



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

**JORGE AUGUSTO DE LIMA NUNES**

**CARACTERIZAÇÃO LITOESTRUTURAL DE QUARTZITOS DA SERRA DO  
MUCURIBE – NW DO CEARÁ**

**FORTALEZA**

**2018**

JORGE AUGUSTO DE LIMA NUNES

CARACTERIZAÇÃO LITOESTRUTURAL DE QUARTZITOS DA SERRA DO  
MUCURIBE – NW DO CEARÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geociências. Área de concentração: Geodinâmica e Recursos Minerais.

Orientadora: Prof. Dr. Irani Clezar Mattos.  
Coorientador: Prof. Dr. Sebastián Gonzáles Chiozza.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

N925c Nunes, Jorge Augusto de Lima.  
Caracterização litoestrutural de quartzitos da Serra do Mucuripe - NW do Ceará / Jorge Augusto de Lima Nunes. – 2019.  
74 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, 2019.

Orientação: Profa. Dra. Irani Clezar Mattos.

Coorientação: Prof. Dr. Sebastián Gonzáles Chiozza.

1. Domínio Médio Coreaú. 2. Grupo São Joaquim. 3. Quartzito. 4. Rocha Ornamental. I. Título.

CDD 551

---

JORGE AUGUSTO DE LIMA NUNES

CARACTERIZAÇÃO LITOESTRUTURAL DE QUARTZITOS DA SERRA DO  
MUCURIBE – NW DO CEARÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geociências. Área de concentração: Geodinâmica e Recursos Minerais.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Profª. Dra. Irani Clezar Mattos.(Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr Johnson Fernandes Nogueira  
Universidade Federal do Piauí (UFPI)

---

Dr. Antônio Leal Neto  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Pedro e Lucia.

A minha vó, Maria Augusta.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pelo dom da vida, pelas conquistas e discernimento.

A minha família por sempre ser meu alicerce em todos os momentos da minha vida.

A Profa. Dra. Irani Clezar Mattos, pela excelente orientação e ao Prof. Dr. Sebastián Gonzáles Chiozza pela coorientação.

Ao Departamento de Geologia da UFC e ao Programa de Pós-Graduação em Geologia.

A empresa Granos pelo apoio nas etapas de campo e por fornecer dados utilizados neste trabalho.

Ao colega geólogo Mateus Miranda pelo auxílio e paciência. Aos colegas geólogos do Laboratório de Microscopia Eletrônica pelo auxílio ao longo do trabalho: Agnaldo, Francisco Diones, Joel Pedrosa e Antônio Leal.

A Isabela, por ser um sustentáculo nessa etapa da minha vida, pela mansidão e pelos inúmeros momentos felizes.

Aos amigos da “Turma da Praia” pelos momentos de alegria e descontração.

“Geralmente quando os problemas aparecem. A gente tá desprevenido né não? Errado! É você que perdeu o controle da situação” (Edi Rock, 2002)

## RESUMO

O objeto de estudo do presente trabalho são os quartzitos que compõe a Serra do Mucuripe. Eles são explotados para uso como rocha ornamental e recebem o nome comercial de Perla Santana. No contexto geotectônico da Província Borborema a área está inserida no chamado Domínio Médio Coreaú (DMC). O objetivo deste trabalho é realizar uma caracterização litoestrutural e tecnológica dos quartzitos evidenciando o arranjo e disposição dos corpos rochosos na área, avaliando a qualidade da rocha para aplicação como rocha ornamental, com isso definir as áreas que oferecem as melhores condições para a exploração do quartzito, diminuindo as perdas, e contribuir para o conhecimento da tectônica da área. Para isso foram realizadas análise de imagens de satélites conciliado com estudos petrográficos e tecnológicos. A área total foi dividida em 5 áreas menores, com o intuito de determinar qual oferece as melhores condições para a exploração. O significado estrutural dos lineamentos, extraídos das imagens de satélite, foi estabelecido após atividade de campo. As cristas relacionadas a tectônica dúctil representam a expressão em superfície de uma foliação ( $S_n$ ) com direção preferencial NE-SW e com mergulhos suaves a moderados, tanto para SE como para NW. A foliação  $S_n$  está relacionada a um dobramento de dimensões quilométricas, com comprimento de onda de aproximadamente 6 km. Com a integração e análise dos resultados conclui-se que a rocha possui os requisitos necessários para uso ornamental, tendo como ponto forte sua alta resistência, podendo ser utilizada em ambientes agressivos. Conclui-se também que a área mais a NE da serra (área 02), é a que apresenta melhores condições para a exploração do quartzito, por conter uma menor densidade de lineamentos e pelo quartzito apresentar-se mais puro, com uma composição de 94% de quartzo.

**Palavras-chave:** Domínio Médio Coreaú. Grupo São Joaquim. Quartzito. Rocha Ornamental.



## ABSTRACT

The object of study of the present work are the quartzites that compose the Serra do Mucuripe. They are exploited for use as dimension stone and receive the trade name of Perla Santana. In the geotectonic context of the Borborema Province the area is inserted in the Domínio Médio Coreáú (DMC). The objective of this work is to carry out a lithostructural and technological characterization of the quartzites evidencing the arrangement of rocky bodies in the area, evaluating the quality of the rock for application as dimension stone, thereby define the areas that offer the best conditions for the exploitation of the quartzite, reducing the losses, and contribute to the knowledge of the area. For this were performed satellite image analysis reconciled with petrographic and technological studies. The total area was divided into 5 smaller areas, in order to determine the best conditions for a exploitation. The structural significance of the lineaments, extracted from satellite images, was established after field activity. The crests related to ductile tectonics represent the surface expression of a foliation (S<sub>n</sub>) with preferential direction NE-SW and with moderate to moderate dives, for both SE and NW. The foliation S<sub>n</sub> is related to folding of kilometer dimensions, with a wavelength of approximately 6 km. With the integration and analysis of the results it is concluded that the rock has the necessary requirements for ornamental use, having as strong point its high resistance, being able to be used in harsh environments. It is also concluded that the NE area of the sierra (area 02) is the one that presents the best conditions for the exploitation of the quartzite, because it contains a lower density of lineaments and the quartzite is more pure, with a composition of 94% quartz.

**Keywords:** Domínio Médio Coreáú. São Joaquim Group. Quartzite. Dimension Stone.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01	– Mapa de localização da área.....	15
Figura 02	– Domínios tectônicos e principais estruturas da Província Borborema.....	16
Figura 03	– Mapa geológico regional.....	19
Figura 04	– Coluna litoestratigráfica das rochas supracrustais São Joaquim e Martinópolis, segundo Torquato <i>et al.</i> (1987) e Silva (2004).....	27
Figura 05	– Áreas requeridas para extração do quartzito.....	28
Figura 06	– Lavra do Quartzito Perla Santana.....	30
Figura 07	– Etapas do processo de beneficiamento.....	32
Figura 08	– Tipos de contatos minerais considerados na análise petrográfica.....	34
Figura 09	– Imagens SRTM com diferentes angulações.....	37
Figura 10	– Imagem Sentinel-2 com composição RGB: A) 432; B) 842.....	38
Figura 11	– Mapa geológico da Serra do Mucuripe.....	42
Figura 12	– Amostras do quartzito do Membro Mato Verde.....	43
Figura 13	– Fotomicrografia do quartzito da amostra FR07.....	45
Figura 14	– Fotomicrografias da amostra de quartzito FR03A.....	46
Figura 15	– Amostras do quartzito do Membro Morro do Cascudo: A) P23; B) P57.....	47
Figura 16	– Fotomicrografias da amostra de quartzito P57.....	48
Figura 17	– A) Mapa misto da amostra P23 gerado pelo MEV/EDS; B) imagem gerada pelo MEV e analisada pelo EDS com as porcentagens dos elementos e compostos.....	49
Figura 18	– Amostras da rocha calcissilicática com bandas de biotita xisto.....	49
Figura 19	– Fotomicrografias da amostra de rocha calcissilicática com intercalação de xisto P53.....	51
Figura 20	– A) Imagem SRTM com; B) mapa de lineamentos contendo todos os lineamentos extraídos na escala de 1:100.000.....	52
Figura 21	– A) Imagem de satélite Sentinel-2, com composição de cor verdadeira RGB 432; B) mapa contendo todos os lineamentos extraídos na escala de 1:50.000.....	53

Figura 22	– Rosetas das cristas e vales obtidos nas diferentes escalas de trabalho.....	54
Figura 23	– Histograma relacionando a frequência azimutal com a somatória dos comprimentos dos lineamentos.....	54
Figura 24	– Imagem Sentinel-2, com composição de cor verdadeira RGB 432, mostrando a divisão das cinco áreas e mapa com os lineamentos extraídos para cada área.....	56
Figura 25	– Projeção ciclográfica dos planos da foliação Sn.....	57
Figura 26	– Foliação nos diferentes litotipos: A) descontinuidades no quartzito puro do Membro Mato Verde; B) bandamento no quartzito impuro do Membro Morro do Cascudo; C) intercalações de biotita-xisto em rocha calcissilicática.....	58
Figura 27	– Dobra de segunda ordem em rocha calcissilicática do Membro Morro do Cascudo.....	58
Figura 28	– Mapa com os lineamentos que perfazem a dobra com indicações de mergulho da foliação, clivagem, dobras de segunda ordem e caimento.....	59
Figura 29	– A) Diagrama de contornos mostrando círculo $\pi$ e eixo $\pi$ ; B) estereograma mostrando os elementos estruturais vinculados ao dobramento.....	60
Figura 30	– Clivagem de fraturas subverticias no Membro Mato Verde.....	60
Figura 31	– Imagem da área estudada indicando os locais onde foram realizados o estudo das fraturas com fotos dos afloramentos e digramas ciclográficos.....	63
Figura 32	– A) Brecha de falha no quartzito do Membro Mato Verde; B) kink-bands em muscovita; C) alteração de feldspato para sericita.....	64
Figura 33	– A) Alteração férrica de cor vermelho alaranjado em fraturas; B) caulinição de aluminossilicatos em fraturas.....	66
Figura 34	– Análise MEV/EDS realizada em alterações de cor avermelhada, mostrando uma composição de 57% de óxido de ferro.....	66
Figura 35	– DRX realizado em amostra retirada de fratura.....	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01	– Evolução do conhecimento geológico da região.....	24
Tabela 02	– Amostras a partir das quais foram confeccionadas lâminas petrográficas.....	34
Tabela 03	– Classificação do Grau de Microfissuramento.....	35
Tabela 04	– Tabela contendo a somatória dos comprimentos dos lineamentos, a área em km <sup>2</sup> e a densidade.....	56
Tabela 05	– Síntese das características petrográficas da rocha estudada.....	66
Tabela 06	– Resultados dos Índices Físicos para o quartzito Perla Santana.....	68
Tabela 07	– Resultados para o ensaio de resistência à compressão uniaxial e resistência à flexão.....	69
Tabela 08	– Resultados do ensaio de Desgaste Abrasivo Amsler para o quartzito Perla Santana.....	69
Tabela 09	– Resultados do ensaio de resistência ao ataque químico.....	70
Tabela 10	– Comparação dos resultados do desgaste de Amsler de outras litologias com o quartzito.....	70

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>1.1</b>	<b>Localização da Área</b> .....	14
<b>1.2</b>	<b>Geologia Regional</b> .....	15
<i>1.2.1</i>	<i>Embasamento</i> .....	17
<i>1.2.2</i>	<i>Grupo Martinópole</i> .....	18
<i>1.2.3</i>	<i>Granitóides</i> .....	18
<i>1.2.4</i>	<i>Grupo Jaibaras</i> .....	19
<b>1.3</b>	<b>Aspectos Tectonometamórficos</b> .....	20
<b>1.4</b>	<b>Grupo São Joaquim</b> .....	22
<i>1.4.1</i>	<i>Formação Dom Simão</i> .....	24
<i>1.4.2</i>	<i>Formação Lamarão</i> .....	25
<b>1.5</b>	<b>Grupo Martinópole</b> .....	26
<i>1.5.1</i>	<i>Formação Covão</i> .....	26
<i>1.5.2</i>	<i>Formação Santa Terezinha</i> .....	26
<b>2</b>	<b>LAVRA E BENEFICIAMENTO</b> .....	28
<b>2.1</b>	<b>Extração do Perla Santana</b> .....	29
<b>2.2</b>	<b>Beneficiamento</b> .....	30
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	33
<b>3.1</b>	<b>Petrografia</b> .....	33
<b>3.2</b>	<b>Análise Estrutural</b> .....	35
<i>3.2.1</i>	<i>Identificação e Extração dos Lineamentos</i> .....	35
<i>3.2.2</i>	<i>Classificação dos Lineamentos</i> .....	38
<i>3.2.3</i>	<i>Análise dos Lineamentos</i> .....	39
<i>3.2.4</i>	<i>Caracterização Tecnológica</i> .....	40
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	41
<b>4.1</b>	<b>Geologia da Serra do Mucuripe</b> .....	41
<b>4.2</b>	<b>Caracterização litológica</b> .....	43
<i>4.2.1</i>	<i>Membro Mato Verde</i> .....	43
<i>4.2.2</i>	<i>Membro Morro do Cascudo</i> .....	47
<b>4.3</b>	<b>Análise Estrutural</b> .....	51
<i>4.3.1</i>	<i>Interpretação Multiescala dos Lineamentos</i> .....	52
<i>4.3.2</i>	<i>Densidade dos lineamentos</i> .....	55

4.3.3	<i>Foliação Sn</i> .....	56
4.3.4	<i>Clivagem de fratura Sn+1</i> .....	60
4.3.5	<i>Zona de Cisalhamento Sn+2</i> .....	61
4.3.6	<i>Faturas pós Sn +2</i> .....	61
4.4	<b>Análise Ornamental</b> .....	64
4.4.1	<i>Síntese da Petrografia</i> .....	64
4.4.2	<i>Índices Físicos</i> .....	67
4.4.3	<i>Compressão Uniaxial e Determinação da Resistência a Flexão</i> .....	68
4.4.4	<i>Desgaste Abrasivo Amsler e Ataque Químico</i> .....	69
4.4.5	<i>Aplicações</i> .....	71
5	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	71
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	73

## **1 INTRODUÇÃO**

O objeto de estudo do presente trabalho são os quartzitos que compõe a Serra do Mucuripe. Eles são explorados para uso como rocha ornamental e recebem o nome comercial de Perla Santana. A NBR 15012 (ABNT, 2013) reconhece como rocha ornamental o material rochoso natural, submetido a diferentes graus ou tipos de beneficiamento, utilizado para exercer uma função estética. O uso de quartzitos, é uma forte tendência de mercado no setor de rochas ornamentais. No Brasil é a rocha que mais tem sido comercializada, principalmente para o mercado externo.

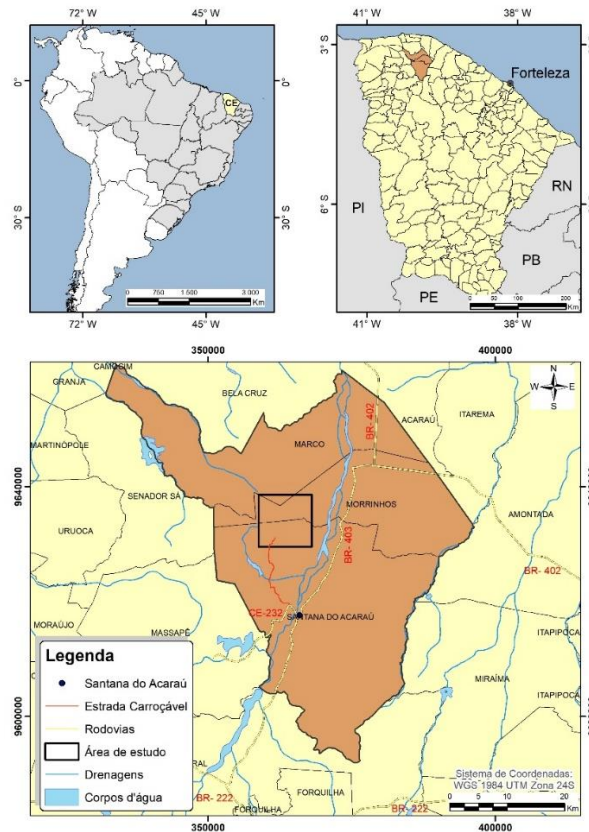
O objetivo deste trabalho é fazer a caracterização litoestrutural e tecnológica dos quartzitos evidenciando o arranjo e disposição dos corpos rochosos na área, avaliando a qualidade da rocha para aplicação como rocha ornamental e com isso definir as áreas que oferecem as melhores condições para a exploração do quartzito, diminuindo as perdas.

### **1.1 Localização da Área**

A área de estudo localiza-se na Serra do Mucuripe, entre os municípios de Santana do Acaraú, Morrinhos e Marco, região NW do estado do Ceará, distante 237 km na direção oeste da capital, Fortaleza (Figura 01). A serra é constituída essencialmente por quartzito, se destaca morfológicamente com cotas variando de 100 a 600 metros de altitude, possui 3 km de largura e 9 km de comprimento com alinhamento geral na direção NE-SW.

O principal acesso à área de estudo partindo de Fortaleza é a BR-222, até a cidade de Umirim, em um percurso de aproximados 95 Km; a partir daí toma-se a BR-402 e segue até o município de Morrinhos, num percurso de 112 km, de onde tomando-se a BR-403, no rumo SW, por 30 km, até a sede do município Santana do Acaraú. Da sede do município toma-se a CE-232 por 2,6 km, e segue o restante do percurso em estrada carroçável por 13 km no sentido NW.

Figura 01: Mapa de localização da área.



Fonte: Extraído e adaptado do banco de dados da CPRM, disponível em <http://geosgb.cprm.gov.br/>.

## 1.2 Geologia Regional

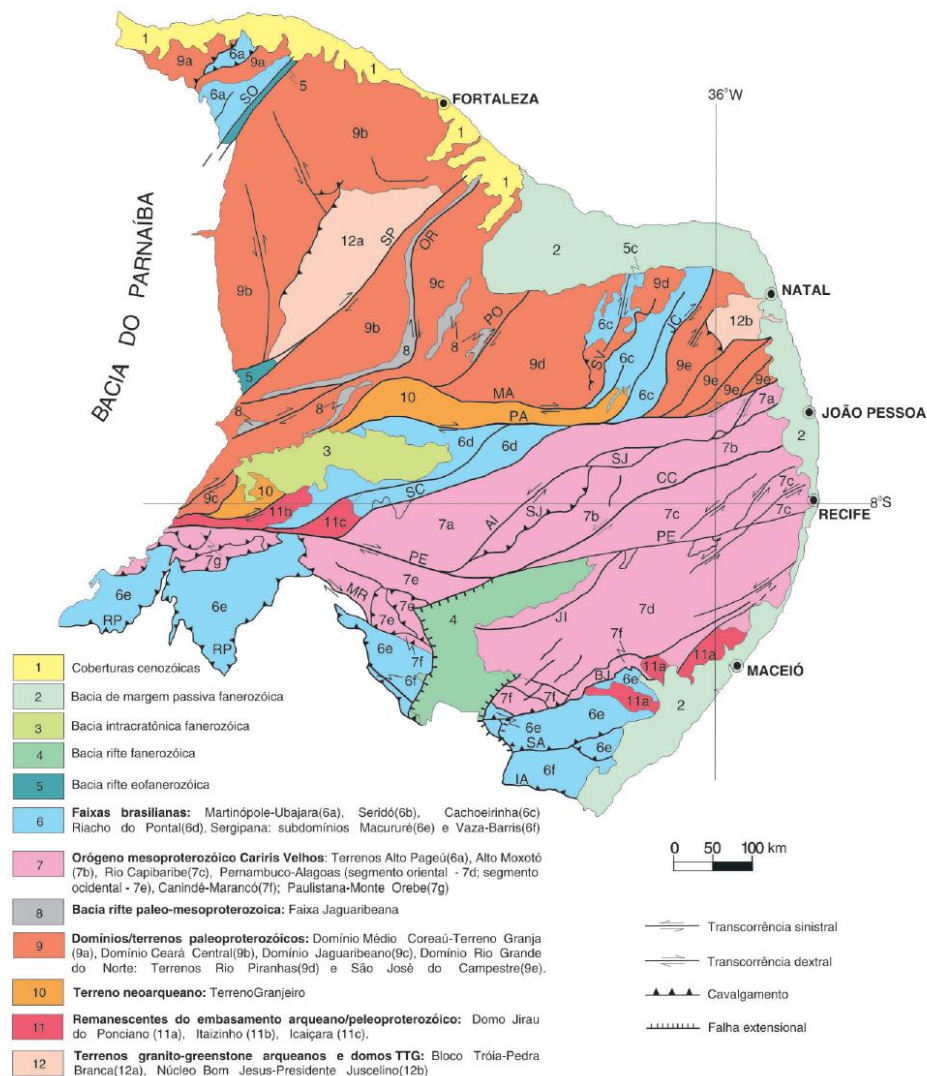
No contexto geotectônico da Província Borborema a área estudada está inserida no chamado Domínio Médio Coreaú (DMC) (Almeida *et al.*, 1977), limitado a leste pela zona de cisalhamento Sobral–Pedro II, uma megaestrutura de direção NE–SW, de caráter transcorrente dextral e idade neoproterozoica (Bizzi *et al.*, 2003).

A Província Borborema compreende uma extensa região geológica do Nordeste do Brasil (Figura 02) de idade Pré-Cambriana, caracterizada pela atuação de intenso magmatismo granítico, e de extensas zonas de cisalhamento transcorrentes, resultado da atuação do ciclo Brasileiro/Pan-Africano, ocupa uma área de aproximadamente 450.000 km<sup>2</sup>. É limitada a oeste pela Bacia do Parnaíba, a leste e norte por bacias da margem costeira, e a sul pelo Cráton São Francisco (Almeida *et al.*, 1977). Tendo se formado como resultado da convergência dos crátons Amazônico, *West African*-São Luis e São Francisco, durante a assembleia do *West Gondwana* (Brito Neves & Cordani, 1991).



A região de dobramento do DMC representa um Cinturão Orogênico formado por diversos tipos rochosos (Brito Neves, 1975). O embasamento é formado por rochas gnáissicas-granulíticas e migmatitos, representadas pelo Complexo Granja. As rochas supracrustais do DMC são representadas pelos Grupos: Martinópole; Ubajara; Jaibaras e Granitóides.

Figura 02: Domínios tectônicos e principais estruturas da Província Borborema. Zonas de cisalhamento: Sobral–Pedro II (SO), Senador Pompeu (SP), Orós–Aiuaba (OR), Porto Alegre (PO), São Vicente (SV), Piauí–João Câmara (JC), Malta (MA), Serra do Caboclo (SC), Congo–Cruzeiro do Nordeste (CC), Serra da Jabitaca (SJ), Jatobá– Itaíba (JI), Macururé–Riacho Seco (MR), Belo Monte–Jeremoabo (BJ), São Miguel do Aleixo (SA) e Itaporanga (IA); Lineamentos: Patos (PA) e Pernambuco (PE); *Nappes* da Faixa Riacho do Pontal (RP).



Fonte: Bizzi *et al.* (2003).

### 1.2.1 Embasamento

As rochas do embasamento do DMC receberam várias denominações, sempre se referindo a mesma sequência litológica. Nascimento *et al.* (1979) foram os primeiros a usar a denominação de Complexo Granja para nomear as rochas que compõem terrenos de idade pré-cambriana da faixa compreendida entre os municípios de Granja (CE) e Parnaíba (PI).

Torquato *et al.* (1987) dividem o Complexo Granja da base para o topo em três unidades: granulitos; gnaisses (orto e paraderivados) e granitóides.

Os granulitos correspondem a uma associação com pelo menos cinco litotipos individualizados: biotita-granada-plagioclásio-granulito, silimanita-granada-plagioclásio-granulito, pertita-granada-plagioclásio-granulito (khondalito), granulito intermediário a máfico e enderbrita.

Os ortognaisses são formados por biotita-hornblenda-gnaiss de composição granítica, granodiorítica e tonalítica, os gnaisses de composição tonalítica apresentam-se com um teor de máficos um pouco maior com relação aos graníticos e granodioríticos, associados a esses gnaisses são encontradas intercalações de migmatitos. Já os paragnaisses são representados por biotita-gnaisses posicionados sobre os ortognaisses, também são encontradas lentes de anfibolito e calssilicáticas.

Os granitóides são representados por corpos graníticos e granodioritos situados no topo do Complexo Granja.

Santos *et al.* (2001) com base em dados de campo e geocronologia Rb/Sr divide o embasamento da região em três sequências: a sequência I representada por uma suíte de rochas com afinidade TTG; a sequência II, composta de granulitos, kondalitos e kinzigitos e; a sequência III, formada pelos migmatitos. Ainda segundo o mesmo autor, através de estudos geoquímicos, as rochas formadoras do embasamento do DMC apresentam origens para e ortoderivadas. As paraderivadas são representadas pelos gnaisses khondalíticos/kinzigíticos (silimanita-granada gnaiss) que ocorrem bordejando a Zona de Cisalhamento de Granja. Estas rochas apresentam paragênese granulítica e são originadas de grauvacas, possivelmente com alguma contribuição pelítica. Já as rochas ortoderivadas predominam e estão representadas por gnaisses diversos, migmatitos e granulitos máficos e anfibolíticos possivelmente originados de basaltos e dioritos, respectivamente.

Os litotipos granulíticos do Complexo Granja exibem idade de geração dos protólitos de 2,3 e 2,2 Ga (Nogueira Neto, 2000), trata-se de um evento acrescionário

relacionado a orogenia Riacciana (Santos, 1999) com retrabalhamento nos eventos orogênicos do Riacciano e Brasiliano.

### ***1.2.2 Grupo Martinópolis***

A denominação de Grupo Martinópolis foi dada por Brito Neves em 1975 e perdura até hoje. Prado *et al.* (1979) adota o termo Grupo Martinópolis para definir a sequência de quartzitos, xistos e filitos que repousa em ligeira discordância estrutural sobre o Complexo Migmatítico-gnáissico (Figura 03). Prado *et al.* (1979) fazem a subdivisão desse grupo em três formações:

- Formação São Joaquim como sendo os quartzitos basais do grupo, tratam-se de quartzitos de cor branca a creme, puros, compactados por vezes preservando feições primárias de estratificação;
- Formação Covão composta por xistos, onde predominam muscovita-quartzo-xisto e sericita-clorita-xisto;
- Formação Santa Terezinha constituída de filitos, correspondem a uma sequência composta de clorita-sericita-filitos, quartzo-filitos e filitos ardosianos.

Oliveira (1987) retira a Formação São Joaquim do Grupo Martinópolis e subdivide a formação em Unidades I e II. A Unidade I (basal), constituída por sillimanita-quartzo muscovita xisto, além de plagioclásio-quartzo-biotita xisto com granada; tal Unidade revela ainda níveis subordinados de gnaisses quartzo-feldspáticos com muscovita. A Unidade II, por sua vez, é composta de muscovita quartzito, cianita-muscovita quartzito, feldspato-mica branca quartzito, com lentes de quartzo-muscovita xisto e cálcio-silicáticas.

### ***1.2.3 Granitóides***

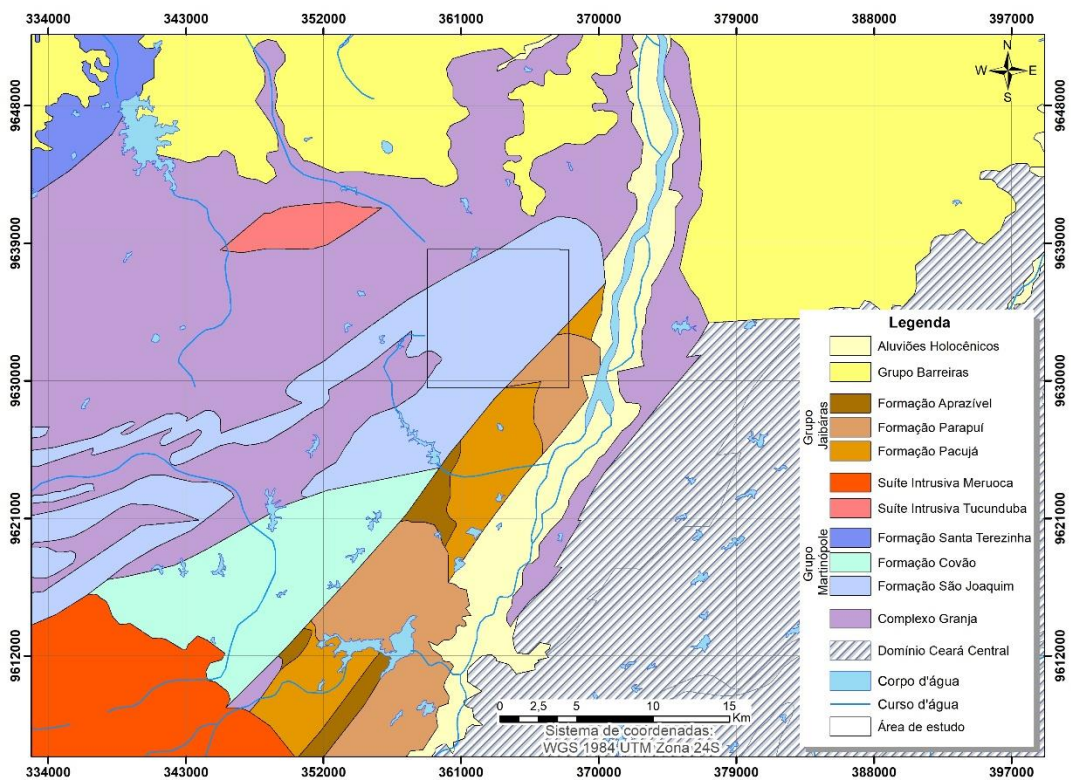
Variadas intrusões graníticas ocorrem no DMC, sendo dois plutons graníticos expostos nas proximidades da área, o Granitoide Tucunduba e o Granitoide Meruoca (Figura 03).

O *stock* Tucunduba, segundo Santos *et al.* (2008), se trata de um granito-granodiorítico, alongado na direção NE-SW, limitado pelas falhas Água Branca e Senador Sá. Nascimento (2014) em estudos petrográficos realizados no Granito Tucunduba, explorado para uso ornamental e conhecido comercialmente como Green Galaxy, classifica a rocha como um

Ultramilonito Quartzo Feldspático, com coloração predominante verde, com algumas áreas acinzentadas. Estudos geocronológicos realizados pelo método Rb-Sr em rocha total revelam idade de 563 Ma para o Granitoide Tucundumba (Gorayeb *et al.* 2011). Santos *et al.* (2008) obtiveram idade de  $563 \pm 17$  Ma através de datação U-Pb em zircões.

O corpo granítico do Meruoca representa o magmatismo final do DMC (Santos *et al.*, 2008), segundo Sial e Long (1981) o pluton Meruoca é composto de rochas graníticas alcalinas a peralcalicas, grosseiras a finas ocupando uma área de aproximadamente 400 km<sup>2</sup>. Estudos geocronológicos realizados pelo método Rb-Sr em rocha total revelam idade de 540 Ma (Gorayeb *et al.*, 2011).

Figura 03: Mapa geológico regional.



Fonte: Extraído e adaptado do banco de dados da CPRM, disponível em <http://geosgb.cprm.gov.br/>.

### 1.2.4 Grupo Jaibaras

O grupo Jaibaras foi assim chamado por Winge em 1967 e subdivida em: Subgrupo Superior formado por conglomerados brechóides; Subgrupo Médio constituído por rochas vulcânicas andesíticas e Subgrupo Basal formado por arenitos, siltitos e conglomerados.

Costa *et al.* (1973) dividem o grupo nas suas Formações mais usuais, são elas: Formação Aprazível formada por arenitos e arenitos conglomeráticos polimíticos; Formação Parapuí constituída por rochas extrusivas e intrusivas fissurais ácidas e básicas; Formação Pacujá onde predominam os arenitos líticos, folhelhos e siltitos (Figura 03).

### 1.3 Aspectos Tectonometamórficos

São reconhecidas quatro fases distintas de deformação no DMC: D1, D2, D3 e D4 (Santos, 1999). A primeira deformação a atuar na região é a D<sub>1</sub>, que atua exclusivamente nas rochas do embasamento, gerando uma foliação S<sub>1</sub>, que ocorre desde uma fina xistosidade dada por biotita e anfibólio a um bandamento gnáissico grosso (Silva, 2004).

Segundo Santos *et al.* (2004) a fase D2, com duração entre 622 e 591 Ma, representa um estágio de colisão frontal, que gerou *nappes* com vergência para NW, foliação de baixo ângulo, metamorfismo de alto grau e anatexia crustal. O evento D2 evolui progressivamente para D3, quando a região entrou em uma fase de "tectônica de escape", que é caracterizado pela foliação S3, subverticais NE-SW a E-W. Durante essa fase a o desenvolvimento de grandes zonas de cisalhamento, cujo os indicadores cinemáticos determinam um caráter dextral para as mesmas. A transição para um regime de transcorrência (D3) ocorreu em torno de 591 Ma. A foliação S3 é bem marcada em filitos e xistos das Formações Santa Terezinha e Covão, enquanto nos quartzitos da Formação São Joaquim é mais discreta.

Ainda segundo Santos *et al.* (2004) a colocação sintectônica de plútons granitóides ocorreu em domínios transtensionais do sistema das zonas de cisalhamento. A intrusão dos granitóides tardios e a elevação e resfriamento rápidos do orógeno em torno de 560 Ma, são resultados dos movimentos transpressionais de D4, que marcaram o fim do regime transcorrente D3.

Santos (1999) e Santos *et al.* (2004) descrevem uma associação mineral para os minerais metamórficos presentes na Formação São Joaquim, que incluem cianita, silimanita, muscovita e estauroлита, indicando metamorfismo de fácies anfibolito sob pressão, abaixo da isógrada K-feldspática.

Conforme Santos (1993) os metassedimentos do Grupo Martinópolis apresentam uma diminuição do grau metamórfico da base para o topo da sequência. Segundo o mesmo a aparição de estauroлита e cianita nas unidades basais indica condições metamórficas compatíveis com o fácies anfibolito e a associação de sericita-biotita-granada e clorita-sericita, indicariam

condições metamórficas compatíveis com o fácies xisto verde para as rochas do topo da sequência.

Segundo Torquato *et al.* (1987) as associações minerais do Grupo São Joaquim, individualizado do Grupo Martinópolis, correspondem a: quartzo + muscovita + silimanita ± cianita ± andaluzita. A presença constante de silimanita em todas as rochas quartzíticas, indica grau de metamorfismo alto.

Entretanto Silva (2004), em trabalho realizado na região NW da Província Borborema, não encontrou cianitas, silimanitas e nem estaurolitas em amostras de quartzitos do São Joaquim, que são minerais-índices de alto grau metamórfico. As paragêneses encontradas foram: quartzo + muscovita + biotita no xisto; quartzo + muscovita + clorita em quartzito; quartzo + muscovita + feldspato + biotita + clorita em quartzito e quartzo + muscovita + feldspato em quartzito. Além disso, foram encontrados indícios de baixa temperatura como; biotita alterando para clorita, plagioclásio altamente sericitizados e com teor de albita e quartzo recristalizados.

Oliveira (1987) estabelece uma evolução tectonometamórfica para essa região, reconhecendo para as rochas do DMC, cinco fases de dobramentos com quatro metamorfismos associados (Dn-1, Dn, Dn+1, Dn+2 e Dn+3). A saber:

- A fase n-1, assim como a fase D1 de Santos (1999), é exclusiva do embasamento gnáissico-migmatítico, representado por um bandamento grosseiro de *trend* E-W. O pico de metamorfismo desta fase encontra-se em fácies anfíbolito superior, na isógrada do feldspato potássico.
- A fase n trata-se da fase mais penetrativa da região, no embasamento são geradas dobras isoclinais de caráter originalmente recumbente, no Grupo Martinópolis são geradas macrodobras invertidas e recumbentes com a foliação Sn como plano axial dessas dobras, com direção preferencial NE-SW e mergulhos suaves a moderados, tanto para SE como para NW.

Essa fase pode ser dividida em dois pulsos. O primeiro acha-se representado nas rochas da Formação São Joaquim, com metamorfismo de alto grau de pressões intermediárias, marcada por cianita junto com a ocorrência de associações de almandina/sillimanita. Já o segundo é evidenciado nas rochas de baixo grau metamórfico, presentes no restante do Gráben de Martinópolis, onde houve a cristalização de clorita, quartzo e micas brancas.

- Na fase n+1, há no embasamento, evidências de dobras fechadas e recumbentes, com clivagem de fraturas associadas. Nos quartzitos São Joaquim, essa fase denota dobras

abertas com planos axiais de clivagem de fraturas ou ainda uma fraca clivagem de crenulação.

- Há uma discordância tectonometamórfica entre a Formação São Joaquim e as unidades do Grupo Martinópolis. Para a Formação, verifica-se um pico de metamorfismo em fácies xisto-verde superior, enquanto para as demais litologias, aparecem apenas minerais de metamorfismos correlates à fácies prehnita-pumpellyíta.
- A fase n+2 é caracterizada por uma clivagem de crenulação penetrativa do tipo "zonal", ao microscópio, como também por dobras em *chevron*, geralmente centimétricas, de planos axiais verticais, todos inseridos nos metassedimentos de baixo grau do Gráben de Martinópolis.

As fases de metamorfismo (n+1) e (n+2) refletem um retrometamorfismo em relação às fases anteriores.

- A fase n+3 não é caracterizada por metamorfismo, exhibe apenas microcisalhamentos, dobras em estágio frágil, ondulações a dobras nos sedimentos do Grupo Jaibaras, além de feições frágeis de reativações das zonas de cisalhamento Dn. É interpretada como uma representação do soerguimento crustal que provocou reativações dos cisalhamentos regionais ativos por todo o Fanerozoico.

#### 1.4 Grupo São Joaquim

Os quartzitos da Formação São Joaquim são citados como sendo a base do Grupo Martinópolis por Prado *et al.* (1979), porém a separação dessa formação do Grupo Martinópolis já foi cogitada por diversos autores, Torquato *et al.* (1987) elevam o status de Formação para Grupo São Joaquim pelos seguintes fatos:

- Os quartzitos que compõem a Serra de Dom Simão são chamados por Prado *et al.* (1979) de “quartzitos indivisos”, e não são colocados juntos com os quartzitos pertencentes a Formação São Joaquim, e sim como sendo parte do embasamento. Porém Torquato *et al.* (1987) observaram que não havia elementos para a separação desses quartzitos, verificando-se uma nítida continuidade entre os dois;
- Verificada a continuidade sugerem duas opções: ou os quartzitos são de idade Mesoproterozoica ou são de idade Neoproterozoica e pertencerem ao Grupo Martinópolis;

- Os xistos pertencentes a Formação Covão repousam em discordância erosiva/angular sobre os quartzitos da Formação Joaquim;
- Os quartzitos podem ser considerados como de ambientes transicionais entre marinho (basal) e fluvial (topo) já os metassedimentos da sequência do Grupo Martinópolis poderiam ser enquadrados como de ambiente marinho de caráter nerítico.

Deste modo Torquato *et al.* (1987) elevam o status da Formação para Grupo São Joaquim, subdividindo o Grupo em: Formação Dom Simão na base e Formação Itacolomi no topo. Torquato *et al.* (1996), por questões de prioridade, renomeia a Formação Itacolomi para Formação Lamarão (Tabela 01).

Silva (2004) reforça as afirmações da promoção de Formação para Grupo através de dados geocronológicos obtidos pelo método Sm-Nd em rocha total, confere idades modelos de 2,20, 2,47 e 2,49 Ga para rochas metassedimentares do Grupo São Joaquim e idades de 1,49 a 2,55 Ga para o Grupo Martinópolis. Assim pode-se dizer que a área fonte da Sequência Supracrustal São Joaquim é proveniente do embasamento onde as idades se enquadram todas no paleoproterozoico.

Torquato *et al.* (1987) e Torquato *et al.* (1996) subdividem as Formações do Grupo São Joaquim. A Formação Dom Simão é subdividida nos membros Mato Verde e Morro do Cascudo, enquanto a Formação Lamarão foi subdividida nos membros Pau Ferro, Paula Pessoa e Riacho do Lino.



Tabela 01: Evolução do conhecimento litoestratigráfico da região.

Autores (ano)	Idade		
	Neoproterozoico	Mesoproterozoico	Paleoproterozoico
Costa <i>et al.</i> (1973)	Pré-cambriano “A”	Pré-Cambriano “B”	
Brito Neves (1975)	Grupo Martinópole		
Prado <i>et al.</i> (1979)	Grupo Martinópole Fm. Santa Terezinha Fm. Covão Fm. São Joaquim		
Torquato <i>et al.</i> (1987)	Grupo Martinópole Fm. Santa Terezinha Mb. Casinha Mb. Vargem Mb. Marfim Fm. Covão Mb. Várzea Grande Mb. Lagoa Grande		Grupo São Joaquim Fm. Itacolomi Mb. Pau Ferro Mb. Paula Pessoa Mb. Riacho do Lino Fm. Dom Simão Mb. Morro do Cascudo Mb. Mato Verde
Oliveira (1987)	Grupo Martinópole Fm. Santa Terezinha Fm. Covão		Fm. São Joaquim Unidade II Unidade I
Torquato <i>et al.</i> (1996)			Grupo São Joaquim Fm. Lamarão Mb. Pau Ferro Mb. Paula Pessoa Mb. Riacho do Lino Fm. Dom Simão Mb. Morro do Cascudo Mb. Mato Verde

Fonte: autor.

#### 1.4.1 Formação Dom Simão

Esta formação é a base do Grupo São Joaquim (Figura 04), apresenta-se sob a forma de elevações, de cotas de até 860 m, trata-se de um espesso pacote metassedimentar composto por quartzitos, calssilicáticas e xistos, essa formação foi dividida nos membros Mato Verde e Morro do Cascudo.

O Membro Mato Verde é constituído por uma sequência de quartzitos puros, as vezes micáceos, esbranquiçados a cinza, por vezes ferruginosos, com granulação variando de fina a média.

O Membro Morro do Cascudo é formado por quartzitos impuros intercalado com pacotes de calciosilicáticas e xistos. Os quartzitos apresentam cores que variam de cinza a creme, branco-azuladas a esverdeadas. Encontram-se normalmente estratificados e intercalados com pacotes de rochas calciosilicáticas de cor esverdeada, de estrutura maciça e granulação variando de fina a média. Os xistos possuem cor avermelhada, de granulação média a grossa, são compostos por muscovitas e quartzo e exibem microdobramentos.

#### ***1.4.2 Formação Lamarão***

Esta formação com espessura estimada em 760 metros, é composta por quartzitos e gnaisses, sendo dividida nos membros Riacho do Lino, Paula Pessoa e Pau Ferro.

O Membro Riacho do Lino tem espessura de aproximadamente 100 metros, este membro é constituído por quartzitos puros com camadas que variam entre 10 e 40 centímetros, apresentando estratificação cruzada. Sua cor varia de branca a cinza-clara, passando para creme, apresenta-se com granulação fina a média.

O Membro Paula Pessoa é formado por quartzitos impuros, apresentando-se bastante micáceos com silimanita e opacos. Sua coloração varia de branca a cinza-clara, chegando à vermelha quando alterada. Apresentam-se bastante tectonizados com o desenvolvimento de feições s/c (clivagem/foliação). Sua relação de contato com o membro inferior se dá de maneira brusca, sem apresentar caráter discordante. Com a litologia do membro superior o contato também é concordante, com sua passagem para os gnaisses de maneira gradativa.

O Membro Pau Ferro é composto por gnaisses que apresentam contato gradacional com os quartzitos do Membro Paula Pessoa. Ocorrem bastante laminados e o bandamento gnáissico é típico, com faixas claras e escuras alternadas.

Nesses gnaisses são encontradas lentes de quartzitos, sendo a de maior expressão a que compõe o Serrote do Socorro. Estes quartzitos apresentam-se ora maciço ora estratificado, sua cor varia de cinza a cinza azulado. Salienta-se a presença da cianita em paragênese com a silimanita.

## 1.5 Grupo Martinópolis

Com a exclusão do Formação São Joaquim, proposta por Torquato *et al.* (1987), este grupo é proposto como sendo constituído pelas formações Covão (basal) e Santa Terezinha (topo) (Figura 04).

### 1.5.1 Formação Covão

Esta formação ocorre sobreposta aos quartzitos da Formação Lamarão e foi dividida nos membros Lagoa Grande (base) e Várzea Grande.

O Membro Lagoa Grande é composto predominantemente por xistos com intercalações de quartzitos sob a forma de lentes. Os xistos apresentam cores de cinza-clara a avermelhada e alaranjadas, são friáveis, muito foliados e dobrados. Sua textura varia de fina a grossa.

Os contatos deste Membro com as formações de topo do Grupo São Joaquim, são feitos por discordância tectônica e através de discordância erosivo/angular. Com o membro superior os contatos se dão lateralmente de forma gradacional.

O Membro Várzea Grande é formado por muscovita-quartzito e secundariamente por quartzitos puros. O muscovita-quartzito apresenta cores variando de branca a creme, por vezes milonitizados e extremamente fraturado. Quando milonitizado exibe cor avermelhada.

### 1.5.2 Formação Santa Terezinha

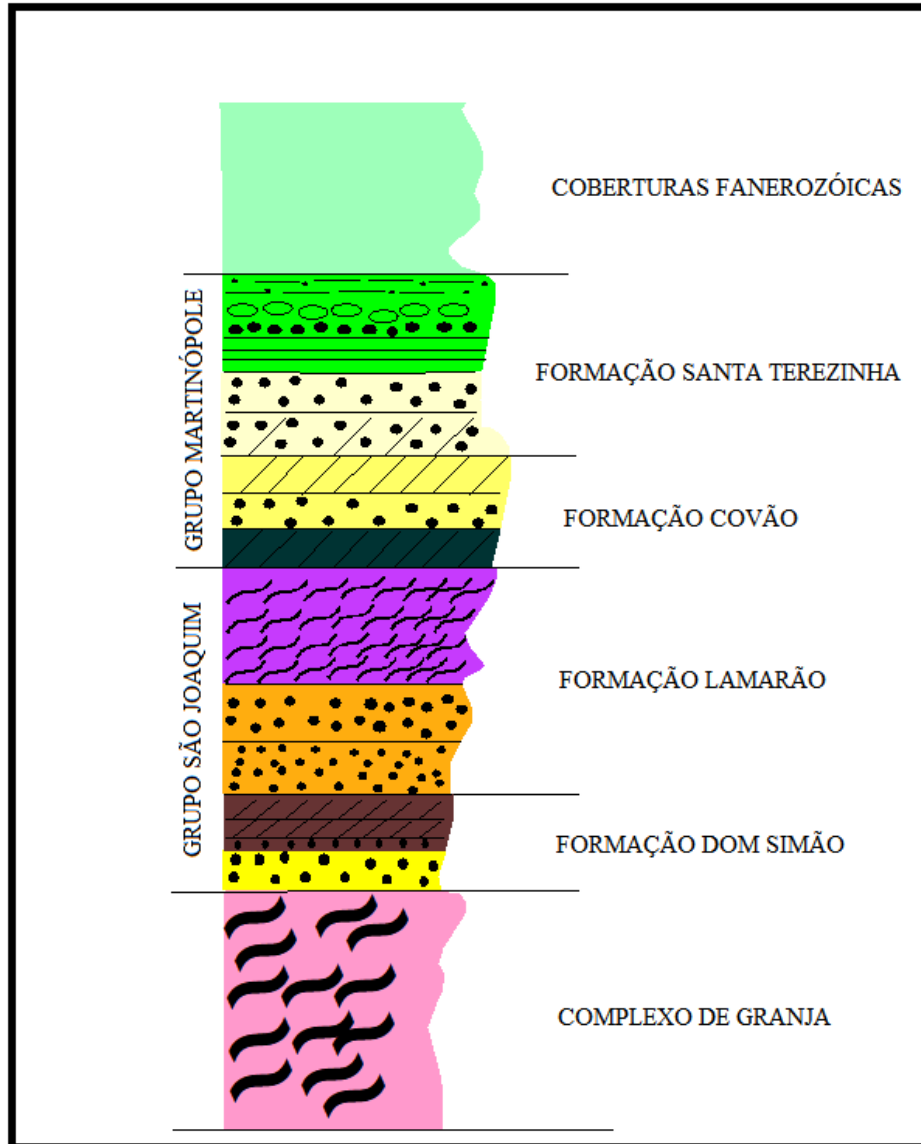
Esta formação posiciona-se sobre os litótipos da Formação Covão e foi dividida nos membros Marfim, Vargem e Casinha (Torquato *et al.*, 1987).

O Membro Marfim é constituído essencialmente por filitos cuja mineralogia básica tem como representantes: quartzo, sericita, clorita, zircão, turmalina, opacos, titanita e granada.

O Membro Vargem inicia-se com filitos puros que em direção ao topo são enriquecidos em quartzo até formar leitões quartzíticos. Em seguida observa-se nova sequência de filitos intercalada com metarcósios gradando para metaconglomerados. Por fim são observadas metagrauvas e novamente filitos com intercalações de metassiltitos.

E por fim o Membro Casinha é constituído essencialmente de metassiltitos que formam extensos pacotes. Essas rochas apresentam-se com coloração amarela e alaranjada. Os metassiltitos são compostos essencialmente por grãos de quartzo e minerais de argila.

Figura 04: Coluna litoestratigráfica das rochas supracrustais São Joaquim e Martinópolis, segundo Torquato *et al.* (1987) e Silva (2004). Coluna estratigráfica da área baseado em Torquato *et al.* (1987)



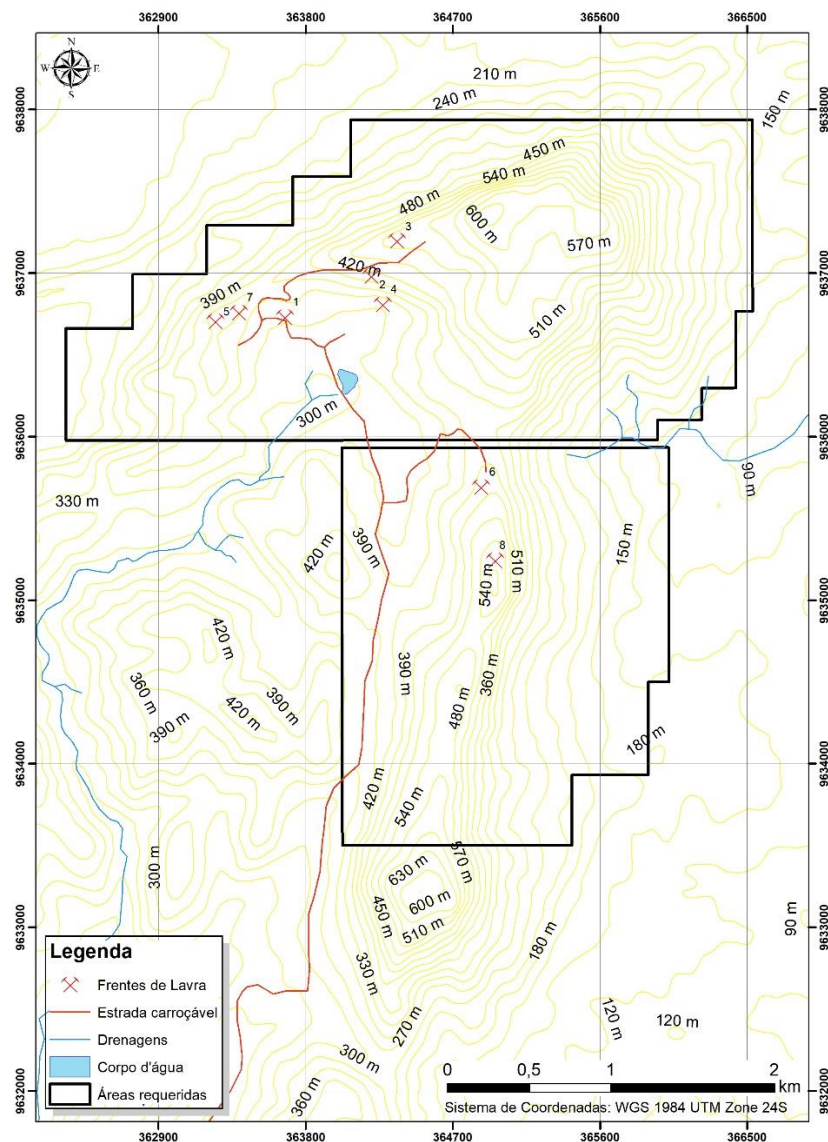
Fonte: Silva (2004)

## 2 LAVRA E BENEFICIAMENTO

As operações de lavra tiveram início no segundo semestre de 2015, sendo estimado uma vida útil de 42 anos para a mina. A Mineração Agreste Ltda é a empresa responsável pela extração do quartzito na Serra do Mucuripe. No ano de 2018 a mineração possui uma área em processo minerário, cadastrada no DNPM, de aproximadamente 11.200m<sup>2</sup> (Figura 5).

A empresa desenvolveu oito frentes de lavra, porém, devido ao elevado grau de faturamento, atualmente encontram-se somente três em atividade, as frentes 3, 7 e 8 (Figuras 5 e 6).

Figura 05: Áreas requeridas para extração do quartzito.



Fonte: autor.

## 2.1. Extração do Perla Santana

O quartzito está em grande parte da área aflorante fazendo com que o capeamento da área da lavra seja pouco significativa.

O método que a empresa utiliza para extrair os blocos de rocha é o método de lavra por bancadas (Figura 6A B). Neste método a mina é subdividida em níveis sucessivos de lavra, que evoluem lateralmente.

Para a abertura de novos níveis ou frentes de lavra, utiliza-se a abertura de gavetas (abertura de um nível lateral na frente de lavra), para obter uma superfície livre e facilitar a passagem do fio diamantado. Devido a dureza da rocha todos os cortes são realizados com o uso de fio diamantado. O princípio básico de corte é puxar uma alça de fio diamantado, enlaçada na rocha por dois furos que se interceptam, formando um circuito fechado, em que através do movimento de translação do fio e da constante força de tração exercida sobre ele, promove-se o desenvolvimento do corte (Figura 6C).

Depois da abertura da gaveta é isolado o quadrote (volume primário de rocha no formato de paralelepípedo) da bancada (Figura 6D). Do quadrote são obtidos os filões (volumes secundários), que depois de tombados recebem o nome de prancha. Por fim a prancha é esquadrejada em blocos. São extraídos blocos prismáticos com dimensões brutas de 2,80 (comprimento) x 1,80 (altura) x 1,25 (largura) metros, perfazendo um volume bruto de 6,3 m<sup>3</sup> (Figura 6E).

Figura 6: A) Primeiro nível de bancadas das operações de avanço de frente de lavra 03, em dezembro de 2016; B) segundo nível de bancadas da frente 03, em dezembro de 2017.; C) corte de gavetas na frente 03, utilizando fio diamantado; D) tombamento do volume primário na frente 07; E) volume de rocha final, pronto para o transporte.



Fonte: autor.

## 2.2. Beneficiamento

O beneficiamento de rochas ornamentais visa basicamente a transformação dos blocos, extraídos na fase de lavra, em produtos finais ou semiacabados (Vidal *et al.*, 2013). O beneficiamento é dividido em duas fases: primária (desdobramento) e secundária. A primeira fase do beneficiamento compreende a preparação e serragem dos blocos em chapas de espessura variável, 3cm, 2cm e 12mm. Na segunda fase, as chapas são submetidas a acabamentos superficiais.

O beneficiamento primário consiste no corte do bloco em chapas. Devido as fraturas presentes no quartzito, se faz necessário o envelopamento do bloco com resinas, para preparar o bloco para a fase de serragem.

O desdobramento do bloco em chapas é feito através de fio diamantado. O sistema de corte por meio de teares multifio diamantado, ou monofio, permite o corte de rochas ornamentais, predominantemente silicáticas, obtendo-se elevada qualidade no acabamento superficial das chapas e boa produtividade. O processo de corte com fio ocorre pela ação abrasiva dos anéis, ou pérolas, diamantadas, que são dispostos ao longo do fio. O equipamento funciona com um conjunto de polias que giram a determinada velocidade e tencionam o fio sobre o bloco.

O beneficiamento secundário é o responsável por conferir as características dimensionais, de conformação e especificação ao produto final. Estão reunidos nessa etapa os processos de polimento, resinagem e telagem (Figura 7).

O processo de polimento consiste em reduzir a rugosidade da superfície trabalhada com a finalidade de transformá-la em uma placa com brilho, isto ocorre pela ação de elementos abrasivos que, conduzidos em movimentos de atrito sobre o material, vão desbastando-o até atingir o grau de polimento desejado, com o uso de abrasivos com granulometria decrescente.

O quartzito, devido seu alto grau de faturamento, também é submetido aos processos de resinagem e telagem e estucamento. A resinagem visa aumentar a resistência da rocha a agressões por intempéries e melhorar o aspecto visual, enquanto que a telagem é aplicada para aumentar a resistência da rocha a flexão. Por vezes se faz necessário o processo de estucamento, esse processo consiste no preenchimento das fissuras abertas presentes na chapa com resina e pó da própria rocha (Figura 07).



Figura 7: Etapas do processo de beneficiamento. A) aplicação de tela na chapa; B) aplicação de resina; C) polimento e estucamento; D) produto final.



Fonte: autor.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O material de estudo do presente trabalho são os quartzitos que compõem a Serra do Mucuripe, com foco principal no quartzito puro, pertencente ao Membro Mato Verde, explorado para uso ornamental e comercializado como Perla Santana.

Para alcançar os objetivos propostos foram realizadas pesquisas bibliográficas, etapas de campo e análises laboratoriais. Com o conhecimento prévio da região estudada realizou-se o trabalho de campo.

A etapa de campo consistiu em identificar as diferentes litologias que ocorrem na área, analisando os diversos afloramentos e visitando as frentes de lavra da extração do quartzito. Em campo foram coletadas 40 amostras, das quais 7 amostras representativas foram escolhidas para a confecção das lâminas delgadas. As medidas estruturais de foliações, fraturas, clivagem de fratura e eixo de dobras de segunda ordem foram realizadas com o uso de uma bússola modelo Brunton.

A fase laboratorial consistiu, principalmente, na descrição das lâminas petrográficas e na análise de imagens de satélite. A etapa final consistiu na compilação dos dados para alcançar os objetivos propostos. Os principais métodos e procedimentos adotados com esse intuito são descritos a seguir.

#### 3.1 Petrografia

A análise petrográfica é fundamentada na observação de lâminas delgadas. Para tal foram confeccionadas 7 lâminas delgadas, pelo menos duas de cada litologia (Tabela 2), foram descritas feições como: textura, estrutura, granulometria dos minerais e composição mineralógica.

Foram analisadas, na amostra do quartzito comercialmente chamado de Perla Santana, além das feições supracitadas, alterações, o tipo de contato entre grãos e o grau de microfissuramento. As alterações intempéricas, são consideradas o principal condicionante das degradações de rochas metamórficas para uso ornamental (Vidal *et al.*, 2013).

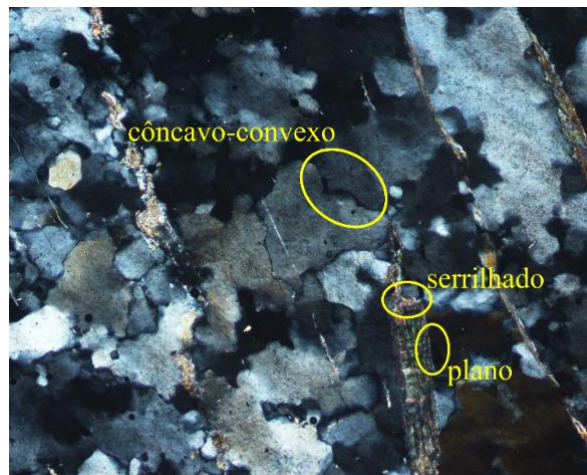
Tabela 2: Amostras a partir das quais foram confeccionadas lâminas petrográficas.

Amostra	Descrição	X	Y
FR03A	Quartzito puro (Membro Mato Verde)	364360	9637198
FR03B	Quartzito (Membro Mato Verde)	364360	9637198
FR07	Quartzito puro (Membro Mato Verde)	363392	9636758
P18	Calcissilicática (Membro Morro do Cascudo)	364091	9635496
P23	Quartzito impuro (Membro Morro do Cascudo)	362900	9632739
P53	Calcissilicática (Membro Morro do Cascudo)	363762	9635020
P57	Quartzito impuro (Membro Morro do Cascudo)	363737	9633470

Fonte: autor.

A relação de contato entre os minerais foi analisada nas lâminas petrográficas do Perla Santana, com aumento da objetiva em 5x. Os contatos foram classificados em: côncavo-convexo, serrilhado e plano (Figura 8).

Figura 8: Tipos de contatos minerais considerados na análise petrográfica, aumento da objetiva de 5X.



Fonte: autor.

O grau de microfissuramento mineral é uma das feições mais importantes para explicar o comportamento físico-mecânico da rocha. O grau de microfissuramento é expresso pelo número de microfissuras por área ( $\text{mm}^2$ ). O estudo foi realizado com o auxílio do microscópio petrográfico com aumento da objetiva de 5x. As microfissuras são discriminadas

em: intragrãos preenchidos; intragrãos não-preenchidos; intergrãos preenchidos; intergrãos não-preenchidos. Os valores de referência estão indicados na tabela 3.

Tabela 3: Classificação do Grau de Microfissuramento.

Grau de Microfissuramento	Quantidade de Microfissuras
Alto	>0,25 microfissuras por mm <sup>2</sup>
Moderado	de 0,1 a 0,25 microfissuras por mm <sup>2</sup>
Baixo	<0,1 microfissuras por mm <sup>2</sup>

Fonte: Meyer, 2003.

As alterações encontradas na rocha que dificultam a exploração, ou que diminuem seu valor comercial, foram analisados em laboratório através dos métodos de difração de raios X e Espectrometria por Energia Dispersiva (EDS), a partir de imagens geradas pelo Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

### 3.2 Análise Estrutural

A análise estrutural foi realizada através do estudo da intergeração das imagens de sistemas orbitais e interpretadas com base em dados coletados em campo.

Em campo foram realizadas medições estruturais de juntas e foliações, as notações foram medidas em modo Clar (sentido e intensidade do mergulho). Apesar do alto grau de deformação, os planos da foliação nem sempre estão bem distintos, principalmente no Membro Mato Verde.

#### 3.2.1 Identificação e Extração dos Lineamentos

Segundo Sabins (2007) os lineamentos são feições lineares de âmbito regional que se expressam morfologicamente como vales, cristas, segmentos de drenagens e anomalias tonais, controladas estruturalmente por foliações, juntas e falhas.

No presente trabalho a extração dos lineamentos foi realizada manualmente em ambiente SIG, para tal foram utilizadas imagens SRTM em conjunto com imagens Sentinel.

As imagens SRTM foram obtidas no site do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). Utilizadas para determinar lineamentos estruturais em grande escala, este produto

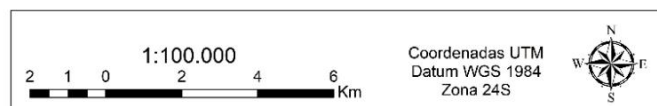
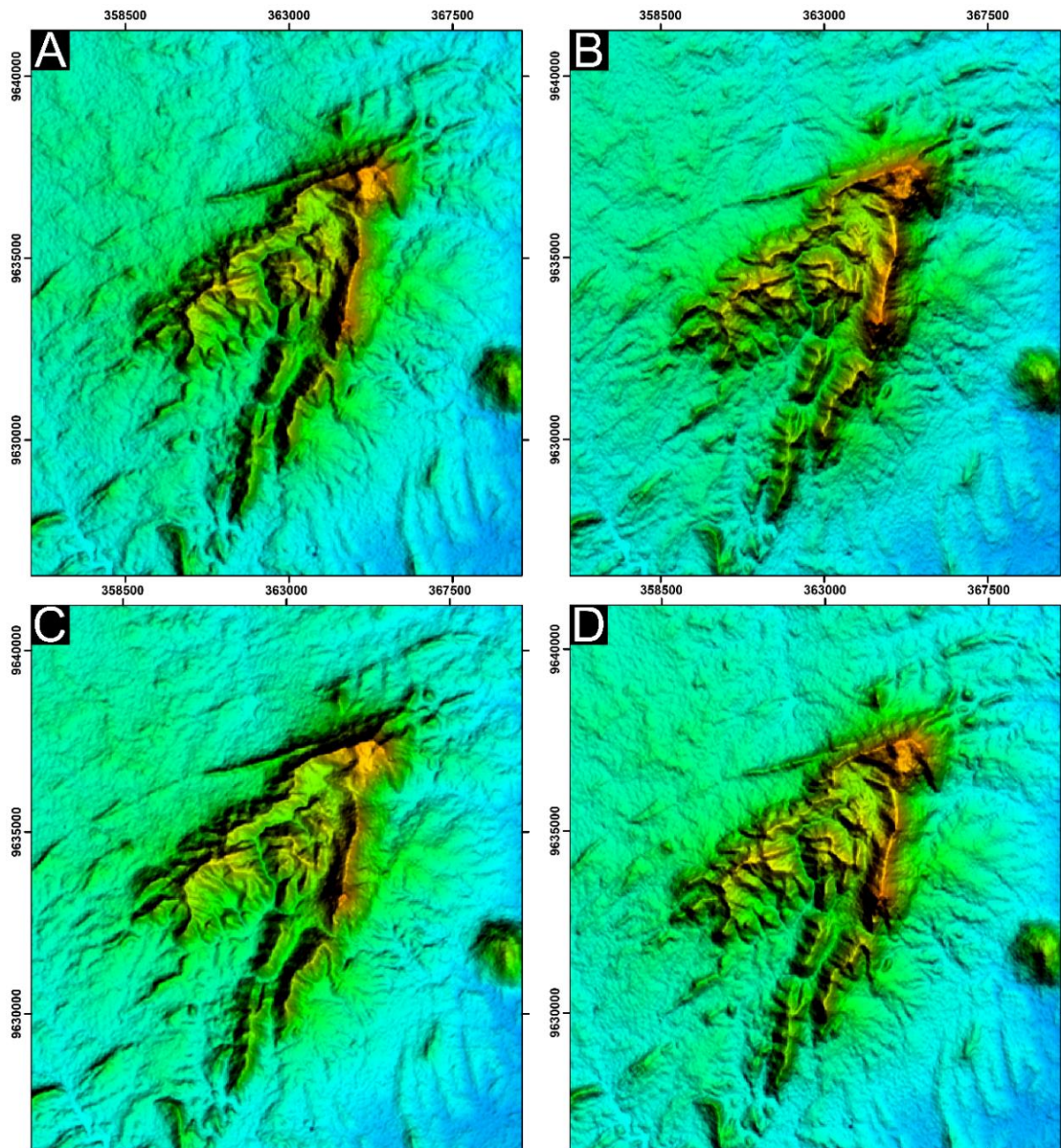
dispõe de uma resolução espacial de 30m e proporciona uma percepção tridimensional coerente com a estrutura do terreno, que é eficiente na análise tectônica.

As imagens foram processadas utilizando diferentes ângulos de elevação do sol (altitude) e diferentes ângulos de azimute. A altitude varia de 0° a 90°, quanto mais perto de 0° maior a sombra formada e quanto mais perto de 90° menor a sombra formada, nas regiões mais acidentadas foi utilizada uma altitude igual a 70°, para que as sombras não mascarassem as informações nas regiões de menor elevação foi utilizado altitude de 30°. O azimute refere-se à posição do sol, foram utilizados quatro azimutes diferentes, para nenhuma feição ser mascarada, azimute de 90° para evidenciar lineamentos N-S, de 0° para lineamentos W-E, 45° para lineamentos NW-SE e 135° para lineamentos NE-SW (Figura 9).

As Imagens de Sensoriamento Remoto do orbital Sentinel-2, obtidas no USGS, também foram utilizadas no auxílio para a obtenção dos dados, por possuírem uma maior resolução espacial (10m), possibilitando a identificação de um maior número de lineamentos. O instrumento MSI a bordo do Sentinel-2 gera 13 bandas espectrais, das quais 4 possuem uma resolução espectral de 10 metros, a saber: azul (B02), verde (B03), vermelho (B04) e infravermelho próximo (B08).

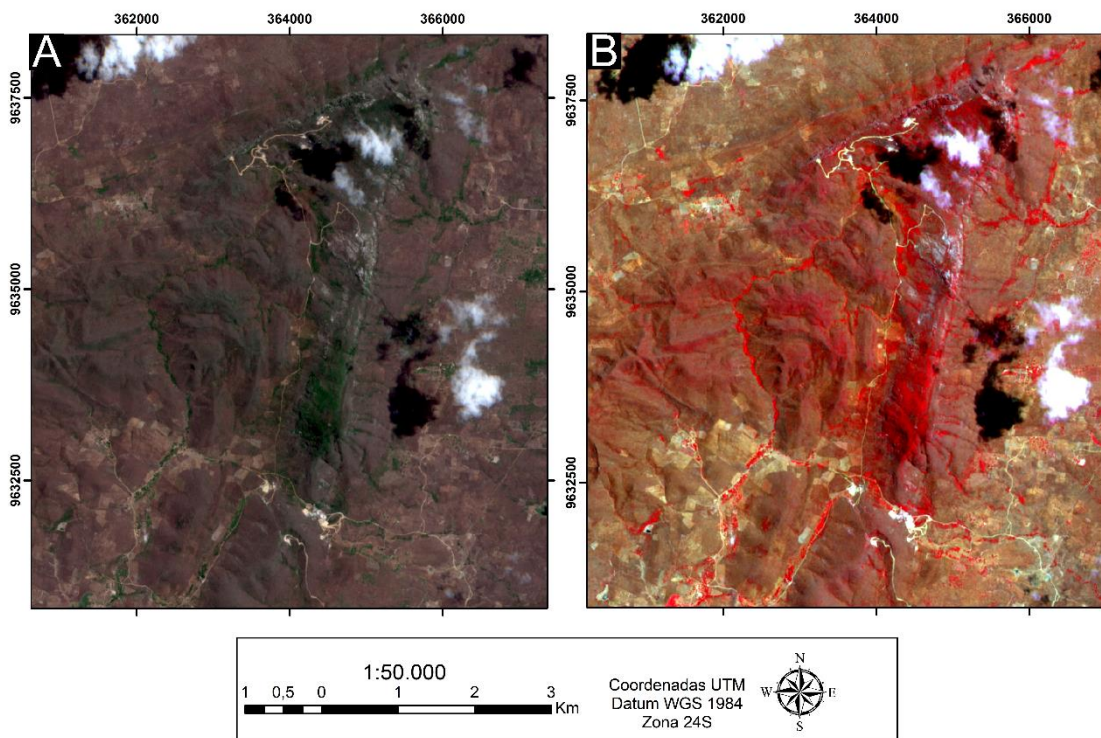
Foram utilizadas duas composições para extração dos lineamentos, a composição RGB 432 (cor verdadeira) e uma composição RGB 842, uma falsa cor utilizada para realçar o contraste dos lineamentos (Figura 10).

Figura 9: Imagens SRTM com diferentes angulações evidenciando a geomorfologia da área, exibindo imagens SRTM com: A) altitude de 70° e azimute 0°; B) altitude de 70° e azimute 135°; C) altitude de 70° e azimute de 45°; D) altitude de 70° e azimute de 90°.



Fonte: adaptado do USGS.

Figura 10: Imagem de satélite Sentinel-2 na escala de 1:50.000 com: A) composição de cor verdadeira RGB 432; B) composição de falsa cor RGB 842.



Fonte: adaptado do USGS.

### 3.2.2 Classificação dos Lineamentos

Para traçar os lineamentos todas as imagens foram analisadas isoladas e em conjunto, para uma melhor acurácia na identificação dos lineamentos. Os lineamentos foram classificados em cristas e vales.

As cristas correspondem aos lineamentos positivos que se destacam topograficamente na região, as cristas podem ser interpretadas como sendo registros de cisalhamentos transcorrentes, outra possibilidade de interpretação são que os lineamentos positivos representam traços em superfície de uma foliação, demarcando flancos e charneiras de dobras em grande escala.

Os vales correspondem aos lineamentos negativos, representados por fraturas observáveis em afloramentos rochosos desprovido de cobertura vegetal, vias de escoamento da água meteórica e canais fluviais (podendo ou não estar associados a faturamentos).

### 3.2.3 Análise dos Lineamentos

O trabalho de extração foi realizado em duas escalas, em um primeiro momento na escala de 1:100.000, para que fosse observado o comportamento estrutural dos lineamentos da região onde a área se insere. E em um segundo momento na escala de 1:50.000, possibilitando uma observação dos lineamentos numa escala de maior detalhe.

Para a análise estatísticas dos dados foram considerados dois parâmetros: a orientação azimutal e o comprimento dos lineamentos. Como resultado foram geradas roseta, utilizando o programa Stereonet, com intervalos de 10°. Também foram gerados histogramas comparando a frequência dos lineamentos com a somatória dos comprimentos, utilizando o mesmo intervalo de 10°.

Outro parâmetro analisado foi o cálculo da densidade de lineamentos, para tal, foi aplicada a metodologia utilizada por Justo (2006), onde são analisadas a somatória dos comprimentos dos lineamentos para uma determinada área pré-estabelecia.

$$\rho = \frac{\Sigma l}{A}$$

onde:

$\rho$  = densidade de lineamentos

$l$  = comprimento do lineamento

$A$  = área analisada

Foram selecionadas 5 áreas de aproximadamente 5,5 km<sup>2</sup> com o intuito de determinar as porções com menor densidade de lineamentos. Foram escolhidas, para o cálculo da densidade de lineamento, as áreas em que a rocha está sendo explorada e áreas com possibilidade de futuras explorações.

Para o tratamento e representação dos dados estruturais obtidas em campo, foram confeccionadas projeções esteriográficas utilizando o programa Stereonet. Para o estudo das estruturas dúcteis (foliações) foram confeccionadas projeções ciclográficas e construção do diagrama Pi.



### ***3.2.4 Caracterização Tecnológica***

A caracterização tecnológica tem o objetivo de avaliar o comportamento do quartzito diante das solicitações às quais poderão ser submetidas, quando utilizada como rocha ornamental. Foram realizados cinco ensaios tecnológicos, são eles: índices físicos (densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água); compressão uniaxial; resistência a flexão (três pontos); desgaste abrasivo de Amsler e ataque químico. Os ensaios físico-mecânico foram realizados pela Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará (NUTEC) e o ataque químico pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), os dados dos foram fornecidos pela Mineração Agreste Ltda.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos estudos petrográficos e estruturais das rochas que compõem a Serra do Mucuripe. Também são apresentados os resultados dos ensaios físico-mecânicos realizados no quartzito do Membro Mato Verde, comercialmente denominado de Perla Santana. Para cada resultado do comportamento físico-mecânico da rocha é realizada uma discussão com base nas suas características petrográficas, para se compreender a resposta da rocha a esforços a que ela será submetida, quando utilizada como rocha ornamental.

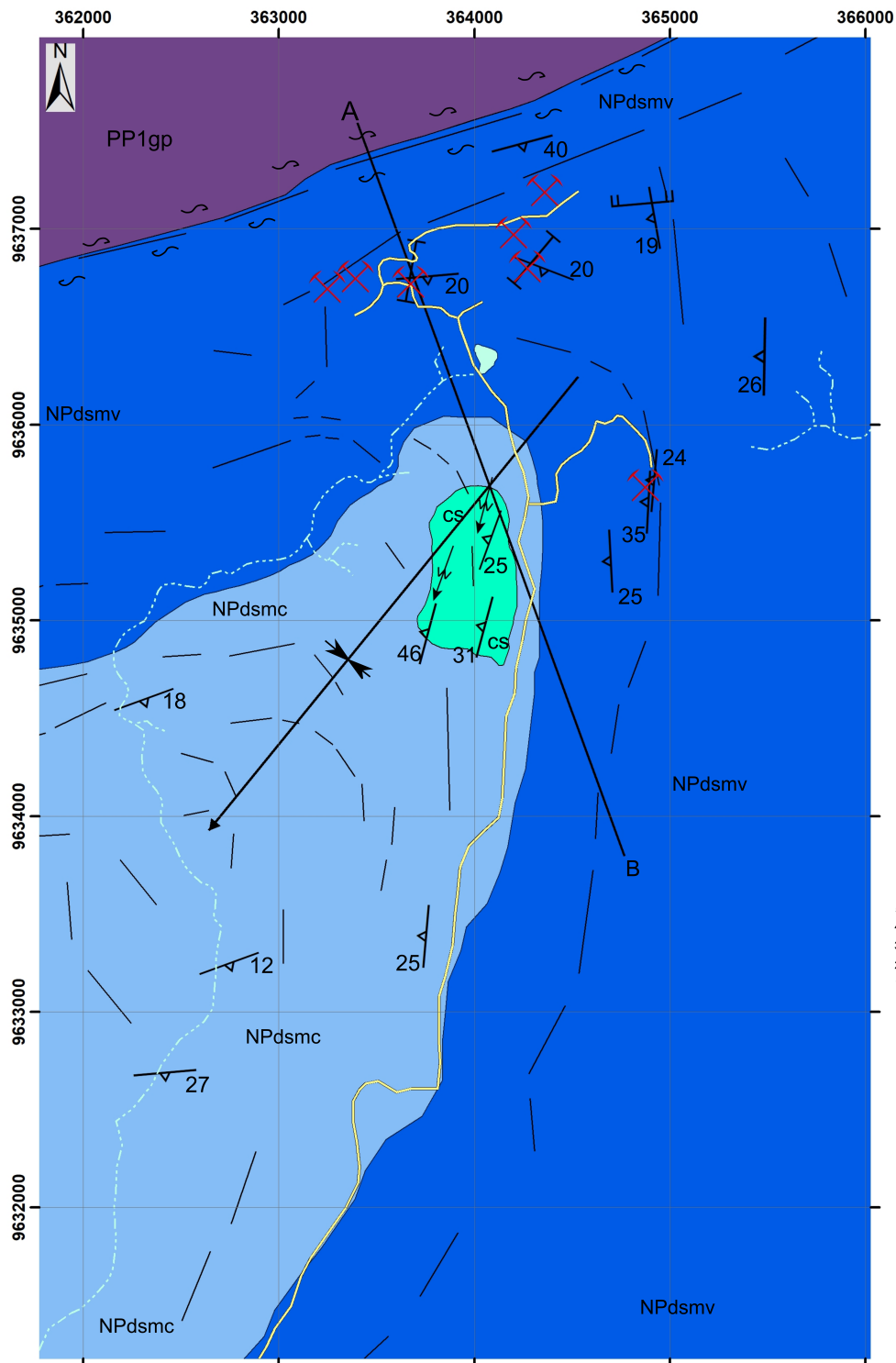
### 4.1 Geologia da Serra do Mucuripe

O relevo da região abrangida pelo mapeamento é caracterizado por cristas alongadas segundo a direção nordeste. Essas cristas apresentam desníveis de até 400 metros. O extremo nordeste da área é caracterizado por formas de relevo mais planas, composto por rochas gnáissicas, do Complexo Granja, perfazendo 10% da área.

As rochas da Formação Dom Simão ocupam os outros 90% da área mapeada. Os dois membros da formação são bem expostos na área, ambos intensamente fraturados. As cotas mais elevadas da área, 500 e 600m, são constituídas do Membro Morro do Cascudo, que é a base da formação. Essas cristas quartzíticas perfazem uma dobra de dimensões quilométricas (Figura 11). O membro é composto por um quartzito de cor branca, puro, com cerca de 94% de quartzo.

O outro membro aflorante é o Morro do Cascudo, composto por quartzitos impuros, com cerca de 84% de quartzo, e intercalações de rochas calcissilicáticas e xistos (Figura 11). A foliação desse membro está bem marcada, e representa o estágio deformacional mais importante da área. O quartzito desse membro apresenta cores branca acinzentadas, essa coloração mais escura se deve a uma maior presença de minerais opacos, que compõe cerca de 7% da rocha. A rocha calcissilicática aflora em quatro pontos, em um morrote no centro da área (Figura 11). A rocha possui uma cor cinza escuro esverdeada, apresenta-se alterada e bandada, as bandas são compostas por biotita xisto. Além de compor o bandamento, o xisto gera dobras de segunda ordem, isso se deve a diferença de competência das rochas.

Figura 11: Mapa Geológico da Serra do Mucuripe.



**UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS**  
**NEOPROTEROZOICO**

**GRUPO SÃO JOAQUIM**  
**FORMAÇÃO DOM SIMÃO**

**NPdsmc** Membro Morro do Cascudo: quartzitos impuros, bandado, por vezes bastante micáceos, com intercalações de calcissilicáticas(cs).

**NPdsmv** Membro Mato Verde: quartzitos puros e micáceos, compactos e laminados.

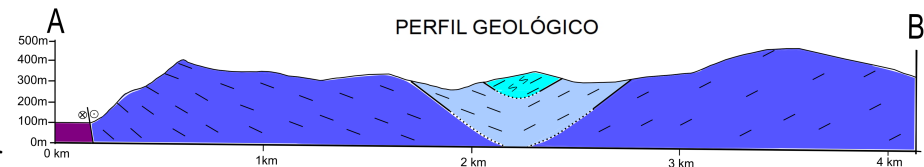
**PALEOPROTEROZOICO**

**COMPLEXO GRANJA**

**PP1gp** Ortognaisses e migmatitos bandados e dobrados.

**CONVENÇÕES GEOLÓGICAS E CARTOGRÁFICAS**

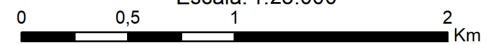
- 25 Foliação com mergulho indicado
- Clivagem de fratura vertical
- Clivagem de fratura subvertical
- Sinclinal com caimento indicado
- Lineamentos estruturais
- Eixo de dobra de segunda ordem
- Zona de cisalhamento trascorrente dextral
- Frente de Lavra
- Corpo d'água
- Rio intermitente
- Estrada carroçável



Autor: Jorge Augusto de Lima Nunes  
Orientadora: Profa. Dra. Irani Clezar Mattos

**MAPA GEOLÓGICO DA SERRA DO MUCURIPE**

Escala: 1:25.000



Sistema de Coordenadas: WGS 1984 UTM Zone 24S  
Declinação magnética para o centro do mapa em 2018: 21° W

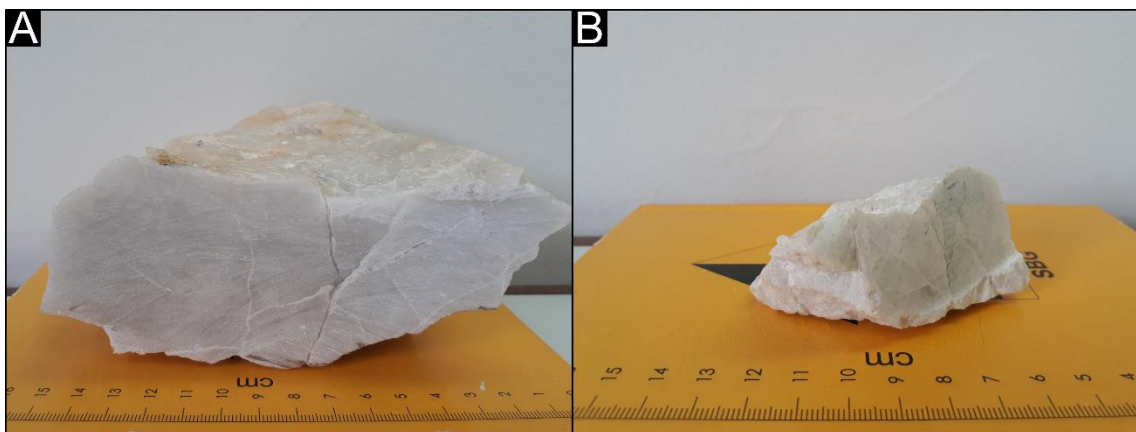
## 4.2 Caracterização litológica

A serra é formada por dois quartzitos distintos, utilizando a classificação proposta por Torquato & Nogueira Neto (1996) é possível distinguir os quartzitos, individualizando-os. Os quartzitos coincidem com as descrições dos Membros Mato Verde (quartzitos puros) e Morro do Cascudo (quartzitos impuros), pertencentes a Formação Dom Simão do Grupo São Joaquim.

### 4.2.1 Membro Mato Verde

O Membro Morro do Cascudo é composto por um quartzito puro, com 94% de quartzo, macroscopicamente possui uma textura granoblástica, uma estrutura isotrópica e apresenta-se bem fraturado (Figura 12).

Figura 12: Amostras do quartzito do Membro Mato Verde. A) Amostra FR03A; B) amostra FR07.



Fonte: autor.

Em lâmina, sua composição modal é 94% de quartzo, 2% de muscovita e 2% de sericita. Sua mineralogia acessória compreende de 1% de zircão e menos de 1% da rocha e é composta por rutilo e opacos.

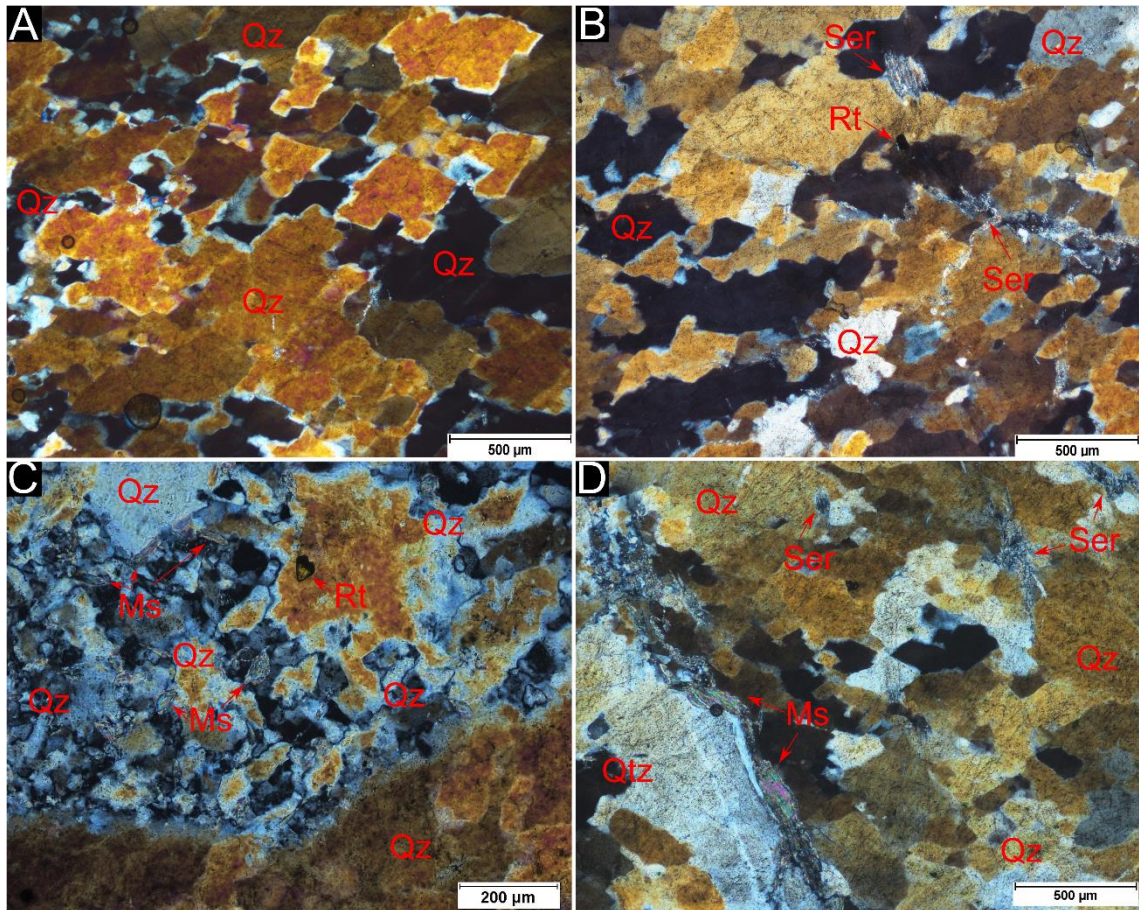
Os cristais de quartzo possuem forma anédrica com contato entre grãos variando entre retilíneo a sinuoso e orientação incipiente dos cristais. Possuem uma granulometria fina a média, variando entre 0,5mm e 1,1mm, e apresentam extinção ondulante marcante. Os agregados de cristais de quartzo exibem feições de recristalização por migração rápida de borda, cuja a principal feição é a sinuosidade das bordas, o que permitiu a reestruturação dos grãos por fluxo no estado sólido (Figura 13).

A muscovita apresenta-se de três formas: cristais lamelares alongados, pequenas palhetas agrupadas e em pequenos flocos. A maioria dos cristais encontram-se preenchendo fraturas, os cristais com hábitos aciculares e em flocos aparecem bem alterados e com contatos retos e serrilhados. Exibem dimensões variando entre 0,1mm até 1,5mm. Também são encontrados cristais estirados formando boudins (Figura 14C), essa boudinagem ocorre inicialmente no estágio plástico, porém com maior atuação no estágio rúptil.

A sericita ocorre principalmente preenchendo fraturas, mas também ocorrem como flocos dispersos na lâmina com contatos sinuosos e serrilhados, indicando formação secundária, proveniente de alteração hidrotermal do quartzo.

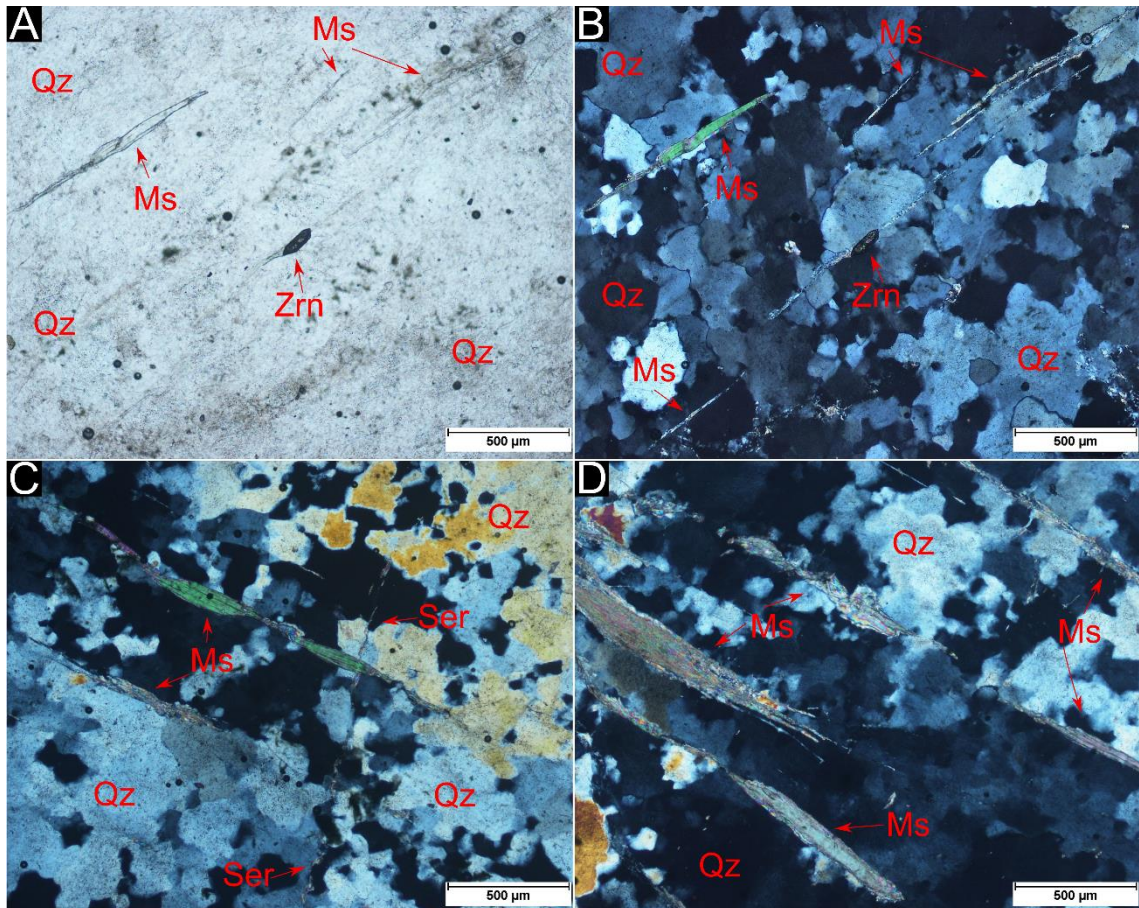
A mineralogia acessória é composta por zircão, rutilo e opacos. O zircão apresenta-se na forma de pequenos cristais prismáticos, de relevo muito alto, dispersos na lâmina e exibindo dimensões médias de 0,2mm. O rutilo ocorre na forma de pequenos cristais anédricos, de relevo alto, dispersos na lâmina, ocorrem em cerca de 0,5% das lâminas e exibindo dimensões médias de 0,1 mm. Os minerais opacos são esporádicos, aparecem somente em uma das lâminas, e ocorrem em grãos muito pequenos >0,1mm.

Figura 13: Fotomicrografia do quartzito da amostra FR07, exibindo: A) orientação incipiente dos cristais de quartzo (Qz) com bordas de recristalização e extinção ondulante; B) cristais de sericita (Ser) em flocos, com contatos serilhados e preenchendo fraturas, pequeno grão de rutilo (Rt) disperso na lâmina; C) porções de quartzo microgranular, e cristais de muscovitas (Ms) e rutilo em grãos pequenos; D) muscovita e sericita preenchendo fraturas, alguns cristais de quartzo orientados apresentando extinção ondulante.



Fonte: autor.

Figura 14: Fotomicrografias da amostra de quartzito FR03A, exibindo: A) Muscovitas (Ms) com hábito lamelar e muscovitas de relevo mais baixo com hábito acicular, bem alteradas, preenchendo fraturas, pequeno cristal de zircão (Zrn) com relevo muito alto, a nicóis descruzados; B) Idem foto A porém, a nicóis cruzados, é possível observar cristais de quartzo (Qz) recristalizado exibindo extinção ondulante; C) fraturas intergrão preenchidas por muscovita e sericita, muscovitas em cristais bem formados, estirados e boudinados com clivagem bem definida, a nicóis cruzados; D) muscovita alterada exibindo contatos serrilhado e retos entre cristais de quartzo que apresentam contatos côncavo-côncavo.



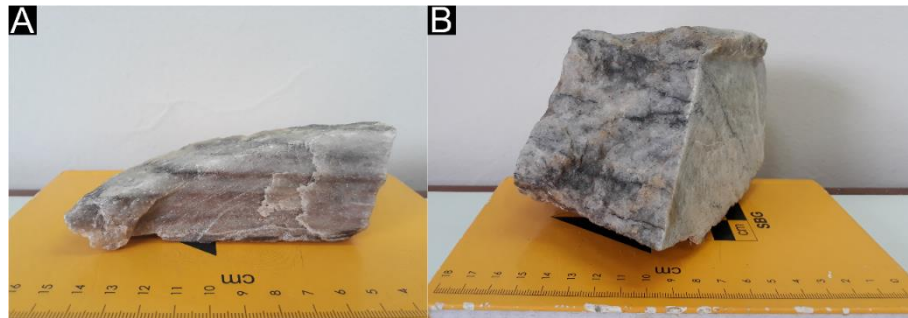
Fonte: autor

#### 4.2.2 Membro Morro do Cascudo

O Membro Morro do Cascudo é formado por um quartzito impuro, com 83% de quartzo, e intercalações de rochas calcissilicáticas e xistos. Macroscopicamente o quartzito possui uma textura granolepidoblástica, leucocrática com bandas de cor escura acinzentada de espessura milimétrica, intercalada com bandas de cor cinza clara a branca, de espessura variável entre 1,00 cm a 6,00 cm. (Figura 15).

Ao microscópio, sua composição modal é de 83% de quartzo, 7% de opacos, 3% silimanita na variedade fibrolita, 2% de epidoto, 2% de sericita e 2% de rutilo. Sua mineralogia acessória compreende 1% de muscovita e zircão.

Figura 15: Amostras do quartzito do Membro Morro do Cascudo: A) P23; B) P57.



Fonte: autor.

Os cristais de quartzo possuem forma anédrica e granulometria muito variável, entre 1,0mm a 2,0mm com porções de quartzo microgranular. Os grãos apresentam extinção ondulante e contatos irregulares e sinuosos.

As bandas acinzentadas são compostas principalmente por minerais opacos, possuindo hábito tabular a lamelar, com reflexões internas na cor vermelha e exibe uma cor cinza metálica a luz natural, características da hematita. Análise das bandas, realizada em MEV, mostrou uma composição de óxido de ferro entre 40 e 70% e entre 4 e 6% de óxido de titânio, conseqüentemente os opacos também podem conter magnetita e ilmenita. Associadas as bandas também ocorrem sillimanita (fibrolita), epidoto, rutilo e sericita (Figura 16).

A sillimanita apresenta-se na sua variação fibrolita, formando massas fibrosas com contatos serrilhados (Figura 16 A, B). A presença de fibrolita sugere que a rocha esteja na zona da sillimanita do metamorfismo de Barrow.

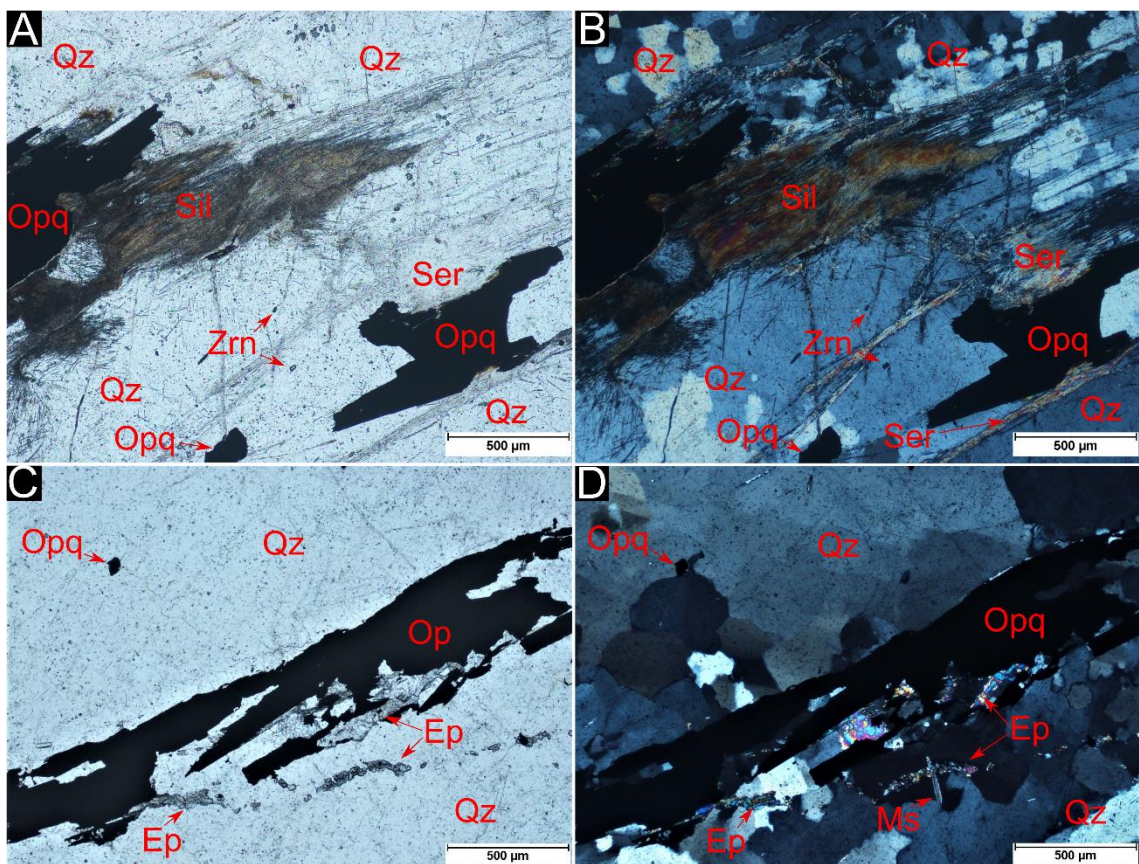
O epidoto exibe-se em agregados de cristais anédricos a subédricos, com contatos retilíneos e irregulares. Os grãos apresentam-se fraturados e orientados segundo a foliação



(Figura 16 C). Os cristais de rutilo exibem hábito granular, apresentam relevo alto e também estão associados ao bandamento, orientados de acordo com a direção de foliação dos minerais principais, cujo aspecto é nitidamente visualizado em imagens obtidas através do MEV/EDS (Figura 17).

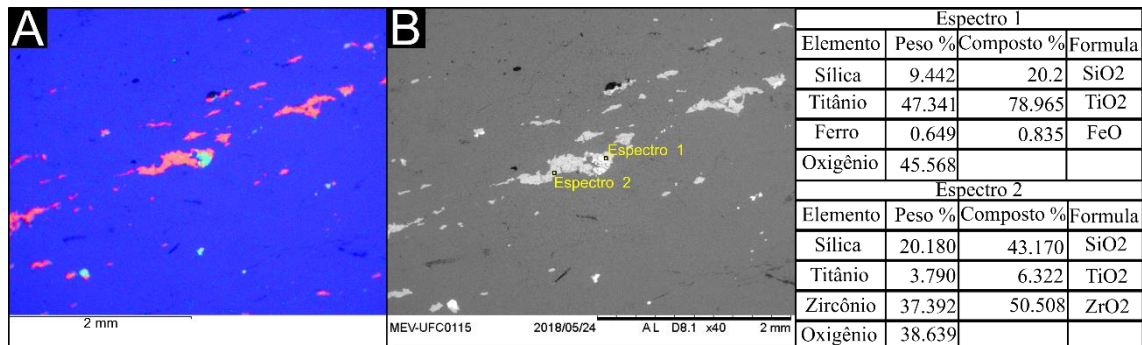
A muscovita aparece como cristais lamelares finos dispersos na lâmina (Figura 16 D). O zircão aparece disperso na forma de pequenos cristais prismáticos a arredondados de relevo muito alto (Figura 16 A, B).

Figura 16: Fotomicrografias da amostra de quartzito P57, exibindo: A) opacos (Opq) com hábito tabular, fibrolita (Sil) como massas fibrosas de relevo médio a alto e contatos serrilhados, pequenos cristais de zircão (Zr) dispersos na lâmina e sericita com hábito acircular de relevo baixo, a nicóis descruzados; B) idem foto A porém, a nicóis cruzados, com quartzo (Qz) apresentando extinção ondulante; C) banda bem definida composta por opacos e epidoto (Ep) com sua discreta cor verde pálido, a nicóis descruzados; D) idem a foto C porém, a nicóis cruzados, com quartzo (Qtz) exibindo extinção ondulante e muscovita (Ms) fina de relevo baixo.



Fonte: autor.

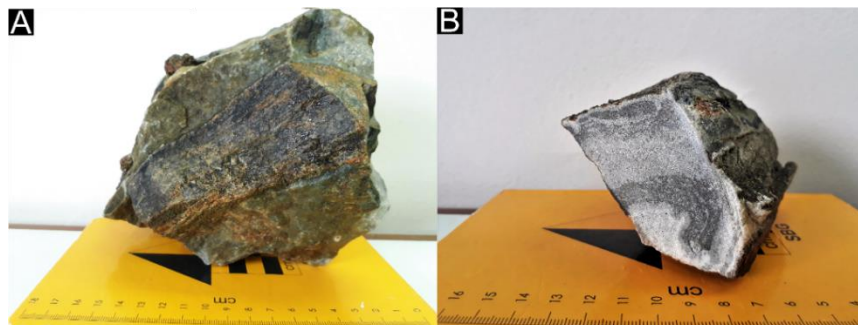
Figura 17: A) Mapa misto da amostra P23 gerado pelo MEV/EDS com uma composição RGB para: Titânio (red), Zircônio (green), Sílica (blue), exibindo banda composta por rutilo ( $\text{TiO}_2$ ) e cristais de zircão ( $\text{ZrO}_2$ ) dispersos na lâmina; B) imagem gerada pelo MEV e analisada pelo EDS com as porcentagens dos elementos e compostos.



Fonte: autor.

No Membro Morro do Cascudo ocorrem intercalações de rochas calcissilicática e xisto. A rocha compõe um morrote no centro da área estudada (Figura 11), mostra-se bem alterada, de cor escura acinzentada a esverdeada, com textura granoblástica e isotrópica, intercalada com bandas xistosas de cor marrom avermelhada, variando de 1 cm até 10 cm (Figura 18).

Figura 18: Amostras da rocha calcissilicática com bandas de biotita xisto. A) Amostra P18; B) amostra P53.



Fonte: autor.

Ao microscópio, a rocha calcissilicática é composta por 60% de calcita, 32% de anfibólio, 3% de quartzo, 2% de titanita, 1% de plagioclásio, 1% de microclína e 1% de zircão e minerais opacos.

A calcita apresenta-se como cristais anédricos de tamanho médio. Pode ser diferenciada dos outros carbonatos por ter maclas mais frequentes e relevo mais baixo (Figura 19 A, B).

O anfibólio apresenta-se bem alterado, com hábito granular e acicular formando agregados fibrosos (Figura 19). O anfibólio pertence a série isomórfica tremolita actinolita, produto de metamorfismo regional de baixo grau.

Os cristais de quartzo são anédricos e possuem uma granulometria muito fina a fina, variando entre 0,1mm e 0,5mm, com contatos entre grãos sinuoso e extinção ondulante.

A mineralogia acessória é composta por cristais de titanita de tamanho variado, 0,08mm até 0,5 mm, mostra-se anédrico e com relevo muito alto a extremo. O plagioclásio exibe-se em pequenos cristais, não ultrapassando 0,1mm, dispersos na lâmina, de forma anédrica, mostrando uma discreta extinção ondulante. O microclínio exibe-se em pequenos cristais, 0,3mm em média, anédricos e dispersos na lâmina. O zircão aparece como pequenos grãos anédricos (< 0,1mm), sem orientação preferencial, dispersos na lâmina. Os minerais opacos esporadicamente e apresentam-se sob a forma de grãos anédricos muito pequenos (< 0,08mm).

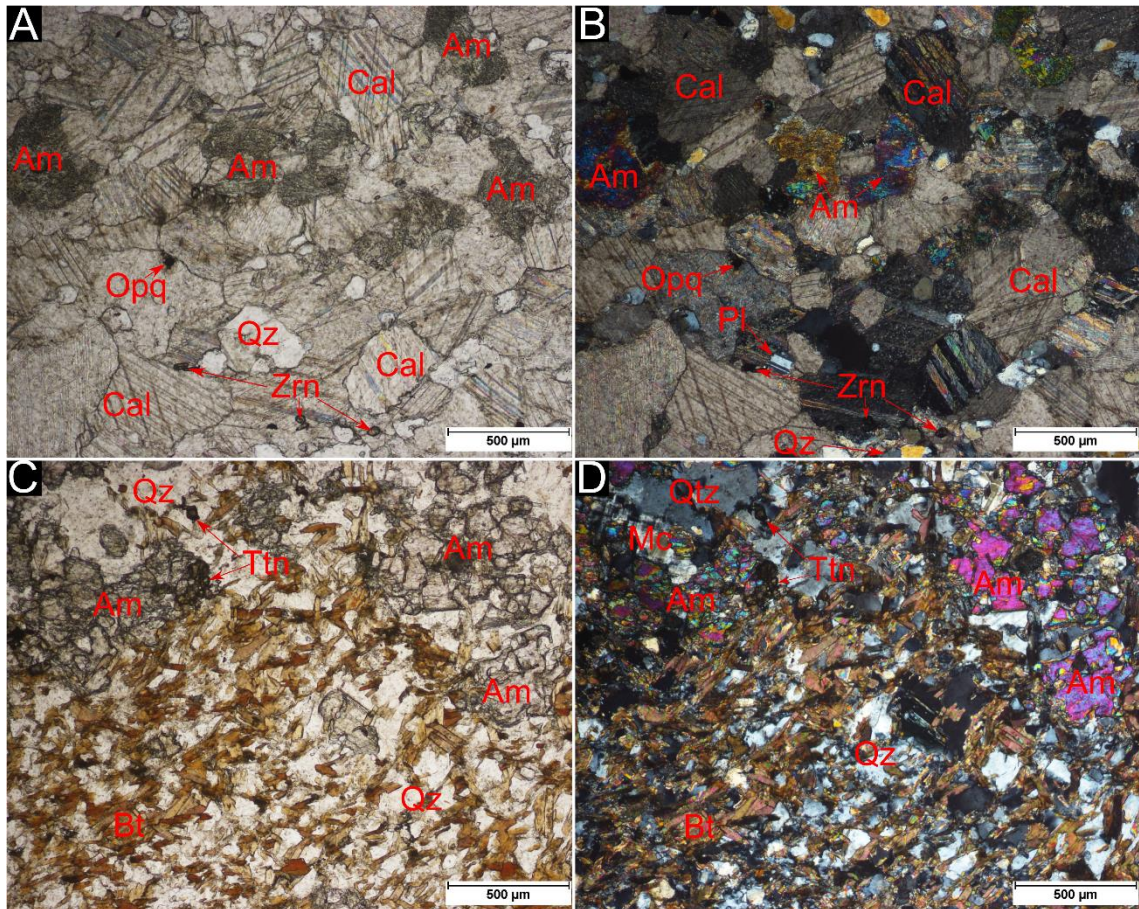
O xisto compõe bandas na rocha calcissilicática, é de cor marrom avermelhado e possui uma textura lepidoblástica (Figura 18).

Em lâmina, a mineralogia do xisto é composta por: 45% de biotita, 30% de anfibólio, 20% de quartzo e 5% de microclínio.

A biotita aparece com hábito lamelar, um pouco desorientadas no contato com a calcissilicática ficando mais orientadas a medida que se afasta do contato, a maioria dos cristais apresenta clivagem bem definida, estando alguns grãos alterados, e não sendo possível ver sua clivagem característica. O anfibólio exibe hábito granular e fibroso com uma leve orientação, segundo a foliação.

O quartzo aparece em grãos pequenos, entre 0,1mm e 0,4mm, e apresenta extinção ondulante. O microclínio exibe-se em pequenos grãos, 0,2mm em média, e apresenta uma discreta extinção ondulante devido a deformação intensa.

Figura 19: Fotomicrografias da amostra de rocha calcissilicática com intercalação de xisto P53, exibindo: A) calcissilicática com calcitas (Cal) anédricas e com contatos sinuosos, o anfibólio (Am) apresenta-se incolor a verde pálido, grãos de zircão (Zr) e minerais opacos (Op) muito pequenos dispersos na lâmina, a nicóis descruzado; B) idem foto A porém, a nicóis cruzados, com cristais de calcita exibindo suas maclas características, pequenos cristais de quartzo (Qz) com extinção ondulante e um pequeno cristal plagioclásio (Pl); C) contato da calcissilicática com o biotita xisto, biotitas (Bt) orientadas, cristais de anfibólio com relevo mais alto e pequenos grão de titanita (Ttn) a nicóis descruzados; D) idem a foto C porém, a nicóis cruzados, com quartzo exibindo extinção ondulante.



Fonte: autor.

### 4.3 Análise Estrutural

A análise estrutural foi realizada com base no estudo de imagens de sistemas orbitais, integrados com dados coletados em campo. Os resultados são apresentados em ordem de escala, da menor escala para a maior e em ordem cronológica.

### 4.3.1 Interpretação Multiescala dos Lineamentos.

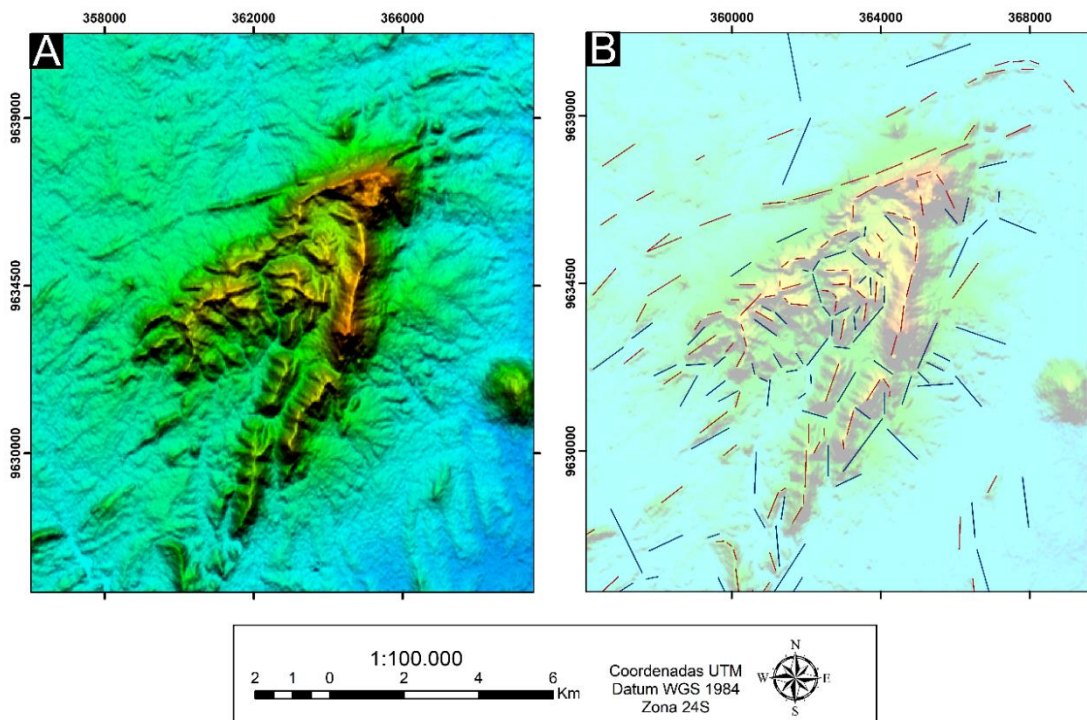
Foram extraídos, somando cristas e vales, 209 lineamentos na escala de 1:100.000 e 323 na escala de 1:50.000, totalizando 522 lineamentos.

O método utilizado para análise das imagens SRTM se mostrou muito eficiente para a extração e compreensão dos lineamentos em escala regional, porém em escala local não se mostrou muito eficaz. As imagens de satélite se mostraram mais eficazes em escala local, principalmente utilizando a composição de falsa cor RGB 842.

Na escala de 1:100.000, as cristas se destacam no terreno, os lineamentos mostraram ter duas direções preferenciais, uma maior no sentido NE-SW e uma N-S (Figura 20). Na escala de 1:50.000 os vales são os que se destacam no terreno, com direções preferenciais NW-SE (Figura 21).

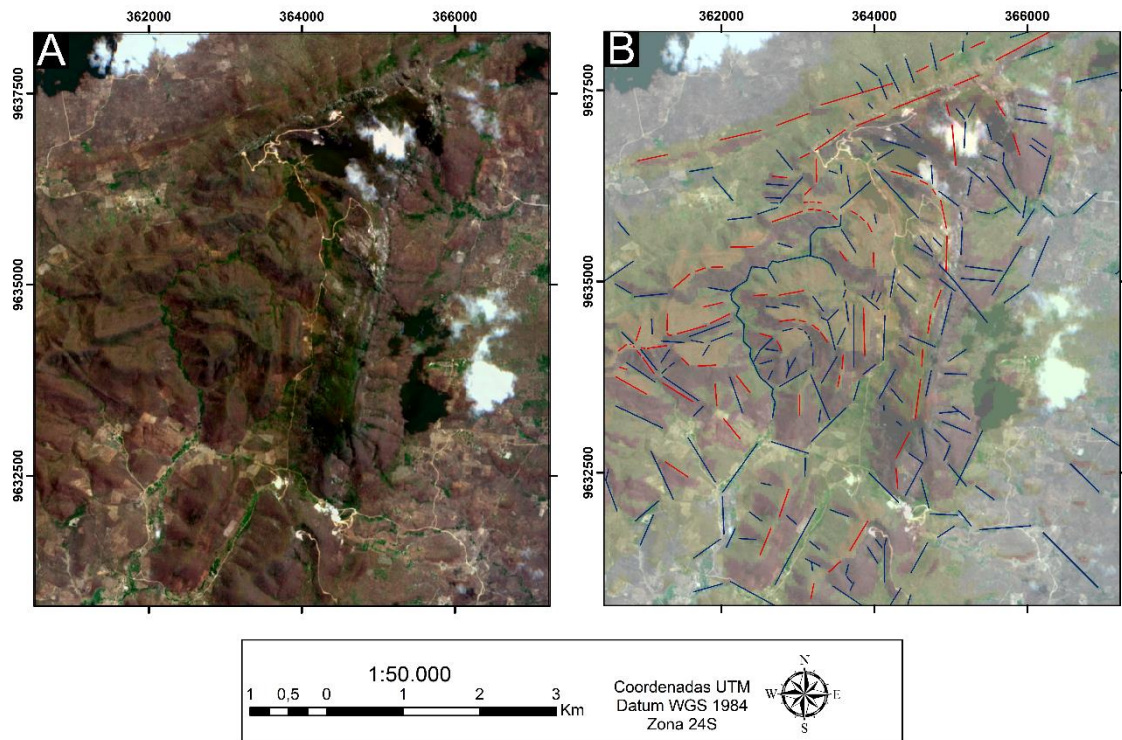
Foram geradas rosetas a partir dos *strikes* dos lineamentos, extraídos em ambiente GIS. As rosetas geradas exibem-se difusas, porém ao contrastar a frequência azimutal com a somatória dos comprimentos, algumas direções se mostram mais relevantes que outras, mesmo apresentando frequências similares.

Figura 20: A) Imagem SRTM com; B) mapa de lineamentos contendo todos os lineamentos extraídos na escala de 1:100.000.



Fonte: autor.

Figura 21: A) Imagem de satélite Sentinel-2, com composição de cor verdadeira RGB 432; B) mapa contendo todos os lineamentos extraídos na escala de 1:50.000.



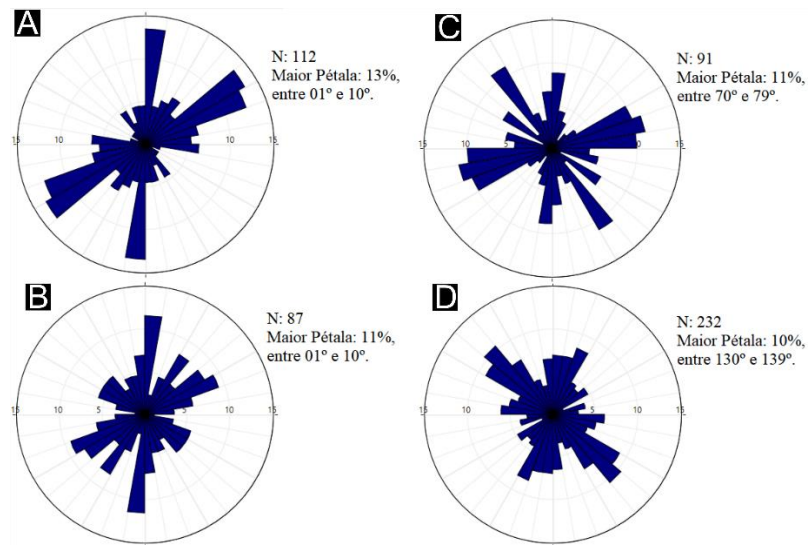
Fonte: autor.

As maiores frequências das cristas na escala de 1:100.000 estão entre  $50^{\circ}$ - $59^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ - $69^{\circ}$  e  $0^{\circ}$ - $10^{\circ}$  (Figura 22 A), porém ao analisar o comprimento dos lineamentos nota-se uma maior relevância dos lineamentos com direções NE-SW (Figura 23). A roseta dos vales indica uma maior frequência no intervalo de  $0^{\circ}$ - $10^{\circ}$  (Figura 22 B) com lineamentos de grande comprimento (Figura 23), no intervalo de  $30^{\circ}$ - $39^{\circ}$  observamos o maior comprimento dos lineamentos, apesar da frequência aparecer como uma discreta pétala na roseta.

Na escala de 1:50.000 a frequência das cristas está mais difusa, com picos entre  $70^{\circ}$ - $79^{\circ}$  e  $140^{\circ}$ - $149^{\circ}$  (Figura 22 C), porém ao ser analisado o histograma comparativo dos comprimentos, os lineamentos que estão entre  $70^{\circ}$ - $79^{\circ}$  somam mais que o dobro do comprimento dos lineamentos entre  $140^{\circ}$ - $149^{\circ}$  (Figura 23).

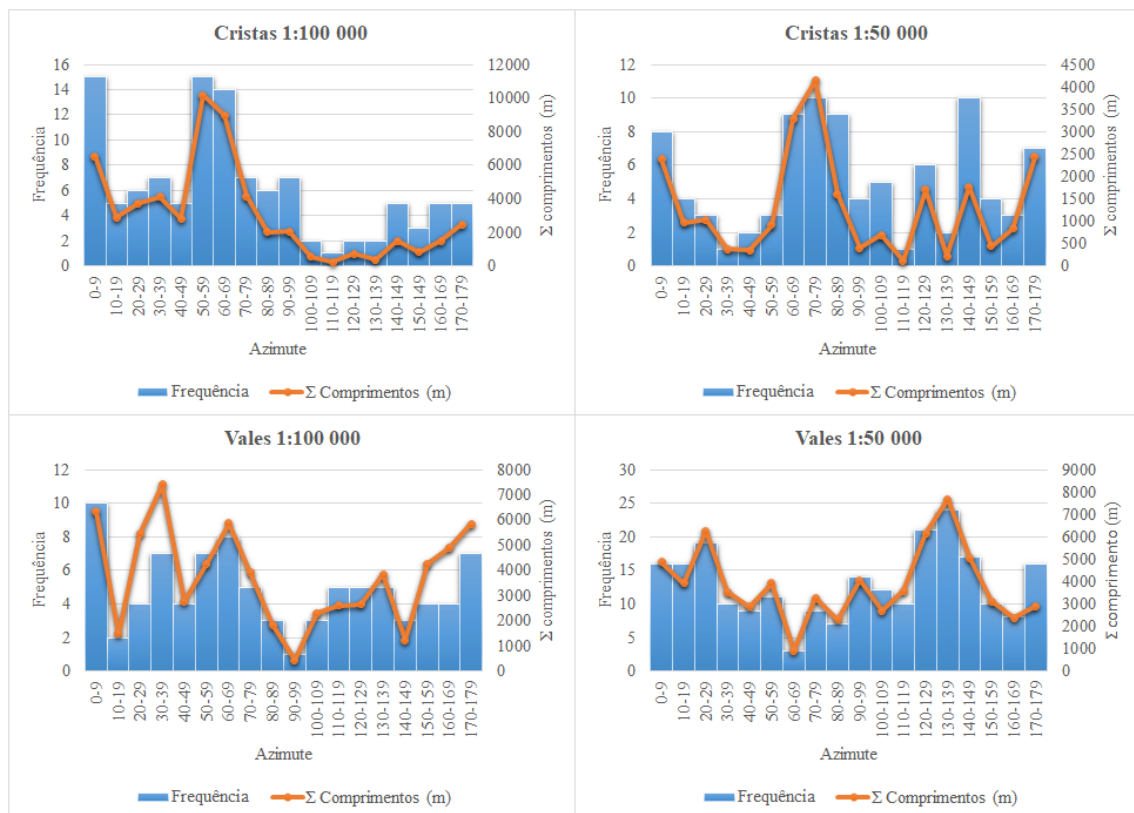
Ao contrário da escala 1:100.000, o que se destaca na escala 1:50.000 são os vales, com o maior número de lineamentos, se apresentam dispersos com somente uma discreta direção preferencial entre  $130^{\circ}$ - $139^{\circ}$  (Figura 22 D). Comparando com a somatória dos comprimentos para cada intervalo azimutal, as frequências apresentam valores concordantes com os comprimentos, com maiores valores no intervalo entre  $130^{\circ}$ - $139^{\circ}$  (Figura 23).

Figura 22: Rosetas das cristas e vales obtidos nas diferentes escalas de trabalho. A) Cristas obtidas na escala de 1:100.000; B) vales obtidos na escala de 1:100.000; C) cristas obtidas na escala de 1:50.000; D) vales obtidos na escala de 1:50.000.



Fonte: autor.

Figura 23: Histograma relacionando a frequência azimutal com a somatória dos comprimentos dos lineamentos.



Fonte: autor

A análise multiescala permitiu evidenciar estruturas para uma melhor interpretação do significado geológico dos lineamentos.

A escala de 1:100.000 se mostrou muito eficiente em evidenciar cristas relacionadas a uma zona de cisalhamento, flancos e charneira de um dobramento de escala quilométrica. Bem como a direção preferencial e de maior importância das mesmas (NE-SW). Na escala de 1:50.000, apesar de ter uma maior dispersão, se confirma a direção preferencial das cristas.

A escala de 1:100.000 não se mostrou muito eficiente na análise dos vales, devido os mesmos não se destacarem topograficamente no terreno, os vales na escala de 1:100.000 apresentam uma elevada dispersão, com uma direção preferencial N-S, esses lineamentos estão relacionados ao dobramento, representando a expressão em superfície do flanco oeste. Porém a escala de 1:50.000 se mostrou mais eficiente na análise dos vales, que possuem direção preferencial NW-SE, esse conjunto de lineamentos representam fraturas, evidências de um estágio de deformação rúptil na região.

#### ***4.3.2 Densidade dos lineamentos***

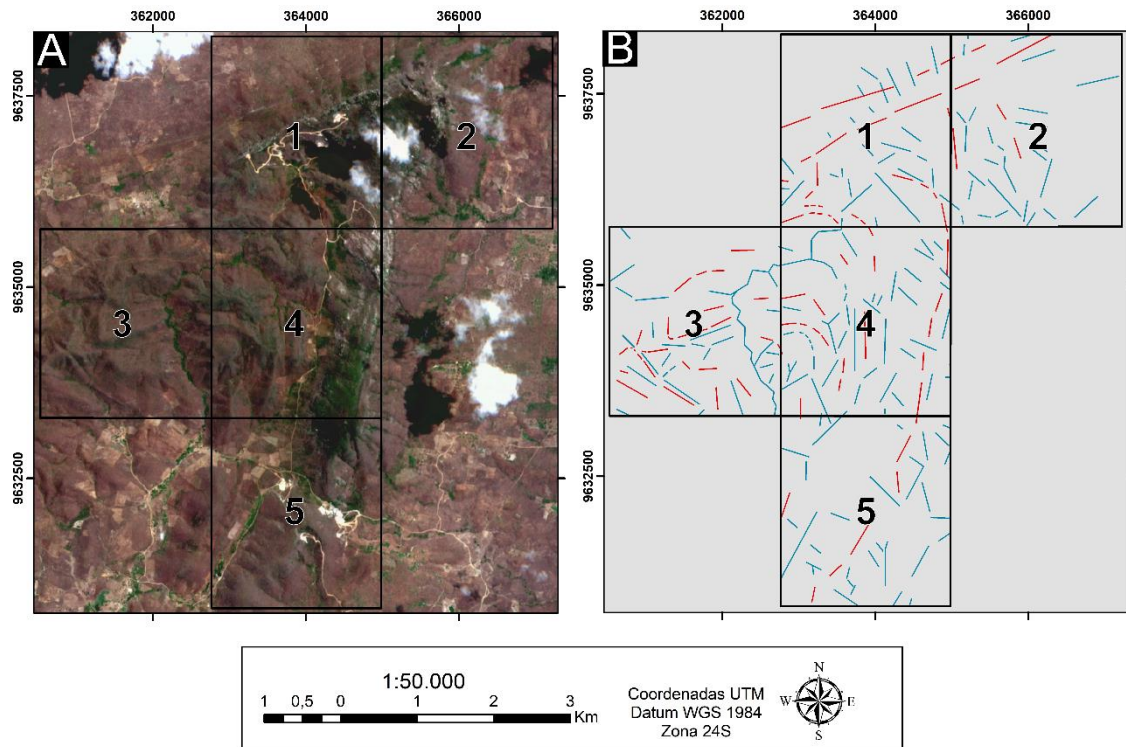
A densidade dos lineamentos foi calculada através do produto do sensor de maior resolução espacial. As cinco áreas foram definidas por conterem as minas onde o quartzito está sendo explorado e afloramentos potenciais para extração do quartzito (Figura 24).

Os resultados das densidades dos lineamentos foram expressos na tabela 4. Das cinco áreas analisadas, foi identificado que a área 04 é a que possui maior densidade de lineamentos, seguido da área 03. Identificou-se que as áreas 04 e 03 foram as mais afetadas pela deformação rúptil. Segundo esse parâmetro essas duas áreas são as menos indicadas para exploração, por conterem maior probabilidade de apresentar as fraturas mais persistentes, tornando muito baixa a recuperação da lavra.

Na área 01 é onde a maioria das frentes de lavra estão concentradas, possui uma densidade de lineamentos moderada, porém está muito afetada por deformações rúpteis e rúptil-dúctil, estando próximo a uma zona de cisalhamento. A área 05 possui uma baixa densidade lineamentos e está pouco afetada pela deformação rúptil, tornando a área, segundo este parâmetro, uma boa opção para explorações. A área 02 é a que possui a menor densidade de lineamentos, sendo a menos afetada pelas deformações, segundo este parâmetro, é a área mais propícia para futuras explorações.



Figura 24: Imagem Sentinel-2, com composição de cor verdadeira RGB 432, mostrando a divisão das cinco áreas e mapa com os lineamentos extraídos para cada área.



Fonte: autor.

Tabela 4: Tabela contendo a somatória dos comprimentos dos lineamentos, a área em km<sup>2</sup> e a densidade.

ÁREA	$\Sigma L$ (km)	A (km <sup>2</sup> )	$\rho$ (km/km <sup>2</sup> )
01	19,910	5,553	3.560
02	13,711	5,627	2.436
03	22,968	5,533	4.151
04	24,888	5,491	4.532
05	16,082	5,514	2.916
Total	97,559	27,720	

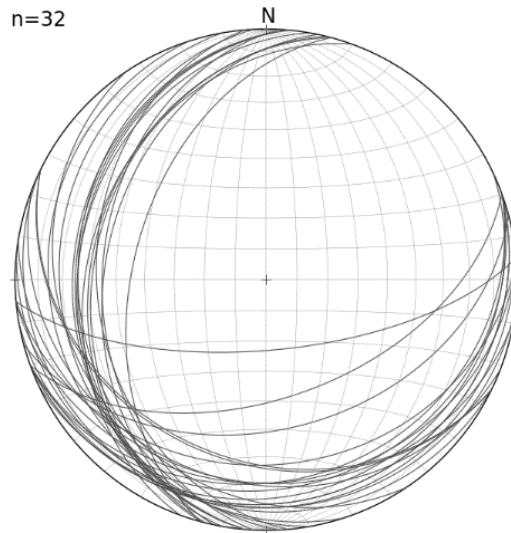
Fonte: autor.

### 4.3.3 Foliação Sn

Apesar do alto grau de deformação, os planos da foliação nem sempre estão bem distintos, principalmente no Membro Mato Verde, por ser mais puro.

A maior parte das cristas presentes na área representam traços em superfície de uma foliação ( $S_n$ ). Foram obtidas 36 medidas de foliação, com direção preferencial NE-SW e com mergulhos suaves a moderados, tanto para SE como para NW (Figura 25).

Figura 25: Projeção ciclográfica dos planos da foliação  $S_n$ .

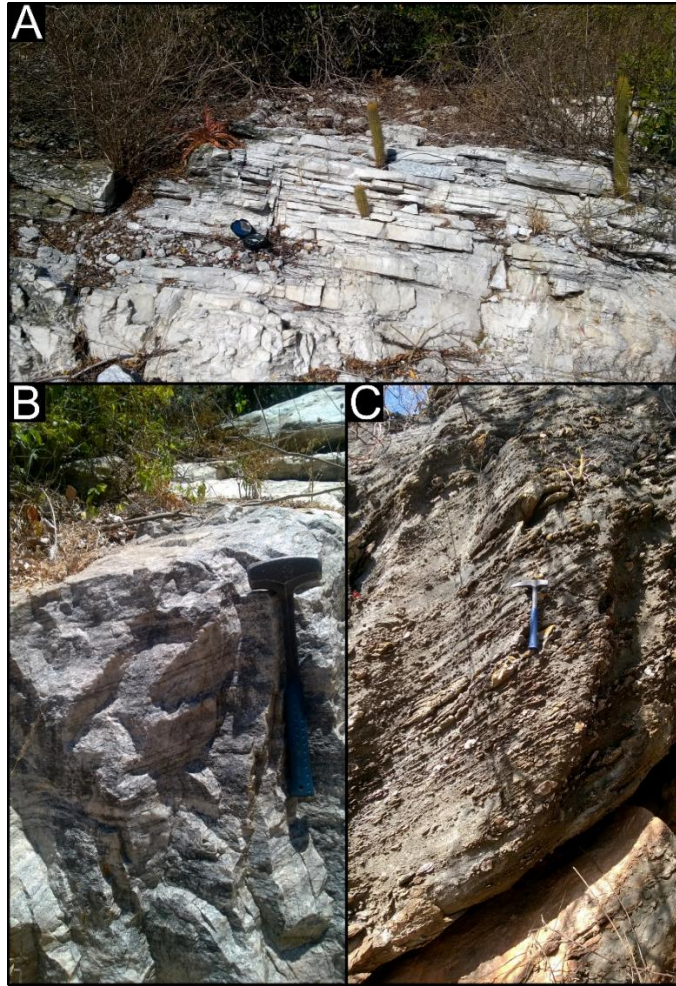


Fonte: autor.

A foliação é do tipo secundária e caracteriza-se por um bandamento tectônico. Apresenta-se sob forma de descontinuidades (bandas), paralelas e contínuas.

No Membro Mato Verde a foliação forma estruturas planares penetrativas no quartzito (Figura 26A). No Membro Morro do Cascudo a foliação no quartzito é caracterizada por um bandamento tectônico, em que as bandas máficas são representadas principalmente por opacos e as bandas félsicas por quartzo (Figura 26B). Na rocha calcissilicática a foliação é marcada por intercalações de biotita-xisto com padrões ora planares, ora sinuosos (Figura 26C). Os padrões sinuosos modelam dobras parasitas fechadas, inclinadas e assimétricas nas rochas calcissilicáticas (Figura 27). Essa foliação é a evidência do estágio deformacional mais penetrativo da área, nomeado de evento D2 segundo Santos (1999) ou fase Dn por Oliveira (1987).

Figura 26: Foliação nos diferentes litotipos: A) descontinuidades no quartzito puro do Membro Mato Verde; B) bandamento no quartzito impuro do Membro Morro do Cascudo; C) intercalações de biotita-xisto em rocha calcissilicática.



Fonte: autor.

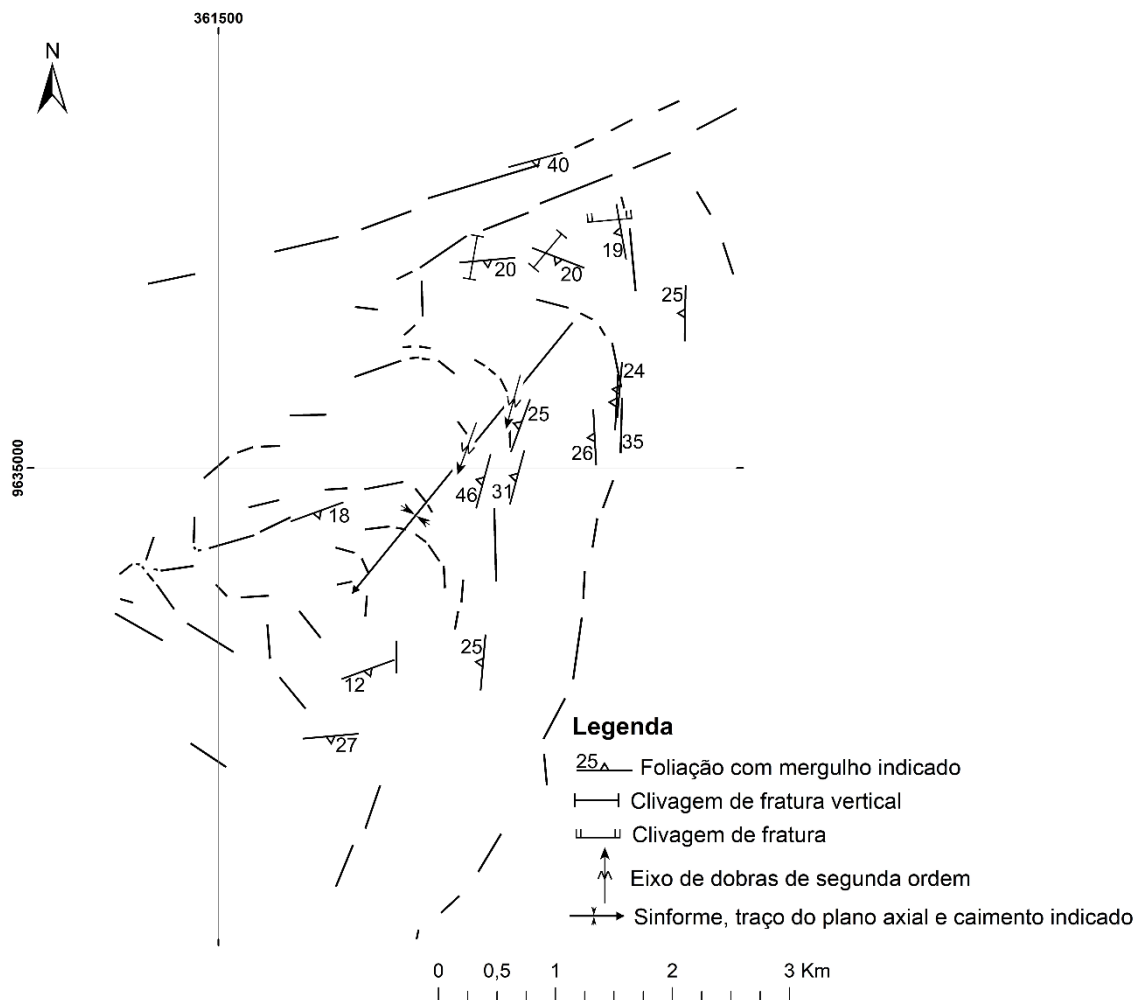
Figura 27: Dobra de segunda ordem em rocha calcissilicática do Membro Morro do Cascudo



Fonte: autor.

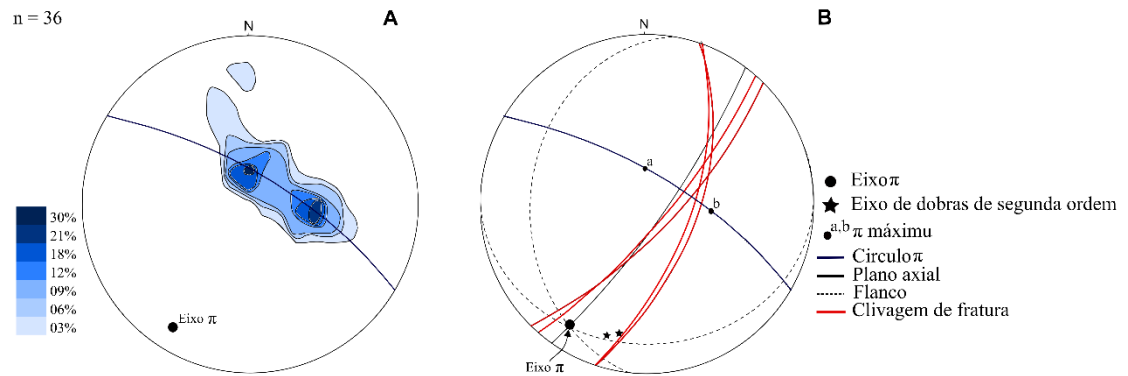
As cristas associadas a foliação demarcam flancos e charneira de uma dobra em grande escala, com comprimento de onda de aproximadamente 6 km (Figura 28). Com base na análise da projeção ciclográfica dos planos das foliações foi construído um diagrama  $\pi$  (Figura 29). O ângulo entre os máximos dos polos indicam se tratar de uma dobra fechada. A dobra é um sinforme, converge para baixo, inclinada com caimento do eixo de  $16^\circ$  para SSW. Com a descrição das relações estratigráficas de Torquato & Nogueira Neto (1996), que relata que o Membro Morro do Cascudo é mais jovem que o Membro Mato Verde, e tendo identificado a polaridade normal das camadas (S0), é possível determinar que se trata de uma dobra sinclinal.

Figura 28: Mapa com os lineamentos que perfazem a dobra com indicações de mergulho da foliação, clivagem, dobras de segunda ordem e caimento.



Fonte: autor.

Figura 29: A) Diagrama de contornos mostrando círculo  $\pi$  e eixo  $\pi$ ; B) estereograma mostrando os elementos estruturais vinculados ao dobramento.



Fonte: autor.

#### 4.3.4 Clivagem de fratura $S_{n+1}$

As clivagens de fratura são feições sistematicamente associadas ao dobramento. São marcadas por um conjunto de fraturas com espaçamentos centimétricos sem geração de minerais recristalizados (Figura 30). As clivagens de fraturas se encontram na zona de charneira da dobra de maior escala, numa posição aproximadamente paralela ao plano axial com mergulhos verticais a subverticais (Figura 28).

Figura 30: Clivagem de fraturas subverticias no Membro Mato Verde.



Fonte: autor.

#### 4.3.5 Zona de Cisalhamento Sn+2

As cristas mais a extremo NW da área destacam-se topograficamente, estão alinhadas perfilando uma faixa com direção NE-SW (Figura 28), estas cristas demarcam uma zona de cisalhamento. Com base na versão preliminar da folha Bela Cruz (CPRM, 2017) esse cisalhamento faz parte da zona de cisalhamento de Campanário, representando sua porção mais a norte, a zona é descrita como transcorrente dextral.

Não foi possível estabelecer uma relação temporal entre a clivagem de fratura e a zona de cisalhamento, porém, segundo Santos *et al.* (2004), essa zona de cisalhamento está relacionada com o regime de transcorrência da fase D3.

#### 4.3.6 Fraturas pós Sn +2

A área apresenta-se densamente fraturada, formando várias famílias de juntas, não sendo possível analisar a área como um todo. O estudo do faturamento é realizado na escala de afloramento, na tentativa de se identificar famílias de fraturas mais pertinentes para cada local estudado.

As rochas que compõem a região norte da área estudada (área 1) possuem duas famílias de fraturas bem evidentes, a de maior relevância possui direção NE-SW, são fraturas subverticais com mergulhos para SE e para NW. A segunda família de fratura está na direção NW-SE com mergulhos subverticais na direção SW. Essas fraturas apresentam-se bem fechadas.

No centro norte da área estudada (área 1) a rocha está bastante fraturada com pelo menos duas famílias de fraturas identificáveis. A família de fratura mais persistente encontrasse na direção NW-SE, com mergulhos para NE e para SW, variando entre 84 e 49°. A família com direção N-S apresenta mergulhos subverticais com uma pequena variação para oeste.

Nos afloramentos que ocorrem a NNE da área (área 2) é onde as fraturas estão mais adensadas, com uma grande família na direção E-W com mergulhos verticais e subverticais para norte. Apesar da densidade são fraturas coesas. Na área também ocorre outra família de fraturas na direção NW-SE com mergulhos subverticais para NE e para SW.

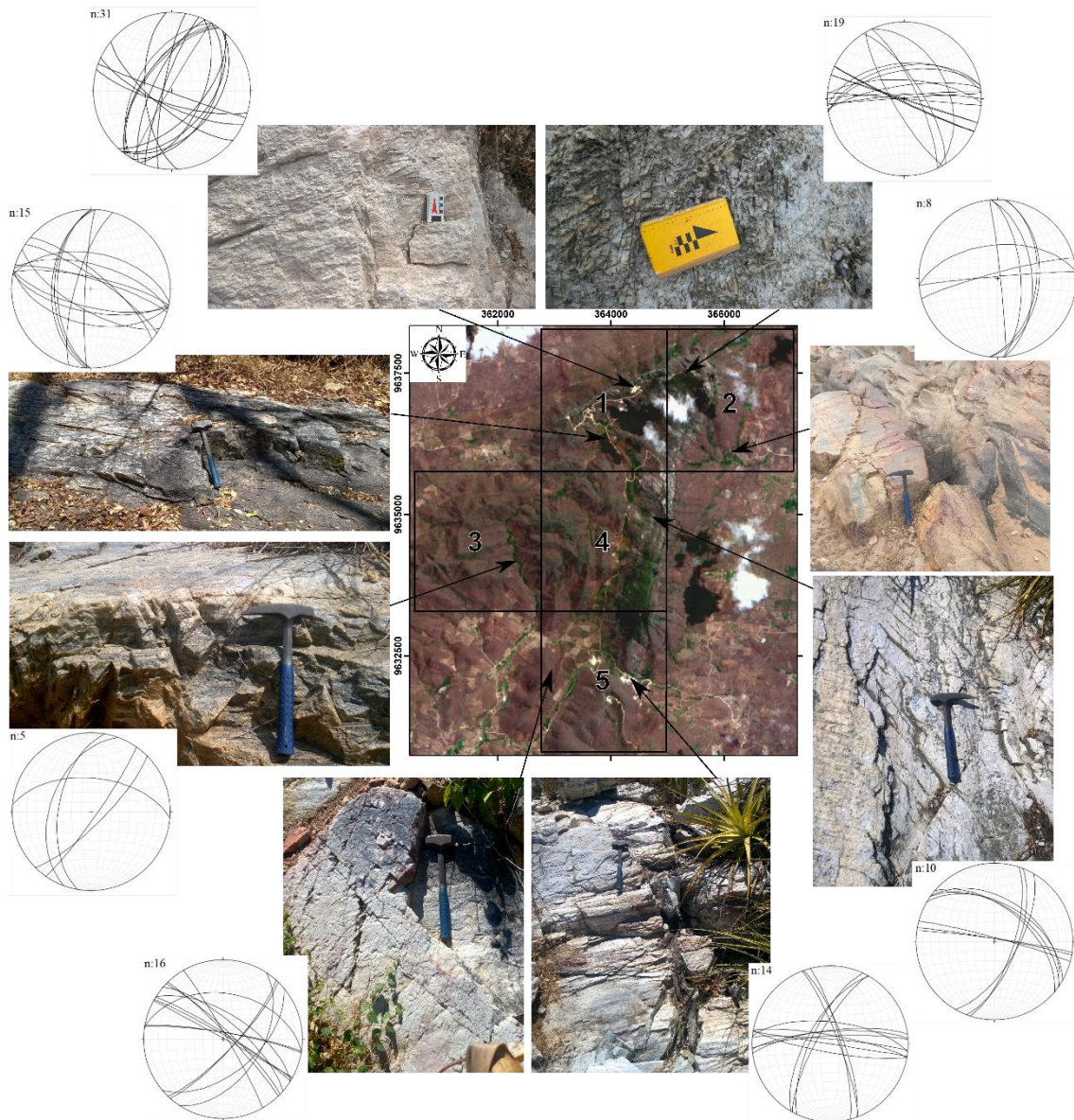
Nos afloramentos a NE da área estudada (área 2) as fraturas apresentam duas direções preferenciais, uma E-W e outra N-S. As fraturas exibem-se fechadas e não preenchidas, as fraturas com direção E-W são subverticais mergulhando para norte e as N-S subverticais com mergulhos para leste.

As fraturas no flanco leste da serra (área 4) possuem três direções preferenciais, a família de fraturas com maior persistência encontrasse na direção NW-SE com mergulhos de aproximadamente 45° para NE. A família de fraturas com direção E-W encontra-se bem verticalizada, a outra família com direções NE-SW tem mergulhos subverticais para SE.

As rochas a sul da serra (área 5) estão bem alteradas e densamente fraturadas, com pelo menos três famílias de fraturas identificáveis. A maioria das fraturas possuem uma direção E-W, com mergulhos verticais e subverticais, tanto para o norte como para sul. Também são encontradas fraturas com direções NW-SE subverticais e NE-SW com mergulhos tanto para NW quanto para SE. As fraturas apresentam-se abertas, tornando a rocha mais quebradiça.

A oeste da serra (área 3) a rocha apresentasse muito alterada, nos afloramentos de rocha não alterada as fraturas possuem uma direção preferencial para NE-SW com mergulhos subverticais, variando para NW e para SE.

Figura 31: Imagem da área estudada indicando os locais onde foram realizados o estudo das fraturas com fotos dos afloramentos e digramas ciclográficos.

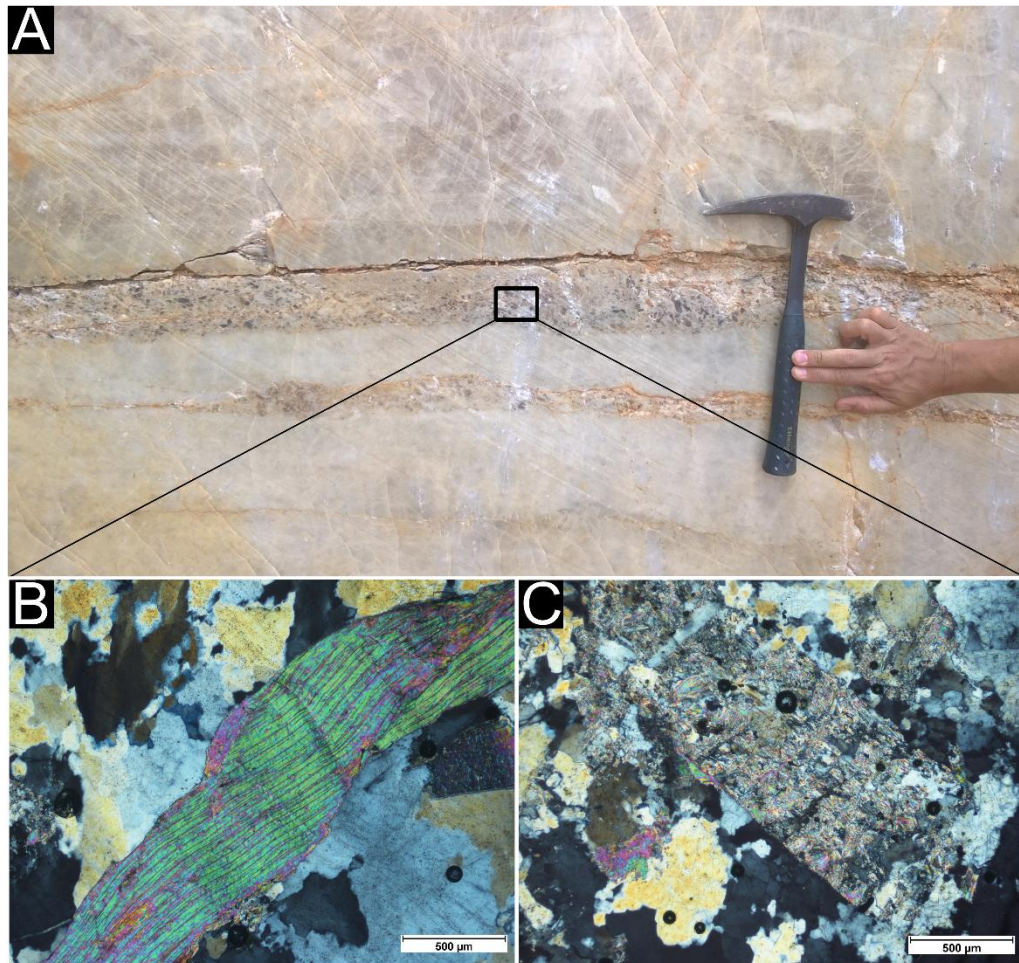


Fonte: autor.

Na região norte da área também foram observadas brechas. Regiões em que se concentraram uma maior quantidade de aluminossilicatos se tornaram pontos de fraqueza no quartzito, que quando submetida a tensões geraram brechas (Figura 32). Em lâmina as brechas apresentam porfiroclastos de muscovita alongados, formando grãos losangulares (*mica fish*). Além das texturas *fish* são observados *kink-bands* em muscovitas (Figura 32 B), essa estrutura ocorre em condições relacionadas a baixa temperatura com ativação do sistema de deslizamento.



Figura 32: A) Brecha de falha no quartzito do Membro Mato Verde; B) *kink-bands* em muscovita; C) alteração de feldspato para sericita.



Fonte: autor.

#### 4.4 Análise Ornamental

Neste item é apresentada a síntese petrográfica dos resultados obtidos no item 5.1 e o resultado da caracterização tecnológica. Esse estudo é realizado com o objetivo de analisar as respostas tecnológicas da rocha comparando com suas características petrográficas.

##### 4.4.1 Síntese da Petrografia

Neste item são descritas as principais características petrográficas que influenciam diretamente na resistência da rocha, e na sua qualidade para uso ornamental. Tais como: composição mineralógica, textura, granulometria, grau de microfissuramento, tipos de contato e alterações. Esses dados são utilizados para entender o comportamento físico-mecânico da

rocha e prever mudanças nas suas propriedades diante das variações das condições climáticas e antrópicas ao longo do tempo de uso da rocha. Os resultados obtidos estão expressos na tabela 5.

Tabela 5: Síntese das características petrográficas da rocha estudada.

<b>Características Petrográficas</b>		<b>Rocha Estudada</b>	
		Perla Santana	
<b>Mineralogia</b>	Quartzo	94%	
	Muscovita	2%	
	Sericita	2%	
	Zircão	1%	
	Rutilo	0,5%	
	Opacos	0,5%	
<b>Coloração</b>		Branca	
<b>Estrutura</b>		Isotrópica	
<b>Textura</b>		Granoblástica	
<b>Granulação</b>		fina a média	
		0,5mm-1,5mm	
<b>Grau de Microfissuramento</b>		alto	
<b>Tipos de Microfissura</b>	Intragãos Preenchidas	microfissuras/mm <sup>2</sup>	0,49
		%	8,3
	Intragrão não Preenchida	microfissuras/mm <sup>2</sup>	2,75
		%	46,4
	Intergrãos Preenchida	microfissuras/mm <sup>2</sup>	1,75
		%	29,5
	Intergrão não Preenchida	microfissuras/mm <sup>2</sup>	0,94
		%	15,8
<b>Tipos de Contatos</b>	Côncavo-convexo		66,0 %
	Serrilhado		06,0 %
	Plano		27,9 %
<b>Alteração Mineral</b>	Sericitização		-
	Alteração de opacos		-
<b>Classificação da Rocha</b>	Sericita muscovita quartzito		

Fonte: autor.

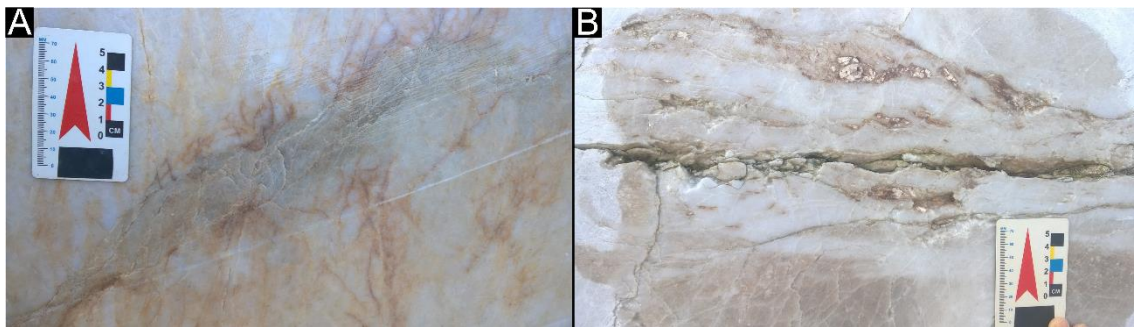
A rocha apresenta-se com um alto grau de microfissuramento, com uma maior porcentagem de microfissuras intragrão não preenchida. Os contatos são predominantemente côncavo-convexo e planos. Os poucos contatos serrilhados são de minerais de sericita e muscovita.

As alterações são observáveis macroscopicamente, a alteração de opacos consiste no desenvolvimento de hidratos de ferro de cor vermelha viva e tons alaranjados, que se espalham na rocha formando manchas (Figura 33A, 34). Outra alteração que ocorre nas rochas do Membro Mato Verde é a sericitização e caulínização, são alterações muito comuns em feldspatos, que consiste na cristalização de lamelas submilimétricas de mica branca (sericita) e

formação de argilominerais (caulinita) por processos intempéricos. Ambas as alterações se concentram nas fraturas (Figura 33B, 35).

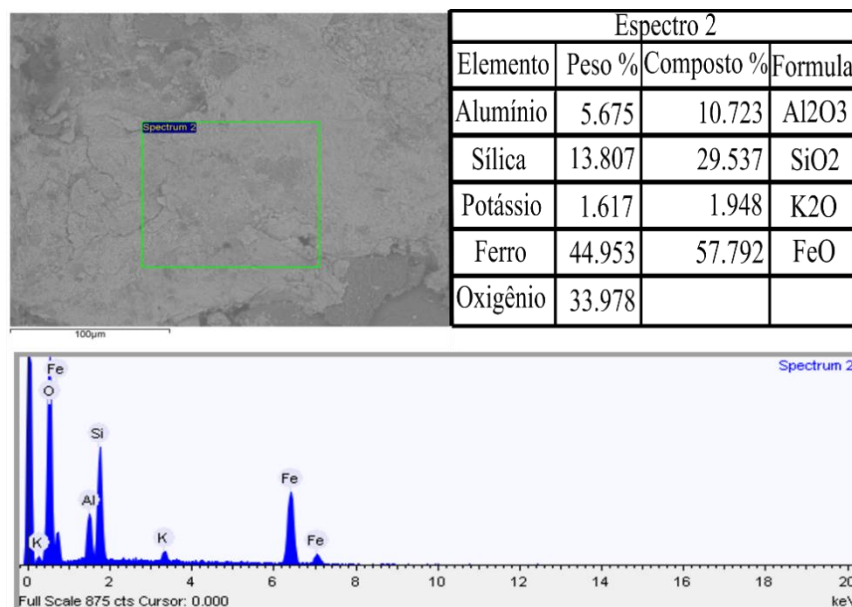
As alterações por ferro causam manchas avermelhadas no quartzito, o que baixa muito o seu valor comercial como rocha ornamental. A presença de aluminossilicatos, como os filossilicatos (muscovita e caulinita), preenchendo as fraturas gera uma abertura maior da fratura, causa um dano maior a rocha, tornando-a mais suscetível a quebra durante os processos de exploração. Tais aluminossilicatos que preenchem algumas fraturas no quartzito foram analisados através de difração de raios X e são formados por muscovita e caulinita (figura 35).

Figura 33: A) Alteração férrica de cor vermelho alaranjado em fraturas; B) caulinitação de aluminossilicatos em fraturas.



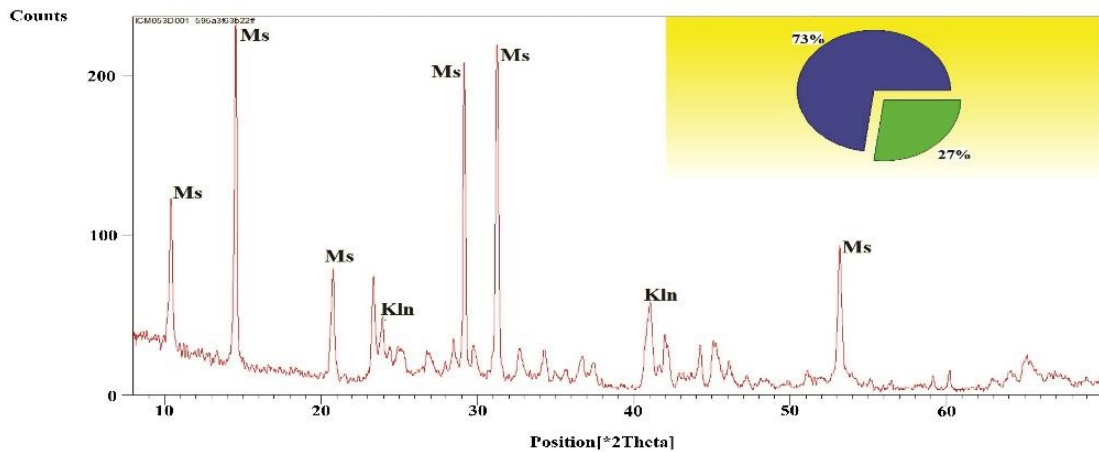
Fonte: autor.

Figura 34: Análise MEV/EDS realizada em alterações de cor avermelhada, mostrando uma composição de 57% de óxido de ferro.



Fonte: autor

Figura 35: DRX realizado em amostra retirada de fratura, mostrando uma composição de 73% de muscovita e 27% de caulinita.



Fonte: autor.

A ABNT não possui valores de referência que especifiquem as características físicas e mecânicas para quartzitos destinados a revestimento de edificações e uso ornamental, sendo utilizado a NBR 15.844 (ABNT, 2015), valores de referência para granitos.

A *American Society for Testing and Materials* (ASTM), órgão internacional de normatização, possui valores de referência específicos para quartzitos, a C616 (ASTM, 2008), porém alguns testes diferem da normativa brasileira, sendo utilizada somente as referências de densidade, absorção de água, compressão uniaxial e módulo de ruptura.

#### 4.4.2 Índices Físicos

Estes ensaios possibilitam a determinação da densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água. Os valores de porosidade representam o volume de espaços “vazios” de um litotipo, enquanto a absorção de água corresponde à sua capacidade para absorver e reter a água em seus poros e descontinuidades. Na tabela 6 encontram-se os resultados obtidos para os índices físicos pela norma NBR 15.845-2 (ABNT, 2015).

Tabela 6: Resultados dos Índices Físicos para o quartzito Perla Santana.

Ensaio Tecnológico			Rocha Estudada	Valores Limítrofes	
			Perla Santana	C616 (ASTM 2015)	NBR 15.845-2 (ABNT 2015)
Índices físicos	Densidade Aparente	(kg/m <sup>3</sup> )	2616	Mínimo 2560	Mínimo 2560
		Desvio Padrão	4,98	-	-
	Porosidade Aparente	%	1,14	-	Máximo 1
		Desvio Padrão	0,11	-	-
	Absorção de Água	%	0,43	Máximo 1	Máximo 0,4
		Desvio Padrão	0,04	-	-

Fonte: NUTEC.

O resultado da densidade da rocha é similar à do quartzo (2650 kg/m<sup>3</sup>), refletindo a natureza da sua composição mineralógica de mais de 95% de quartzo, este parâmetro é utilizado para o cálculo de cargas em construções, o dimensionamento de embalagens e os custos relacionados ao transporte. O valor da densidade é superior ao limite, indicando que a rocha está suficientemente coesa.

A ASTM não possui valores de referência para a porosidade de quartzitos, comparando com os valores de referência para granitos da ABNT, a rocha apresenta porosidade aparente pouco acima da referência. Pelo motivo do alto número de microfissuras intragrão não preenchidas.

A rocha apresenta absorção de água dentro dos valores de referência estabelecidos pela norma C616 (ASTM, 2015). Apesar do elevado grau de microfissuras, os valores se mostraram positivos, devido à baixa conectividade entre as fraturas. A maioria das microfissuras intergrão são preenchidas, com 15,8% das microfissuras do tipo intergrão não preenchidas.

#### 4.4.3 Compressão Uniaxial e Determinação da Resistência a Flexão

Na tabela 7 encontra-se os resultados para as análises de resistência a compressão uniaxial, pela norma e NBR 15.845-5 (ABNT, 2015), e resistência à flexão, segundo a norma 15845-6 (ABNT, 2015). O teste de compressão uniaxial tem a finalidade de avaliar a resistência da rocha quando utilizada como elemento estrutural e obter um parâmetro indicativo de sua integridade física. Já o teste de resistência a flexão é utilizado para a determinar qual a tensão mínima, ou qual a flexão máxima, que provoca a ruptura de uma placa de rocha.

Tabela 7: Resultados para o ensaio de resistência à compressão uniaxial e resistência à flexão.

Ensaio Tecnológico		Rocha Estudada Perla Santana	Valores Limítrofes	
			C616 (ASTM, 2015)	NBR 15.844 (ABNT, 2015)
Resistência à Compressão Uniaxial (condição seca)	MPa	48,4	Min. 137,9	Min. 100
	Desvio Padrão	2,53	-	-
Resistência a Flexão (Condição Seca)	MPa	10,8	Min. 13,9	Min. 10
	Desvio Padrão	2,8	-	-

Fonte: NUTEC.

Os resultados dos ensaios da determinação a compressão uniaxial se mostram muito a baixo dos valores da normativa. Isso se deve ao alto grau de faturamento da rocha. Esse faturamento pode ser observado nas diferentes escalas de estudo, a densidade de lineamentos apresentada pelas imagens de satélites, as diferentes direções de faturamento, com uma variedade de direções e intensidade de mergulho e o microfissuramento mineral. Todas essas discontinuidades sob um campo de tensão, tornam-se pontos de fraqueza sujeitos a ruptura.

O resultado obtido para o teste de resistência a flexão está abaixo do valor de referência da ASTM para quartzitos com  $\geq 95\%$  de quartzo, porém na norma da ABNT os valores são considerados satisfatórios. Estes dados são compatíveis com os resultados dos índices físicos, apesar das fraturas supracitadas, a rocha apresenta-se suficientemente coesa, estando esta característica diretamente relacionada ao contato entre grãos predominantemente côncavo convexo.

#### 4.4.4 Desgaste Abrasivo Amsler e Ataque Químico

O ensaio foi realizado de acordo com a norma da NBR 12.042 (ABNT, 2012) na condição seca, e como parâmetro foi utilizada a norma NBR 15.844 (ABNT, 2015). Os resultados obtidos neste ensaio são apresentados na Tabela 8. O ataque químico foi realizado de acordo com a norma NBR 13.818 (ABNT, 1997), os resultados estão expressos na tabela 9.

Tabela 8: Resultados do ensaio de Desgaste Abrasivo Amsler para o quartzito Perla Santana.

Ensaio Tecnológico		Rocha Estudada Perla Santana	Valores Limítrofes ABNT NBR 15.844- 2015
Desgaste Abrasivo Amsler	500 m	0,26 mm	-
	1000 m	0,60 mm	Máx. 1,0 mm

Fonte: NUTEC.

Tabela 9: Resultados do ensaio de resistência ao ataque químico.

<b>Reagente Utilizado</b>	<b>Tempo de Aplicação</b>	<b>Resultado (observação macroscópica da área ensaiada)</b>
<b>Cloreto de Amônia ( 100g/L)</b>	24 h	Não se verificou alteração visual na área de contato
<b>Hipoclorito de Sódio (20g/L)</b>		Não se verificou alteração visual na área de contato
<b>Ácido Cítrico (100 g/L)</b>		Não se verificou alteração visual na área de contato
<b>Ácido Láctico (5%)</b>		Não se verificou alteração visual na área de contato
<b>Ácido Acético (3%)</b>		Não se verificou alteração visual na área de contato
<b>Ácido Clorídrico (3%)</b>	96 h	Não se verificou alteração visual na área de contato
<b>Ácido Clorídrico (18%)</b>		Não se verificou alteração visual na área de contato
<b>Hidróxido de Potássio (30 g/L)</b>		Não se verificou alteração visual na área de contato
<b>Hidróxido de Potássio (100 g/L)</b>		Não se verificou alteração visual na área de contato

Fonte: IPT.

Os valores de desgaste do quartzito Perla Santana encontram-se muito abaixo dos valores da normativa, tendo um desgaste mínimo comparado com outras litologias. Ao ser comparado com os resultados das rochas pegmatíticas (Leal Neto, A. 2017), ou até mesmo rochas graníticas (Marques, 2013) o quartzito mostra valores de desgastes bem inferiores (Tabela 11). A alta resistência do Perla Santana a abrasão revela a relação intrínseca entre a composição mineralógica, rica em quartzo, e sua resistência a abrasão.

Tabela 10: Comparação dos resultados do desgaste de Amsler de outras litologias com o quartzito estudado.

<b>Rocha</b>	<b>Quartzito Perla Santana</b>	<b>Granitos de Banabuiú (Marques, 2013)</b>	<b>Pegmatitos Branco, Capuccino e Golden (Leal Neto, A. 2017)</b>
<b>Desgaste Abrasivo Amsler 1000m</b>	0,60mm	Entre 0,81 e 1,24mm	Entre 0,83 e 0,96mm

Fonte: autor.

Verifica-se que o Perla Santana é resistente ao ataque das soluções químicas. Isso é reflexo da sua mineralogia rica em quartzo, que possui uma grande resistência química, mediante à ação das substâncias utilizadas. À temperatura ambiente, ele é atacado somente pelo ácido fluorídrico.

Diante da análise dos resultados obtidos pode-se afirmar que a composição mineralógica constitui fator importante na determinação dos valores de resistência abrasiva e química de uma rocha.

#### **4.4.5 Aplicações**

Em função dos resultados da resistência à compressão uniaxial da rocha, não é recomendado o uso da rocha como elementos de sustentação, como colunas, pilares ou pisos suspensos, sendo esta a única restrição da rocha com relação a sua aplicação.

Com base nos resultados obtidos no desgaste de Amsler, é possível afirmar que a rocha possui uma alta resistência a abrasão, essa propriedade permite a sua aplicação como piso em áreas com grande fluxo, tais como shoppings e aeroportos.

A rocha apresenta-se inalterada a ataques de agentes químicos, permitindo o uso em ambientes agressivos, como em áreas urbanas afetadas por diversas fontes de poluição ambiental, mas também, em ambientes domésticos, onde são utilizados produtos químicos de limpeza, frutas cítricas, vinagres, refrigerantes, entre outros.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Os estudos realizados utilizando imagens SRTM, passando para imagens de satélites de maior resolução, estudos em escala de afloramento, estudos de corpo de prova e estudo microscópico, comprovou a eficiência da metodologia de análise multiescala, para o entendimento do comportamento estrutural frágil do quartzito. A integração de imagens de sistemas orbitais e a correlação com dados coletados em escala de afloramento permitiu indicar áreas com a maior probabilidade de êxito nas operações de lavra. Portanto, a metodologia utilizada no presente trabalho é indicada como ferramenta para futuras investigações para abertura de novas frentes de lavra.

Os estudos podem ser complementados com o uso da geofísica, utilizando métodos de investigação de subsuperfície, tais como imageamento elétrico, detectando áreas mais fraturadas pela diferença de eletrorresistividade.

Conclui-se que a rocha possui os requisitos necessários para uso ornamental, tendo como ponto forte sua alta resistência, podendo ser utilizada em ambientes agressivos. A resposta do quartzito Perla Santana aos ensaios relativos aos índices físicos mostra um comportamento coerente e refletem a influência direta das suas características petrográficas. A rocha estudada apresenta valores elevados de resistência a abrasão e resistência a ataque químico, podendo ser usada nos mais diversos ambientes. Apenas não sendo recomendado o uso como elemento de sustentação.



Com relação a exploração, das cinco áreas divididas da área total as áreas 03 e 04 são as menos indicadas para exploração. Devido a dois fatores principais. O primeiro fator é a ocorrência do Membro Morro do Cascudo. Os quartzitos que pertencem a esse membro são impuros (84% de quartzo). A maior quantidade de minerais acessórios, principalmente opacos, torna a rocha mais escura e mais susceptível a alterações, sobretudo de ferro, que se espalham na rocha formando manchas avermelhadas. Esses fatores desvalorizam o valor comercial tornando sua exploração não rentável. O segundo fator é a densidade das estruturas rúpteis. Essas áreas foram as que apresentaram as maiores densidades de lineamentos. A maioria desses lineamentos estão ligadas a fraturas, que ocorrem em três direções preferenciais, fraturas com direção NE-SW e fraturas com direção variando de E-W até NW-SE, formando um “leque” de fraturas. As fraturas com direções NW-SE e NE-SW apresentam-se pouco coesas, um agravante que facilita a quebra da rocha nos processos de exploração.

A área 01 é onde se concentram a maioria das frentes de lavra em operação. Essa área apesar de ter uma densidade moderada de lineamentos, comparado com as demais áreas, é onde as rochas do Membro Mato Verde ocorrem em maior volume.

A área 05 possui uma baixa densidade de lineamento, comparando com as outras áreas supracitadas. Porém a rocha apresenta-se bem alterada, com poucos afloramentos de rocha menos alterada, se fazendo necessário furos de sondagem para saber o comportamento da rocha em subsuperfície.

A área 02 é a melhor área para a exploração do quartzito, apresenta a menor densidade de lineamentos e onde o quartzito apresenta-se mais puro e em maior volume. Na área as fraturas apresentam três direções preferenciais, as fraturas que possuem uma maior densidade estão na direção E-W, porém são fraturas fechadas, não preenchidas e bem coesas. As fraturas que se apresentam menos coesas são as com direcionamento N-S. Nas operações de avanço das frentes de lavra, é recomendado o descarte das zonas com maior quantidade de fraturas abertas, caso não seja possível, recomenda-se orientar os cortes em concordância com fraturas abertas (N-S). Outro fator determinante é a ocorrência do Membro Mato Verde, por ser o quartzito mais puro, apresenta uma menor variação de tonalidades, sendo predominantemente branco, dando um padrão a rocha, o que eleve seu valor, tornando-a explorável.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15.845/2**: Rochas para Revestimento: Determinação da Densidade Aparente, da Porosidade Aparente e da Absorção de Água. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15.845/5**: Rochas para Revestimento: Determinação da Resistência à Compressão Uniaxial. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15.845/6**: Rochas para Revestimento: Determinação do Módulo de Ruptura (flexão por carregamento em três pontos). Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12.042**: Rocha para Revestimento: Desgaste Abrasivo Amsler. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13.818**: Placas Cerâmicas para Revestimento: Especificação e Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- ALMEIDA F. F. M.; HASUI Y.; BRITO NEVES B. B.; FUCK R. A. Províncias Estruturais Brasileiras. *In*: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 8., 1977, Campina Grande. **Anais** [...] Campina Grande: SBG, 1977. p. 363-391.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM Norma C616**: Standard Specification for Quartz-Based Dimension Stone. West Conshohocken: ASTM, 2008.
- BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H. **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil**. Brasília: Serviço Geológico do Brasil. 2003. 692 p.
- BRITO NEVES, B.B. **Regionalização geotectônica do Pré-cambriano Nordeste**. 1975. 198 p. Tese (Doutorado em Paleontologia e Estratigrafia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1975.
- BRITO NEVES, B.B.; CORDANI, U.G. Tectonic Evolution of South America during the Late Proterozoic. Elsevier: **Precambrian Research**, Amsterdã, v. 53, n. 1-2, p. 23-40. 1991.
- COSTA, M. J.; FRANÇA, J. B.; BACCIEGGA, I. F.; HABEKOST, C. R.; CRUZ, W. B. **Geologia da Bacia Jaibaras**: Ceará, Piauí e Maranhão. Projeto Jaibaras. Recife: DNPM/CPRM. 1973. 106 p.
- GORAYEB P.S.S, BARBOSA R.C.O., MOURA C.A.V., LEMOS R.L. 2011. Petrografia, geocronologia e significado tectônico do Nefelina Sienito Brejinho: extremo noroeste da Província Borborema. **Revista Brasileira de Geologia**, 41:390-407

JUSTO A. P. **Sistemas Orbitais e Aéreos Aplicados à Análise Multiescala de Lineamentos na Borda Sudeste da Bacia do Parnaíba**. 2006. 115 p. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica) - Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

NASCIMENTO, D.A. & GAVA, A. Novas considerações sobre a estratigrafia da Bacia do Jaibaras. *In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE*, 9., 1979, Natal. **Anais [...]** Natal: SBG, 1979. p. 14-29.

NASCIMENTO, D. M. **Caracterização tecnológica de um ultramilonito da região de Marco-CE**. 2014. 95 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Fortaleza-CE, 2014.

NETO A. L. **Caracterização Tecnológica de Rochas Ornamentais Pegmatíticas do Seridó Oriental Paraibano - Pedra Lavrada/PB**. 2017. 202 p. Tese (Doutorado em Geologia) - Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

NOGUEIRA NETO, J. A. **Evolução Geodinâmica das Faixas Granulíticas de Granja e Cariré, Extremo Noroeste da Província Borborema**. 2000. 239p. Tese (Doutorado em Geologia Regional) - Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2000.

MARQUES J. G. **Caracterização Geológica e Tecnológica de Granitoides do Ceará**. 2014. 119 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro, Portugal, 2017.

OLIVEIRA, D.C. **Contribuição ao estudo da geologia do noroeste do Ceará. Mapeamento geológico de uma área ao sul de Granja**. 1987. 232 p. Monografia (Graduação em Geologia) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 1987

PRADO F. S.; MENDONÇA J. C. G.; MORAIS J. B. A.; MEDEIROS M. F.; ASSUNÇÃO P. R. S.; ANDRADE V. A.; MEDEIROS R. P. **Projeto Martinópole: Relatório Final**. Recife, v. 1, n. 9, 160 p., 1979.

SABINS F. F. **Remote Sensing: Principles and interpretation**. 3. ed. Illinois: Waveland Press, Inc., 2007. 485 p.

SANTOS, T. J. S. **Aspectos Geológicos de uma Área a Sudoeste de Granja. Região Noroeste do Ceará**. 1993. 159 p. Dissertação (Mestrado em Geologia Regional) - Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1993.

SANTOS, T. J. S. **Evolução Tectônica e Geocronológica do Extremo Noroeste da Província Borborema**. 1999. 186p. Tese (Doutorado em Geologia Regional) - Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1999.

SANTOS, T. J. S.; NOGUEIRA NETO, J. A.; FETTER, A. F. Petrografia e litogeoquímica das rochas do embasamento cristalino da região de Granja – CE. **Revista de Geologia**, Fortaleza, v.14, n.1, p. 33-48, 2001.

SANTOS, T.J.S.; FETTER, A. H.; HACKSPACHER, P. C.; VAN SCHMUS W. R.; NOGUEIRA NETO, J. A. Neoproterozoic tectonic and magmatic episodes in the NW sector of Borborema Province, NE Brazil, during assembly of Western Gondwana. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 25, n. 3, p. 271-284, 2008.

SANTOS, T.J.S.; FETTER, A. H.; HACKSPACHER, P. C.; VAN SCHMUS W. R.; NOGUEIRA NETO, J. A. Structural and geochronological studies of the Médio Coreaú Domain, NE Brazil: Constraints on Brasiliano/Pan-African tectonic evolution in the NW part of the Borborema Province. **Journal of the Virtual Explorer**, v. 17, 9 p, 2004.

SIAL, A. N.; LONG, L. E.; FIGUEIREDO, M. H. Rare Earth element geochemistry of the Meruoca and Mucambo plutons, Ceará, Northeast Brazil. Elsevier: **Chemical Geology**, Amsterdã, v. 31, p. 271–283, 1981.

SILVA V. F. **Proveniência das Rochas Metassedimentares da Sequência Supracrustal Martinópolis – Uma Abordagem Isotópica Sm-Nd – Nw do Ceará**. 2004. 81 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

TORQUATO, J. R.; NOGUEIRA NETO, J. A. Historiografia da Região de Dobramentos do Médio Coreaú. **Revista Brasileira de Geociências**, v26, n.4, p. 303-314, 1996.

TORQUATO, J.R.; PEDREIRA, L.H.S.T.; NOGUEIRA NETO, J. A. **Projeto Granja: Geologia local**. Relatório final. 1987. Processo 408206/84-GL, CNPq, Mimeografado. 81 p.

VIDAL, F. W. H., AZEVEDO, H. C. A., CASTRO, N. F. **Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013. 700p.

WINGE, H. Breves notas sobre a geologia do Nordeste do Ceará. 1967. **Boletim de Estudos**, Recife, n. 3, p. 13-18, 1967.