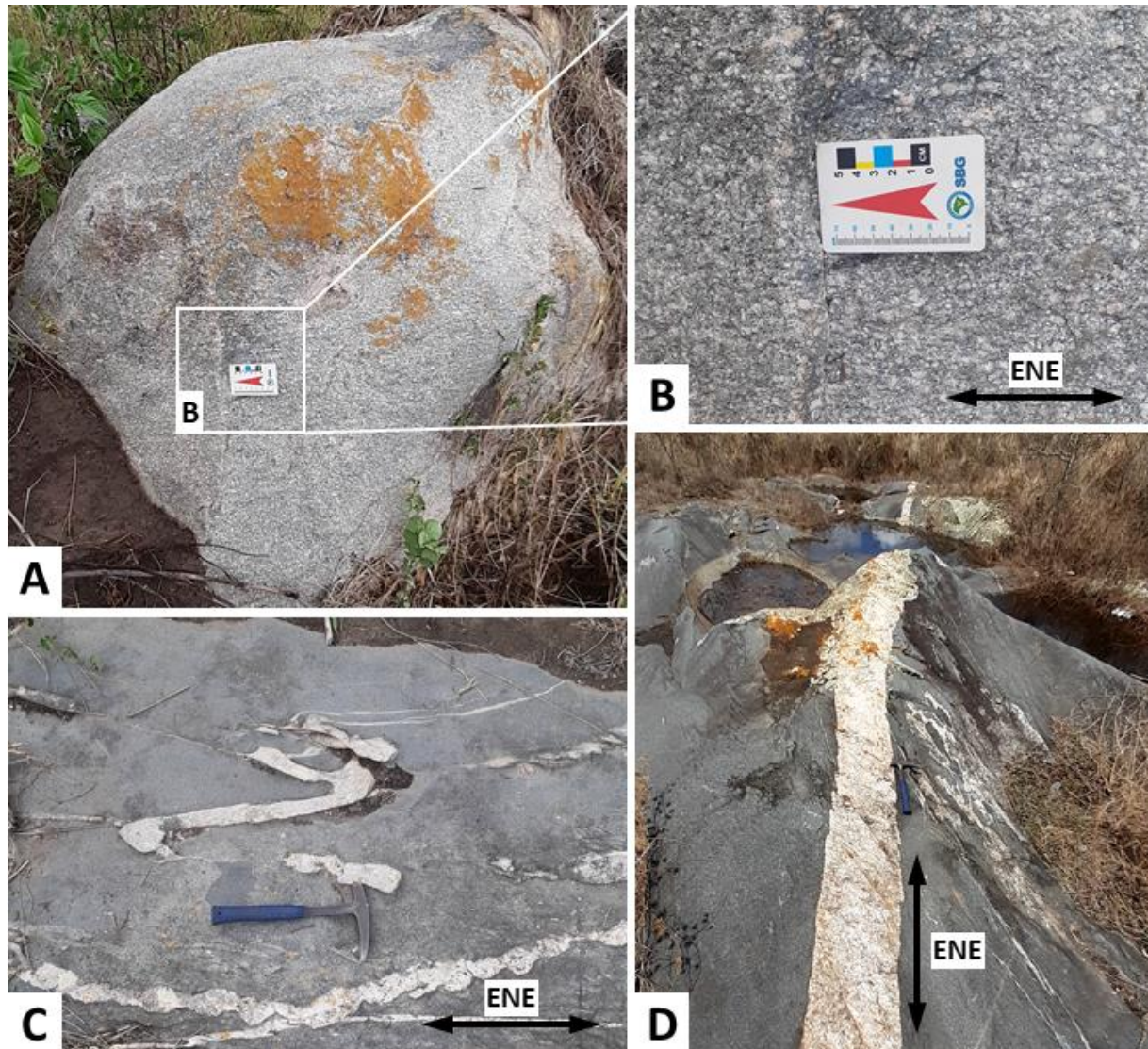
4.3 GRANITOIDES

Os granitoides estão localizados na região sul da área de estudo, e consistem de corpos com variações de fácies graníticas (s.s.) a granodioríticas, predominantemente. Pela proximidade que se encontram com a faixa milonítica da ZCPE, que limita a unidade a norte, e influência da deformação transcorrente, as rochas se encontram frequentemente deformados/milonitizados, apresentando foliação milonítica e foliação magmática preservada, na direção NE. Estas características também indicam que esses plútons são sintranscorrentes ao evento Brasileiro. As observações dos afloramentos associadas à interpretação das imagens aerogeofísicas, sobretudo as gamaespectrométricas, permitiram inferir a classificação destes granitoides em dois tipos litológicos principais: (1) anfibólio-biotita-granito milonitizado com enclaves intermédios/máficos e (2) biotita-muscovita-granito.

O primeiro tipo litológico é representado pela variação de composição granítica a granodiorítica, compostos por quartzo, plagioclásio e feldspato potássico, com anfibólio e biotita como principais minerais acessórios. Possuem granulação média a grossa, por vezes porfirítica (feldspatos ≤ 1 cm), coloração rósea acinzentada a cinza. Nas porções com textura porfirítica, a matriz geralmente é escura, composta basicamente por níveis de biotita e anfibólio. Foliação magmática ou de deformação são mais frequentes nessa porção (Figura 23A e B).

Além disso, estão associados com corpos intermediários/máficos, compostos principalmente por plagioclásio, anfibólio e biotita, caracterizando uma composição diorítica. Possuem granulação fina, por vezes grossa, coloração cinza escura, e se encontram também deformados. Veios e diques de leucogranitos finos a pegmatíticos são comuns nesses corpos, e apresentam dobramentos, estrutura *boudin* e *en echelon*, em decorrência da deformação (Figura 23C e D).

Figura 23 - Fotografias dos afloramentos dos granitoides sintranscorrentes tipo 1



Fonte: O Autor, 2020.

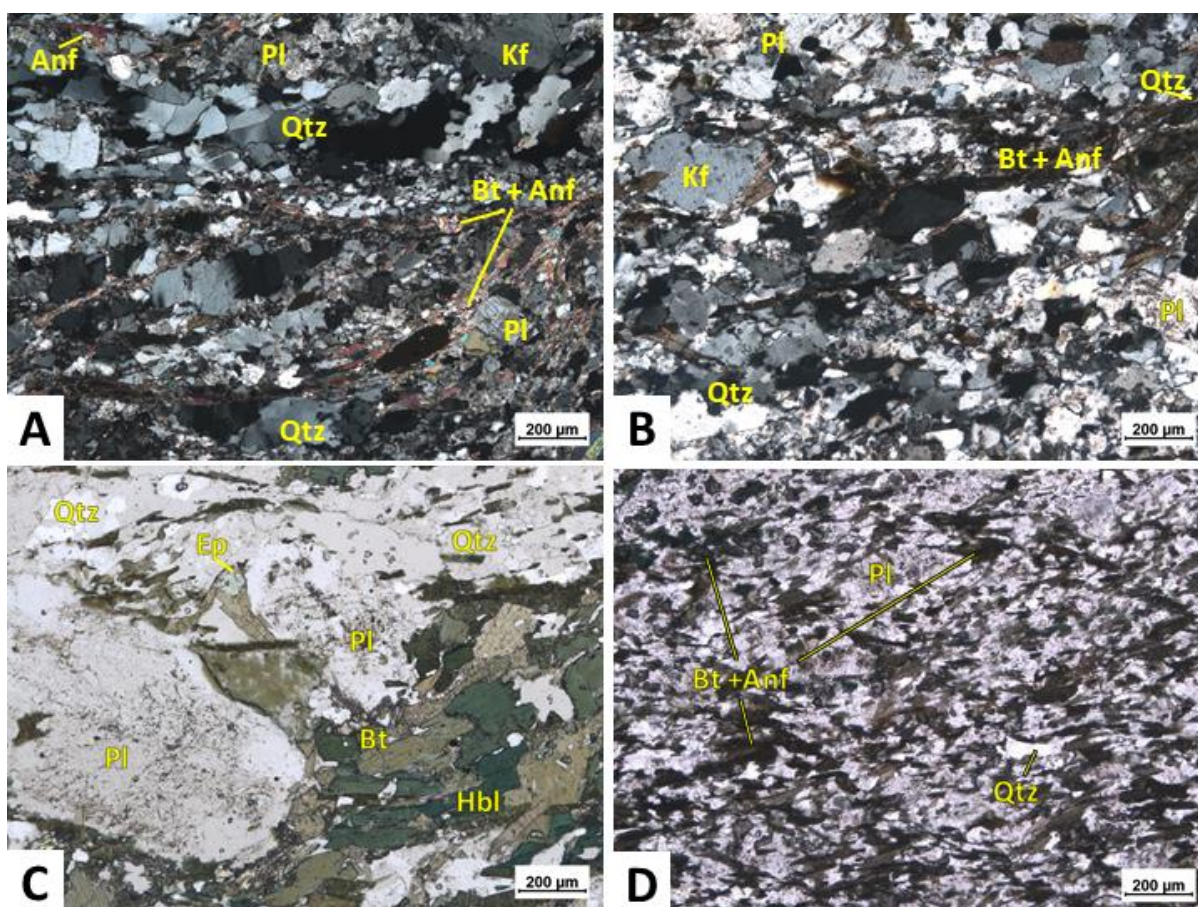
A – anfibólio-biotita-granito milonitizado (LFM50). B – Destaque de (A), ilustrando porfiroclastos de feldspato deformados gerando foliação. C – Corpos dioríticos com diques graníticos/pegmatíticos cedo- a sintranscorrentes, dobrados, desmembrados e apresentando *boudins* (LFM48). D – Corpos dioríticos com diques graníticos/pegmatíticos cedo- a sintranscorrentes (LFM51).

Petrograficamente, o tipo litológico 1 é composto essencialmente por quartzo ($\pm 25\%$), plagioclásio (20-25%), feldspato potássico (15-20%), e como acessórios, anfibólio ($\pm 10\%$), biotita (5-10%), epidoto + allanita + titanita + apatita + opacos ($\pm 10\%$). A deformação milonítica é bem marcada, definida por fitas de quartzos recristalizados no estado sólido por rotação de subgrão, apresentando localmente, trama poligonal pela redução de área; e por níveis de biotita e anfibólios alongados e recristalizados. Trama S/C é facilmente observada, indicando a cinemática destal da deformação (Figura 24A e B). Os feldspatos (feldspato potássico e plagioclásio) ocorrem com forma subédrica na matriz e como porfiroclastos, apresentando recristalização incipiente, extinção ondulante e fraturamento. Podem apresentar mirmequita e

perita, localmente. O anfibólio, além de formar a foliação, também ocorrem com forma subeudrais e microestrutura nematoblástica. O epidoto ocorre como mineral secundário, cristalizado pela alteração dos anfibólios e allanita, a biotita também ocorre como mineral de alteração dos anfibólios. A titanita é euédrica e bastante alterada para minerais opacos.

Os corpos dioríticos possuem granulação fina e grossa, são compostos essencialmente por plagioclásio (30-35%), biotita (25%), anfibólio (20-25%), quartzo (~10%), feldspato potássico (0-5%), titanita + epidoto + apatita + opacos (~5%). O plagioclásio ocorre subédrico a euédrico, inequidimensional, por vezes porfirítico, frequentemente com avançada sericitização. O quartzo ocorre de forma alongada, em finos níveis, apresentando recristalização incipiente e deformação por extinção ondulante e formação de subgrão. O anfibólio é de coloração verde claro a escuro, possui orientação preferencial e se encontra estirados pela deformação, forma níveis de foliação de deformação associadas à biotita e epidoto. (Figura 24C e D)

Figura 24 - Fotomicrografia das amostras dos granitoides tipo 1



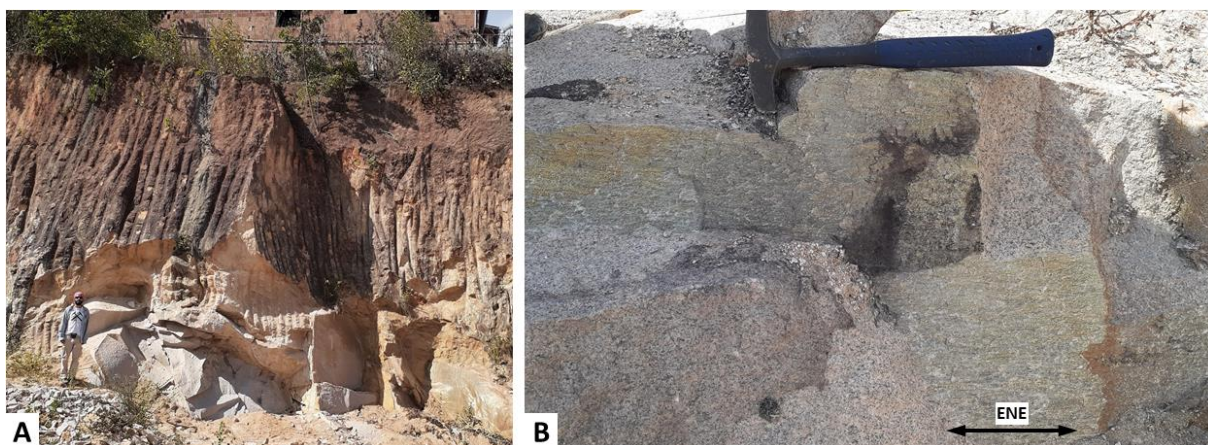
Fonte: O Autor, 2020.

A (LFM50) e B (LFM48) – Anfibólio-biotita-granito milonitizado, ilustrando a trama S/C, cinemática destal, formada pelas fitas de quartzo e de biotita + anfibólio (LFM50). C – Variação granodiorítica a diorítica dos enclaves deformados associados (LFM51). D – Corpo diorítico deformado ilustrando a foliação formada pela orientação de níveis máficos (biotita + anfibólio) e félsico (plagioclásio e quartzo). Luz polarizada cruzada: A e B; Luz polarizada plana: C e D.

O segundo tipo litológico é menos frequente na área de estudo, devido ao estado avançado de alteração e espessas camadas de cobertura de solo residual sobre a rocha mãe (Figura 25A). Consiste de granitos félsicos, granulação média, equigranular, coloração cinza clara a rósea, composto essencialmente por quartzo, feldspato potássico, plagioclásio, muscovita e biotita. A textura mais observada é isotrópica nas áreas mais afastadas da ZCPE, apresentando pouca deformação (Figura 25B). Nas proximidades da ZCPE, se encontra mais deformado, entretanto, pelo estado de alteração dos afloramentos, as características da rocha não são bem evidenciadas.

Nestes corpos foram observadas falhas transcorrentes destrais, paralelas à direção da ZCPE foram observadas em um afloramento a sul da área (Figura 25B). Nessa porção não são observados enclaves máficos associados e veios são menos frequentes.

Figura 25 - Fotografias dos afloramentos dos granitoides sintranscorrentes tipo 2



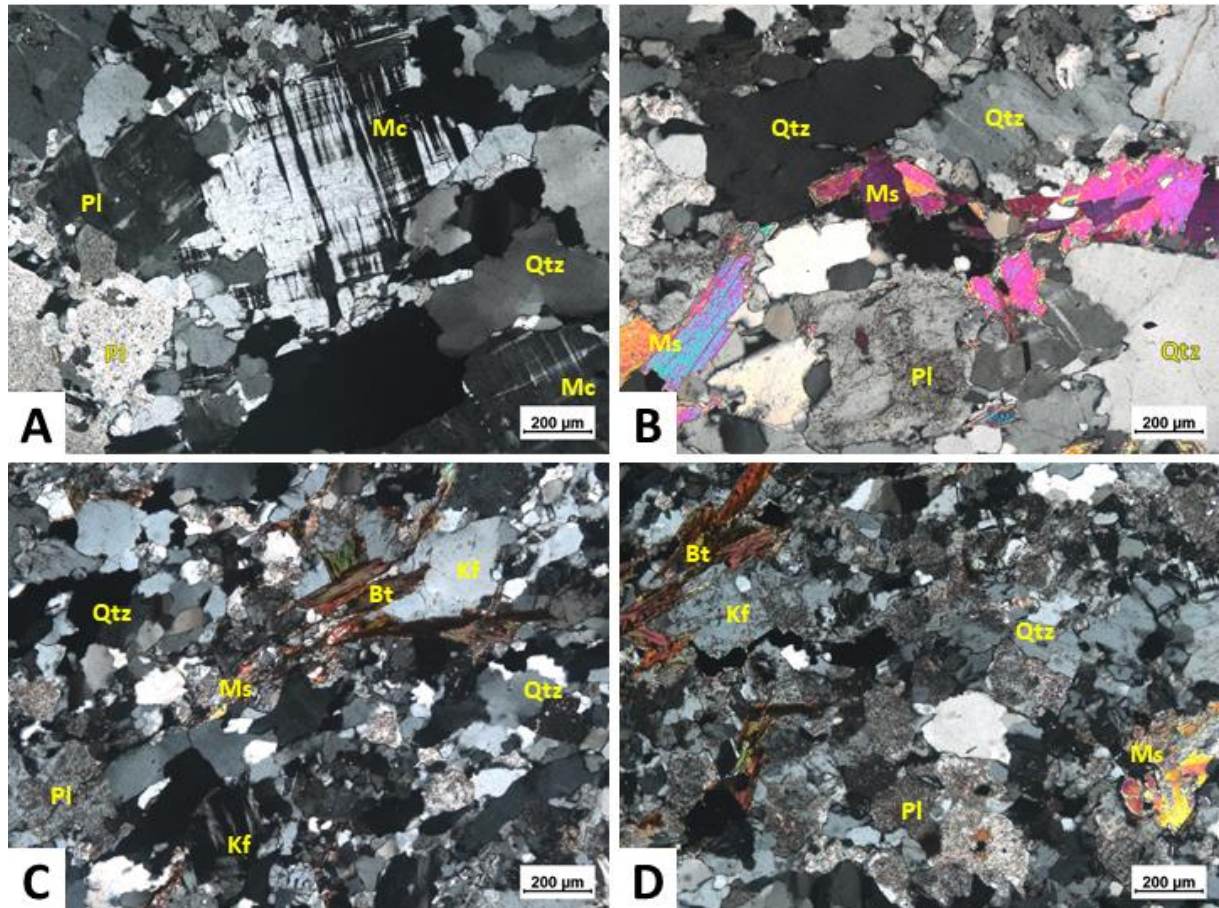
Fonte: O Autor, 2020.

A – Talude de corte ilustrando a camada espessa de solo residual sobre o granito (rocha mãe) (LFM54). B – Destaque do Bt-Ms-granito, isotrópico, com plano de falha com lineação de estria, transcorrente destrai, direção ENE-WSW (LFM54).

O tipo litológico 2 é composto essencialmente por quartzo (25-30%), feldspato potássico (25-30%), plagioclásio (15-25%), muscovita ($\pm 5\%$), biotita ($\pm 5\%$), clorita + allanita + apatita + epidoto ($\pm 5\%$). Possui granulação média a grossa, gradando de equigranular a inequigranular. Apresenta deformação incipiente, marcada pela orientação preferencial e estiramento de minerais, caracterizando a foliação magmática incipiente (Figura 26C e D). O quartzo é anédrico, alongado, inequidimensional, apresenta deformação por extinção ondulante e desenvolvimento de subgrão (Figura 26A e B). Os feldspatos (potássico e plagioclásio) são subédrico, inequidimensional – sendo os maiores cristais de microclina – e pontualmente, apresentam deformação. Mirmequita é observada pontualmente. As micas ocorrem de forma

subédrica, e nas porções deformadas apresentam orientação preferencial, ocorrem como mineral primário e secundário, oriundas do processo avançado de sericitização do plagioclásio que formam muscovita (Figura 26C e D).

Figura 26 - Fotomicrografia das amostras dos granitoides tipo 2



Fonte: O Autor, 2020.

A e B (LFM54) – Biotita-muscovita-granito com deformação incipiente. Notar deformação de extinção ondulante e subgrão do quartzo. C e D (LFM55) – Biotita-muscovita-granito deformado, orientação de micas e quartzos alongados. Notar a intensa sericitização do plagioclásio e feldspato potássico com bandas de deformação (C). Luz polarizada cruzada: A – D.

5 GEOLOGIA ESTRUTURAL E MICROESTRUTURAS

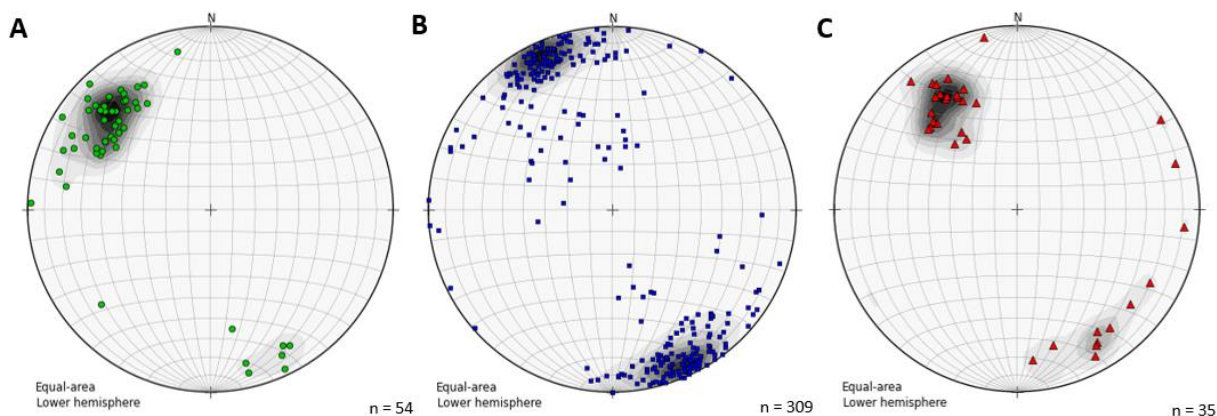
A área de estudo apresenta diversas de estruturas características de zonas de cisalhamento transcorrentes, como foliação penetrativa de alto ângulo bem desenvolvida, claros critérios cinemáticos, entre outros, bem como outras importantes estruturas marcantes e raras como dobras e falhas em escala métrica. Estas estruturas são descritas em detalhe a seguir.

5.1 FOLIAÇÃO E LINEAÇÃO

Os dados estruturais foram divididos de acordo com as unidades litológicas: Complexo Surubim-Caroalina (rochas metassedimentares), milonitos da ZCPE e granitoides; e comparados, posteriormente (Figura 27).

Os milonitos da ZCPE são as estruturas de maior relevância deste estudo. Apresentam foliação milonítica preferencial ENE-WSW, subvertical, com mergulho para SE ou NW (Figura 27B). O Complexo Surubim-Caroalina, a norte, e os granitoides, a sul, apresentam foliação de alto ângulo, com mergulho para SE, e direção preferencial NE-SW, com uma variação angular suave (10 - 20°) em relação à ZCPE (Figura 27A e C).

Figura 27 - Projeções estereográficas dos polos das foliações das unidades litológicas

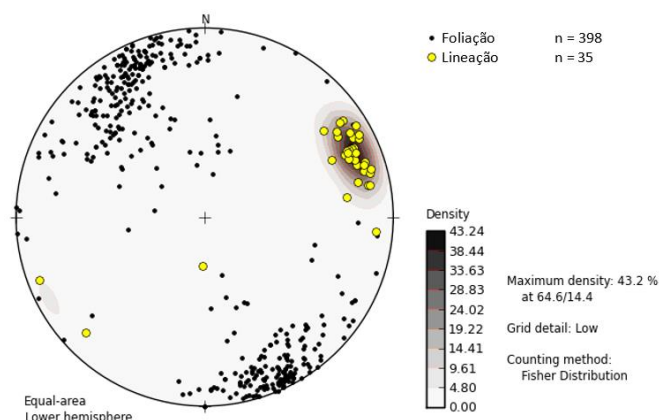


Fonte: O Autor, 2020.

A – Complexo Surubim-Caroalina; B – Milonitos da ZCPE; C – Granitoides.

As lineações são, geralmente, caracterizadas pelo estiramento de cristais de quartzo e feldspatos, e mais observadas na faixa milonítica. Apresentam sentido de caimento preferencial para ENE, com intensidade de baixo ângulo a sub-horizontal (0 - 20°) (Figura 28). Devido à semelhança das atitudes das foliações das unidades litológicas da área, as lineações foram representadas em único estereograma de polos.

Figura 28 - Estereograma de polos das foliações e lineações da área de estudo.



Fonte: O Autor, 2020.

Os resultados, portanto, evidenciam que as unidades possuem direção de foliação e intensidade de mergulho semelhantes devido à tectônica transcorrente, que rotacionou e verticalizou no sentido dextral as foliações pré-existentes do Complexo Surubim-Caroalina, bem como deu origem a dobramentos e zonas de cisalhamento NE-SW subordinadas à ZCPE; e condicionou o alojamento e subsequente deformação dos corpos graníticos, dando origem às foliações tectônicas e magmáticas e zonas de cisalhamento subparalelas à ZCPE, o que sugere que estes corpos são sin- a tarditranscorrentes.

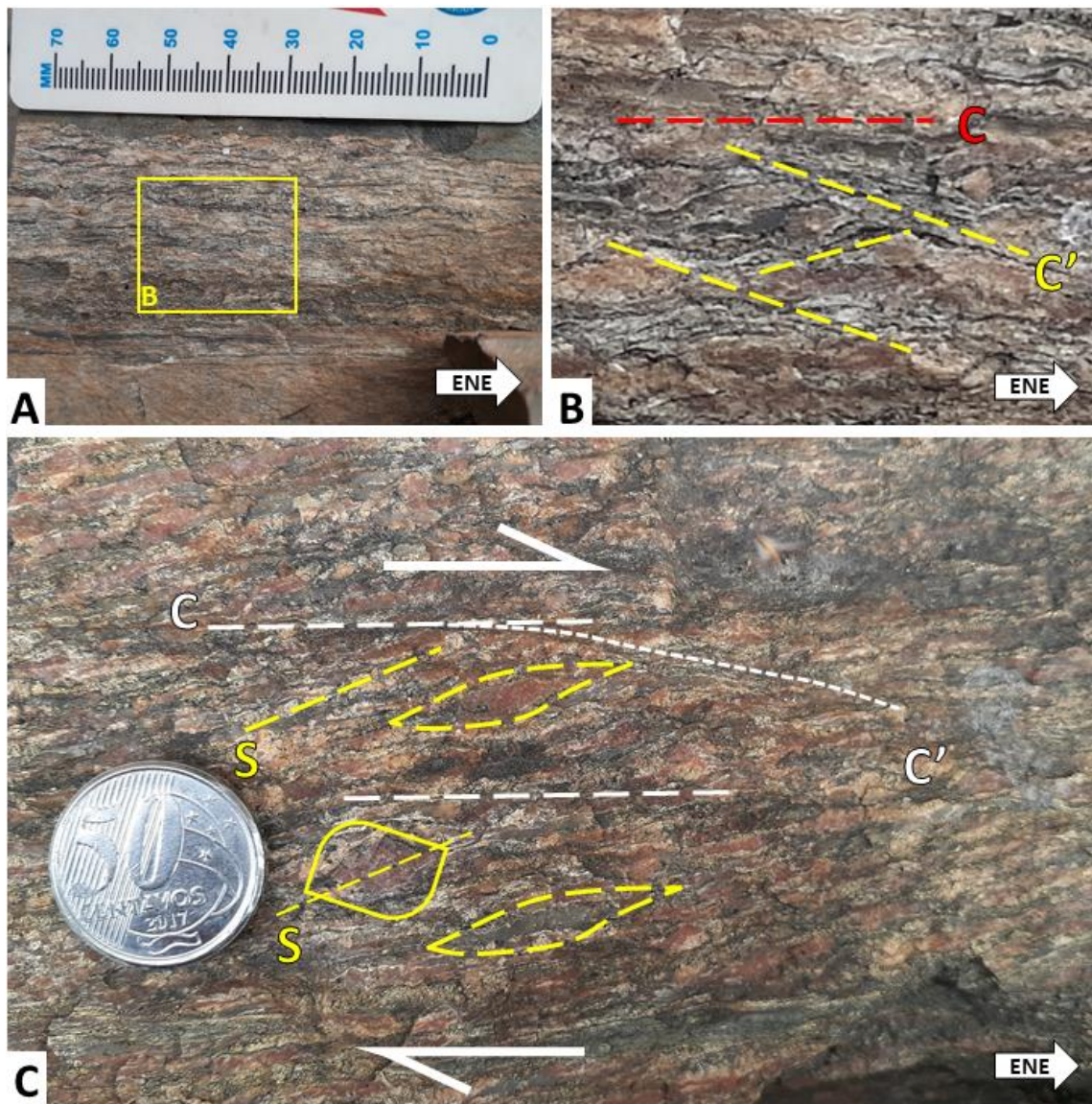
5.2 ESTRUTURAS DÚCTEIS E INDICADORES CINEMÁTICOS

As principais estruturas dúcteis observadas na área de estudo são os claros indicadores cinemáticos originadas pela deformação que caracterizam a cinemática dextral da transcorrência, os dobramentos característicos da ZCPE e os diques e *boudins* presentes nos granitoides. Essas estruturas são descritas a seguir.

5.2.1 Tramas S/C e bandas de cisalhamento (C')

Em escala de afloramento, devido a granulação fina da maior parte das rochas e intensa deformação em que se encontram, não fica bem evidente os critérios cinemáticos. Esses critérios são observados de forma mais clara em macroestruturas, observáveis em imagens de satélite/geofísicas regionais, ou em microescala, em lâmina delgada. Entretanto, é possível observar nas rochas miloníticas da ZCPE, tramas S/C e banda de cisalhamento (C'), de tamanhos milimétricos, marcadas por estiramento de cristais de quartzo e sigmoides de feldspatos assimétricos, que evidenciam a cinemática dextral da transcorrência (Figura 29).

Figura 29 - Fotografia dos indicadores cinemáticos da ZCPE



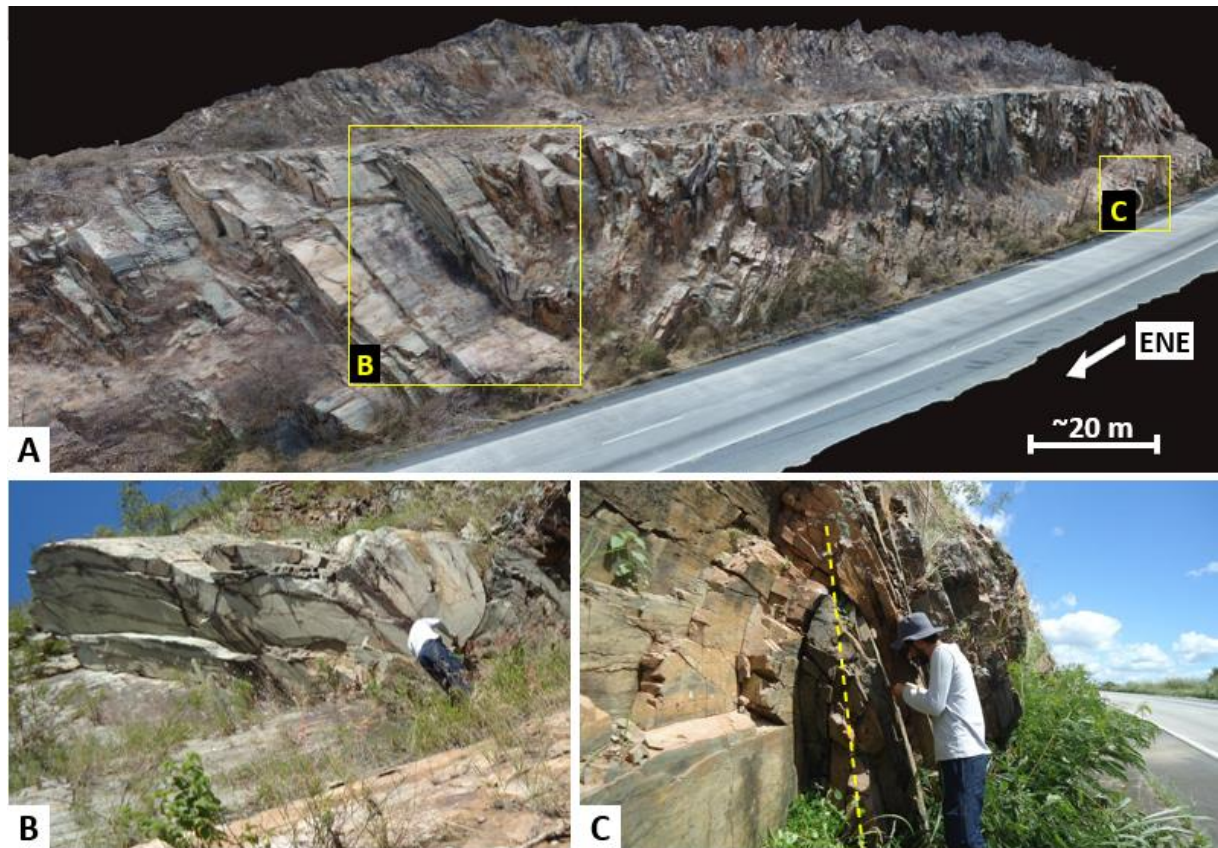
Fonte: O Autor, 2020

A – Fotografia do milonito da ZCPE (LFM10) ilustrando a foliação de granulação fina. B – Destaque da fotografia (A) ilustrando a trama S/C e C', indicando cinemática destal, marcadas por fitas de quartzos e sigmoides de feldspato. C – Fotografia do milonito da ZCPE (LFM06) ilustrando trama S/C e C', indicando cinemática destal, marcadas por fitas de quartzos e sigmoides de feldspato.

5.2.2 Dobras

A faixa milonítica apresenta um conjunto de dobras de escala métrica relacionadas à tectônica transcorrente (Figura 30). Essas dobras são sinformes e antiformes, fechadas a apertadas, horizontais normais a pouco inclinadas, com eixo sub-horizontal, e com as superfícies axiais paralelas a subparalelas à foliação milonítica (ENE-SWS), conforme mostra os dados estruturais interpretados no diagrama de roseta (Figura 31).

Figura 30 - Fotografias das dobras antiformes e sinformes nos ultramilonitos da Serra das Russas, Gravatá – PE (SR01)

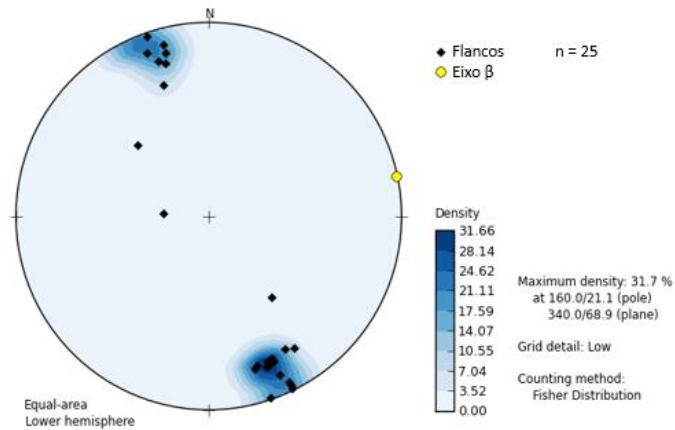


Fonte: (A) Santos, et al; 2020. (B e C) O Autor, 2020.

A – Visão geral do afloramento (imageamento 3D obtido por drone), ilustrando o conjunto de dobras de escala métrica. B – Fotografia de detalhe em (A) de dobra sinforme aberta. C - Fotografia de detalhe em (A) de dobra antiformes, normal, fechada, eixo horizontal, plano axial paralelo à ZCPE.

Esses dados sugerem que os dobramentos são sintectônicos à ZCPE, originada por cisalhamento simples, através da combinação da transcorrência com forças compressivas, caracterizando um regime transpressivo. Os flancos e planos axiais subparalelos à foliação milonítica, podem ter se originado pela progressão do esforço de cisalhamento pós-dobramentos (deformação progressiva).

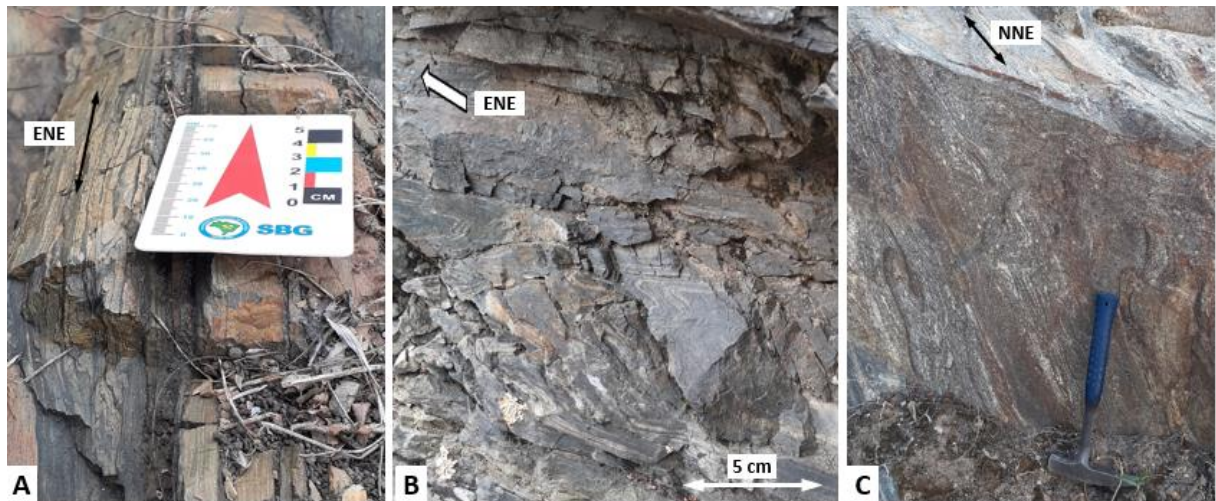
Figura 31 - Estereograma de polos dos flancos e eixo β dos dobramentos nos milonitos da ZCPE



Fonte: O Autor, 2020.

Além disso, dobras intrafoliais, de escala milimétrica a centimétrica, são frequentemente observadas nos ultramilonitos bandados da faixa milonítica da ZCPE e, localmente, nos paragneisses do Complexo Surubim-Caroalina (Figura 32). Estas feições também são originadas pela deformação progressiva.

Figura 32 - Dobras intrafoliais



Fonte: O Autor, 2020.

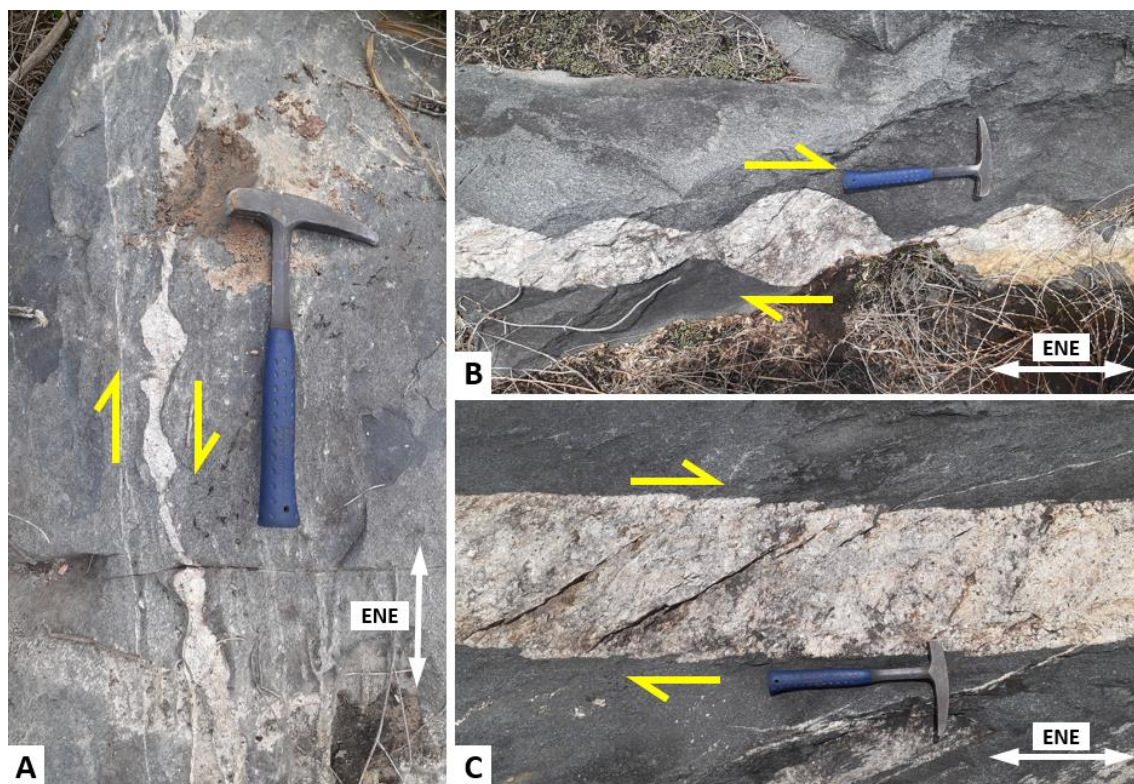
A (LFM02) e B (LFM04) – Dobras intrafoliais nos ultramilonitos bandados da ZCPE. C (LFM29) – Dobras intrafoliais no paragneisse do Complexo Surubim-Caroalina.

5.2.3 Diques *boudinados* e *en echelon*

Nos granitoides a sul da área, os diques de leucogranito fino a pegmatítico, associados aos corpos intermediários/máficos, estão frequentemente deformados plasticamente. Apresentam estruturas *boudin* e *en echelon* paralelos à foliação tectônica, que evidenciam a cinemática dextral da deformação transcorrente, por cisalhamento simples, a qual foram submetidos (Figura 33).

O fato desses diques e veios apresentarem deformação dúctil e direção paralela à foliação, evidencia a geração e alojamento de magma granítico durante o processo de transcorrência, portanto, também sugere caráter cedo- a sintranscorrente ao evento tectônico.

Figura 33 - Diques pegmatíticos deformados



Fonte: O Autor, 2020.

A (LFM48) e B (LFM51) – Diques pegmatíticos *boudinados*, deformado por cisalhamento simples, cinemática dextral. C (LFM51) – Dique de pegmatito apresentando falhas *en echelon*, cinemática dextral.

5.3 ESTRUTURAS RÚPTEIS

As principais estruturas rúpteis da área de estudo se concentram na ZCPE e consiste de sistema de falhas destrais e sinistrais relacionadas ao modelo de cisalhamento de Riedel, e sistema de juntas em 3 direções. Essas estruturas são descritas a seguir.

5.3.1 Falhas

Um sistema de falhas transcorrentes foi identificado na área de estudo. Se encontram na faixa milonítica, principalmente, e na região sul do mapa; e podem ser observadas em escala milimétrica a métrica. Tratam-se de falhas transcorrentes, de direção NW-SE e NNE-SSW, dextral e sinistral, respectivamente, que formam um par conjugado. Localmente, também são observados planos de falha na direção E-W, paralelo à ZCPE. A cinemática é indicada pelos marcadores de deslocamento observados na foliação, degraus de abatimento e lineações de estrias observados nos planos de falha, com baixo ângulo de caimento (Figura 34).

Figura 34 - Fotografia dos indicadores cinemáticos do sistema de falhas



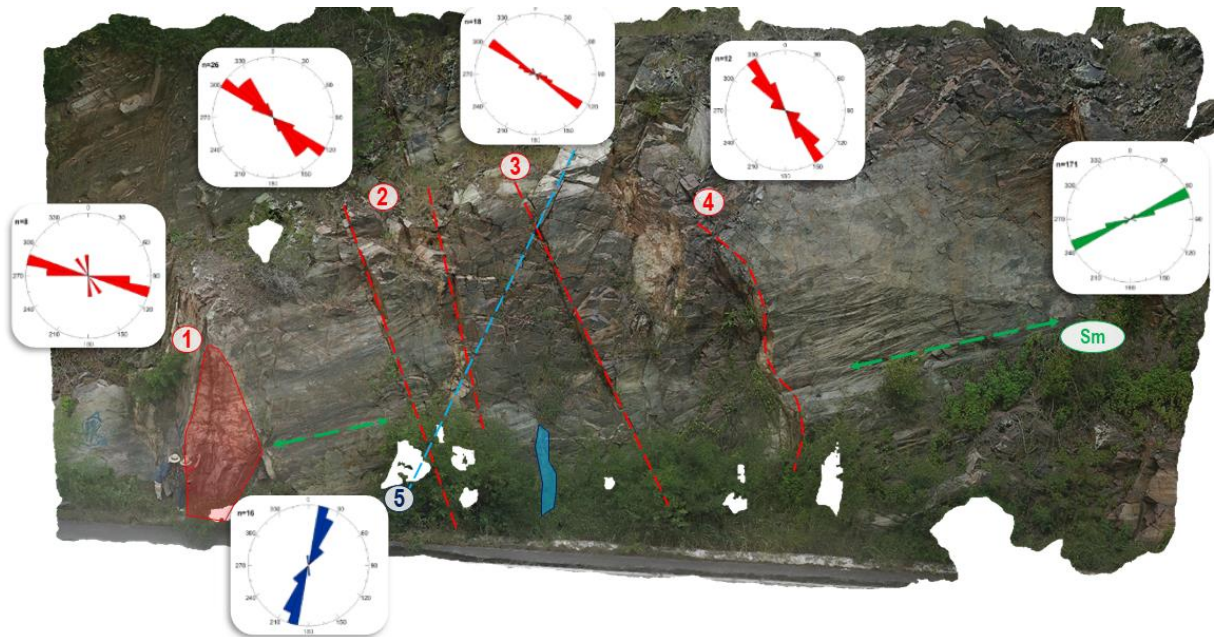
Fonte: O Autor, 2020.

A – Falhas milimétricas destrais e sinistrais cortando a foliação ultramilonítica (visão em planta). B – Falha transcorrente dextral cortando a foliação ultramilonítica (visão em planta). C – Plano de falha dextral ilustrando as estrias e degraus de abatimento (visão em perfil).

Esse conjunto de falhas é, aqui, correlacionado ao modelo de cisalhamento de Riedel (Fossen, 2012, cap. 18.4.1, Twiss e Moores, 2007, cap. 6.1; p.ex. Miranda, et al, 2020). As falhas NW-SE (dextral) e NNE-SSW (sinistral) são interpretadas como falhas R e R', respectivamente, e as falhas ENE-WSW, paralelas à ZCPE, como a zona de deslocamento principal (D) do modelo de Riedel (Figuras 35 e 36).

Diante disso, a interpretação desse modelo indica uma cinemática dextral de cisalhamento. Esse sistema de falhas também pode ser correlacionado à tectônica transcorrente de idade Brasiliano, representando a transição dúctil-rúptil desse evento.

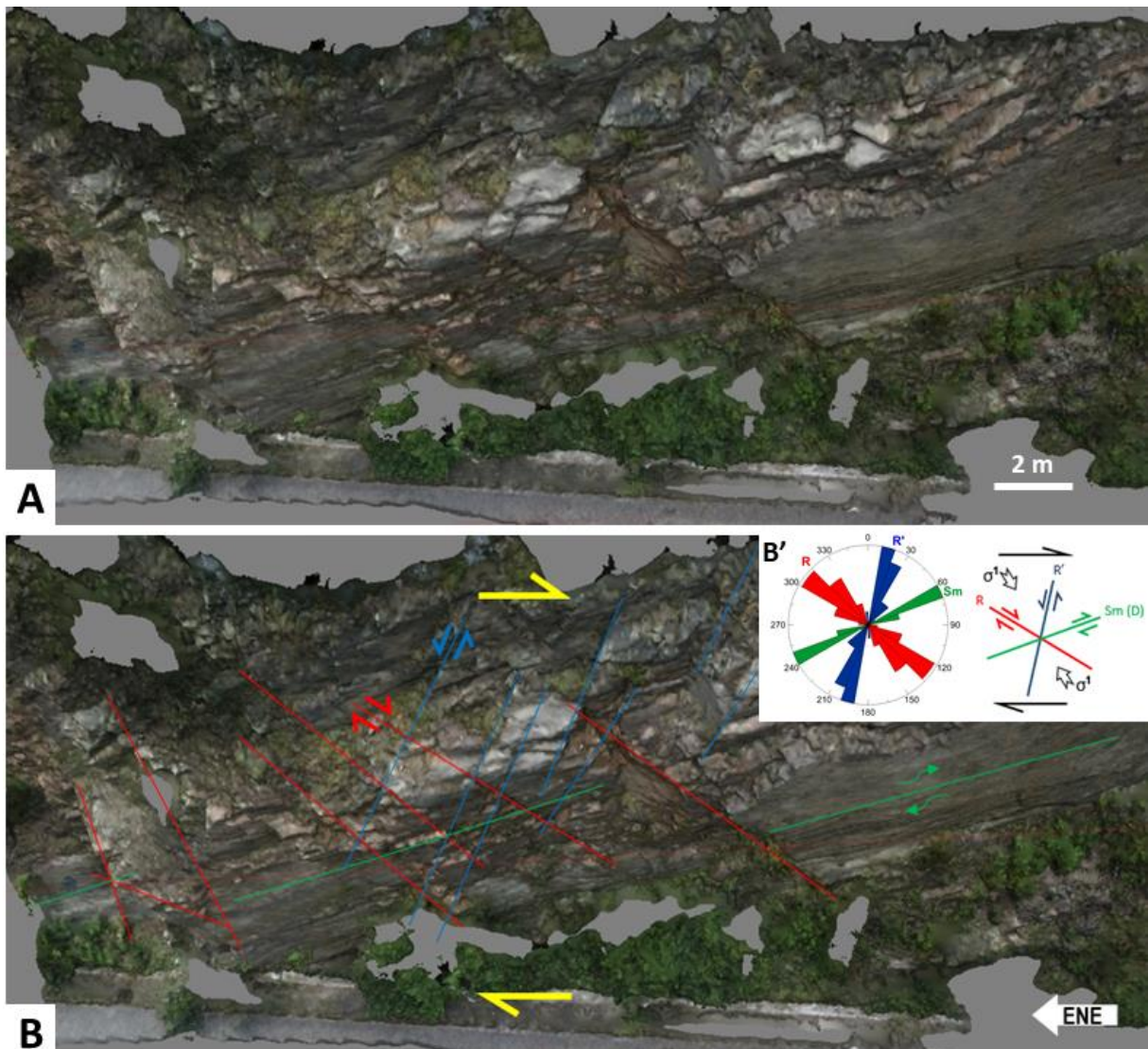
Figura 35 - Ortofotografia em perfil do afloramento-chave dos ultramilonitos bandados contendo o sistema de falhas, localizado na Serra das Russas (SR02)



Fonte: O Autor, 2020.

Imagem obtida por drone, com ângulo de visada $\sim 45^\circ$ da superfície. Detalhes ilustrando o par conjugado das falhas transcorrentes R (destal – em vermelho) e R' (sinistral – em azul); e do plano de zona de deslocamento principal (D – em verde), correspondente à direção da ZCPE. Diagramas de roseta respectivos aos planos de falha: R (1, 2, 3 e 4) e R' (5); e da foliação milonítica da ZCPE (Sm).

Figura 36 - Ortofotografia em planta do afloramento-chave dos ultramilonitos bandados contendo o sistema de falhas, localizado na denominada Serra das Russas (SR02)



Fonte: O Autor, 2020.

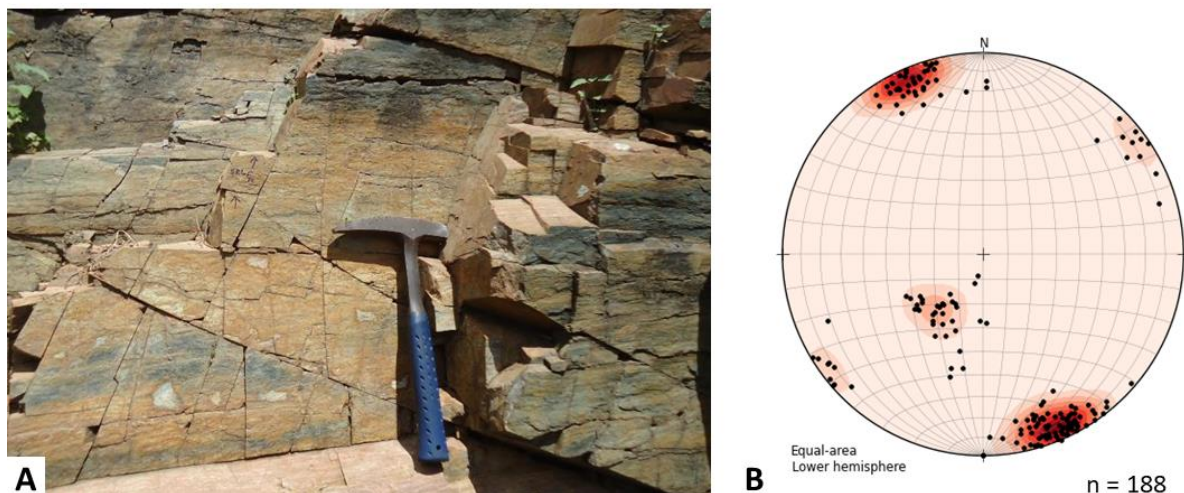
Imagem obtida por drone, visão em planta. B – Interpretação da imagem ilustrando, em detalhes, o par conjugado das falhas transcorrentes R (dextral – em vermelho) e R' (sinistral – em azul); e do plano de zona de deslocamento principal (D – em verde), correspondente à direção da ZCPE. B' – (esquerda) Diagrama de roseta dos planos de falha R e R', e da foliação milonítica da ZCPE (Sm). (direita) Interpretação do modelo de Riedel, com eixo de maior compressão orientado na direção NW-SE, condizente com a cinemática dextral do cisalhamento.

5.3.2 Sistema de fraturas

A área de estudo apresenta juntas em duas direções preferenciais – NE-SW e NW-SE – que formam um sistema de fraturas (Figura 37). Embora ocorra em toda a extensão da área, são mais proeminentes nos ultramilonitos da faixa milonítica da ZCPE. Em termos de estruturas no estado rúptil, estas são as mais frequentes. Localmente, essas fraturas ocorrem preenchidas por filossilicatos e epidoto. As direções são condizentes com as direções do par conjugado de falhas e com as direções dos lineamentos estruturais observados em macroescala, nas imagens MDE

e aerogeofísicas. Esse sistema de fraturas, portanto, está correlacionado com a tectônica transcorrente regional. Pontualmente, essas fraturas ocorrem com maior densidade, podendo gerar um núcleo de catáclase.

Figura 37 - Sistema de fraturas da área de estudo



Fonte: O Autor, 2020.

A – Fotografia das fraturas no ultramilonito da ZCPE. B – Estereograma de polos das fraturas.

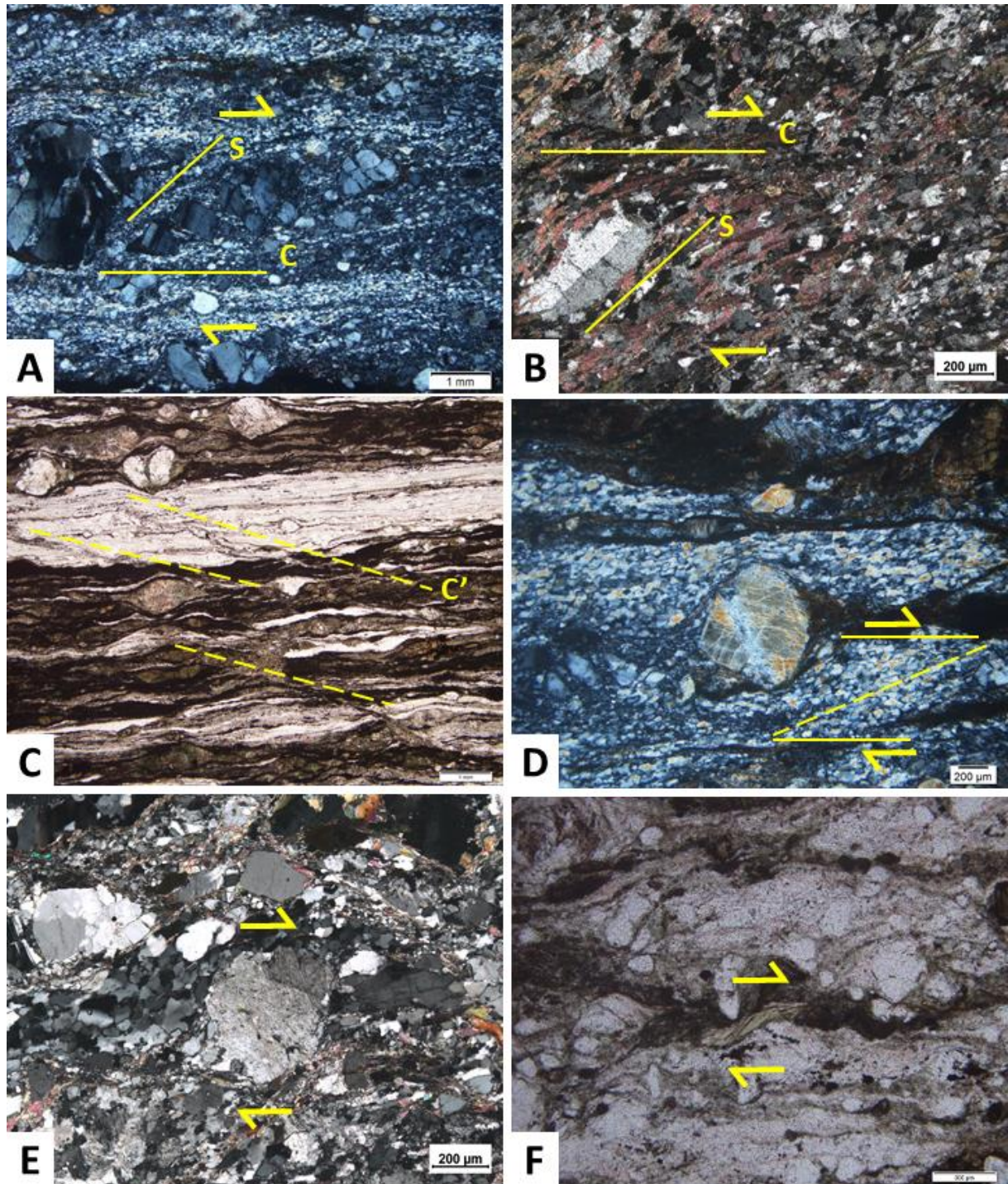
5.4 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

As microestruturas observadas nas litologias, em síntese, foram descritas anteriormente na seção 4. Porém, assim como nas observadas em mesoescala, aqui são destacadas as principais que estão relacionadas à análise microtectônica da ZCPE, tais como, indicadores cinemáticos, falhas e fraturas.

5.4.1 Indicadores cinemáticos

Os principais critérios cinemáticos, que reafirmam a cinemática destrai ZCPE, observados nas rochas da faixa milonítica e nos granitoides são: (i) trama S/C formada pela orientação oblíqua de grãos de feldspato e micas (S) em relação ao plano de cisalhamento (C) (Figura 38A e B); (ii) banda de cisalhamento (C') resultante da deformação progressiva (Figura 38C); (iii) foliação oblíqua do quartzo, formada pela recristalização dos grãos em forma alongada e imbricadas no sentido do cisalhamento (Figura 38A e D); (iv) sigmoides de feldspato assimétricos, quando deformados plasticamente (Figura 38D e E); e (v) *mica fish*, formada pela deformação plástica da biotita e muscovita (Figura 38F).

Figura 38 - Fotomicrografias ilustrando os critérios cinemáticos da tectônica transcorrente destrai regional (ZCPE)



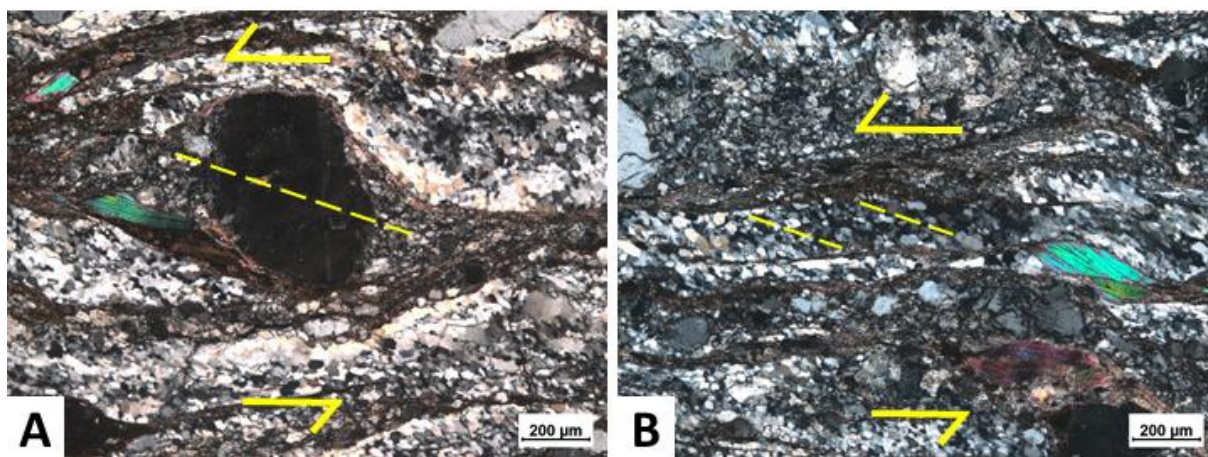
Fonte: O Autor, 2020.

A – Trama S/C no ultramilonito, formada por porfiroclasto de feldspato fragmentado (com microfratura sintética), e foliação oblíqua de quartzo (SR01). B - Trama S/C, no corpo diorítico dos granitoides, formado pela orientação do plagioclásio e biotita (LFM48). C – Banda de cisalhamento (C') no ultramilonito bandado (SR01). D – Porfiroclasto de feldspato sigmoidal assimétrico e foliação oblíqua do quartzo (SR02). E – Porfiroclasto de feldspato sigmoidal assimétrico no Anf-Bt-granito, com caudas de recristalização indicando a cinemática destrai (LFM50). F – Biotita *fish* em ultramilonito (SR02). Luz polarizada cruzada: A, B, D, E e F; Luz polariza plana: C.

Na porção NW da área de estudo, uma zona de cisalhamento de direção NNE, que afeta parcialmente os milonitos da ZCPE e se estende para o Complexo Surubim-Carolina (vide mapa geológico – APÊNDICE 4), apresenta cinemática sinistral. Essa cinemática só foi possível de ser definida em microescala. Os principais critérios cinemáticos foram foliação oblíqua de quartzo, sigmoides assimétricos de feldspato e muscovita *mica fish*, observados na porção dos ultramilonitos (Figura 39).

A direção dessa zona de cisalhamento e a sua cinemática sugerem que foi originada de forma subordinada à ZCPE, como resultante da tectônica transcorrente regional brasileira.

Figura 39 - Fotomicrografias ilustrando os critérios cinemáticos da zona de cisalhamento sinistral



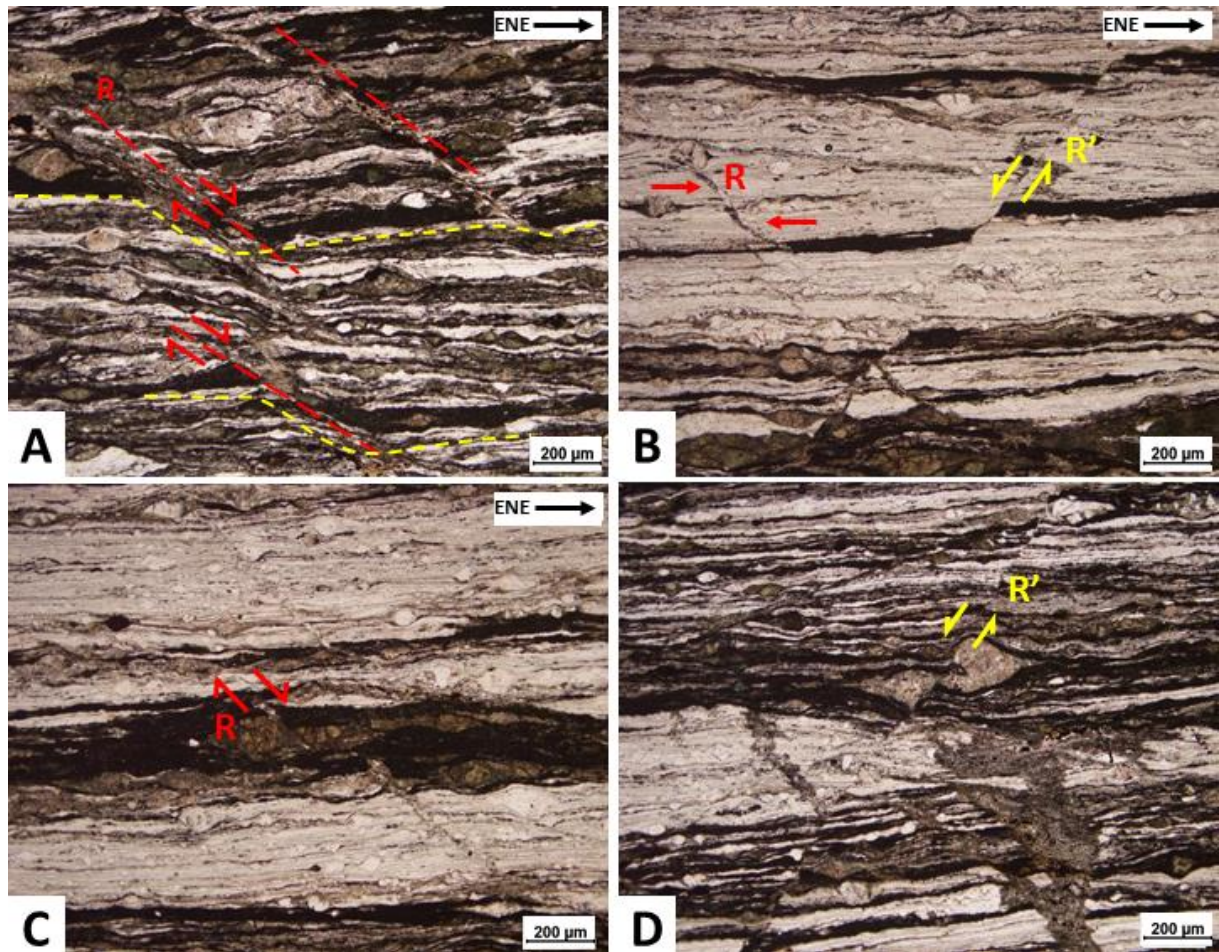
Fonte: O Autor, 2020.

Zona de cisalhamento subordinada à ZCPE, localizada na porção NW da área. A – Foliação oblíqua de quartzo, feldspato sigmoidal com cauda de recristalização assimétrica, muscovita *mica fish* (LFM46). B – Foliação oblíqua de quartzo, feldspato sigmoidal com cauda de recristalização assimétrica, muscovita *mica fish* (LFM46).

5.4.2 Microfalhas

Assim como em escala de afloramento, o sistema de falhas R e R' também pode ser observado em microescala, cortando a foliação. De acordo com a orientação da foliação milonítica (ENE), as microfalhas R e R' estão orientadas nas direções NW-SW e NNE-SSW, respectivamente (Figura 40). É possível observar que em algumas amostras dos ultramilonitos, a foliação se curva em direção a microfalha R, sugerindo que esta ocorreu durante uma transição dúctil-rúptil (Figura 40A). Neste caso, a microfalha R pode ser uma evolução da banda de cisalhamento (C') para o estado rúptil. Em outra amostra, a microfalha R se encontra curvada, formando leve dobramento, no sentido dextral, condizente com a cinemática da ZCPE, (Figura 40B), também sugerindo que esta ocorreu ainda no estado dúctil. Assim, essas feições são interpretadas como indícios da transição dúctil-rúptil da deformação transcorrente na ZCPE.

Figura 40 - Fotomicrografia ilustrando as microfalhas R (destal) e R' (sinistral) presentes nos ultramilonitos bandados da ZCPE (SR02)



Fonte: O Autor, 2020.

A – Microfalha R paralela a banda de cisalhamento (C') sugerindo uma transição dúctil-rúptil da deformação. B – Microfalha R curvada no sentido da foliação (setas em vermelho), condizente com a cinemática da ZCPE, sugerindo que esta feição ocorreu ainda no estado dúctil; e microfalha R'. C – Microfalha R (destal) deslocando a foliação e porfiroclasto de anfibólio deformado. D – Microfalha R' (sinistral) cortando a foliação e porfiroclasto de feldspato deformado.

6 MAGMATISMO E METAMORFISMO

As rochas metassedimentares do complexo Surubim-Caroalina são as unidades mais antigas presentes na área de estudo, que por sua vez, corresponde ao registro de evento metamórfico regional mais antigo, com idade de pico metamórfico neoproterozoica (~630 Ma) (Neves, et al, 2009). O protólito sedimentar pelítico é indicado pela associação mineralógica identificada nessas rochas, marcada pela abundância de micas e presença de granada e sillimanita. Esta associação mineralógica também indica que as condições metamórficas do Complexo Surubim-Caroalina foram de alto grau, equivalente à fácies anfibolito alto.

O metamorfismo principal da área de estudo corresponde ao metamorfismo dinâmico originado pela tectônica transcorrente brasileira. Este evento é o responsável pela geração dos milonitos/ultramilonitos bandados da faixa milonítica e das intrusões de granitoides a sul da área. Na faixa milonítica, a porção de ultramilonitos bandados apresenta quartzo com recristalização intensa por processo de *bulging* e feldspato com deformação de extinção ondulante e predominantemente fragmentados, com pouco grãos deformados. A porção de milonitos graníticos apresenta o quartzo com recristalização intensa que grada de processo por BLG a SGR; e o feldspato, além de fragmentado, apresenta maior deformação plástica, com formação de sigmoides assimétricos e recristalização incipiente por BLG, nas bordas dos grãos. Localmente, a recristalização pode ser mais avançada, gerando microestrutura manto-e-núcleo. Estas evidências indicam que a faixa milonítica possui uma deformação que varia de baixo a médio grau de condições metamórficas. Entretanto, a predominância é a deformação de baixo grau, com intervalo de temperatura entre 400°C a 500 °C.

Os granitoides, tipo litológico 1 e 2, de acordo com a composição modal realizada, sugerem que possuem afinidade química cálcio-alcálica e peraluminosa, respectivamente. O biotita-muscovita-granito (litotipo 1) ainda sugere uma fonte associada a fusão de rochas supracrustais, o que caracteriza uma assinatura de granito tipo-S. Estes resultados são condizentes com os trabalhos já realizados (ex. Teixeira, 2015). As observações de campo e microestruturais, tais como, foliação milonítica e magmática orientada de acordo com a ZCPE, evidências de deformação incipiente e milonitização associada com textura isotrópica, bem como a forma geométrica dos corpos em escala de mapa, são indícios que estes plútons são intrusões alojadas sob influência da tectônica transcorrente brasileira. Portanto, são classificados como plútons sin- a tarditectônicos.

7 RECURSOS MINERAIS

De acordo com Agência Nacional de Mineração (ANM), os recursos minerais que ocorrem na área de estudo, são representados por: areia, argila, filito e água mineral. A tabela 1 apresenta os status das áreas requeridas dos recursos minerais na região mapeada. A Figura 41 ilustra a localização dessas áreas no mapa geológico. Entretanto, a potencialidade desses recursos minerais não foi observada durante o mapeamento.

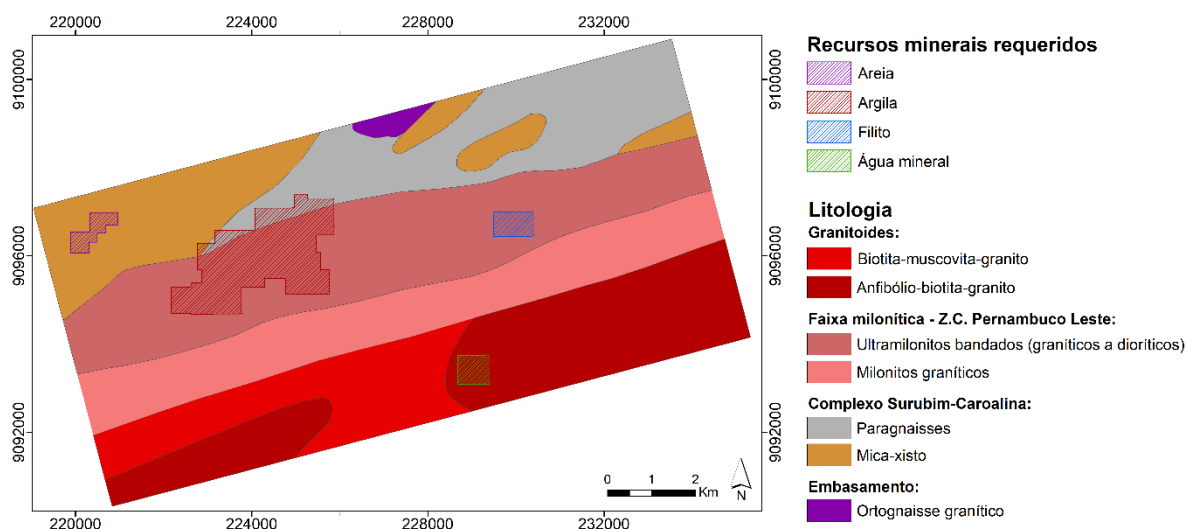
Contudo, a área de estudo possivelmente apresenta potencial para fonte de brita. A brita é um bem mineral de uso comum na construção civil, e as litologias mais adequadas para a fonte desse recurso são granitos, gnaisses, dioritos, dentre outras. Assim, os milonitos/ultramilonitos da ZCPE e os granitoides, possivelmente, podem ser explorados para este fim. Embora, até o momento não há cadastro de exploração para este bem mineral, além disso, se faz necessário um estudo mais detalhado de avaliação do potencial econômico do mesmo.

Tabela 1 - Recursos minerais disponíveis na área de estudo

Substância	Areia	Argila	Argila
Processo	840228/2017	840306/2015	840315/2015
Fase	Requerimento de licenciamento	Autorização de pesquisa	Autorização de pesquisa
Uso	Construção civil	Industrial	Industrial
Unidade Geológica	Complexo Surubim-Caroalina	Complexo Surubim-Caroalina	Complexo Surubim-Caroalina
Localização	Gravatá	Gravatá	Gravatá
Substância	Argila	Filito	Água mineral
Processo	840077/2016	840110/2018	840146/2015
Fase	Autorização de pesquisa	Autorização de pesquisa	Disponibilidade
Uso	Industrial	Industrial	Engarrafamento
Unidade Geológica	Complexo Surubim-Caroalina	Faixa milonítica - ZCPE	Granitoides
Localização	Gravatá	Gravatá/Pombos	Chã Grande

Fonte: Sistema de Informações Geográficas da Mineração (SIGMINE), 2020.

Figura 41 - Mapa geológico simplificado com as áreas de recursos minerais requeridas



Fonte: O Autor, 2020.

8 DISCUSSÃO

A área de estudo, inserida na porção leste da Província Borborema, encontra-se majoritariamente sob a Zona de Cisalhamento Pernambuco Leste, que subdivide a área em duas unidades litológicas distintas: rochas metassedimentares do Complexo Surubim-Caroalina, a norte, e granitoides sintranscorrentes, a sul (APÊNDICE 4). Os aspectos estruturais característicos da área foram originados pela deformação transcorrente do evento Brasileiro em um regime de transição dúctil-rúptil que são representados por foliação de alto ângulo e lineações de estiramento mineral; dobramentos; sistema de falhas e fraturas; e principalmente pelas zonas de cisalhamento.

8.1 ASPECTOS TECTÔNICO E GEOLÓGICO

As imagens de satélite e aerogeofísicas indicam que a ZCPE consiste num conjunto de zonas de cisalhamento com geometria anastomosada, que formam uma faixa principal, de direção ENE-WSW, com ramificações de direção NE-SW. A cinemática destral é bem definida por critérios observados em macro a microescala. Entretanto, na porção noroeste do mapa, uma ramificação da zona de cisalhamento foi classificada por indicadores microestruturais com cinemática sinistral, originada de forma subordinada à ZCPE.

A mineralogia presente nas rochas metassedimentares do Complexo Surubim-Caroalina, sobretudo a ocorrência de granada e sillimanita, indicam que o metamorfismo ocorreu na fácies anfibolito alto, na zona da sillimanita. De acordo com a literatura (ex. Teixeira, 2015; Neves et al, 2017), a foliação regional desse complexo é de baixo ângulo com direção NNE. Diante disso, alguns aspectos estruturais/microestruturais destacados, como: (i) geometria de corpos alongados na direção NE-SW, com foliação nesta mesma orientação e mergulho moderado a alto; (ii) frequente milonitização; (iii) recristalização dinâmica do quartzo; e (iv) mecanismos de deformação de bandas de deformação, formação de subgrão e *kink bands* em biotita; corroboram com o entendimento de que a deformação transcorrente rotacionou e verticalizou, no sentido destral (correspondente à cinemática do evento), a foliação pré-existente dessas litologias, além de ter gerado dobramentos e zonas de cisalhamento.

Os granitoides, a sul, apresentam foliação tectônica e magmática, forma geométrica dos corpos alongada e textura isotrópica observada em porções mais afastadas da ZCPE, sugerindo que o alojamento desses plútons se deu por influência da tectônica transcorrente. Assim, a gênese desses plútons é sin- a tarditectônica. Estes resultados são condizentes com os resultados dispostos na literatura.

Com isso, os aspectos de campo e petrográficos indicam que a deformação que gerou a ZCPE afetou todas as litologias da região. O estudo de detalhe petrográfico e microestrutural permitiu identificar a que a faixa milonítica possui variação de deformação das rochas que a compõem, em termos de textura e composição. Portanto, foi dividida em duas porções: ultramilonitos bandados e milonitos graníticos.

A porção de ultramilonitos representa a variação mais proeminente da faixa milonítica. São caracterizados pelos bandamentos félsicos e máficos, cuja composição varia de granítica a diorítica, e por vezes, metassedimentar. Nas bordas dessa porção, também se evidencia menor intensidade de deformação, apresentando variação para milonitos. Os diques encontrados nessa litologia estão milonitizados junto com toda a unidade, por isso, é difícil o reconhecimento entre a foliação bandada verticalizada. A porção de milonitos é caracterizada pelo predomínio de protólito granítico, fortemente influenciada pelos granitoides. A intensidade de deformação dessa porção pode variar para protomilonito nas bordas da unidade.

8.2 ASPECTOS ESTRUTURAIS DA TRANSIÇÃO DÚCTIL-RÚPTIL

A deformação dúctil que deu origem a zona de cisalhamento é o principal registro da área de estudo, entretanto, algumas evidências apresentadas neste trabalho sugerem que a deformação transcorrente evoluiu da fase dúctil para uma fase dúctil-rúptil ao final do processo tectônico.

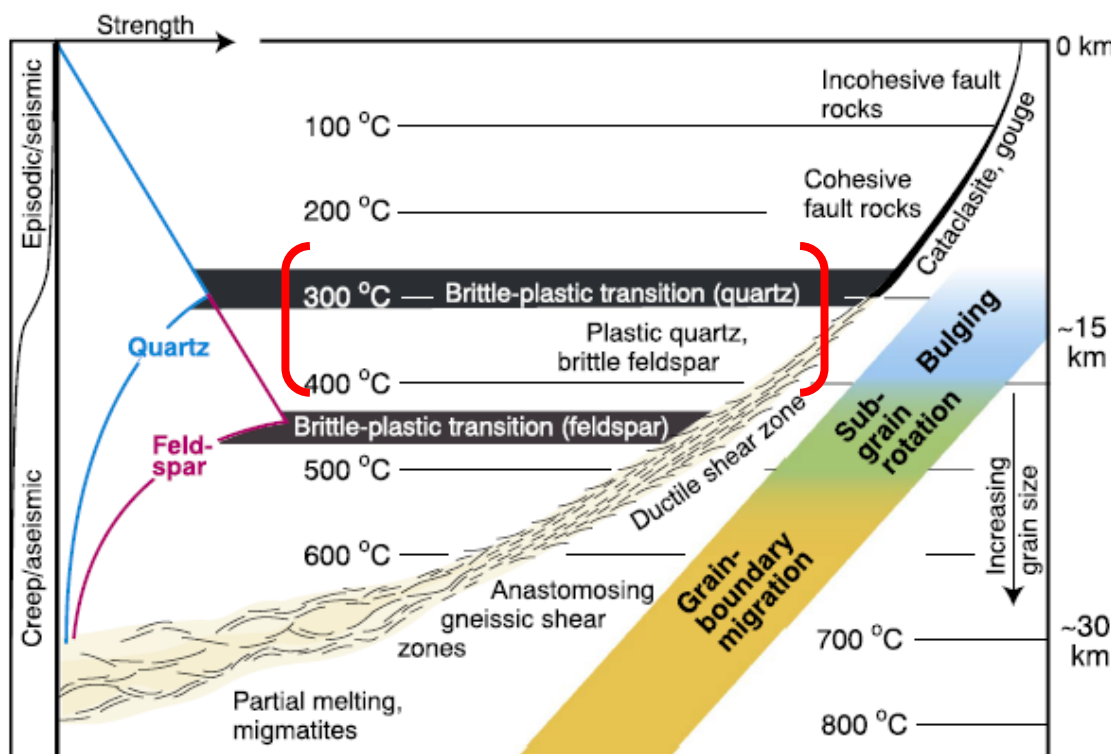
Em macroescala, os lineamentos estruturais obtidos através de modelos digitais de elevação possuem direção preferencial ENE-WSW e NW-SE e outra direção N-S, menos expressiva. Considerando que estas direções se correlacionam com os dados estruturais observados em meso- e microescala: (i) a direção ENE corresponde com a foliação da ZCPE e das falhas transcorrentes destrais E-W; (ii) a direção NW corresponde às falhas R (destral); e (iii) a direção N-S corresponde à falha R' (sinistral). Adicionalmente, as direções dos lineamentos também são condizentes com as fraturas identificadas na área durante o mapeamento.

Em escala de afloramento, foram observados dobras e sistema de falhas. Os dobramentos foram originados na deformação dúctil, possivelmente nos estágios iniciais, por forças compressivas associadas à transcorrência, e posteriormente paralelizadas à foliação milonítica por efeito da deformação progressiva (Figura 43B). O par conjugado de falhas transcorrentes, com direções NE-SW (destral) e NNE-SSW (sinistral), podem ser correlacionados ao par R e R', respectivamente, do modelo de cisalhamento de Riedel, e a zona de cisalhamento correspondendo ao deslocamento principal (Figura 43C). Assim, essa relação

sugere que as falhas se formaram nos estágios finais do evento de transcorrência, em regime dúctil-rúptil.

A análise microtectônica mostra que a porção milonítica é marcada pela recrystalização intensa do quartzo, que grada de BLG a SGR, localmente apresentando trama poligonal e pela deformação plástica do feldspato. Embora o feldspato ocorra também fraturado, a feição predominante é a forma de sigmoides simétricos e assimétricos, com recrystalização incipiente nas bordas dos grãos, podendo apresentar microestrutura manto-e-núcleo bem desenvolvida. Essas feições indicam que essa porção se originou em baixo a médio grau de deformação (400 – 500 °C). Além disso, a porção apresenta mirmequitas pontuais nas faces do grão paralelas à foliação de cisalhamento (C), indicando que a deformação pode ter iniciado em temperaturas mais elevadas e decresceu para condições metamórficas mais baixas. Já a porção ultramilonítica possui grau de deformação menor que a milonítica. A recrystalização do quartzo ocorre principalmente por BLG, e o feldspato ocorre com deformação frágil predominante. Estes se encontram intensamente fraturados, com redução de grão. Essas feições indicam que essa porção se originou em baixo grau de deformação (± 400 °C) (Figura 42).

Figura 42 - Diagrama simplificado ilustrando a variação vertical de deformação em zonas de cisalhamento



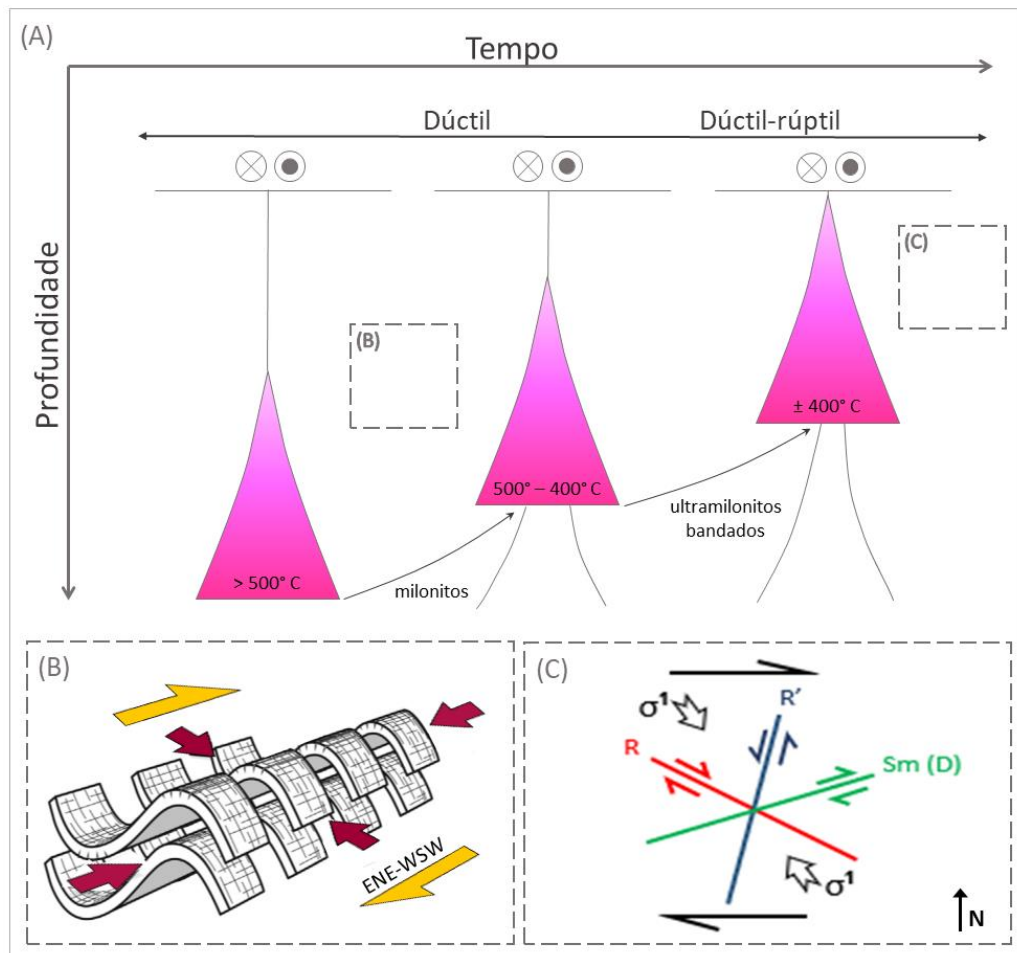
Fonte: Fossen; Cavalcante, 2017.

Colchetes em vermelho indica a faixa das condições de deformação da ZCPE na área de estudo. A transição dúctil-rúptil para o quartzo e feldspato e os principais mecanismos de recrystalização (BLG, SGR, GBM) estão associados à temperatura, bem como depende da taxa de deformação e presença de fluidos.

Ainda em microtectônica, o par conjugado R e R' e bandas de cisalhamentos também podem ser observados. As bandas de cisalhamento (C') possuem a mesma direção que a microfalha R, sugerindo que há uma evolução da deformação para o estado rúptil no local (ver seção 5.5). As direções dessas microestruturas podem ser obtidas de forma aproximada, a partir da orientação das seções delgadas.

Portanto, a interpretação estrutural, de macro- a microescala, sugere que a deformação na área de estudo, pode ter se iniciado em condições metamórficas de maior grau de deformação, em regime dúctil, com temperaturas acima de 500 °C, e declinou para condições de baixo grau de deformação, em regime dúctil-rúptil, com temperatura média de 400 °C, equivalente à fácies xisto verde, sendo este o registro principal das rochas (Figura 43A).

Figura 43 - Modelo de evolução esquemático da Zona de Cisalhamento Pernambuco Leste



Fonte: O Autor, 2020. (adaptado de Miranda et al, 2020)

A – Progresso da deformação relacionada com a exumação. Início em condições de alta temperatura e regime dúctil, com progressão para baixo de grau de deformação, em baixas temperaturas e regime dúctil-rúptil. B – Ilustração da formação dos dobramentos, originados por força transpressiva em regime dúctil e paralelizados com a foliação pela deformação progressiva (adaptado de Fossen et al, 2013 para regime transpressivo). C – Modelo de cisalhamento de Riedel ilustrando a deformação progressiva durante a transição do regime dúctil-rúptil (R, falha sintética; R', falha antitética; Sm(D), zona de deslocamento principal; σ^1 , orientação inferida do esforço compressão máxima regional).

As condições de deformação e desenvolvimento da ZCPE são constantemente debatidas para o entendimento da evolução da Província Borborema. Neves e Mariano (1999) demonstraram que a evolução metamórfica dessa estrutura grada no grau de deformação, de seções de milonitos de alta-T a baixa-T, de oeste para leste. Trabalhos recentes (ex. Teixeira, 2015, França et al, 2019, Castellan et al, 2020), corroboram para estas afirmações e contribuem com dados mais precisos sobre a relação de idade e condições de pressão e temperatura de formação da ZCPE. Castellan et al (2020), adicionalmente, indicam que a porção leste, que corresponde aos milonitos/ultramilonitos de baixa-T, se desenvolveu sobre um regime de transição dúctil-rúptil.

Diante disso, os resultados obtidos neste trabalho são condizentes com a literatura da região, corroboram no entendimento da deformação da ZCPE nesta seção.

9 CONCLUSÃO

Baseado na interpretação dos dados obtidos em imagens de satélite/aerogeofísicas, trabalho de campo e análise petrográfica/microtectônica, o presente estudo aponta as seguintes conclusões:

- a) O regime transcorrente, que gerou a Zona de Cisalhamento Pernambuco Leste, deformou e rotacionou a litologia pré-existente do Complexo Surubim-Caroalina e condicionou o alojamento dos plútons graníticos, o que fez com a foliação dominante na área seja paralela a foliação milonítica, com mergulho moderado a alto.
- b) Indicadores cinemáticos observados em macro- a microescala, tais como, trama S/C e tipo-C', foliação oblíqua de quartzo, porfiroclastos de feldspato assimétrico (tipo- σ) e *mica fish*, definem claramente a cinemática destal da Zona de Cisalhamento Pernambuco Leste.
- c) A análise microtectônica mostra que a variação do comportamento reológico dos minerais, tais como, recristalização do quartzo gradando de SGR para BLG e deformação do feldspato gradando de dúctil para dúctil-rúptil nos ultramilonitos/milonitos, evidencia uma variação da temperatura de deformação, de média para baixa. O que indica que houve um declínio no grau de condição metamórfica durante a formação da ZCPE, dentro do campo equivalente à fácies xisto verde.
- d) O modelo de cisalhamento de Riedel marcado pelo par conjugado de falhas transcorrentes R (destal – NW-SE), R' (sinistral – NNE-SSW), e falhas ENE-WSW (foliação milonítica – zona de deslocamento principal), observado em meso- e microescala, também indicam a transição do regime dúctil para dúctil-rúptil da deformação transcorrente, de forma evolutiva dentro do mesmo evento tectônico da Orogênese Brasileira.
- e) Os resultados obtidos deste trabalho representam uma contribuição ao conhecimento geológico da porção leste da ZCPE. Entretanto, são necessários estudos de maior detalhe a respeito de alguns tópicos, por isso, é sugerido: (i) caracterização microtectônica de forma sistemática em seções transversais à ZCPE para melhor interpretação do gradiente de deformação; (ii) caracterização sistemática das estruturas rúpteis para analisar possíveis reativações das estruturas descritas neste estudo; (iii) estudos geofísicos e geoquímicos de detalhe para melhor distinção dos granitoides e embasamento a sul da área.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y; NEVES, B. B. B.; FUCK, R. A. Brazilian structural provinces: an introduction. **Earth-Science Reviews**, v. 17, p. 1-29, 1981.
- CASTELLAN, P., VIEGAS, G.; FALEIROS, F. M. Brittle-ductile fabrics and P-T conditions of deformation in the East Pernambuco shear zone (Borborema Province, NE, Brazil). **Journal of the Geological Society**, 2020.
- CAXITO, F. A. *et al.* Toward an integrated model of geological evolution for NE Brazil-NW African: the Borborema Province and its connection to the Trans-Saharan (Benino-Nigerian and Tuareg shields) and Central African orogens. **Brazilian Journal of Geology**, v.50, n. 2, 2020.
- EBERT, H. Tectônica e metamorfismo regional do escudo brasileiro. **Recife: SUDENE**, 1964.
- FOSSEN, H.; CAVALCANTE, G. C. G. Shear zone: a review. **Earth-Science Reviews**, p. 434-455, 2017.
- FOSSEN, H., TEYSER, C.; WHITNEY, D. L. Transtensional folding. **Journal of Structural Geology**, p. 89-102, 2013.
- FRANÇA, R. H. M.; NEVES, S. P.; BEZERRA, J. P. S. Análise Tectônica do Segmento Central da Zona de Cisalhamento Pernambuco Leste, Província Borborema, NE do Brasil. **Estudos Geológicos**, 28(2), p. 32-52. 2018.
- FRANÇA, R. H. M.; NEVES, S. P.; BEZERRA, J. P. S.; BRUGUIER, O. Geochemistry and geochronology of orthogneisses across a major transcurrent shear zone (East Pernambuco shear zone, Borborema Province, Northeast Brazil): Tectonic implications. **Journal of South American Earth Sciences**, p. 285-301. 2019
- JARDIM DE SÁ, E. F.; MEDEIROS, V. C.; AMARO, V. E. Os cisalhamentos brasileiros na Zona Transversal, NE do Brasil: uma mega-estrutura em dominó. *In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE*, 16., 1995, Recife. **Anais [...]**. Recife: SBG, 1995. p. 134-138.
- MIRANDA, T. S.; NEVES, S. P.; CELESTINO, M. A. L.; ROBERTS, N. M. W. Structural evolution of the Cruzeiro do Nordeste shear zone (NE Brazil): Brasiliano-Pan-African-ductile-to-brittle transition and Cretaceous brittle reactivation. **Journal of Structural Geology**, v. 141. 2020
- NEVES, S. P.; BEZERRA, J. P. S.; BRUGUIER, O. FRANÇA, R. H. M. Evidence for Early Tonian (Ca. 1000-940 Ma) continental rifting in southern Borborema Province (NE Brazil): tectonic inheritance and shear zone nucleation during assembly of West Gondwana. **International Geology Review**. 2020.
- NEVES, S. P. *et al.* U–Pb ages of plutonic and metaplutonic rocks in southern Borborema Province (NE Brazil): Timing of Brasiliano deformation and magmatism. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 25, p. 285-297. 2008.

NEVES, S. P. *et al.* The age distributions of detrital zircons in metasedimentary sequences in eastern Borborema Province (NE Brazil): Evidence for intracontinental sedimentation and orogenesis?. **Precambrian Research**, v. 175, p. 187-205. 2009.

NEVES, S. P. *et al.* From extension to shortening: Dating the onset of the Brasiliano Orogeny in eastern Borborema Province (NE Brazil). **Journal of South American Earth Sciences**, p. 238-256. 2015.

NEVES, S. P. *et al.* Timing of crust formation, deposition of supracrustal sequences, and Transamazonian and Brasiliano metamorphism in the East Pernambuco belt (Borborema Province, NE Brazil): Implications for western Gondwana assembly. **Precambrian Research**, p. 21. 2006.

NEVES, S. P.; LAGES, G. A.; BRASILINO, R. G.; MIRANDA, A. W. A. Paleoproterozoic accretionary and collisional processes and the build-up of the Borborema Province (NE Brazil): Geochronological and geochemical evidence from the Central Domain. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 58, p. 165-187. 2015.

NEVES, S. P.; MARIANO, G. Assessing the tectonic significance of a large-scale transcurrent shear zone system: the Pernambuco lineament, northeastern Brazil. **Journal of Structural Geology**, v. 21, p. 1369-1383. 1999.

NEVES, S. P.; MARIANO, G.; CORREIA, P. B.; SILVA, J. M. R.. 70 m.y. of synorogenic plutonism in eastern Borborema Province (NE Brazil): temporal and kinematic constraints on the Brasiliano Orogeny. **Geodinamica Acta**, v. 19, n. 3-4, p. 213-236. 2006.

NEVES, S. P.; MARIANO, G.; SILVA, M. R. **Geologia e recursos minerais da Folha Surubim SC.25-Y-C-IV Escala 1:100.000**. Recife: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2017.

NEVES, S. P.; MARIANO, G.; LIMA, C. M. Avaliando a Reativação de Estruturas do Embsamento Precambriano na Formação das Bacias Sedimentares Costeiras: o caso da Zona de Cisalhamento Pernambuco Leste. **Estudos Geológicos**, 28(1), p. 104-119. 2018.

NEVES, S. P.; TEIXEIRA, C. M. L.; BRUGUIER, O. Long-lived localized magmatism in central-eastern part of the Pernambuco-Alagoas Domain, Borborema Province (NE Brazil): Implications for tectonic setting, heat sources, and lithospheric reworking. **Precambrian Research**, v. 337, p. 32, 2019

PASSCHIER, C. W; TROUW, R. A. J. **Microtectonics**. 2 ed. Berlin: Springer, 2005.

SILVA FILHO, A. F. *et al.* SHRIMP U–Pb zircon geochronology and Nd signatures of supracrustal sequences and orthogneisses constrain the Neoproterozoic evolution of the Pernambuco–Alagoas domain, southern part of Borborema Province, NE Brazil. **Journal Earth Science (Geol. Rundsch.)**, p. 2155-2190, 2014.

TEIXEIRA, C. M. L. **A terminação oriental da zona de cisalhamento Pernambuco leste e seu magmatismo associado**. 2011. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

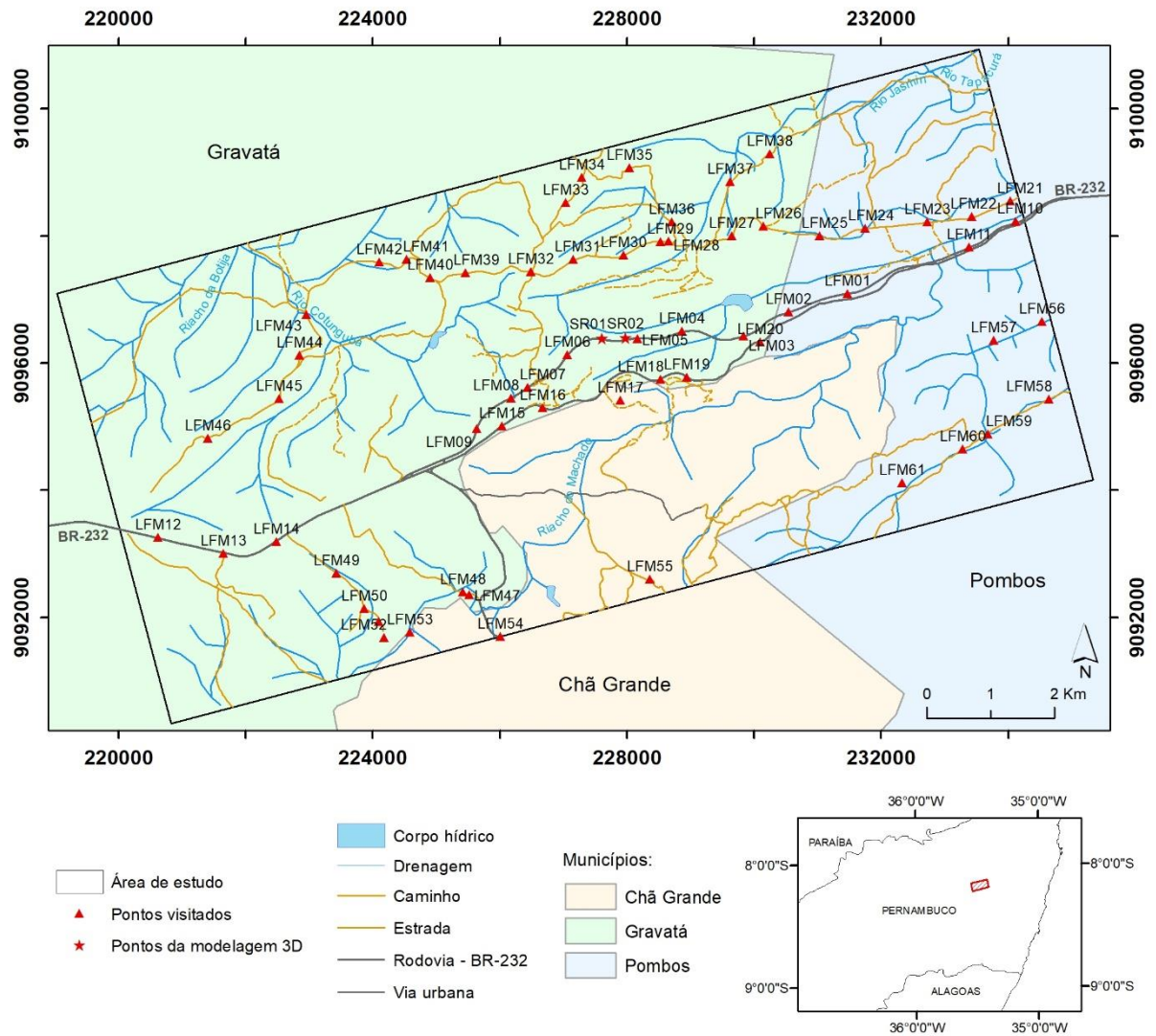
TEIXEIRA, C. M. L. **Evolução crustal dos domínios central e Pernambuco-Alagoas da província Borborema na folha Vitória de Santo Antão (Pernambuco - Nordeste do Brasil)**. 2015. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

TOUW, R. A. J.; PASSCHIER, C. W.; WIERSMA, D. J. **Atlas of Mylonites** - and related microstructures. Berlin: Springer. 2010.

TWISS, R. J.; MOORES, E. M.. **Structural Geology**. 2 ed. New York: Freeman, 2007.

VAN SCHMUS, W. R. *et al.* Proterozoic links between the Borborema Province, NE Brazil, and the Central African Fold Belt. West Gondwana: Pre-Cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region., **Special Publications**, n. 294, p. 66-99, 2008.

APÊNDICE A - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DE PONTOS



APÊNDICE B - TABELAS DE PONTOS E DADOS ESTRUTURAIS

Tabela B 1 - Pontos e dados estruturais de foliação e lineação

PONTO	LAT_X	LONG_Y	LITOLOGIA	FOLIAÇÃO			LINEAÇÃO	
				INT	SENT	DIR	INT	SENT
LFM01	231469	9097090	milonito bandado	45	163	253	32	215
LFM02	230541	9096798	ultramilonito bandado	71	177	267		
LFM03	229840	9096424	ultramilonito bandado	41	335	245		
LFM04	228871	9096496	ultramilonito	78	154	244	25	82
LFM05	228166	9096382	milonito a ultramilonito bandado	85	155	245	27	66
LFM06	227067	9096130	ultramilonito bandado	71	165	255		
LFM07	226443	9095616	milonito bandado	75	165	255		
LFM08	226179	9095444	milonito granítico	81	325	235	14	55
LFM09	225636	9094962	milonito bandado	81	145	235		
LFM10	234115	9098224	milonito bandado	81	340	250		
LFM11	233382	9097822	ultramilonito	75	150	240	8	62
LFM12	220630	9093254	milonito a ultramilonito bandado	73	143	233	13	226
LFM13	221657	9093002	milonito granítico	30	135	225		
LFM14	222485	9093186	milonito granítico	81	335	245		
LFM15	226038	9095008	milonito granítico	82	156	246	18	66
LFM16	226674	9095294	milonito a ultramilonito granítico	73	178	88		
LFM17	227897	9095406	milonito a ultramilonito granítico	76	145	235		
LFM18	228528	9095742	milonito a ultramilonito granítico	65	330	240		
LFM19	228944	9095768	granito milonitizado	75	353	263		
LFM20	230099	9096328	ultramilonito bandado	70	327	237		
LFM21	234033	9098542	ultramilonito bandado	80	320	230		
LFM22	233429	9098298	ultramilonito bandado	70	150	240		
LFM23	232726	9098218	milonito bandado	70	138	228		
LFM24	231747	9098116	Anf-Bt-xisto	40	110	200		
LFM25	231033	9097998	xisto intercalado com milonito	70	272	182		
LFM26	230151	9098152	milonito de protólito metassedimentar	65	135	225	12	60
LFM27	229655	9097996	milonito de paragnaisse	70	132	222		
LFM28	228660	9097912	Solo amarronzado					
LFM29	228531	9097904	paragnaisse milonitizado	85	122	212		
LFM30	227953	9097692	Solo róseo claro, quartzo-feldspático					
LFM31	227154	9097622	milonito de protólito metassedimentar	75	347	257		
LFM32	226494	9097430	milonito de paragnaisse	70	132	222		
LFM33	227040	9097912	Solo cinza amarronzado					
LFM34	227289	9098918	ortognaisse granítico	74	132	222	69	182

LFM35	228040	9099066	Solo claro, quartzo-feldspático					
LFM36	228706	9098212	xisto milonitizado	65	130	40		
LFM37	229630	9098850	saprólito de xisto	60	118	208		
LFM38	230246	9099288	Bt-paragneisse deformada	75	118	208		
LFM39	225461	9097412	saprólito	75	330	60		
LFM40	224904	9097340	paragneisse milonitizado		130	220		
LFM41	224536	9097628	Bt-xisto	85	136	226		
LFM42	224110	9097584	Bt-xisto	65	130	220		
LFM43	222958	9096760	Bt-xisto	55	130	220		
LFM44	222854	9096118	ultramilonito de protólito metassedimentar	65	142	232		
LFM45	222531	9095433	ultramilonito bandado	70	140	230		
LFM46	221414	9094810	milonito de paragneisse	85	330	60		
LFM47	225522	9092354	granitoide - tectonito S	60	152	62		
LFM48	225417	9092390	granito milonitizado/corpo diorítico	56	136	46		
LFM49	223430	9092690	granito milonitizado	75	330	60		
LFM50	223874	9092132	Anf-Bt-granito milonitizado	70	310	40		
LFM51	224095	9091926	granodiorito cinza milonitizado	80	140	50		
LFM52	224186	9091676	Anf-Bt-granito deformado		160	70		
LFM53	224591	9091760	Anf-Bt-granito deformado	80	332	62		
LFM54	226014	9091690	Bt-Ms-granito isotrópico					
LFM55	228362	9092598	Bt-Ms-granito deformado	70	152	62		
LFM56	234527	9096652	Granito deformado			60	Direção de foliação	
LFM57	233775	9096354	Granito milonitizado			25	Direção de foliação	
LFM58	234643	9095428	Granito milonitizado	69	150	240		
LFM59	233679	9094876	Granito milonitizado	69	150	60		
LFM60	233281	9094642	Granito milonitizado					
LFM61	232332	9094110	Ortogneisse granodiorítico	56	19	289		
SR01	227613	9096378	ultramilonito bandado	80	334	64	10	65
SR02	227979	9096383	ultramilonito bandado	82	335	65	15	60

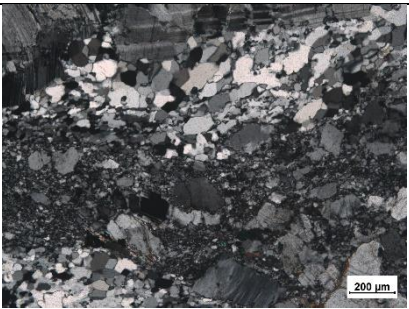
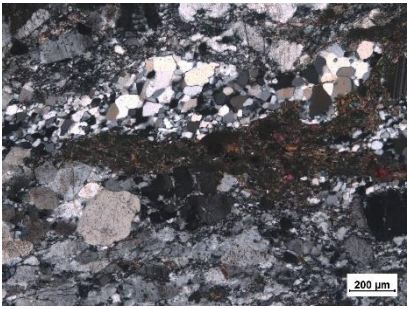
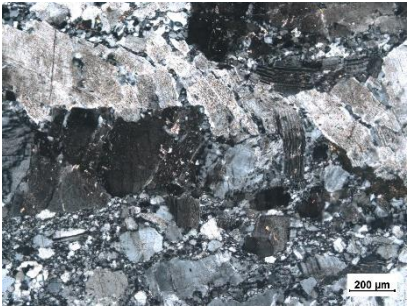
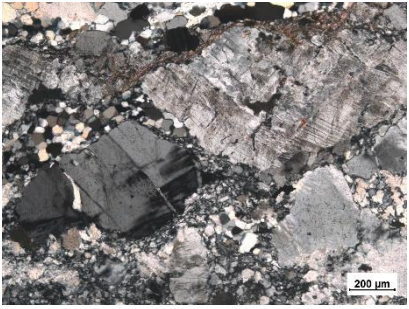
Tabela B 2 - Pontos e dados estruturais de dobras

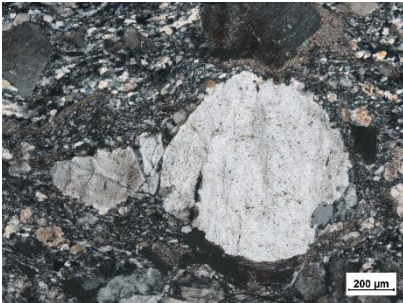
PONTO	LAT__X	LONG_Y	EIXO DE DOBRAS		OBS.
			INT	SENT	
LFM03	229840	9096424	10	262	
LFM04	228871	9096496	31	80	
LFM48	225417	9092390		70	Traço axial
LFM56	234527	9096652			Direção de foliação
LFM57	233775	9096354			Direção de foliação
SR01	227613	9096378	5	80	68/340 – Plano Axial

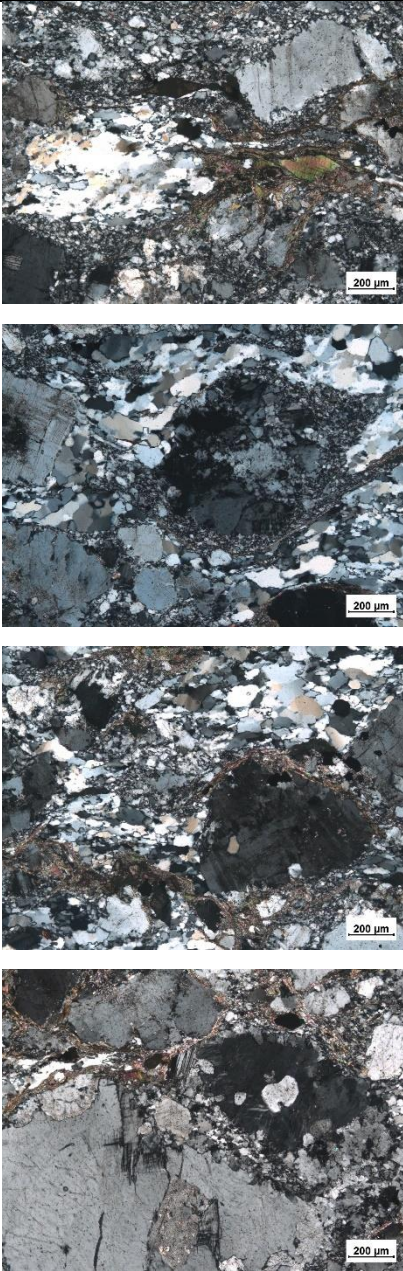
Tabela B 3 - Pontos e dados estruturais de falhas

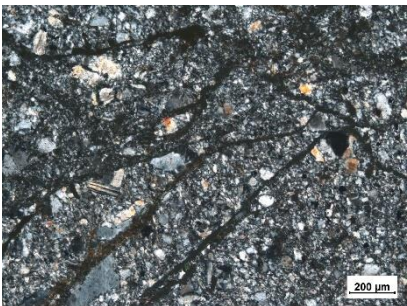
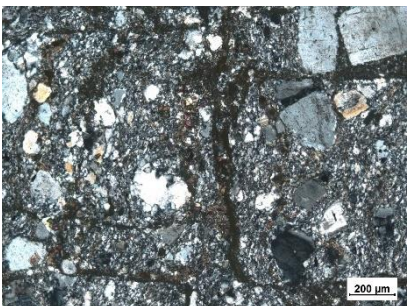
PONTO	LAT_X	LONG_Y	FALHAS			LINEAÇÃO		CINEMÁTICA
			INT	SENT	DIR	INT	SENT	
LFM01	231469	9097090	68	195	285	35	266	Destral
			75	315	225	70	284	-----
LFM13	221657	9093002	84	335	245	3	270	Destral
LFM54	226014	9091690	70	160	70	15	85	Destral
SR02	227979	9096383	75	235	325	12	320	Destral
			75	290	20	20	25	Sinistral

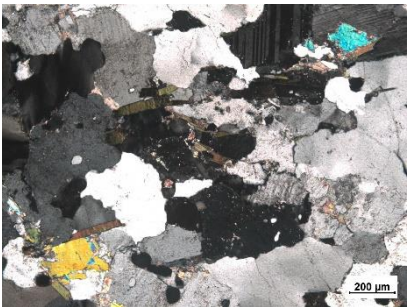
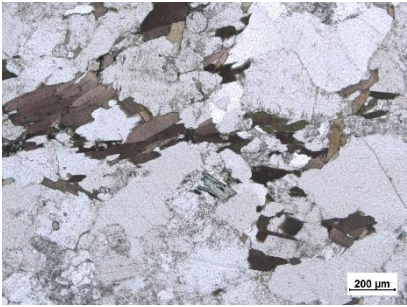
APÊNDICE C - DESCRIÇÕES PETROGRÁFICAS

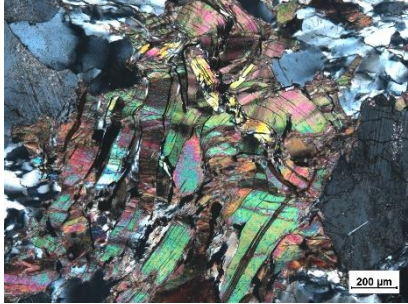
Amostra	LFM.09	
Minerais Essenciais (%)	Qtz ($\pm 30\%$), Kf ($\pm 25\%$), Pl ($\pm 20\%$), Bt (10-15%)	
Minerais Acessórios (%)	Ap, Ttn, Ep, Czo, Anf, Opc	
Nome da Rocha	Milonito de protólito granítico	
Descrição Microscópica		Fotomicrografia
A foliação milonítica é definida pelas fitas de quartzo e micas, que envolvem porfiroclastos de feldspato. Microtextura principal de milonito com variações para protomilonito. Granulação fina a média. Cinemática destral definida por fitas de quartzo, porfiroclastos assimétricos. O Qtz forma fitas espaçadas de cristais equigranulares, variando de forma alongada com contatos interlobado a poligonais. A recrystalização é avançada, principalmente por SGR. A deformação é fraca a moderada, apresenta localmente bandas de deformação e subgrão. Os feldspatos (Kf/Pl) ocorrem como porfiroclastos intensamente fraturados, apresenta deformação de extinção ondulante, com recrystalização incipiente por BLG. Microestrutura manto-e-núcleo e pertita são observadas. Pl apresenta avançada alteração por sericitização, curvamento de grão, bandas kink e localmente cristais com dobras fechadas. Bt ocorrem como fitas finas, paralelas a foliação milonítica, bastante alteradas (oxidadas). Ep/Czo são abundantes, granulação fina a grossa, associados as fitas de micas e inclusos nos plagioclásios como resultado da saussuritização. Baixa a média temperatura de deformação metamórfica (400 – 500 °C).		   

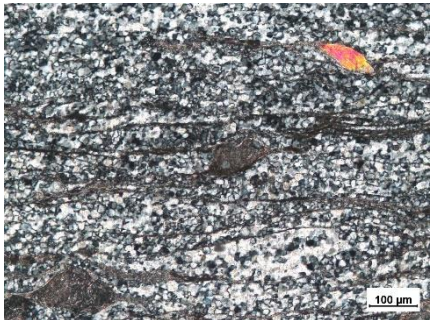
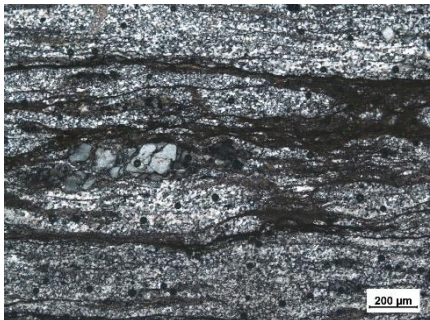
Amostra	LFM.12	
Minerais Essenciais (%)	Qtz ($\pm 30\%$), Kf ($\pm 25\%$), Pl (15-20%), Bt (5-10%), Ms ($\pm 5\%$)	
Minerais Acessórios (%)	Ep, Czo, Anf, Opc	
Nome da Rocha	Milonito de protólito granítico	
Descrição Microscópica		Fotomicrografia
A foliação milonítica é definida pelas fitas de quartzo, que envolvem porfiroclastos de feldspato. Microtextura principal de milonito. Granulação fina. Cinemática destal definida por fitas de quartzo, porfiroclastos assimétricos e fraturados (microfalhas antitéticas). O Qtz ocorre como cristais alongados de granulação fina a média, formam fitas (foliação oblíqua), de cinemática destal, apresenta recristalização avançada por BLG e SBR (predominantemente). Não é observado claramente mecanismos de deformação como bandas de deformação e subgrão. Kf ocorre como porfiroclastos bastante fraturados e deformados formando sigmoides, apresenta deformação de extinção ondulante, recristalização incipiente por processo de BLG. Microestrutura de manto-e-núcleo (sigmoides) e pertita (localmente) são observadas, bem como inclusões de Ep e Qtz recristalizado nas fraturas. Pl ocorre como porfiroclastos em menor proporção que o Kf, inequigranulares, fraturados, apresenta deformação de extinção ondulante e curvamento de grão Recristalização fraca por processo de BLG. Microestrutura de manto-e-núcleo é observada. Apresenta alteração por sericitização. Bt ocorrem como fitas finas, paralelas a foliação milonítica, bastante alteradas (oxidadas). Ms ocorre como pequenas fitas de cristais estirados na direção da foliação milonítica (textura lepidoblástica), provável mineralização secundária, como mineral de alteração. Baixa a média temperatura de deformação metamórfica (400 – 500 °C).		   

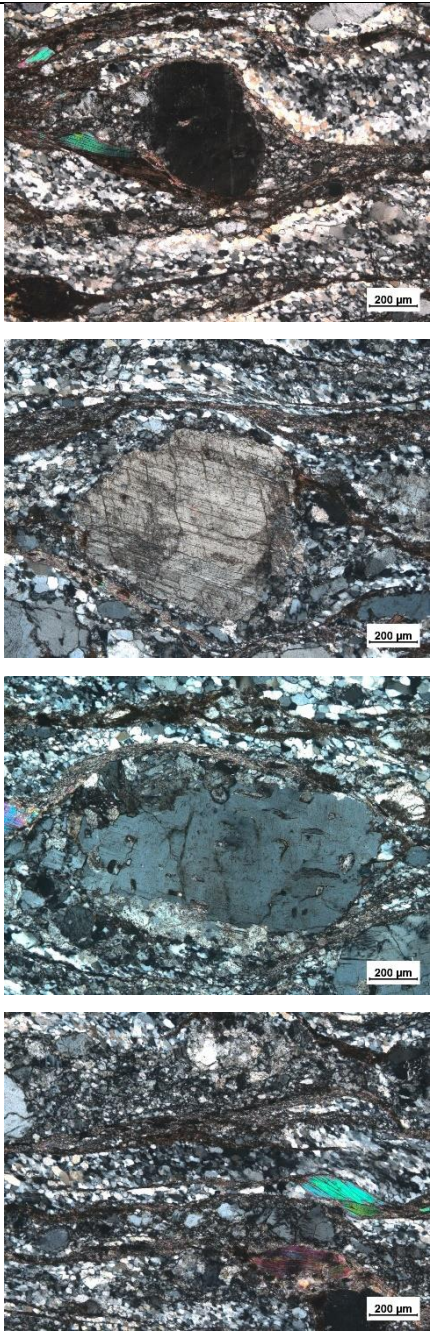
Amostra	LFM.13
Minerais Essenciais (%)	Qtz (20-30%), Kf (25-30%), Pl ($\pm 20\%$), Bt (5-10%), Ms ($\pm 5\%$), Hbl/Act ($\pm 5\%$)
Minerais Acessórios (%)	Ap, Ep, Czo, Opc
Nome da Rocha	Milonito de protólito granítico
Descrição Microscópica	Fotomicrografia
A foliação milonítica é definida pelas fitas de quartzo, que envolvem porfiroclastos de feldspato. Microtextura principal de milonito. Granulação fina. Cinemática destal definida por fitas de quartzo, porfiroclastos assimétricos, mica fish. Qtz ocorre como cristais alongados de granulação média, contatos interlobados preferencialmente, formam fitas de foliação oblíqua, apresenta recristalização avançada por SBR. Apresenta bandas de deformação e subgrão como deformação. Kf ocorre como porfiroclastos bastante fraturados e deformados formando sigmoides, apresenta deformação de extinção ondulante, recristalização incipiente por processo de BLG. Microestrutura manto-e-núcleo (sigmoides) por vezes bem desenvolvida e pertita e mirmequita (localmente) são observadas. Mirmequita na face paralela à foliação, indicando a cinemática e deformação com início em alta temperatura. Pl ocorre como porfiroclastos, fraturados, apresenta deformação de extinção ondulante e curvamento de grão Recristalização incipiente por processo de BLG. Texturas de manto-e-núcleo é observada. Apresenta alteração por sericitização Bt/Ms ocorre como mineral acessório e secundário, formam pequenas fitas descontínuas de minerais alongados pela deformação e subidioblástico, associadas aos anfibólios, localmente formam a microsteutura mica fish. A muscovita também ocorre associado ao plagioclásio como resultado da sericitização. Estão em alto estado de oxidação. Anfibólios (Hbl/Act) OCORRE COMO cristais xenomórficos, por vezes deformados, associados com as fitas de micas, em estado de alteração para biotita e epidoto/clinozoisita. Média temperatura de deformação metamórfica (450 – 500 °C).	

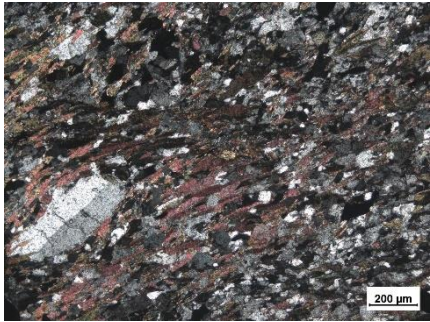
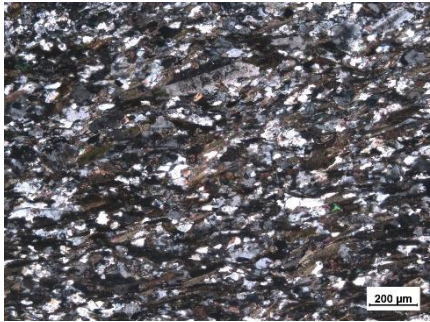
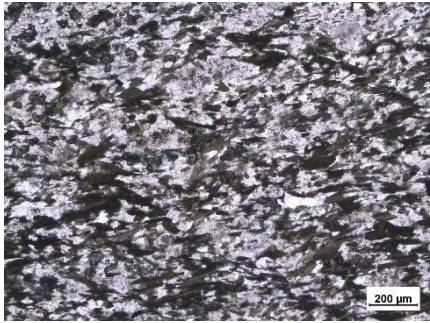
Amostra	LFM.18
Minerais Essenciais (%)	Qtz, Kf, Pl,
Minerais Acessórios (%)	Bt/Ms, Ep
Nome da Rocha	Ultramilonito fraturado (cataclase)
Descrição Microscópica	Fotomicrografia
Rocha com matriz muito fina, matriz afanítica, com porfiroclastos de Kf/Pl de granulação fina/média. A matriz possui textura ultramilonítica, com a foliação marada pela recrystalização por BLG dos cristais de Qtz – não sendo possível distinguir claramente Qtz de Kf/Pl. Apresenta textura de cataclase, com intenso fraturamento em diversas direções; as fraturas são caracterizadas por uma coloração marrom esverdeada devido a oxidação e intensa cristalização de epidoto secundário que as compõem, resultado de alteração hidrotermal. O epidoto possui granulação de fina a média, com forma idioblástica nos cristais maiores e xenoblástica nos cristais menores. Os porfiroclastos de feldspatos são prismáticos, fraturados, pouco deformados – mas localmente ocorrem com sigmoides – recrystalizados por BLG, apresentam extinção ondulante e inclusões de epidoto nas fraturas. Baixa temperatura de deformação metamórfica (400 °C).	   

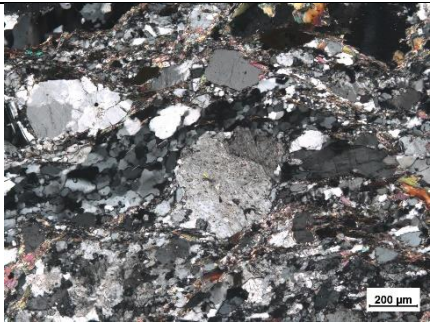
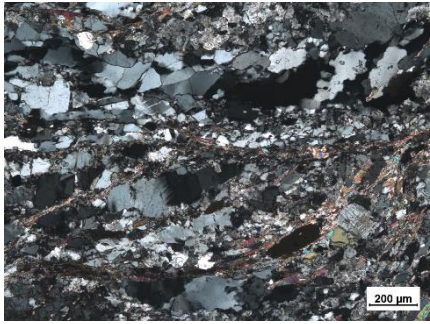
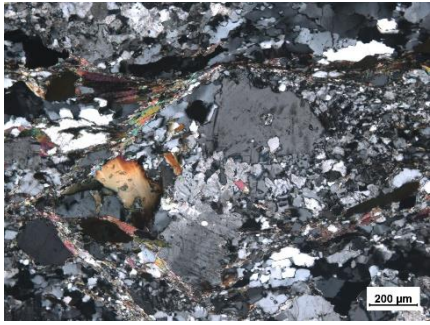
Amostra	LFM.34	
Minerais Essenciais (%)	Qtz ($\pm 35\%$), Pl ($\pm 25\%$), Kf (10-15%), Bt (10-%), Ms ($\pm 5\%$)	
Minerais Acessórios (%)	Ap, Chl, Opc	
Nome da Rocha	Ortognaisse quartzo-feldspático	
Descrição Microscópica		Fotomicrografia
Rocha de granulação média a grossa, inequigranular, com foliação definida, marcada por níveis de biotita e níveis de qtz e fds. Qtz ocorre como cristais alongados, apresentam deformação de extinção ondulante, bandas de deformação e subgrão, localmente é observado grãos poliminerálicos. Kf/Pl ocorrem como cristais xenoblásticos a subidioblástico, pouco deformado, apresentam extinção ondulante, moderado estado de sericitização, além das micas, inclusões de granadas pequenas é observado. Bt/Ms ocorrem como cristais idioblásticos em geral, possuem textura lepidoblástica que formam uma foliação gnáissica espaçada. Bt são de coloração amarronzada e localmente possui alteração para Chl. Ms também ocorre como alteração do plagioclásio (sericita). Chl são poucos cristais, subidioblásticos, associado aos níveis de Bt.		   

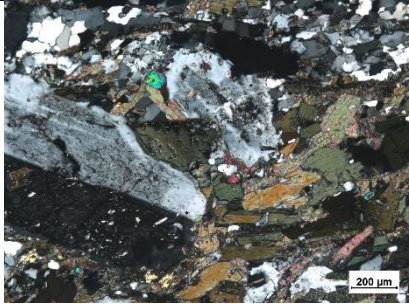
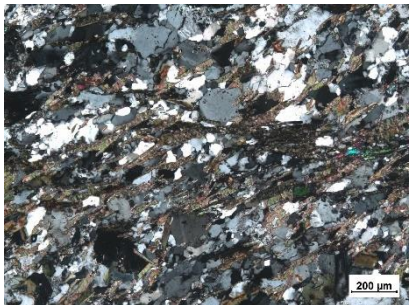
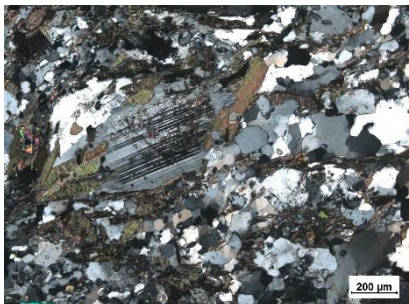
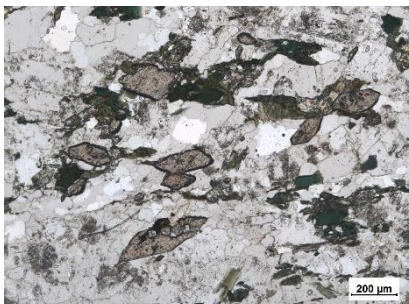
Amostra	LFM.38	
Minerais Essenciais (%)	Qtz ($\pm 35\%$), Pl (20-25%), Kf ($\pm 10\%$), Bt (10-15%), Ms ($\pm 5\%$)	
Minerais Acessórios (%)	Sill, Grt, Chl, Anf, Ep, Opc	
Nome da Rocha	Sillimanita-granada-Paragnaisse quartzo-feldspático	
Descrição Microscópica		Fotomicrografia
Rocha com microestrutura porfiroblástica com matriz lepidogranoblástica de granulação grossa, com foliação definida, composta pelos níveis micáceos e quartzo-feldspáticos, e as micas comumente apresentam dobramentos (kink band), cujos traços axiais transpõem a foliação principal ortogonalmente. Qtz: cristais xenoblásticos com forma alongada em geral, por vezes com grãos poliminerálicos, contato interlobados e serrilhados, apresentam extinção ondulante, bandas de deformação e formação de subgrão, recristalização por SGR e GBM. Apresenta duas direções de foliação oblíqua. Pl: ocorre como cristais xenoblástico a subidioblástico de granulação grossa e também como porfiroblastos. Apresenta deformação ondulante e curvamento de grãos, recristalização incipiente. Intenso processo de sericitização. Inclusões de biotita prismáticas ocorrem localmente nos porfiroblastos. Kfs: em menor proporção que o Pl, ocorre como cristais xenoblástico, de granulação grossa na matriz, apresenta deformação ondulante, faturamento. Bt/Ms: granulação grossa, com forma subidioblástica a idioblástica, disposta em níveis micáceos em duas direções. Comumente apresenta microestrutura de kink bands e crenulação, indicando possível dobramento pela transcorrência. Inclusões de zircão são observadas. Bt possui coloração castanho avermelhada e Ms é incolor. Grt: forma subidioblástica, localmente as inclusões de biotita. Sil: ocorre na forma fibrosa (fibrolita) associada aos níveis micáceos.		    

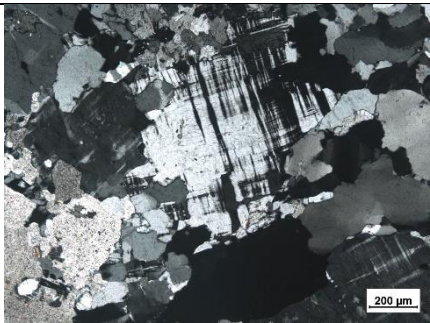
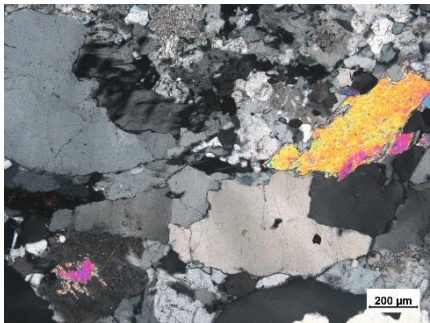
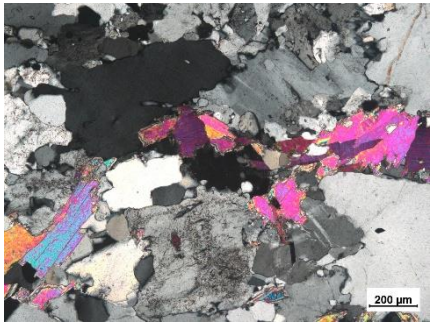
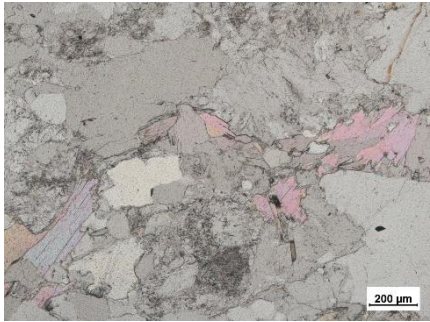
Amostra	LFM.44
Minerais Essenciais (%)	Qtz, Pl, Kf, Ms
Minerais Acessórios (%)	
Nome da Rocha	Ultramilonito quartzo-feldspático
Descrição Microscópica	Fotomicrografia
Ultramilonito de textura afanítica, com níveis variando de granulação fina a muito fina (cheerts) que formam finos bandamentos. O Qtz ocorre intensamente recrystalizado por BLG, os Kfs/Pl ocorrem fragmentados imersos na matriz, sendo difícil distinção do Qtz, e como porfiroclastos arredondados ou prismáticos, bastante fraturados, apresenta extinção ondulante e recrystalização moderada por BLG. A muscovita são pequenos cristais em microestrutura de mica fish. A cinemática não é bem evidente pelo grau alto de deformação que gerou a textura ultramilonítica, e recrystalização ocorrido, as microestruturas em mica fish indicam ambas cinemáticas – destal e sinistral -, sendo a sinistral em maior proporção. Assim, a deformação sinistral observado pode ser resultado de um processo tardio incipiente que se sobrepôs fracamente na rocha. Apresenta par conjugado de microfalhas. Possivelmente R e R' no modelo de cisalhamento de Riedel. Baixa temperatura de deformação metamórfica (400 °C).	   

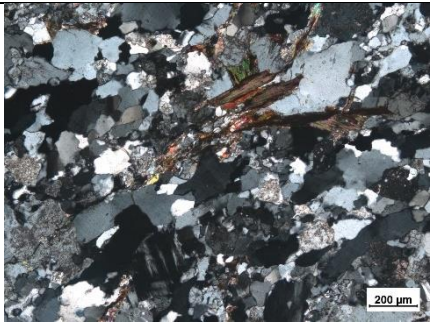
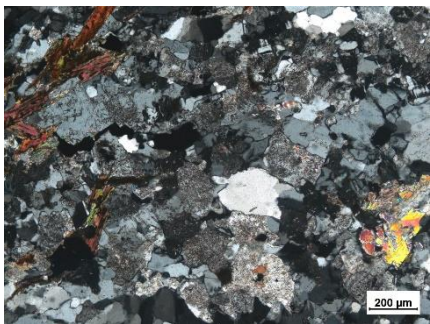
Amostra	LFM.46	
Minerais Essenciais (%)	Qtz (30-35%), Pl ($\pm 25\%$), Kf (10-15%), Ms ($\pm 10\%$)	
Minerais Acessórios (%)	Bt, Opc	
Nome da Rocha	Milonito granítico)	
Descrição Microscópica	Fotomicrografia	
Rocha com microtextura de milonito, com porfiroclastos de feldspato imersos em matriz de granulação média. A foliação milonítica é caracterizada por níveis de micas e Qtz. As micas formam foliações espaçadas com abundância de mica fish e o Qtz forma foliação oblíqua intensamente recrystalizado. A forma dos grãos, sobretudo os porfiroclastos de feldspatos em forma de sigmoides parcialmente simétricos sugerem uma deformação progressiva intensa. Alguns porfiroclastos assimétricos, foliação oblíqua de Qtz e os grãos mica fish indicam predominância da cinemática sinistral, embora, a cinemática destal ainda pode ser observada em porfiroclastos de Kf que preservam a forma sigmoidal e microfalhas. Ou seja, a deformação sinistral é sobreposta à destal. A abundância de minerais micáceos, sobretudo de Ms, sugere um caráter aluminoso, de protólito metassedimentar. Qtz: cristais alongados, granulação média a grossa, contatos interlobado, localmente apresenta contato poligonal indicando redução de área (recristalização estática), recrystalização intensa por SGR principalmente e apresenta extinção ondulante. Kfs/Pl: ocorrem principalmente como porfiroclastos prismáticos ou sigmoides simétricos e assimétricos. São bastante fraturados, podem apresentar extinção ondulante e curvamento de grãos. Inclusões de micas e feldspatos é comum. Microestrutura de manto-e-núcleo é comum, com recrystalização moderada por BLG. Mirmequita também é comum, indicando que a deformação chegou a atingir estágios de alto grau. Bt/Ms: formam foliações espaçadas de granulação fina com cristais mica fish indicando cinemática sinistral preferencialmente. Muscovita também ocorre resultado da sericitização dos feldspatos e de origem magmática.		

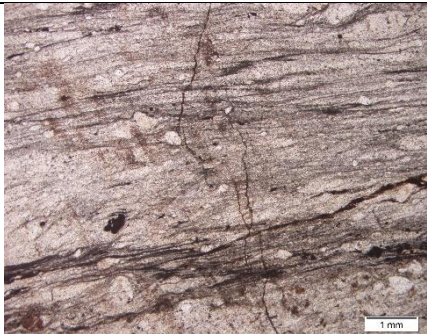
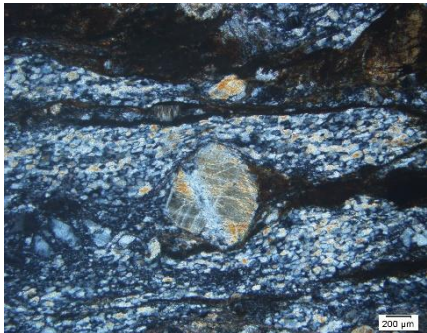
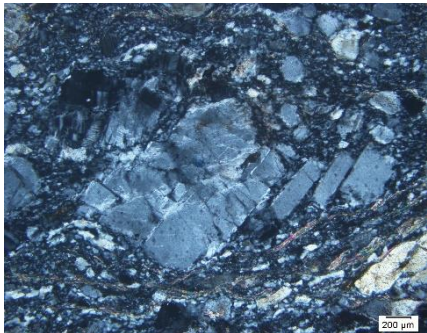
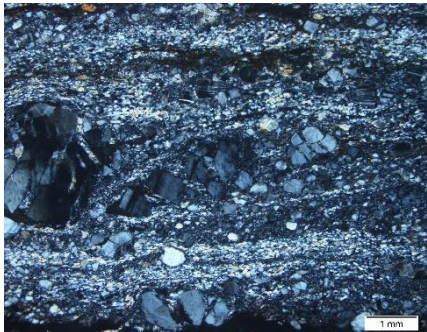
Amostra	LFM.48	
Minerais Essenciais (%)	Pl (30-35%), Bt ($\pm 25\%$), Anf (20-25%), Qtz ($\pm 10\%$)	
Minerais Acessórios (%)	Kf, Ttn, Ep, Ap, Opc	
Nome da Rocha	Biotita-hornblenda-diorito deformado	
Descrição Microscópica	Fotomicrografia	
Rocha deformada com foliação definida pelos níveis de micas e anfibólios associados à porfiroclastos de Pl. O plagioclásio ocorre subédrico a euédrico, inequidimensional, por vezes porfirítico, frequentemente com avançada sericitização. O quartzo ocorre de forma alongada, em finos níveis, apresentando recristalização incipiente e deformação por extinção ondulante e formação de subgrão. O anfibólio é de coloração verde claro a escuro, possui orientação preferencial e se encontra estirados pela deformação, forma níveis de foliação de deformação associadas à biotita e epidoto.		
		
		
		

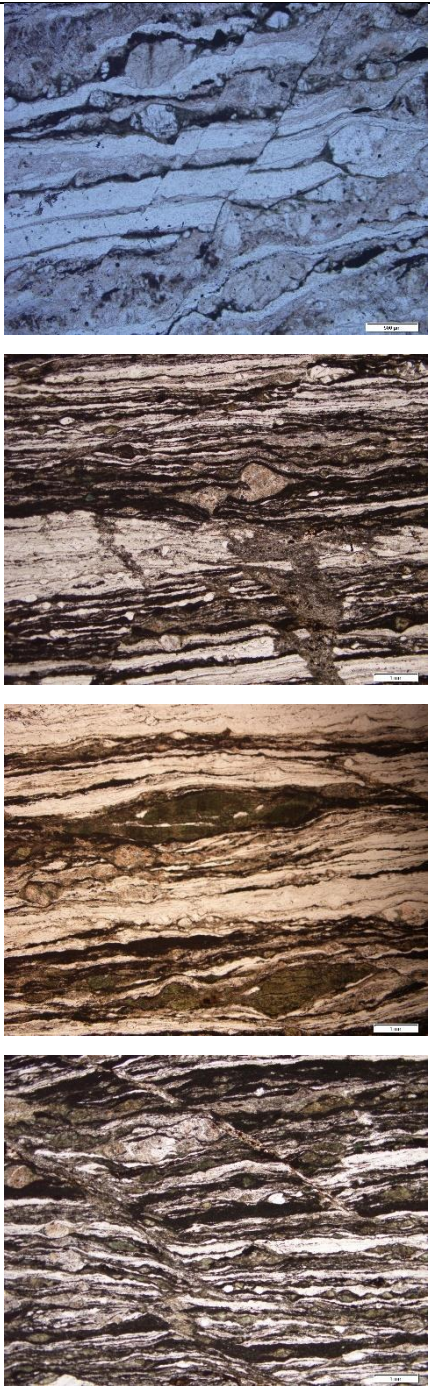
Amostra	LFM.50	
Minerais Essenciais (%)	Qtz ($\pm 25\%$), Pl ($\pm 25\%$), Kf (15-20%) Anf ($\pm 10\%$), Bt (5-10%)	
Minerais Acessórios (%)	All, Ep, Ttn, Ap, Opc	
Nome da Rocha	Anfibólio-biotita-granito milonitizado	
Descrição Microscópica	Fotomicrografia	
Rocha granítica milonitizada, com foliação bem marcada, definida por fitas de quartzos recrystalizados no estado sólido por rotação de subgrão (SGR), apresentando localmente, trama poligonal pela redução de área; e por níveis de biotita e anfibólios alongados e recrystalizados. Trama S/C é facilmente observada, indicando a cinemática destal da deformação. Os feldspatos (feldspato potássico e plagioclásio) ocorrem com forma subédrica na matriz e como porfiroclastos, apresentando recrystalização incipiente, extinção ondulante e fraturamento. Podem apresentar mirmequita e pertita, localmente. O anfibólio, além de formar a foliação, também ocorrem com forma subeudrais e microestrutura nematoblástica. O epidoto ocorre como mineral secundário, cristalizado pela alteração dos anfibólios e allanita, a biotita também ocorre como mineral de alteração dos anfibólios. A titanita é euédrica e bastante alterada para minerais opacos.		
		
		
		

Amostra	LFM.51
Minerais Essenciais (%)	Qtz ($\pm 25\%$), Pl (25-30%), Kf (15%), Anf (10-15%), Bt ($\pm 10\%$)
Minerais Acessórios (%)	Ttn, Ep, Ap, Opc
Nome da Rocha	Anfibólio-biotita-granodiorito milonitizado
Descrição Microscópica	Fotomicrografia
Rocha granítica deformada com foliação definida pelos níveis de micas e anfibólios associados à porfiroclastos de Pl. O plagioclásio ocorre subédrico a euédrico, por vezes porfirítico, frequentemente com sericitização. O quartzo ocorre de forma alongada, em finos níveis, apresentando recristalização incipiente e deformação por extinção ondulante e formação de subgrão. O anfibólio é de coloração verde claro a escuro, possui orientação preferencial, granulação média, forma subidiomórfico a xenomórfica e se encontra estirados pela deformação (formam trama S/C com porfiroclastos de Pl), forma níveis de foliação de deformação associadas à biotita e epidoto.	    

Amostra	LFM.54	
Minerais Essenciais (%)	Qtz (25-30%), Pl (15-20%), Kf (25-30%) Ms (50%), Bt (5%)	
Minerais Acessórios (%)	Anf, All, Ep, Ap, Opc	
Nome da Rocha	biotita-muscovita-granito	
Descrição Microscópica		Fotomicrografia
Rocha granítica com granulação média a grossa, gradando de equigranular a ineigranular. Apresenta microestrutura isotrópica predominante, embora deformação incipiente, marcada pela orientação preferencial e estiramento de minerais pode ser observada, caracterizando a foliação magmática incipiente. O quartzo é anédrico, alongado, inequidimensional, apresenta deformação por extinção ondulante e desenvolvimento de subgrão. Os feldspatos (potássico e plagioclásio) são subédrico, inequidimensional – sendo os maiores cristais de microclina – e pontualmente, apresentam deformação. Mirmequita é observada pontualmente. As micas ocorrem de forma subédrica, e nas porções deformadas apresentam orientação preferencial, ocorrem como mineral primário e secundário, oriundas da alteração dos anfibólios que forma biotita e do processo avançado de sericitização do plagioclásio que formam muscovita		
		
		
		

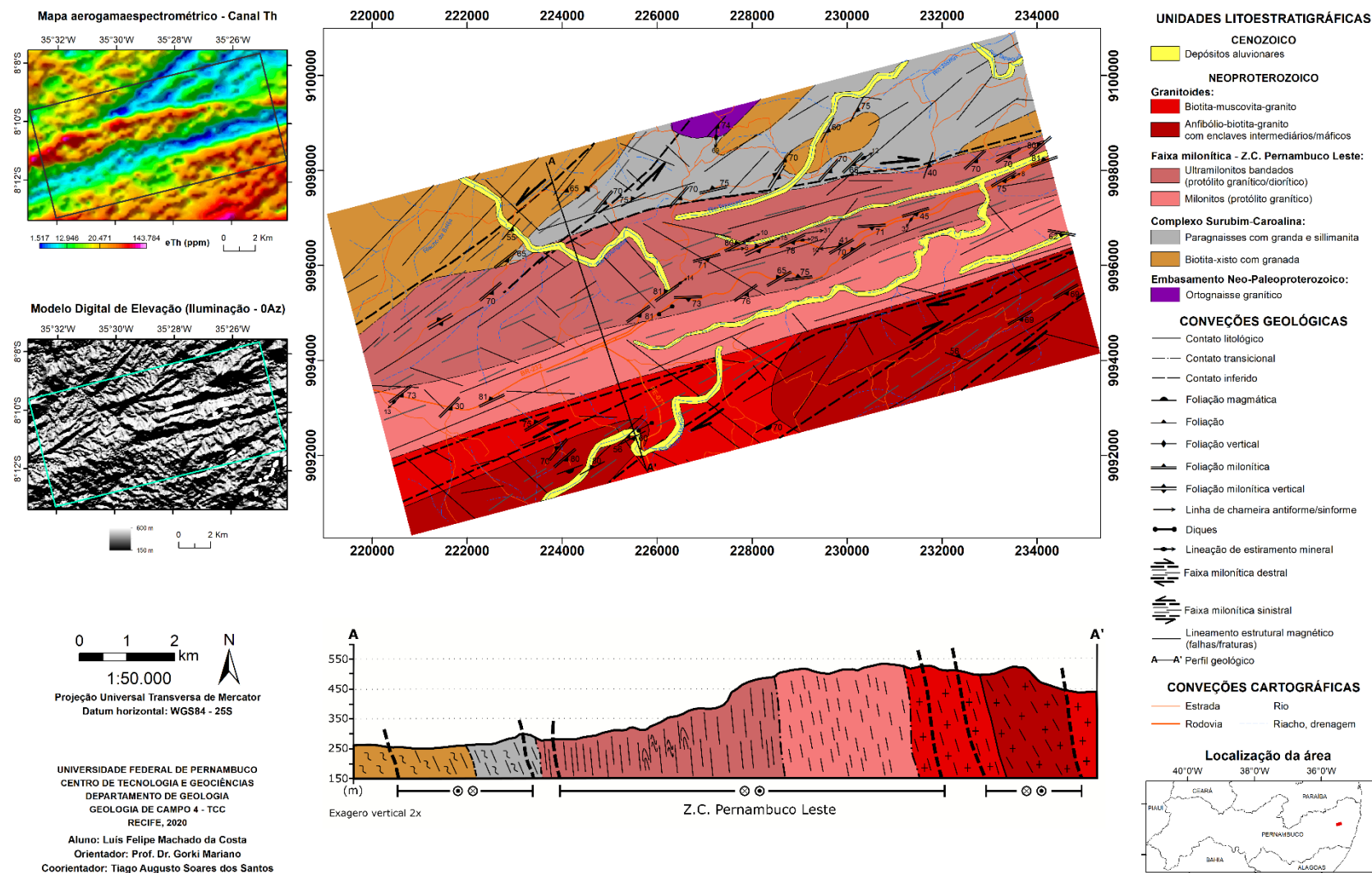
Amostra	LFM.55	
Minerais Essenciais (%)	Qtz (25-30%), Pl (15-20%), Kf (25-30%) Ms (50%), Bt (5%)	
Minerais Acessórios (%)	Anf, All, Ep, Ap, Opc	
Nome da Rocha	biotita-muscovita-granito	
Descrição Microscópica	Fotomicrografia	
Rocha granítica com granulação média a grossa, gradando de equigranular a ineigranular. Apresenta fraca deformação, marcada pela orientação preferencial e estiramento de minerais, caracterizando a foliação magmática incipiente. O quartzo é anédrico, alongado, inequidimensional, apresenta deformação por extinção ondulante e desenvolvimento de subgrão. Os feldspatos (potássico e plagioclásio) são subédrico, inequidimensional – sendo os maiores cristais de microclina – e pontualmente, apresentam deformação de extinção ondulante. Mirmequita é observada pontualmente. As micas ocorrem de forma subédrica, e nas porções deformadas apresentam orientação preferencial, ocorrem como mineral primário e secundário, oriundas da alteração dos anfibólios que forma biotita e do processo avançado de sericitização do plagioclásio que formam muscovita		
		
		
		

Amostra	SR.01	
Minerais Essenciais (%)	Qtz ($\pm 30\%$), Pl ($\pm 20\%$), Kf ($\pm 25\%$), Bt ($\pm 15\%$)	
Minerais Acessórios (%)	Anf, Ms, Ttn, Ap, Opc	
Nome da Rocha	Ultramilonito bandado	
Descrição Microscópica	Fotomicrografia	
A foliação ultramilonítica bandada é bem definida pela intercalação de bandas félsicas e máficas, de granulação muito fina a fina, composta por porfiroclastos de feldspatos imersos em uma matriz de Qtz recristalizado e micas. Porfiroclastos de feldspato ocorrem envoltos na matriz. O Qtz apresenta forma geralmente alongada, equigranular, que define uma trama de foliação oblíqua indicando cinemática destal. Localmente, é observada foliação oblíqua com cinemática sinistral. A recristalização é avançada por processo de BL. Os feldspatos (Pl/Kf), geralmente, são porfiroclastos fragmentados, apresentam microfalhas antitéticas e sintéticas ao cisalhamento destal, e redução de grão pelo intenso fraturamento, fazendo com que se misture na matriz fina recristalizada de quartzo, o que pode tornar difícil a distinção entre eles. As fraturas localmente são preenchidas por epidoto e quartzo. Porfiroclastos simétricos e assimétricos ocorrem localmente. A biotita ocorre estirada e recristalizada e formam fitas micáceas contínuas e descontínuas. Localmente apresenta microestrutura mica fish. Os anfibólios ocorrem como porfiroclastos fraturados, por vezes deformados, associados com as fitas de micas, em estado de alteração para biotita e epidoto. Baixa temperatura de deformação metamórfica ($\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$).	   	

Amostra	SR.02	
Minerais Essenciais (%)	Qtz ($\pm 30\%$), Pl ($\pm 20\%$), Kf ($\pm 25\%$), Bt ($\pm 15\%$)	
Minerais Acessórios (%)	Anf, Ms, Ttn, Ap, Opc	
Nome da Rocha	Ultramilonito bandado	
Descrição Microscópica		Fotomicrografia
A foliação ultramilonítica bandada é bem definida pela intercalação de bandas félsicas e máficas, de granulação muito fina a fina, composta por porfiroclastos de feldspatos imersos em uma matriz de Qtz recristalizado e micas. Porfiroclastos de feldspato ocorrem envoltos na matriz. São observadas microfalhas formando um par conjugado R (destral) e R' (sinistral) e bandas de cisalhamento (C'). O Qtz apresenta forma geralmente alongada, equigranular, que define uma trama de foliação oblíqua indicando cinemática destral. Localmente, é observada foliação oblíqua com cinemática sinistral. A recristalização é avançada por processo de BL. Os feldspatos (Pl/Kf), geralmente, são porfiroclastos fragmentados, apresentam microfalhas antitéticas e sintéticas ao cisalhamento destral, e redução de grão pelo intenso fraturamento, fazendo com que se misture na matriz fina recristalizada de quartzo, o que pode tornar difícil a distinção entre eles. As fraturas localmente são preenchidas por epidoto e quartzo. Porfiroclastos simétricos e assimétricos ocorrem localmente. A biotita ocorre estirada e recristalizada e formam fitas micáceas contínuas e descontínuas. Localmente apresenta microestrutura mica fish. Os anfibólios ocorrem como porfiroclastos fraturados, por vezes deformados, associados com as fitas de micas, em estado de alteração para biotita e epidoto. Baixa temperatura de deformação metamórfica ($\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$).		

APÊNDICE D – MAPA GEOLÓGICO DA REGIÃO DA SERRA DAS RUSSAS, GRAVATÁ - PE

Mapa Geológico da Região da Serra das Russas, Gravatá - PE



APÊNDICE E – MAPA GEOLÓGICO – ESTRUTURAL DA REGIÃO DA SERRA DAS RUSSAS, GRAVATÁ – PE

Mapa Geológico-estrutural da Região da Serra das Russas, Gravatá - PE sobreposto ao MDE (iluminação em 0Az)

