



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

CASSIANO DIAS DE SOUZA

**CARACTERIZAÇÃO ESPECTRORRADIOMÉTRICA DO MINÉRIO
MAGNESÍTICO DA PORÇÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DO CEARÁ**

FORTALEZA

2020

CASSIANO DIAS DE SOUZA

CARACTERIZAÇÃO ESPECTRORRADIOMÉTRIA DO MINÉRIO MAGNESÍTICO DA
PORÇÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DO CEARÁ

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

Orientadora: Prof^a. Dra. Cynthia Romariz Duarte.

Coorientador: Prof. Dr. Daniel Dantas Moreira Gomes.

FORTALEZA

2020

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)

- S237c Souza, Cassiano Dias de.
Caracterização espectrorradiométrica do minério magnésítico da porção centro-sul do estado do Ceará /
Cassiano Dias de Souza. – 2020.
99 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação
em Geologia, Fortaleza, 2020.
Orientação: Prof. Dr. Cynthia Romariz Duarte.
Coorientação: Prof. Dr. Daniel Dantas Moreira Gomes.
1. Espectrorradiometria. 2. Magnesita. 3. Sensoriamento Remoto. I. Título.

CDD 551

CASSIANO DIAS DE SOUZA

CARACTERIZAÇÃO ESPECTRORRADIOMÉTRICA DO MINÉRIO MAGNESÍTICO DA
PORÇÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DO CEARÁ

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

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dra. Cynthia Romariz Duarte
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Michael Vandesteem Silva Souto
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

Prof^ª. Dra. Tati de Almeida
Universidade de Brasília (UnB)

AGRADECIMENTOS

A orientadora Prof^a. Dra. Cynthia Romariz Duarte pela motivação, apoio e orientação desde o começo da minha jornada acadêmica.

À Magnesium do Brasil S/A e IBAR por permitirem a coleta do material utilizado neste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Geologia da UFC que contribuíram para a minha formação.

Ao pessoal do Laboratório de Geoprocessamento do Departamento de Engenharia Agrícola da UFC, em especial o Prof. Dr. Adunias dos Santos Teixeira e o MSc. Marcio Regys Rabelo de Oliveira, por disponibilizarem o espectrorradiômetro utilizado e pelo auxílio na aquisição dos dados espectrorradiométricos.

Ao Laboratório de Microscopia Eletrônica e ao LAMIN, em especial ao Dr. Antonio Leal Neto e MSc. Joel Pedrosa Souza, pela disponibilização dos equipamentos e pela confecção das lâminas petrográficas utilizadas.

Ao Laboratório de Geoprocessamento do Ceará (GEOCE), o qual sempre me acolheu e disponibilizou os equipamentos e meios necessários para minha pesquisa.

Aos amigos e colegas de curso e laboratório, os quais compartilharam de vários momentos da minha graduação e pós-graduação, que me presentearam com sua amizade e tornaram o decorrer dos anos mais felizes.

A toda minha família, que sempre me apoiou e incentivou em todas as etapas da minha vida, em especial aos meus pais, Ivan e Rosinere, e a minha madrinha, que é minha segunda mãe, Cristina Isabel, que sempre me aconselharam e contribuíram para o meu crescimento.

A CAPES, pela concessão da bolsa de pesquisa que permitiu a realização do trabalho.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo a caracterização espectrorradiométrica do minério magnésítico da porção centro-sul do estado do Ceará através de espectrorradiometria de reflectância. As amostras coletadas das minas do Torto, Riacho Fundo e Cabeça de Negro, localizadas entre os municípios de Orós e Jucás, foram cortadas e polidas, a fim de se obter superfícies uniformizadas, e de minimizar o efeito do relevo e de eventuais efeitos intempéricos de superfície. Para a aquisição dos dados, utilizou-se o espectrorradiômetro FieldSpec Pro FR, que coleta dados na faixa entre 350 nm e 2500 nm. O procedimento de coleta foi feito em laboratório, sem qualquer interferência oriunda de iluminação externa. Foram realizadas três medidas em pontos distintos da amostra, cada medida representando a média de 50 espectros coletados. As feições espectrais encontradas estão relacionadas a íons de ferro, aos grupos CO_3^{2-} , H_2O , OH^- e ligação $\text{Mg} - \text{OH}$. Sete dessas feições se destacaram por sua frequência e intensidade, sendo denominadas de Banda 1 a Banda 7. O comportamento espectral nos menores comprimentos de onda está associado aos processos transicionais eletrônicos do ferro, assim como a intensa e larga banda de absorção entre 1000 nm e 1300 nm (Banda 1), e a banda em 1700 nm (Banda 3). Devido as feições espectrais em 1390 nm (Banda 2), 1440 nm e 1940 nm (Banda 5) características, excetuando-se a amostra CN – 05, pôde-se afirmar que há a presença de H_2O inserido como inclusão fluída ou como parte da estrutura cristalina das amostras da mina Cabeça de Negro, com as feições em 950 nm, e em 2070 nm e 2390 nm sendo atribuídas à hidroxila e/ou à ligação $\text{Mg} - \text{OH}$. Nos espectros das amostras das minas do Torto, Riacho Fundo, e da amostra CN – 05 da mina Cabeça de Negro, há somente as feições espectrais relacionadas à hidroxila e à ligação $\text{Mg} - \text{OH}$. As feições espectrais relacionadas aos processos transicionais vibracionais do CO_3^{2-} estão centrados em 1850 nm (Banda 4), 1970 nm (Banda 5), 2130 nm (Banda 6) e 2300 nm (Banda 7). Nos espectros das amostras da mina Cabeça de Negro, com exceção da amostra CN – 05, a feição de absorção da Banda 5 μm encontra-se mascarada e deslocada para 1940 nm devido à absorção do H_2O . A Banda 7 é intensa e bem marcada nas amostras das três minas, por vezes apresentando feição dupla. O albedo dos espectros e a intensidade das feições são influenciadas pela presença de matéria orgânica e pela granulometria. A técnica de remoção do contínuo auxiliou na melhor visualização das feições espectrais, assim como nas características das feições, porém não anula de fato os efeitos da matéria orgânica e/ou granulometria.

Palavras-chave: Espectrorradiometria. Magnesita. Sensoriamento Remoto.

ABSTRACT

This work has as objective the spectroradiometric characterization of magnesitic ore of the south-central portion of the state of Ceará through reflectance spectroradiometry. The samples collected from the mines of Torto, Riacho Fundo and Cabeça de Negro, located between the municipalities of Orós and Jucás, were cut and polished, in order to obtain uniform surfaces, and to minimize the effect of the relief and any weather effects of surface. The data were obtained through the FieldSpec Pro FR 3 which collects data in the range between 350 nm and 2500 nm. The collection procedure was performed in the laboratory, without any interference from external lighting. Three measurements were made in different sample location, each measurement representing the average of 50 spectra collected. The spectral features found are related to iron ions, to the groups CO_3^{2-} , H_2O , OH^- , and $\text{Mg} - \text{OH}$ bond. Seven of these features stood out for their frequency and intensity, being called Band 1 to Band 7. The spectral behavior at the shortest wavelengths is associated with the electronic transitional processes of iron, as well as the intense and wide absorption band between 1000 nm and 1300 nm (Band 1), and the band at 1700 nm (Band 3). Due to the spectral features at 1390 nm (Band 2), 1440 nm and 1940 nm (Band 5) characteristics, except for the CN – 05 sample, it could be said that there is the presence of H_2O inserted as a fluid inclusion or as part of crystalline structure of the samples from the Cabeça de Negro mine, with the features at 950 nm, 2070 nm and 2390 nm being attributed to hydroxyl and $\text{Mg} - \text{OH}$ bond. In the spectra of the samples from Torto, Riacho Fundo, and the CN – 05 sample from Cabeça de Negro mine, there are only spectral features related to the hydroxyl and the $\text{Mg} - \text{OH}$ bond. The spectral features related to the transitional vibrational processes of CO_3^{2-} are centered at 1850 nm (Band 4), 1970 nm (Band 5), 2130 nm (Band 6) and 2300 nm (Band 7) . In the spectra of samples from Cabeça de Negro mine, with the exception of the CN -05 sample, the absorption feature of the Band 5 is masked and shifted to 1940 nm due to H_2O absorption. The Band 7 is intense and well-marked in the samples from the three mines, sometimes presenting a double feature. The albedo of the spectra and the intensity of the features are influenced by the presence of organic matter and granulometry. The technique of removing the continuum helped in the better visualization of the spectral features, as well as in the characteristics of the features, however it does not, in fact, cancel out the effects of organic matter and/or granulometry.

Keywords: Reflectance Spectroradiometry. Magnesite. Remote Sensing

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Mapa de Localização	13
Figura 2	– Tipos de mudanças de níveis energéticos em diferentes partes do espectro eletromagnético	19
Figura 3	– Divisão dos domínios estruturais da Província Borborema	24
Figura 4	– Mapa geológico local das ocorrências de magnesita na Faixa Orós	28
Figura 5	– Fotomicrografias a nicóis cruzados das amostras da mina Cabeça de Negro .	29
Figura 6	– Aspecto macroscópico das amostras da mina Cabeça de Nego	30
Figura 7	– Fotomicrografias a nicóis cruzados (NX) e a nicóis descruzados (NII) das amostras da mina Riacho Fundo	31
Figura 8	– Aspecto macroscópico das amostras da mina Riacho Fundo	31
Figura 9	– Fotomicrografias a nicóis cruzados (NX) e a nicóis descruzados (NII) das amostras da mina Riacho Fundo	32
Figura 10	– Aspecto macroscópico das amostras da mina do Torto	33
Figura 11	– Fluxograma da metodologia aplicada	34
Figura 12	– Espectros de reflectância das amostras da mina Cabeça de Negro	39
Figura 13	– Espectros de reflectância das amostras da mina Riacho Fundo	40
Figura 14	– Espectros de reflectância das amostras da mina do Torto	42
Figura 15	– Espectros de reflectância das amostras da mina de Cabeça de Negro, Riacho Fundo e Torto	42
Figura 16	– Espectros de reflectância com o contínuo removido das amostras da mina Cabeça de Negro	43
Figura 17	– Espectros de reflectância com o contínuo removido das amostras da mina Riacho Fundo	44
Figura 18	– Espectros de reflectância com o contínuo removido das amostras da mina do Torto	44

Figura 19 – Espectros com o contínuo removido das minas de Cabeça de Negro, Riacho Fundo e Torto	45
Figura 20 – Espectros de reflectância com o contínuo removido para a Banda 3	51
Figura 21 – Espectros de reflectância com o contínuo removido para a Banda 2	54
Figura 22 – Espectros de reflectância com o contínuo removido para a Banda 4	58
Figura 23 – Espectros de reflectância com o contínuo removido para a Banda 5	60
Figura 24 – Espectros de reflectância com o contínuo removido para a Banda 6	63
Figura 25 – Espectros de reflectância com o contínuo removido para a Banda 7	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Intervalos e nomenclaturas das regiões do espectro eletromagnético	17
Tabela 2 – Principais feições observadas para o grupo CO_3^{2-}	21
Tabela 3 – Posição das bandas de absorção dos minerais carbonáticos anídricos (nm) .	22
Tabela 4 – Feições de absorção devidos aos <i>overtones</i> e <i>combination tones</i> da molécula de água	22
Tabela 5 – Sumário dos litotipos analisados na pesquisa	35
Tabela 6 – Bandas de absorção características do minério magnésítico	45
Tabela 7 – Tabela contendo os dados referentes a absorção em torno de 1030 – 1060 nm (Banda 1) nos carbonatos das minas Cabeça de Negro, Riacho Fundo e Torto	48
Tabela 8 – Tabela contendo os dados referentes a absorção em torno de 1710 nm (Banda 3) nos carbonatos das minas de Cabeça de Negro, Riacho Fundo e Torto	49
Tabela 9 – Tabela contendo os dados referentes a absorção em torno de 1390 nm (Banda 2) nos carbonatos das minas de Cabeça de Negro, Riacho Fundo e Torto	52
Tabela 10 – Tabela contendo os dados referentes a absorção em torno de 1850 nm (Banda 4) nos carbonatos das minas Cabeça de Negro, Riacho Fundo e Torto	56
Tabela 11 – Tabela contendo os dados referentes a absorção em torno de 1930 – 1980 nm (Banda 5) nos carbonatos das minas Cabeça de Negro, Riacho Fundo e Torto	59
Tabela 12 – Tabela contendo os dados referentes a absorção em torno de 2130 nm (Banda 6) nos carbonatos das minas de Cabeça de Negro, Riacho Fundo e Torto	61

Tabela 13 – Tabela contendo os dados referentes a absorção em torno de 2300 nm (Banda 7) nos carbonatos das minas de Cabeça de Negro, Riacho Fundo e Torto	64
Tabela 14 – Tabela contendo a classificação atribuídas às amostras das minas de Cabeça de Negro, Riacho Fundo e Torto	70

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Área de estudo	13
1.2	Objetivos	14
<i>1.2.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	14
<i>1.2.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Sensoriamento Remoto	15
2.2	Radiação Eletromagnética (REM)	16
2.3	Espectrorradiometria	18
<i>2.3.1</i>	<i>Origem das feições espectrais</i>	18
2.4	Caracterização espectral dos grupos CO₃²⁻, H₂O e OH⁻	20
3	CONTEXTO GEOLÓGICO	24
3.1	Geologia Regional	24
<i>3.1.1</i>	<i>Domínio Orós-Jaguaribe (DOJ)</i>	25
3.2	Geologia Local	27
4	MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1	Materiais Amostrados	34
4.2	Medidas Espectrorradiométricas	36
4.3	Análise e Processamento de Dados	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
6	CONCLUSÕES	72
	REFERÊNCIAS	74
	ANEXO A – GALERIA MACRISCÓPICA DAS AMOSTRAS DA MINA CABEÇA DE NEGRO (AMOSTRAS CN-01, CN-02, CN-03)	80
	ANEXO B – GALERIA MACROSCÓPICA DAS AMOSTRAS DA MINA CABEÇA DE NEGRO (AMOSTRAS CN-04, CN-05, CN-06)	81
	ANEXO C – GALERIA MACROSCÓPICA DAS AMOSTRAS DA MINA CABEÇA DE NEGRO (AMOSTRAS CN-07, CN-08, CN-09)	82
	ANEXO D – GALERIA MACROSCÓPICA DAS AMOSTRAS DA MINA RIACHO FUNDO (AMOSTRAS RF-02, RF-03, EF-05)	83
	ANEXO E – GALERIA MACROSCÓPICA DAS AMOSTRAS DA MINA	84

RIACHO FUNDO (AMOSTRAS RF-06, RF-08, RF-10)	
ANEXO F – GALERIA MACROSCÓPICA DAS AMOSTRAS DA MINA DO TORTO (AMOSTRAS TO-01, TO-03, TO-04)	85
ANEXO G – GALERIA MACROSCÓPICA DAS AMOSTRAS DA MINA DO TORTO (AMOSTRAS TO-05, TO-06, TO-07)	86
ANEXO H – GALERIA MACROSCÓPICA DAS AMOSTRAS DA MINA DO TORTO (AMOSTRAS TO-08, TO-09, TO-10)	87
ANEXO I – GALERIA MACROSCÓPICA DAS AMOSTRAS DA MINA DO TORTO (AMOSTRAS TO-11, TO-12)	88
ANEXO J – LÂMINA PETROGRÁFICA (AMOSTRA CN-03)	89
ANEXO K – LÂMINA PETROGRÁFICA (AMOSTRA CN-04)	90
ANEXO L – LÂMINA PETROGRÁFICA (AMOSTRA CN-07)	91
ANEXO M – LÂMINA PETROGRÁFICA (AMOSTRA CN-09)	92
ANEXO N – LÂMINA PETROGRÁFICA (AMOSTRA RF-03)	93
ANEXO O – LÂMINA PETROGRÁFICA (AMOSTRA RF-06)	94
ANEXO P – LÂMINA PETROGRÁFICA (AMOSTRA RF-10)	95
ANEXO Q – LÂMINA PETROGRÁFICA (AMOSTRA TO-04)	96
ANEXO R – LÂMINA PETROGRÁFICA (AMOSTRA TO-05)	97
ANEXO S – LÂMINA PETROGRÁFICA (AMOSTRA TO-09)	98
ANEXO T – LÂMINA PETROGRÁFICA (AMOSTRA TO-10)	99

1 INTRODUÇÃO

A magnesita, nome dado ao carbonato de magnésio de fórmula $MgCO_3$, é a principal fonte de extração de magnésio no mundo, sendo utilizada na obtenção de magnésio metálico e de alguns compostos de magnésio comumente utilizados na agropecuária e nas indústrias farmacêuticas, químicas e de refratários.

O Brasil está entre os cinco maiores produtores e exportadores de magnésio do mundo, com as reservas concentradas nos estados da Bahia e Ceará. No Ceará, de acordo com o Anuário Mineral Estadual (ANM, 2018), a produção de magnesita ultrapassou 136 mil toneladas, constituindo um importante setor mineral para o estado, contribuindo para a geração de empregos e renda nos municípios de Jucás, Iguatu e Orós, aonde os depósitos estão presentes.

Devido à crescente demanda da produção mineral de diferentes bens metálicos e não metálicos, diversas empresas e pesquisadores tem desempenhado um esforço considerável na localização de novas reservas minerais. Entre os diferentes métodos utilizados, o emprego de imagens multi e hiperespectrais vem sendo cada vez mais utilizados na prospecção mineral (GOETZ, ROWAN e KINGSTON, 1982; SABINS, 1999; CRÓSTA *et al.*, 2003; MOGHTADERI, MOORE e MOHAMMADZADEH, 2007; BISHOP, LIU e MASON, 2011; HUO *et al.*, 2014; SALEM e EL GAMMAL, 2015; SOE *et al.*, 2017; entre vários outros).

A interpretação dessas imagens fundamenta-se na análise do comportamento de reflectância dos materiais, estando diretamente ligada à estrutura e a química dos materiais. Estes dados podem ser obtidos através de equipamentos denominados espectrorradiômetros de reflectância (portáteis ou não), que além de serem utilizados para o auxílio e calibração dos sensores orbitais e/ou aerotransportados, também estão sendo utilizados no auxílio do planejamento e avanço nas frentes de lavra e/ou descrições de furos de sondagem, já que constituem de uma ferramenta que permite uma rápida e não destrutiva análise química e mineralógica dos materiais (GAFFEY, 1985; GAFFEY, 1986; CROWLEY, 1986; GAFFEY, 1987; VAN DER MEER, 1995; HERRMANN *et al.*, 2001; DUCART *et al.*, 2006; PRADO *et al.*, 2016; entre vários outros).

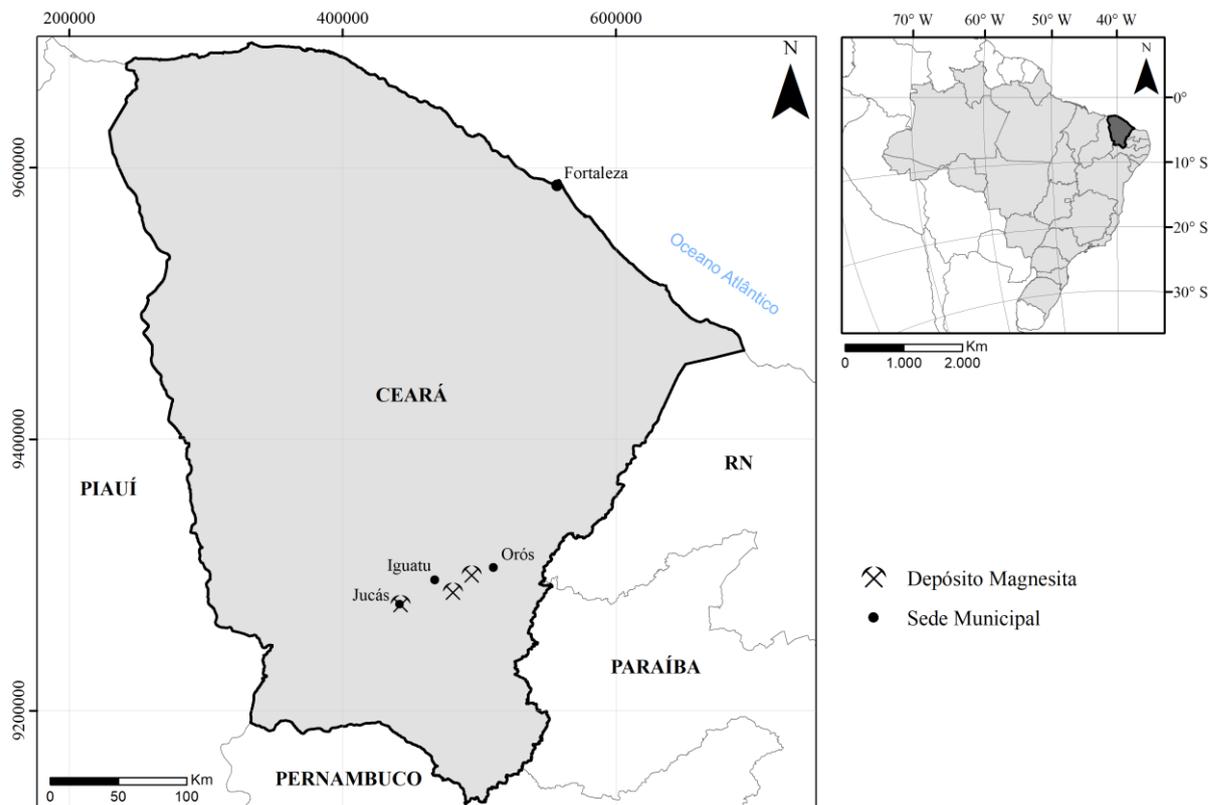
Na literatura, percebe-se que há uma carência de dados espectrorradiométricos referentes às rochas carbonáticas, e especialmente rochas carbonáticas de composição magnésítica. Alguns trabalhos de destaques sobre a espectrorradiometria de carbonatos, como Gaffey (1985, 1986 e 1987), Crowley (1986) e Van der Meer (1995), descrevem uma série de feições espectrais entre 1600 nm e 2500 nm diagnósticas dos minerais carbonáticos, variando em intensidade e posição de acordo com a composição química do material.

Este trabalho tem como objetivo o levantamento e descrição das assinaturas espectrais dos carbonatos magnésíficos da porção centro sul do estado do Ceará, contribuindo para o desenvolvimento de trabalhos científicos na área em questão.

1.1 Área de estudo

Os depósitos minerais de magnesita do estado do Ceará estão localizados na porção centro-sul do estado, ocorrendo de forma descontínua em uma faixa aproximadamente E-W de mais de 100 km de extensão, percorrendo os municípios de Jucás, Iguatu e Orós, distando aproximadamente 400 km da capital estadual Fortaleza (Figura 1).

Figura 1 - Mapa de Localização



Fonte: Elaborado pelo autor.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral, a caracterização espectrorradiométrica do minério magnesítico do estado do Ceará através de espectrorradiometria de reflectância.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Obter dados espectrorradiométricos que permitam elaborar uma biblioteca espectral para os depósitos de magnesita do estado do Ceará.
- b) Identificação de feições características do material amostrado, avaliando as semelhanças e diferenças dos diferentes depósitos de magnesita.
- c) Comparação entre os espectros coletados e os espectros contidos na literatura.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Sensoriamento Remoto

O termo ‘sensoriamento remoto’ foi formalmente definido pela ASPRS (*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*) como a medição ou aquisição de propriedades de um objeto ou fenômeno, por um dispositivo que não esteja em contato físico com o objeto ou fenômeno em estudo (COLWELL, 1983). Porém, o termo remonta a um artigo não publicado do começo dos anos 1960, feito pelo grupo *Office of Naval Research* (ONR), sendo posteriormente promovido em uma série de simpósios patrocinados pelos mesmos (PRUITT, 1979 *apud* JENSEN, 2009).

Essa definição, entretanto, posteriormente se provou ser muito ampla, embarcando técnicas da aerogeofísica ao simples ato de contato visual através do olho humano. Então, convencionalmente, o termo sensoriamento remoto tem sido definido como a técnica de se obter informação à distância de um objeto ou fenômeno, sem estar em contato físico com o mesmo, através da utilização de radiação eletromagnética (REM), e baseando-se na análise do comportamento da reflectância espectral dos materiais no intervalo de comprimento de onda que varia do visível ao infravermelho de ondas curtas (JENSEN, 2009; GUPTA, 2018).

A princípio marcado por técnicas de fotografias aéreas e fotointerpretação, o sensoriamento remoto vem experimentando ao longo dos anos um rápido desenvolvimento, com o lançamento de diversos sensores multi e hiperespectrais, auxiliando nas práticas de exploração de recursos, mapeamento, estudos mineralógicos, monitoramento ambiental, planejamento urbano, entre várias outras aplicações.

As interpretações das imagens desses sensores fundamentam-se na análise do comportamento de reflectância dos materiais, baseando-se no fato de que todo corpo na superfície terrestre pode emitir, refletir, absorver ou transmitir energia eletromagnética (EEM) em um comprimento de onda específico, a depender principalmente da sua composição e estrutura (JENSEN, 2009; GUPTA, 2018). Esses dados de reflectância podem ser medidos através de espectrorradiômetros de reflectância (portáteis ou não), de alta resolução espectral (hiperespectrais), capazes de gerar as curvas de reflectância espectrais.

2.2 Radiação Eletromagnética (REM)

As propriedades da radiação eletromagnética podem ser explicadas por dois modelos, que se complementam para caracterizar a natureza dual da REM, que se comporta ao mesmo tempo como onda (modelo ondulatório) e como energia (modelo corpuscular)

Segundo o modelo ondulatório, a REM pode ser explicada como uma forma de onda senoidal e harmônica, consistindo em um campo elétrico e um campo magnético que possuem as mesmas amplitudes, sendo inseparáveis e sempre perpendiculares um ao outro. Essa radiação é gerada toda vez que uma partícula é acelerada, fazendo com que as perturbações dos campos elétricos e magnéticos se propaguem repetitivamente no vácuo a uma velocidade de aproximadamente 300.000 km/h (velocidade da luz), em uma direção ortogonal à direção dos campos, sendo essas perturbações chamadas de ondas eletromagnéticas (MENESES e ALMEIDA, 2012; GUPTA, 2018).

Segundo esse modelo, as características das imagens de sensoriamento remoto são explicadas pela interação macroscópica, que é, na prática, a resposta da intensidade com que um objeto reflete a REM em razão do tamanho da onda e a textura da superfície do objeto, e se aplica melhor para grandes comprimentos de onda (MENESES e ALMEIDA, 2012)

O modelo corpuscular dita que a REM é composta por numerosos pequenos pacotes de energia discreta, denominados fótons (forma física de um quantum), que são como corpúsculos de energia sem matéria (MENESES e ALMEIDA, 2012; GUPTA, 2018).

O termo discreto se refere ao fato de que a intensidade de energia transportada pela REM num dado comprimento de onda é sempre a mesma, independente do momento que é medida, significando que para cada comprimento de onda, há uma específica quantidade de energia, havendo uma relação inversamente proporcional entre energia e o comprimento de onda, onde fótons de menores comprimentos de onda (maior frequência) carregam mais energia que fótons de maiores comprimentos de onda (menor frequência).

A natureza corpuscular da REM se manifesta através da sua interação com a matéria, onde há trocas de energias discretas entre elas. Para haver essa interação ou troca de energia entre a REM e a matéria, é preciso que a REM incidente seja em parte absorvida pelas moléculas ou átomos, o que promove uma mudança de elétron de um orbital para outro de maior energia, ou em um aumento de intensidade de vibração molecular (MENESES e ALMEIDA, 2012).

Como as energias envolvidas na interação são discretas, as trocas de energia somente ocorrerão se a quantidade de energia contida na REM for igual àquela necessária para

promover uma mudança nos níveis de energia dos átomos ou moléculas, se configurando como uma interação dita microscópica, dependente da constituição química do material, e se aplica melhor para os comprimentos de ondas menores (MENESES e ALMEIDA, 2012; GUPTA, 2018).

Ao conjunto de ondas eletromagnéticas que compõem o campo de radiação de um determinado objeto dá-se o nome espectro. O espectro eletromagnético representa todas as regiões espectrais da REM conhecidas, que se estende dos comprimentos de onda dos raios cósmicos aos comprimentos de corrente alternada emitidos pelas redes de alta tensão. (NOVO, 2008; MENESES e ALMDEIRA, 2012)

Apesar de ter um espectro contínuo, o espectro eletromagnético foi arbitrariamente dividido em intervalos de comprimentos de onda, em função dos processos físicos que dão origem à energia, dos mecanismos físicos de sua detecção e do tipo de interação que ocorre entre a radiação e os objetos sobre os quais incide.

Estes não são limites rigorosamente precisos e fixos, sendo comum haver na literatura pequenas diferenças de limites dos intervalos espectrais, assim como também há pequenas diferenças de nomenclatura entre as divisões e subdivisões do espectro eletromagnético.

Os intervalos e nomenclaturas para as diferentes regiões do espectro eletromagnético adotados estão sintetizados na Tabela 1. Serão mostrados somente do intervalo compreendido entre o visível e o infravermelho distante, que compreendem o intervalo de maior interesse para o trabalho.

Tabela 1 - Intervalos e nomenclaturas das regiões do espectro eletromagnético.

Nomenclatura	Intervalo espectral	Abreviação	
Visível	400 – 700 nm	VIS	VNIR
Infravermelho próximo	700 – 1200 nm	NIR	
Infravermelho de ondas curtas	1200 – 3000 nm	SWIR	
Infravermelho termal	3000 – 5000 nm	MIR	
	5000 nm – 1 mm	FIR	

Fonte: Meneses e Almeida (2012); Gupta (2018). Nota: As abreviações foram mantidas de acordo com a nomenclatura em inglês, obedecendo à convenção adotada na área de pesquisa. A mesma abreviação será mantida ao longo do trabalho. VIS = *visible*; NIR = *near-infrared*; VNIR = *visible + near-infrared*; SWIR = *shortwave infrared*; MIR = *mid-infrared*; FIR = *far-infrared*.

2.3 Espectrorradiometria

Denomina-se radiometria a medida quantitativa da intensidade de qualquer um dos tipos de radiação conhecidas. Se a radiação medida for a eletromagnética, utiliza-se o termo espectrorradiometria (MENESES e NETTO, 2001).

Em uma escala atômica/molecular, a interação entre a REM e a matéria resulta em absorção, emissão e reflexão seletivas, que são melhores explicados pela natureza corpuscular da REM (GUPTA, 2018).

Diversos métodos têm sido desenvolvidos para a aquisição de dados espectrorradiométricos, que se diferem em relação às faixas de comprimento de ondas e do fenômeno físico utilizado na investigação (reflexão, emissão e absorção, este último também chamado de transmissão).

Entre os diferentes métodos, a espectrorradiometria de reflectância é a que vem sendo mais utilizada, devido principalmente a maior praticidade em se obter os dados, principalmente das porções do VNIR e SWIR.

A técnica de obtenção de dados através da espectrorradiometria de reflectância consiste na medição, em diferentes comprimentos de onda, da reflectância dos objetos. Ao gráfico composto da reflectância pelo comprimento de onda dá-se o nome de curva de reflectância espectral, ou assinatura espectral, que dão ou podem dar importantes informações acerca das propriedades químicas e físicas dos objetos em estudo (GUPTA, 2018)

2.3.1 Origem das feições espectrais

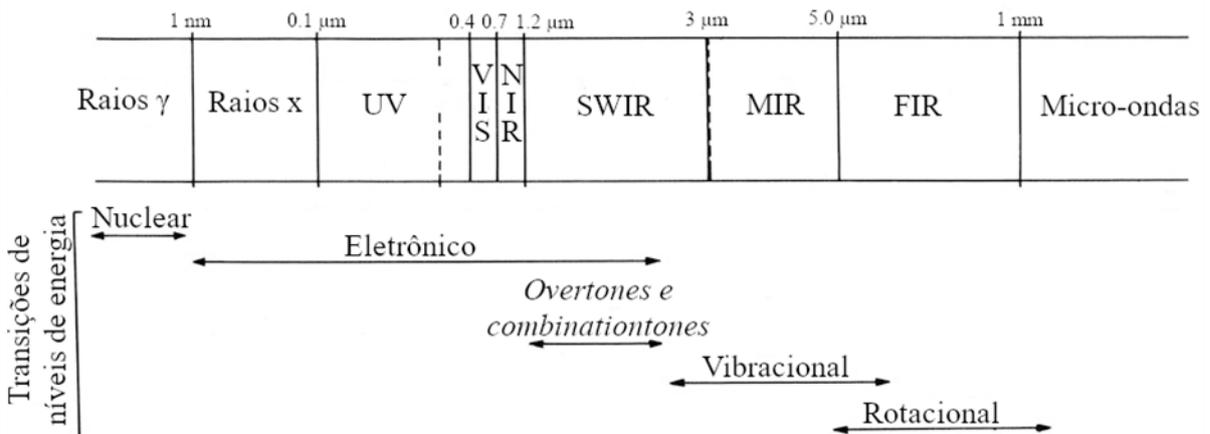
Na espectrorradiometria, as feições espectrais de um material, que correspondem às porções das curvas de reflectância em determinado comprimento de onda, com formas e intensidade definida própria daquele material, são função conjunta das interações macroscópicas e microscópicas. Devido à enorme variedade de composição e estrutura possíveis, as rochas e minerais têm sido bastante estudadas nesse aspecto desde a década de 60, com ênfase nos trabalhos realizados por Lyon (1962, 1965), Farmer (1974) e Hunt (1977, 1979, 1980).

Nas curvas de reflectância espectral, essas feições características aparecem como depressões ou picos negativos, caracterizando porções com alta absorção de REM (baixa reflectância), e são de extrema importância para o sensoriamento remoto, pois é através dessas feições que é possível extrair informações acerca das composições químicas dos materiais.

A forma e aparência dessas feições é, além de função da composição do material, controlada por fatores tais como o tempo de vida do estado excitado, efeitos de saturação (quando o número de elétrons excitados é igual à do estado estacionário) e efeitos de relaxamento (relacionados a taxa de decaimento do estado excitado) (MENESES e NETTO, 2001).

No espectro eletromagnético que tange o intervalo óptico, as feições são produzidas como consequência de processos eletrônicos (transições eletrônicas) e vibracionais (transições moleculares vibracionais), ambas ocorrendo em porções espectrais distintas (Figura 2), devido às diferentes exigências de quantidade de energia para causar ambas as transições (MENESES e NETTO, 2001; GUPTA, 2018).

Figura 2 - Tipos de mudanças de níveis energéticos em diferentes partes do espectro eletromagnético.



Fonte: Adaptado de Gupta (2018). Nota: As linhas tracejadas verticais indicam mudança de escala.

Os processos eletrônicos (transições eletrônicas) são predominantemente responsáveis pelas feições de absorção espectral no intervalo do VIS ao NIR, e algumas feições de parte do SWIR. Estes processos são, em síntese, rearranjos dos elétrons de valência, ocorrendo nos íons que apresentam elétrons desemparelhados, características em comum dos metais de transição (MENESES e NETTO, 2001; GUPTA, 2018).

Diferentes mecanismos e fenômenos têm sido utilizados para explicar os processos eletrônicos que levam à absorção seletiva, e as diferenças em intensidade e comprimento de onda em que ocorrem. Entre os mecanismos propostos, os de efeito de campo cristalino e transferência de carga são considerados os mais comuns e importantes (MENESES e NETTO, 2001).

Os processos vibracionais (transições moleculares vibracionais) são responsáveis pelas feições espectrais da região do SWIR e TIR do espectro eletromagnético, sendo caracterizadas por serem feições mais intensas que as dos processos eletrônicos, apesar de

necessitarem de menores quantidades de energia. Estes processos resultam de transições energéticas do estado estacionário ou fundamental de vibração das ligações moleculares, e tal qual acontece com os processos eletrônicos, a transição só irá ocorrer mediante a absorção de uma quantidade específica de energia necessária (MENESES e NETTO, 2001; GUPTA, 2018; MENESES, ALMEIDA e BAPTISTA, 2019).

Os átomos em uma molécula estão sempre em uma contínua vibração em torno de uma posição de equilíbrio. Esses processos vibracionais são descritos como movimentos de distensão e compressão, que constituem os níveis energéticos dos estados fundamentais e estacionários vibracionais das moléculas. A intensidade e quais tipos de vibração que ocorrem varia para cada material, dependendo do número de átomos existentes, da massa dos átomos, da geometria espacial e da força de ligação entre si. As feições espectrais decorrentes dessas vibrações fundamentais ocorrem nos comprimentos de onda maiores do que 2600 nm (MENESES e NETTO, 2001; MENESES, ALMEIDA e BAPTISTA, 2019).

Porém, como essas vibrações não são permanentemente harmônicas durante todo o período considerado, surgem transições de menores intensidades, que resultam em bandas de absorção que acompanham as vibrações fundamentais, se manifestando em porções do SWIR inferiores a 2500 nm, denominadas *overtones* e *combination tones* (MENESES e NETTO, 2001; MENESES, ALMEIDA e BAPTISTA, 2019)

2.4 Caracterização espectral dos grupos CO_3^{2-} , H_2O e OH^-

Há poucas referências na literatura acerca da caracterização de rochas carbonáticas, com destaque aos trabalhos realizados por Hunt e Salisbury (1971), Gaffey (1985, 1986, 1987), Crowley (1986) e Van der Meer (1995).

O grupo CO_3^{2-} quando aparece isolado em carbonatos de fórmula geral MCO_3 (M = Ca, Mg, Fe, Mn, Sr ou Ba) apresenta quatro modos fundamentais de vibração que podem ser registrados (HUNT e SALISBURY, 1971; HUNT, 1977; CLARK *et al.*, 1990):

- a) vibração de estiramento (C - O), simétrica (ν_1) próxima a 9407 nm (inativa no infravermelho, porém com feição Raman em torno do valor indicado);
- b) vibração de dobramento fora do plano (ν_2) próxima a 11376 nm;
- c) vibração de estiramento (C - O), assimétrica (ν_3), próxima a 7067 nm;
- d) vibração de dobramento no plano (ν_4), próxima a 14700 nm.

Esses modos fundamentais vibracionais resultam em *overtones* e *combination tones* que estão relacionados às feições de absorção no SWIR, entre os comprimentos de onda de 1600 nm e 2500 nm (HUNT e SALISBURY, 1971; CLARK *et al.*, 1990).

De acordo com Hunt e Salisbury (1971), os carbonatos apresentam até cinco feições de absorção características relacionados a esses *overnotes* e *combination tones* (Tabela 2), duas dessas ocorrendo em comprimentos de ondas maiores, em 2500 – 2550 nm e em 2300 – 2350 nm, sendo mais intensas e bem desenvolvidas, podendo apresentar feição dupla devido ao aumento da degeneração da estrutura mineral ou do sítio do ânion (CLARK *et al.*, 1990), e as outras três sendo mais fracas, situadas em torno de 2100 – 2160 nm, 1970 – 2000 nm e 1850 – 1870 nm, tendo como característica a presença de incipientes ombros no lado da banda voltada para os menores comprimentos de onda (HUNT e SALISBURY, 1971; MENESES, ALMEIDA e BAPTISTA, 2019).

Tabela 2 - Principais feições observadas para o grupo CO₃²⁻.

<i>Combination tones / Overtones</i>	Posição geral (nm)	Posição observada (nm)
$v_1 + 2v_3$	2550	2500 – 2550
$3v_3$	2350	2300 – 2350
$v_1 + 2v_3 + v_4$ ou $3v_1 + 2v_4$	2160	2120 – 2160
$2v_1 + 2v_3$	2000	1970 – 2000
$v_1 + 3v_3$	1850	1850 – 1870

Fonte: Retirado de Hunt e Salisbury (1971).

Um estudo detalhado realizado por Gaffey (1985, 1986, 1987) indicou a presença de até sete bandas de absorção vibracional em carbonatos anidros, sendo que cinco destas bandas coincidem com as bandas indicadas no trabalho de Hunt e Salisbury (1971).

Gaffey (1985, 1986, 1987) demonstrou também como as posições das bandas de absorção variam nos diferentes materiais carbonáticos, de acordo com a composição química do material (Tabela 3).

A questão da mudança da posição das bandas de absorção carbonáticas em função da composição foi estudada também por Van der Meer (1995), que utilizou misturas espectrais com diferentes proporções de calcita e dolomita, além de diferentes quantidades de siderita, goethita, kaolinita e matéria orgânica.

Tabela 3 - Posição das bandas de absorção dos minerais carbonáticos anídricos (nm).

Mineral	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7
Magnesita	2500	2300	2220	2130	1960	1850	1780
Calcita	2530	2330	2260	2170	1990	1880	1760
Dolomita	2520	2320	2240	2160	1980	1860	1740
Siderita	2530	2330	2250	2180	1990	1890	1750
Rodocrosita		2370	2300	2220	2010	1900	
Aragonita	2530	2330	2260	2190	1990	1880	1750
Cerusita		2470	2360	2270	2090	1970	1820

Fonte: Retirado de Gaffey (1987).

Os carbonatos apresentam frequentemente feições espectrais devido à presença de água (GAFFEY, 1985). Água líquida possui três modos vibracionais fundamentais, que se manifestam em 3106 nm (ν_1), 6080 nm (ν_2) e 2903 nm (ν_3) (HUNT, 1977) ou 2738 nm (ν_1), 6269 nm (ν_2) e 2662 nm (ν_3) (CLARK *et al.*, 1990). Os *overtones* e *combination tones* derivados destes modos vibracionais fundamentais estão listados na Tabela 4.

Tabela 4 - Feições de absorção devidos aos *overtones* e *combination tones* da molécula de água.

<i>Combination tones / Overtones</i>	Posição geral (nm)
$\nu_2 + \nu_3$	1875*
$2\nu_1 + \nu_3$	1454*
$\nu_1 + \nu_3$	1380*
$\nu_1 + \nu_2 + \nu_3$	1135
$2\nu_1 + \nu_3$	942*

Fonte: Retirado de Hunt (1977). Nota: os valores marcados com * correspondem a valores que foram indicados tanto no trabalho de Hunt (1977) quanto no trabalho de Clark *et al.* (1990).

As feições devido à presença de água variam em intensidade e local, sendo consequência da variedade de sítios que a água pode ocupar nos minerais e rochas. Porém, sempre que a água estiver presente, haverá duas feições de absorção diagnósticas, localizadas próximas a 1400 nm e 1900 nm (HUNT, 1977).

No infravermelho há apenas um modo de estiramento fundamental para o grupo hidroxila (OH^-), responsável por feições espectrais próximos a 2750 nm (HUNT, 1977; CLARK *et al.*, 1990). Exatamente onde essa feição vai se manifestar vai depender de quem o OH^- está anexado, e em qual sítio está contido no material. Assim como acontece com as

moléculas de água, devido a possibilidade do OH⁻ poder estar presente em diferentes sítios no mesmo material, diversas bandas podem aparecer no espectro, variando de intensidade e local (HUNT, 1977).

Em relação à hidroxila, o que se observa na região entre 350 nm e 2500 nm é resultado de *overtones* e/ou das denominadas *combination bands* (HUNT, 1977). O primeiro *overtone* de estiramento ocorre próximo à 1400 nm, sendo uma das feições espectrais mais comuns em minerais (HUNT, 1977), e o segundo *overtone* ocorre próximo à 950 nm (CLARK *et al.*, 1990).

É comum os minerais exibirem feições de absorção relacionadas às *combination bands* X – OH (onde X é geralmente Al, Fe ou Mg), onde os dobramentos e estiramentos relacionados à hidroxila combinam-se com as vibrações da rede cristalina, causando o surgimento de feições de absorção em torno de 2100 nm – 2400 nm, a depender de qual metal a hidroxila está ligada (HUNT, 1977; CLARK *et al.*, 1990; MENESES, ALMEIDA, e BAPTISTA, 2019).

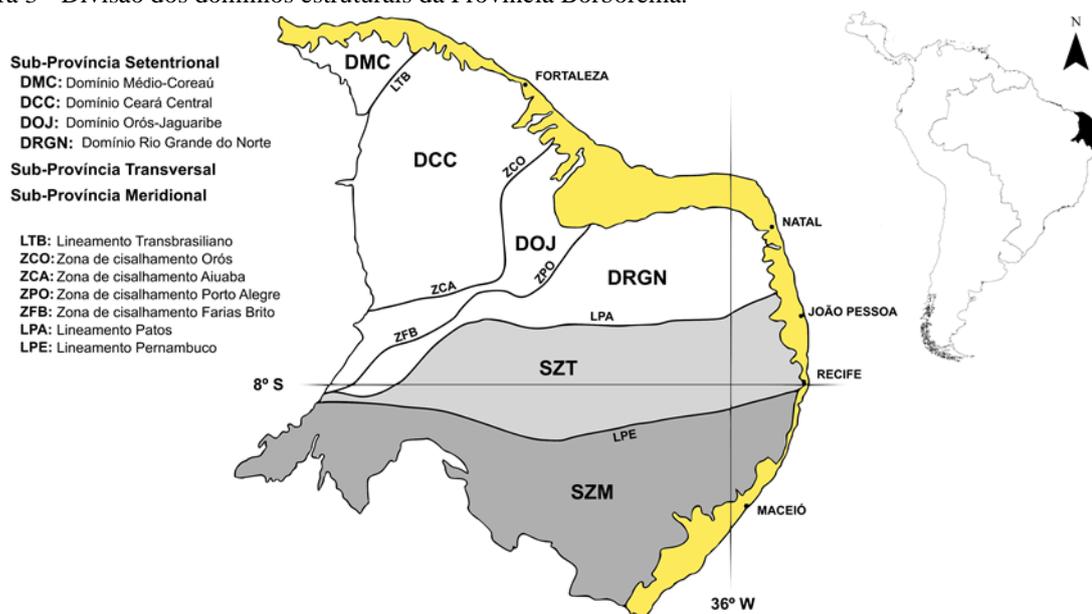
3 CONTEXTO GEOLÓGICO

A área de estudo encontra-se inserida na porção oriental da Plataforma Sul-Americana, na porção setentrional da Província Borborema (ALMEIDA *et al.*, 1977), fazendo parte do denominado Domínio Orós-Jaguaribe (ARTHAUD, 2007).

3.1 Geologia Regional

A Província Borborema está situada na porção nordeste do território Brasileiro, abrangendo uma área de cerca de 450.000 km², sendo limitada a sul pelo Cráton São Francisco, a oeste pela Bacia do Parnaíba, e pelas bacias sedimentares da margem costeira a norte e a leste (Figura 3).

Figura 3 - Divisão dos domínios estruturais da Província Borborema.



Fonte: Modificado de Bizzi *et al.* (2003), acatando as definições propostas por Arthaud (2007).

Foi denominada primeiramente por Almeida *et al.* (1977), em substituição a antiga nomenclatura “região de dobramento nordeste”, utilizada em trabalhos pioneiros relacionados à compartimentação da região, como Brito Neves (1975) e Almeida *et al.*, (1976). É caracterizada como um mosaico de núcleos arqueanos, blocos paleoproterozoicos, faixas de dobramento neoproterozoicas, sendo grande parte dessas unidades intrudidas por granitoides brasileiros (ALMEIDA *et al.*, 1977; VAN SCHMUS *et al.*, 1995), e estando separadas por extensas zonas de cisalhamento dúcteis transcorrentes de direção NE-SW, NNE e E-W,

possuindo centenas de quilômetros de extensão e podendo chegar a dezenas de quilômetros de largura, sendo acompanhadas por frequentes *nappes* de cavalgamento (CABY e ARTHAUD, 1986; VAUCHEZ *et al.*, 1995).

A atual configuração estrutural da província está relacionada à orogenia Brasileira/Pan-Africana, ocorrida no final do Neoproterozoico, envolvendo os crátons São Luís/Oeste-Africano, Amazônico e São Francisco/Congo, que culminou na formação da porção ocidental do Gondwana (ALMEIDA *et al.*, 1977; CABY e ARTHAUD, 1986; HOFFMAN, 1991). Segundo Araújo (2014), as principais assembleias petrotectônicas entre as regiões cratônicas envolvida na colisão são representadas por margens passivas, arcos juvenis, arcos continentais tardios e sequencias sin-orogênicas, com o final da atividade orogenética sendo datada por volta de 540-500 Ma, com a presença de granitoides pós-colisionais.

Diversos autores adotam subdivisões regionais da província Borborema, subdividindo-a em três subprovíncias delimitadas por zonas de cisalhamento (ZC) de direção E-W, sendo as subprovíncias denominadas Setentrional, localizada a norte da ZC Patos, a Zona Transversal, limitada ao norte pela ZC Patos e ao sul pela ZC Pernambuco, e Meridional, localizada ao sul da ZC Pernambuco (VAN SCHMUS *et al.*, 1995; SÁ *et al.*, 1995; BRITO NEVES *et al.*, 2000; NEVES, 2003).

3.1.1 Domínio Orós-Jaguaribe (DOJ)

O Domínio Orós-Jaguaribe (DOJ) engloba as rochas existentes entre as ZC Orós-Aiuaba e Portoalegre-Farias Brito, sendo sobrepostas à nordeste e à sudoeste pelas coberturas sedimentares da Formação Barreiras e da Formação Parnaíba, respectivamente (JARDIM DE SÁ, 1994; ARTHAUD, 2007).

Apesar deste presente trabalho adotar os limites e nomenclatura proposta por Jardim de Sá (1994) e Arthaud (2007), que são as convenções mais difundidas/consolidadas no meio geológico, é reconhecido que foram sugeridas outras nomenclaturas em trabalhos anteriores, mesmo que ainda não tinha sido proposto a alcunha de domínio/faixa para a região. Exemplos desses trabalhos pioneiros são Brito Neves (1975), onde o atual DOJ estaria inserido dentro do Sistema Jaguaribeano, Cavalcante *et al.* (1983), que agruparam as rochas do DOJ sob a denominação Metamorfitos da Zona de Orós, e Santos *et al.* (1984), que utilizou a denominação Complexo Orós.

É constituída por duas faixas vulcano-sedimentares distintas e paralelas, denominadas Faixas Orós e Jaguaribe (MENDONÇA e BRAGA, 1987), sendo separadas por

um embasamento gnáissico-migmatítico, dividido nos blocos denominados Jaguaretama e São Nicolau (SÁ, 1991; PARENTE e ARTHAUD, 1995). Apresenta-se em formato sigmoidal, com cerca de 500 km de extensão, possuindo espessuras que variam entre 15km e 75km.

O complexo gnáissico-migmatítico que ocorre separando as Faixas Orós e Jaguaribe (o “embasamento leste”, proposto por SÁ, 1991) foi proposto como sendo parte integrante do DOJ por Parente e Arthaud (1995), que argumentam que o mesmo não seria apenas o resultado de uma tectônica acrescionária, mas sim o embasamento das Faixas Orós e Jaguaribe. O Bloco Jaguaretama, localizado na porção mais ao norte do complexo, é caracterizado por ortognaisses tonalíticos e graníticos, ambos geralmente bandados e parcialmente migmatizados, e metassedimentos pelíticos, também frequentemente migmatizados, sendo raro a ocorrência de quartzitos e calciossilicáticas. O Bloco São Nicolau, localizado na porção mais ao sul, é composto basicamente por ortognaisses, sendo rara a presença de metassedimentos (PARENTE e ARTHAUD, 1995). Idades Rb-Sr para esse complexo variam do Arqueano (2.6 Ga; SÁ, 1991) ao Paleoproterozoico (2.35 Ga; BRITO NEVES, 1975).

Os metassedimentos da Faixa Orós são majoritariamente xistos aluminosos, estando intercalados com quartzitos, mármore calcíticos, domolíticos e magnesianos, rochas calcissilicáticas e quartzitos variando entre carbonosos, micáceos e puros (Parente e Arthaud, 1995). A seção litoestratigráfica inferior é marcada por uma associação vulcânica bimodal (Cavalcante, 1999), contendo idades Rb/Sr e U/Pb em torno de 1.8 Ga (Sá, 1991), sendo espacialmente sobreposta por paragnaisses, quartzitos micaxistos e hornblenda gnaisses, e sotopostos por sedimentos paralíticos plataformais característicos de uma associação quartzopelítica-carbonática - QPC (PARENTE e ARTHAUD, 1995). Como intrusivas plutônicas, ocorrem granitos porfiríticos (1.67 Ga), sienogranitos, metagabros (900 Ma) e ortognaisses (665 Ma) (SÁ, 1991; PARENTE e ARTHAUD, 1995; CAVALCANTE, 1999).

Na Faixa Jaguaribe predomina uma suíte magmática de *augen* gnaisses, seguida das formações vulcânicas, havendo em menor proporção rochas metassedimentares, representadas sobretudo por xistos e quartzitos (PARENTE e ARTHAUD, 1995; CAVALCANTE, 1999). Idades U-Pb e Rb-Sr a partir dos *augen* gnaisses indicam idades entre 1.7 e 1.8 Ga (CAVALCANTE, 1999).

As faixas Orós e Jaguaribe possuem uma foliação de alto ângulo, subvertical na porção N-S, e superior a 45° na porção E-W, contrastando com as foliações do complexo gnáissico-migmatítico, que possui mergulhos inferiores a 45° (Bloco Jaguaretama). A análise da foliação regional nas duas faixas demonstra que ela não está superposta a uma foliação de

baixo ângulo, demonstrando um caráter monocíclico, contrastando novamente com os dados do complexo gnáissico-migmatítico, que demonstram ter caráter policíclico, com a foliação de tectônica tangencial sendo transposta por foliações de deformação transcorrente, que foi a que também afetou as das faixas (PARENTE e ARTHAUD, 1995).

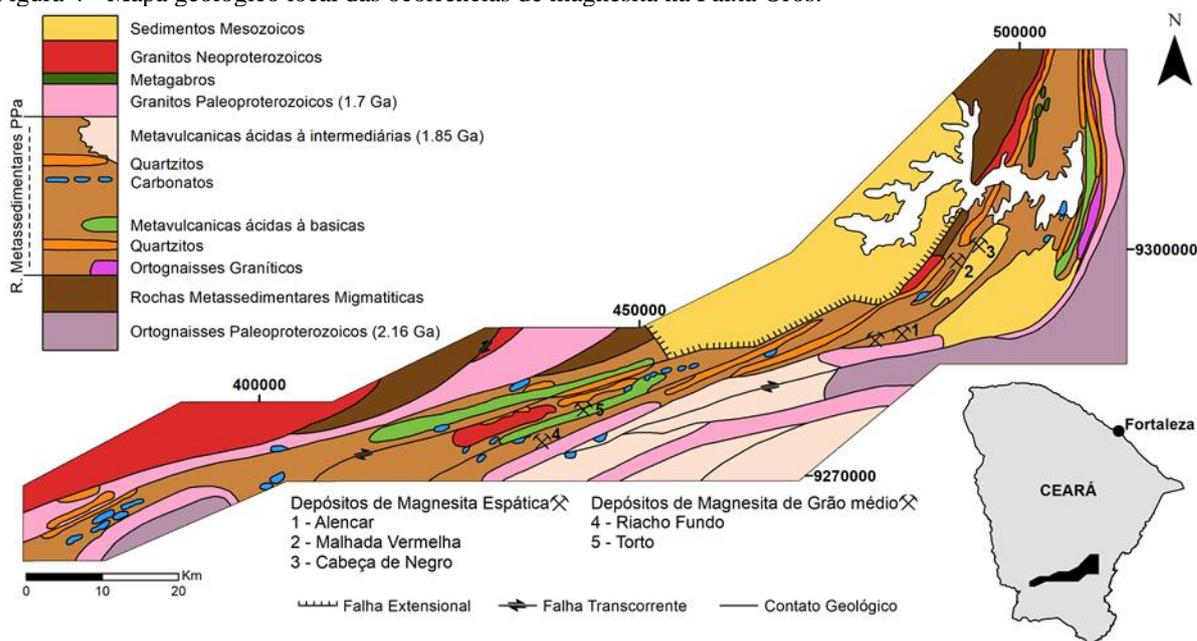
De um mundo geral, o grau metamórfico aumenta de oeste para leste, variando do xisto verde ao granulito. O complexo gnáissico-migmatítico apresenta metamorfismo atingindo até o fácies anfibolito alto, com grau variado de migmatização nos diversos litotipos. Nas faixas metassedimentares, o metamorfismo varia do fácies xisto verde a anfibolito baixo, chegando localmente a granulito (PARENTE e ARTHAUD, 1995).

3.2 Geologia Local

Os depósitos e ocorrências de magnesita do Ceará formam um rosário de lenticulas descontínuas inseridas na sequência metavulcanossedimentar da Faixa Orós, se prolongando por mais de 140 Km (PARENTE *et al.*, 1998).

Os mármores magnesíticos fazem parte do conjunto metassedimentar de fácies xisto verde à anfibolito, composto sobretudo por pelitos, formados principalmente por xistos aluminosos intercalados com quartzitos, mármores calcíticos, dolomíticos e magnesíticos, rochas calcissilicáticas e quartzitos carbonosos (PARENTE *et al.*, 1998; Figura 4). Este conjunto está intercalado com rochas ígneas datadas em torno de 1.8 Ga (VAN SCHIMUS *et al.*, 1995, datação U/Pb em metariolitos), que corresponde à provável idade de sedimentação, sendo recortado também por granitos meso e neoproterozoicos e por corpos básicos e ultra básicos do Neoproterozoico (PARENTE *et al.*, 1998).

Figura 4 - Mapa geológico local das ocorrências de magnesita na Faixa Orós.



Fonte: Modificado de Parente *et al.* (2004).

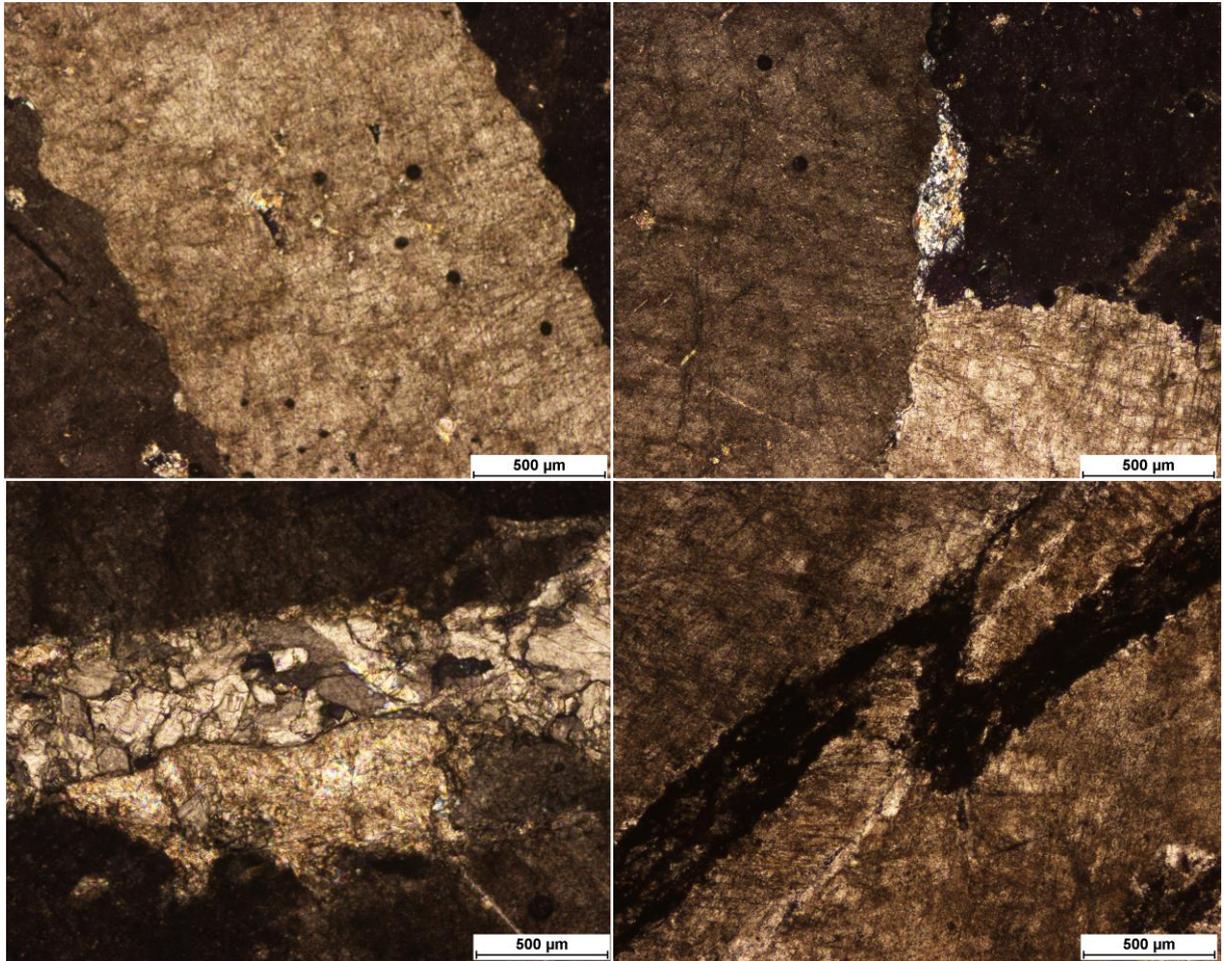
Os principais corpos magnesíticos, que possuem formas lenticulares de alguns metros a centenas de metros, possuem, em conjunto, reservas da ordem de 160 Mt (BIZZI *et al.*, 2003). Apresentam um crescimento granulométrico para o sentido nordeste, sendo classificados por Parente *et al.* (1998) em mármores magnesíticos espáticos, na região de Alencar e Orós, e mármores magnesíticos de grão médio/fino, na região de Jucás.

Os jazimentos de magnesita espática (Alencar, Malhada Vermelha e Cabeça de Negro) formam um rosário de lenticulas descontínuas com cerca de 25 km de extensão, com as lenticulas variando entre 20 e 900 metros, possuindo largura variando entre 10 e 200 metros.

O depósito de Cabeça de Negro possui formato sigmoidal, com comprimento de cerca de 150 metros e largura de cerca de 100 metros. Assim como os depósitos de Alencar e Malhada Vermelha, o depósito de Cabeça de Negro é encaixado e acompanhado de mármores dolomíticos, onde a passagem entre estes e os mármores magnesíticos é progressiva e bem definida, havendo, porém, algumas porções onde há mistura entre ambas.

Apresenta grandes variações texturais, com o tamanho dos cristais em geral maiores que 2 mm, ocorrendo, porém, zonas de recristalização de menor granulometria (Figura 5). Ocorre além da magnesita, o talco, clorita, e serpentina, que aparecem ou como micro inclusões dentro dos cristais de magnesita, ou como bolsões de tamanhos e formatos diversos, geralmente ligados às zonas de recristalização, ou no contato entre grãos. Ocorre também fraturas preenchidas por material opaco, sendo essas fraturas por vezes recortadas por veios de recristalização de magnesita.

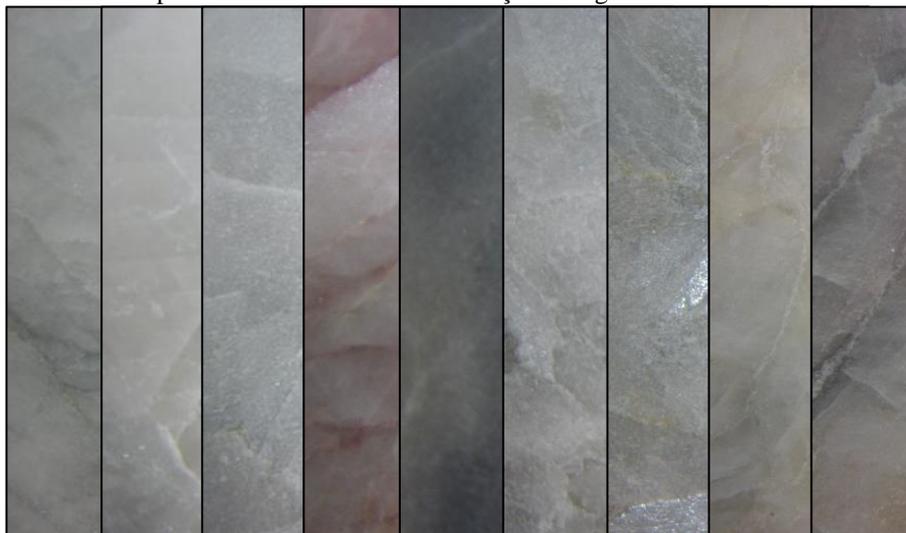
Figura 5 - Fotomicrografias a nicóis cruzados das amostras da mina Cabeça de Negro. A) grãos de carbonato com pequenas inclusões de talco; B) serpentina preenchendo fratura entre grãos de carbonato; C) fratura preenchida por carbonato recristalizado, acompanhada por um bolsão de talco; D) fratura preenchida por material opaco.



Fonte: Elaborado pelo autor. Nota: Demais fotomicrografias e descrições referentes às amostras da mina Cabeça de Negro podem ser encontradas no Anexo J, Anexo K, Anexo L e Anexo M).

A cor do minério é variável, indo de branco, cinza claro, a cinza escuro, por vezes possuindo tons avermelhados/amarronzados e/ou amarelados (Figura 6)

Figura 6 - Aspecto macroscópico das amostras da mina Cabeça de Negro.



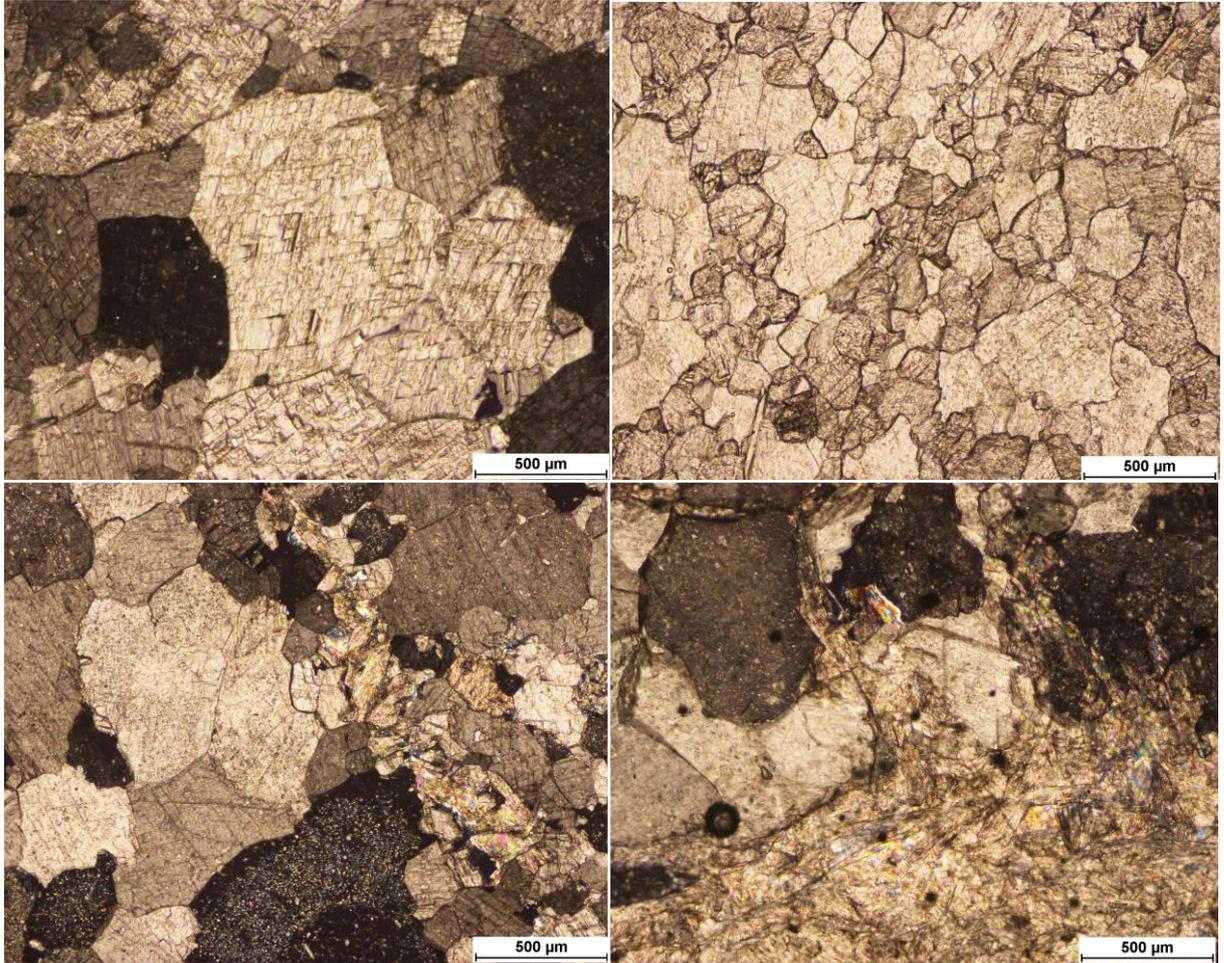
Fonte: Elaborado pelo autor. Nota: Demais fotografias podem ser visualizadas no Anexo A, Anexo B e Anexo C.

Os jazimentos de magnesita de grão fino/médio (Riacho Fundo e Torto) ocupam duas pequenas bacias lenticulares com espessura irregulares. O depósito de Riacho Fundo possui um formato lenticular, com comprimento da ordem de 100 metros e largura variando entre 30 a 50 metros, onde as extremidades encontram-se recobertas por sedimentos cenozoicos, sendo encaixado entre metadolomitos, xistos e rochas calcissilicáticas.

O minério é composto majoritariamente por magnesita, com o tamanho dos grãos geralmente menores que 1 mm, podendo ocorrer como minerais acessórios o talco, a clorita e a pirita. É comum ocorrer zonas de fraturamento e/ou recristalização de menor granulometria, podendo ser composta somente por magnesita recristalizada, ou podendo conter também talco e/ou serpentina, por vezes gerando bolsões de tamanho considerável (Figura 7).

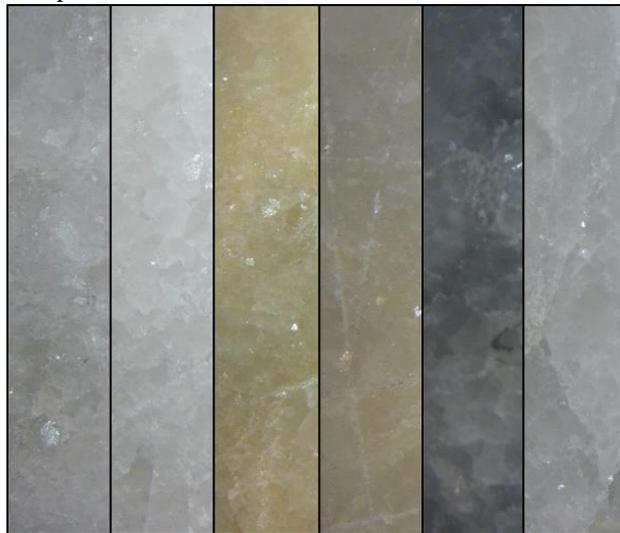
A cor do minério é variável indo do branco ao cinza, ao cinza escuro, por vezes possuindo tonalidades amareladas (Figura 8).

Figura 7 - Fotomicrografias a nicóis cruzados (NX) e a nicóis descruzados (NII) das amostras da mina Riacho Fundo. A) grãos de carbonato a NX, com clivagem romboédrica; B) grãos de carbonato recristalizados e com menor granulometria a NII; C) talco lamelar entre grãos de carbonato a NX; D) bolsão de talco anedral.



Fonte: Elaborado pelo autor. Nota: Demais fotomicrografias podem ser visualizadas no Anexo N, Anexo O e Anexo P.

Figura 8 - Aspecto macroscópico das amostras da mina Riacho Fundo.

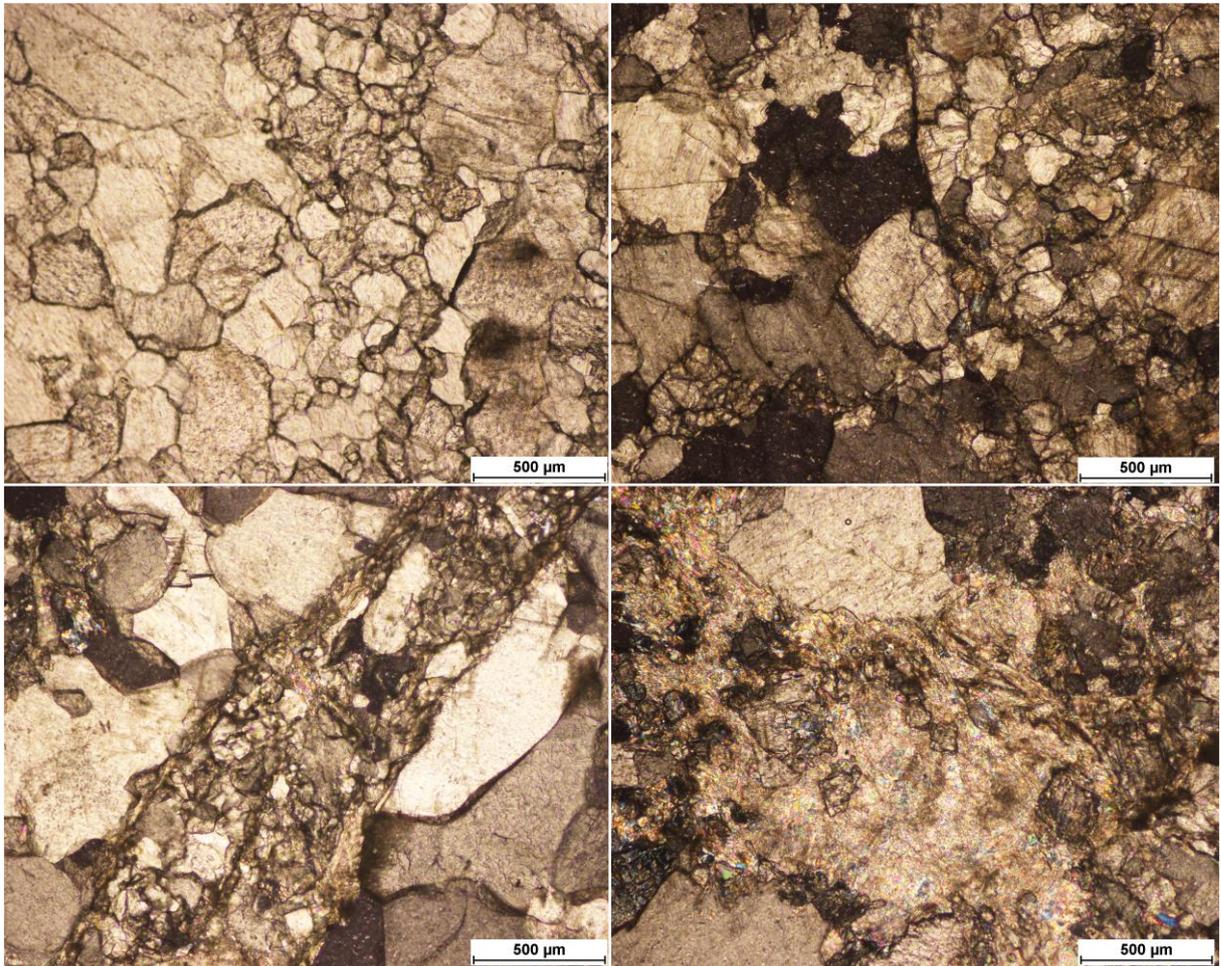


Fonte: Elaborado pelo autor. Nota: Demais fotografias podem ser visualizadas no Anexo D e Anexo E.

O depósito do Torto é composto por duas lentes grosseiramente sigmoidais, com extensão variando de 380 a 400 metros, e espessura variando entre 30 e 120 metros, também estando encaixadas entre metadolomitos, xistos, quartzitos e calcissilicáticas.

A magnesita do depósito do Torto se assemelha a da mina Riacho Fundo, com a granulometria em geral menor que 1 mm, também ocorrendo como minerais acessórios o talco, clorita e serpentina. Zonas de fraturamento são mais comuns, frequentemente acompanhados por bolsões de talco e/ou serpentina de tamanhos variáveis (Figura 9)

Figura 9 - Fotomicrografias a nicóis cruzados (NX) e a nicóis descruzados (NII) das amostras da mina Riacho Fundo. A) grãos de carbonato de diferentes granulometrias a NII; B) zona de fraturamento com carbonatos de diferentes granulometrias a NX; C) zona de fraturamento preenchida, marcada pela recristalização de carbonatos e pela presença de talco a NX; D) bolsão de talco em zona de fraturamento a NX.



Fonte: Elaborado pelo autor. Nota: Demais fotomicrografias podem ser visualizadas no Anexo Q, Anexo R, Anexo S e Anexo T.

A coloração do minério é variável, indo do branco, ao cinza, ao cinza escuro (Figura 10).

Figura 10 - Aspecto macroscópico das amostras da mina do Torto.



Fonte: Elaborado pelo autor. Nota: Demais fotografias podem ser visualizadas no Anexo F, e Anexo G, Anexo H e Anexo I.

Parente *et al.* (1998, 2004) através de dados petrográficos e geoquímicos enquadram esses depósitos de magnesita no tipo Vetsch, de origem puramente sedimentar, onde a magnesita espática teria sido formada em um ambiente paralítico, fracamente saturado, com uma importante evolução diagenética, e a magnesita de grão fino/médio sendo formada também em um ambiente paralítico, porém mais confinado e/ou saturado, com uma menor evolução diagenética.

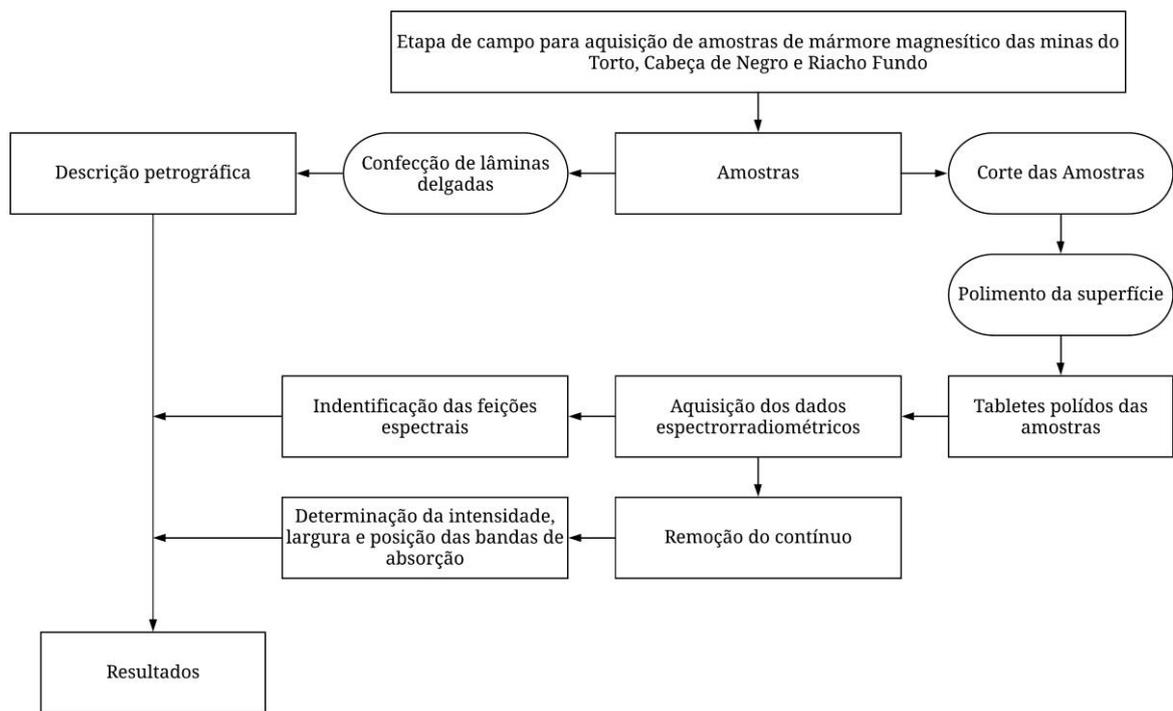
Esse ambiente de formação estaria ligado a uma paleogeografia configurada por uma série de golfos parálitos, em que se misturam associações evaporíticas com influências continentais. Neste esquema, os depósitos de magnesita se situariam entre dois golfos parálitos principais, ambos em posição distal em relação ao mar, onde no maior e mais distal, seria formado os depósitos espáticos, se desenvolvendo em um ambiente mais estável que os depósitos de grão médio (PARENTE *et al.*, 2004).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir apresenta-se os materiais utilizados para a elaboração da presente dissertação de mestrado, e a metodologia utilizada para a aquisição dos dados de espectrorradiometria de reflectância.

A Figura 11 contém o fluxograma da metodologia aplicada.

Figura 11 - Fluxograma da metodologia aplicada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1 Materiais Amostrados

As amostras de mármore magnesíticos/dolomíticos foram adquiridas das minas Cabeça de Negro, Torto e Riacho Fundo, todas localizadas na Faixa Orós, na porção centro-sul do Estado do Ceará. Buscou-se adquirir amostras de modo a cobrir todas as diferentes fácies de minério existentes nas minas, que, apesar de ser um minério relativamente uniforme dentro do *pit*, ainda apresenta pequenas variações de cor e textura. A localização dos locais de coleta foi predeterminada pelas empresas responsáveis pelas minas.

No total, foram coletadas 26 amostras de mármore magnesítico. A classificação litotípica das amostras está contida na Tabela 5.

Tabela 5 - Sumário dos litotipos analisados na pesquisa.

Amostra	Descrição
CN – 01	Magnesita espática branca acinzentada com talco.
CN – 02	Magnesita espática branca acinzentada com talco.
CN – 03	Magnesita espática branca acinzentada com talco e serpentina.
CN – 04	Magnesita espática avermelhada com talco e material opaco.
CN – 05	Magnesita espática cinza escuro com talco.
CN – 06	Magnesita espática branca acinzentada.
CN – 07	Magnesita espática branca acinzentada com talco e serpentina.
CN – 08	Magnesita espática amarela/avermelhada com talco e material opaco.
CN – 09	Magnesita espática cinza avermelhada, com talco, serpentina e material opaco.
RF – 02	Magnesita branca acinzentada de grão fino/médio com talco.
RF – 03	Magnesita branca de grão fino/médio com talco.
RF – 05	Magnesita amarelada de grão fino/médio com talco.
RF – 06	Magnesita cinza amarelada de grão fino/médio com talco.
RF – 08	Magnesita cinza escuro de grão fino/médio com talco.
RF – 10	Magnesita branca acinzentada de grão fino/médio com talco.
TO – 01	Magnesita cinza escuro de grão fino/médio com talco.
TO – 02	Magnesita cinza escuro de grão fino/médio com talco.
TO – 04	Magnesita cinza escuro de grão fino/médio, com talco e serpentina.
TO – 05	Magnesita branca acinzentada de grão fino/médio com talco.
TO – 06	Magnesita branca acinzentada de grão fino/médio com talco.
TO – 07	Magnesita cinza escuro de grão fino/médio com talco.
TO – 08	Magnesita cinza escuro de grão fino/médio com talco.
TO – 09	Magnesita branca acinzentada de grão fino/médio com talco e serpentina.
TO – 10	Magnesita escura de grão fino/médio com talco e serpentina.
TO – 11	Magnesita escura de grão fino/médio com talco e serpentina.
TO – 12	Magnesita cinza amarelada de grão fino/médio com talco.

Fonte: Elaborado pelo autor. Nota: informações adicionais podem ser buscadas no tópico 3.2 – Geologia Local, e nos Anexos.

Para evitar que as respostas espectrorradiométricas fossem influenciadas por características de superfície, tal como relevo e possíveis pequenas alterações intempéricas superficiais, as amostras foram cortadas em tabletes com dimensões em média de 10 cm x 5 cm x 2 cm (comprimento x largura x espessura), e tiveram sua superfície polida/uniformizada.

Algumas das amostras de mão foram selecionadas para a confecção de lâminas delgadas petrográficas.

O aspecto das amostras utilizadas pode ser visualizado nos Anexos (Anexo A ao Anexo I). As fotografias foram adquiridas utilizando-se de um suporte e iluminação fixos.

As descrições petrográficas podem ser visualizadas nos Anexos (Anexo J ao Anexo T).

4.2 Medidas Espectrorradiométricas

Para a aquisição dos dados espectrorradiométricos, utilizou-se do espectrorradiômetro de reflectância pontual FieldSpec Pro FR 3 (*Analytical Spectral Devices Inc.*), cuja a faixa de operação se estende entre os comprimentos de onda de 350 e 2500 nm, com resolução espectral de 1 nm.

Para impedir qualquer interferência oriunda de iluminação externa, o cômodo foi previamente completamente revestido de preto.

A aquisição dos dados foi realizada através do sensor de sonda de contato, que possui iluminação interna e coleta os dados em contato direto com a superfície da amostra (tabletes), reduzindo assim o ruído de aquisição e não necessitando testar diferentes geometrias de aquisição. A janela de aquisição da sonda de contato possui área de 1 cm², e o espectro resultante representa a média de 50 espectros coletados na mesma área. Para cada amostra, foram realizadas três medidas em pontos distintos, totalizando 150 espectros coletados por amostra.

Os espectros coletados foram convertidos para reflectância utilizando da amostra de referência spectralom, sendo realizado a calibração do equipamento a cada 20 minutos durante a coleta de dados. A assinatura espectral de cada amostra representa a média de todas as medidas realizadas na amostra em questão.

4.3 Análise e Processamento de Dados

As médias das três medidas de cada amostra foram realizadas utilizando-se da expressão matemática simples $(s1+s2+s3/3)$ no programa ENVI. 4.8.

Os espectros de reflectância foram então analisados utilizando-se dos programas Spectragryph 1.2, ENVI 4.8 e Excel, que possibilitaram a visualização dos dados, assim como a identificação das feições de absorção e dos padrões das curvas de reflectância.

Para acentuar as feições espectrais do material, assim como permitir uma comparação individual dos espectros, foi aplicado a técnica de remoção do contínuo, que em suma normaliza os dados espectrais por uma linha de base comum, utilizando-se da metodologia definida por Clark e Roush (1984), que consiste na divisão do espectro de fator de reflectância original pelo espectro do contínuo. Para isso, utilizou-se do programa ENVI 4.8.

Os dados normalizados foram então analisados utilizando-se também dos programas Spectragryph 1.2, ENVI 4.8 e Excel, que possibilitaram a determinação da posição, profundidade e largura das bandas de absorção.

A posição da feição de absorção é definida como o comprimento de onda em que a feição de absorção chega no valor mínimo da curva, enquanto que a profundidade da absorção é definida pela Equação 1 (VAN DER MEER, 2004).

$$P_a = 1 - P_{CR}$$

(Equação 1)

Onde P_a representa a profundidade da absorção;

P_{CR} representa o fator de reflectância com o contínuo removido na posição da feição.

A largura das feições de absorção foi obtida medindo-se a largura à meia altura das feições.

Para as feições não ancoradas nos pontos de locais máximos (pontos onde o espectro original toca a linha do contínuo, possuindo valor 1.0), ou que possuam seus valores enviesados por outras feições, foi realizado a remoção do contínuo local, abrangendo somente a área que compreende o início e o final da feição no espectro. Esse procedimento permite analisar a feição individualmente, sem influência do restante do núcleo de absorção (Clark *et al.*, 2003). Vale salientar que esses dados são para auxílio, permitindo uma melhor visualização e entendimento dos dados, e não deve ser analisada isoladamente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As assinaturas espectrais das amostras da mina Cabeça de Negro apresentaram uma reflectância média acima de 35%, com exceção da amostra CN – 05, que possui reflectância média de cerca de 20% (Figura 12). Com exceção da região entre 350 nm e 400 nm, os espectros das amostras se mostraram pouco ruidosos.

Nos comprimentos de ondas mais curtos, os espectros das amostras, com exceção da CN – 04, CN – 05, CN – 08 e CN – 09, são caracterizados por uma curva ascendente a partir de 350 nm, se tornando progressivamente menos inclinada até alcançar a forma de uma linha horizontal, que perdura até cerca de 750 nm (Figura 12). Após 750 nm, todas as amostras, com exceção da amostra CN – 05, apresentaram um comportamento espectral semelhante.

Os espectros possuem uma intensa e larga banda de absorção em torno de 1030 nm, com a feição perdurando até cerca de 1370 nm (Figura 12), sendo essa feição menos intensa na amostra CN – 09. A amostra CN – 05 não possui essa banda, apresentando somente uma leve absorção, quase imperceptível, em torno de 1030 nm.

Todas as amostras possuem uma banda de absorção centrada em 1390 nm, sendo bem delimitado e consistente em todos os espectros (Figura 12).

As amostras CN – 01, CN – 02, CN – 03, CN – 08 e CN – 09 apresentam uma sutil feição de absorção em 1440 nm, estando esta feição presente menos intensamente no restante das amostras (Figura 12). É possível observar que nos espectros em que a banda de absorção de 1390 nm possui menor intensidade, a feição em 1440 nm se torna, também, menos intensa.

Pequena absorção em torno de 1730 nm. Esta banda está mais bem pronunciada nos espectros das amostras CN – 01, CN – 04, CN – 06 e CN – 08, estando ausente ou pouco perceptível nas demais amostras (Figura 12).

Banda de absorção em 1850 nm (Figura 12), estando deslocada para 1860 nm no espectro da amostra CN – 05. Essa banda de absorção possui a forma de um vale, com a borda da banda voltada para os menores comprimentos de onda possuindo formato de rampa.

Feição de absorção intensa em 1940 nm em todas as bandas com exceção da CN – 05, onde a absorção está deslocada para 1980 nm (Figura 12). É possível notar, também, que essa banda de absorção na amostra CN-05 possui o formato de rampa, tal como descrito para a banda de absorção em 1850 nm.

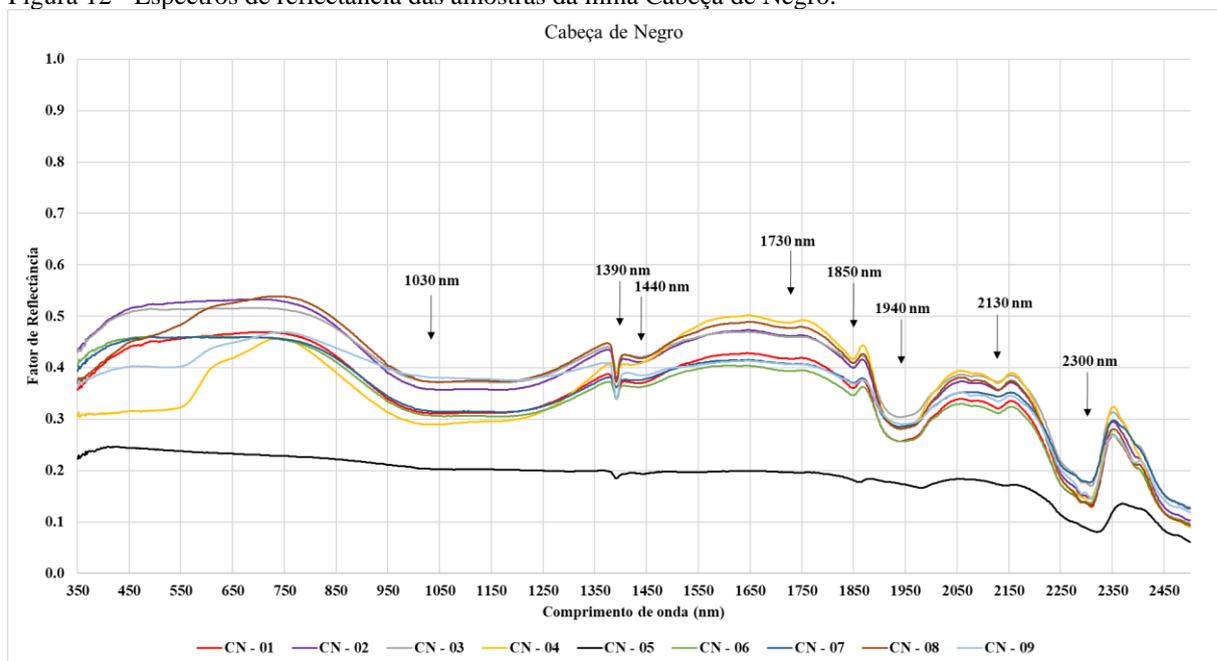
Pequena absorção em 2070 nm, particularmente visível nas amostras CN – 08 e CN – 09, estando ausente ou pouco expressiva nas outras amostras (Figura 12).

Banda de absorção em 2130 nm, com exceção da amostra CN – 05, onde a absorção está deslocada para 2140 nm (Figura 12). Essa banda também apresenta, de maneira mais sutil, o formato de rampa citado.

Intensa banda de absorção em 2310 nm, com exceção da amostra CN – 05, onde a banda de absorção está deslocada para 2320 nm (Figura 12). Em alguns espectros, é possível notar que a banda apresenta dupla feição, bem acentuada.

As amostras CN – 08 e CN – 09 possuem pequenas absorções em 2080 nm e 2390 nm, estando estas feições ausentes nas demais amostras da mina (Figura 12).

Figura 12 - Espectros de reflectância das amostras da mina Cabeça de Negro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os espectros das amostras da mina Riacho Fundo apresentaram reflectância média variada, com a amostra RF – 03 possuindo a maior média de reflectância, em torno de 35% (Figura 13). Assim como as amostras da mina Cabeça de Negro, os espectros são pouco ruidosos, estando os ruídos existentes concentrados nos menores comprimentos de onda.

Todas as amostras da mina Riacho Fundo apresentaram forte banda de absorção em torno de 1040 nm, variando somente em intensidade (Figura 13)

A banda de absorção centrada em 1390 nm é bem marcada, com exceção das amostras RF – 06, onde a feição está ausente (Figura 13).

A feição em 1440 nm existente em algumas amostras da mina Cabeça de Negro, não se manifesta nas amostras da mina Riacho fundo, havendo apenas, na região, a forma de

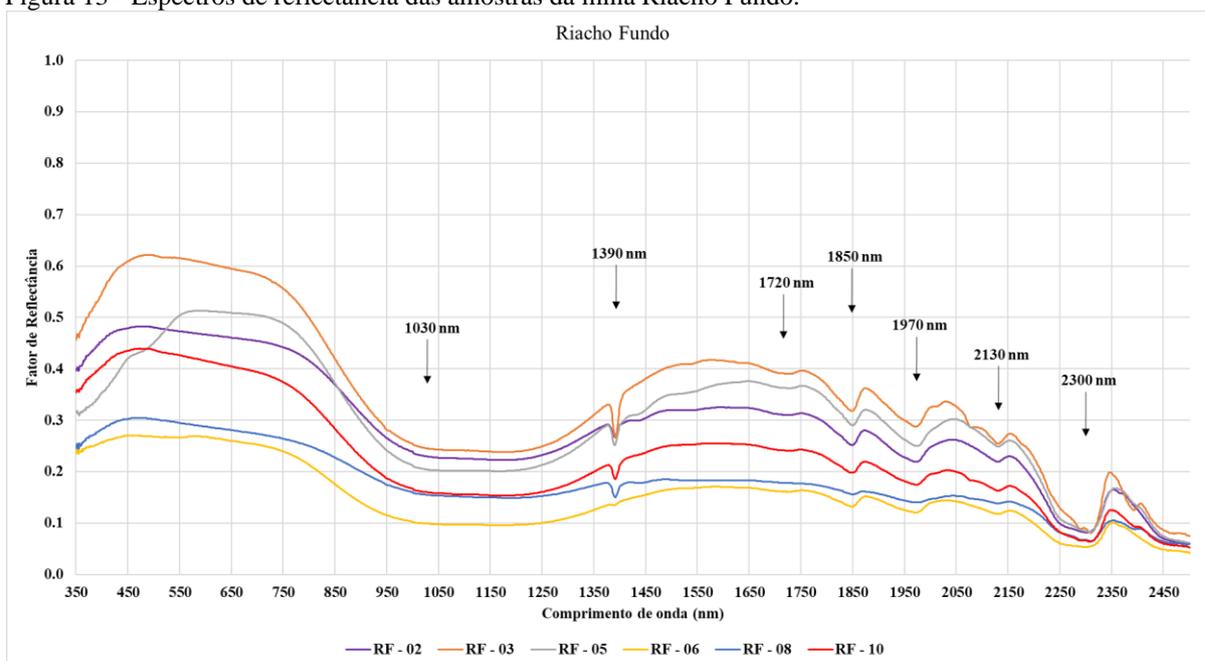
um ‘ombro’ de reflectância constante nas amostras RF – 02, RF – 05 e RF – 08, estando totalmente ausente nas demais amostras (Figura 13).

As amostras, com exceção da RF – 08, possuem uma fraca feição de absorção em torno de 1720 nm, particularmente bem marcada nos espectros das amostras RF – 02, RF – 03 e RF – 05 (Figura 13).

Bandas de absorção bem marcadas em 1850 nm, 1970 nm e 2130 nm (Figura 13). Essas bandas de absorção possuem a forma de um vale, com a borda da banda de absorção voltada para os menores comprimentos de onda possuindo um formato de rampa.

Os espectros das amostras RF – 03 e RF – 10 possuem pequenas absorções localizadas em 2080 nm e em 2390 nm, sendo elas particularmente evidentes na amostra RF – 03. Essas feições estão ausentes nos outros espectros da mina (Figura 13).

Figura 13 - Espectros de reflectância das amostras da mina Riacho Fundo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os espectros das amostras da mina do Torto apresentam, em geral, reflectância média menor que 25%, com exceção das amostras TO – 06 e TO – 09, que possuem reflectância média de 30% e 50% respectivamente (Figura 14).

Com exceção da amostra TO – 10, todos os espectros das amostras possuem a absorção em torno de 1030 nm, sendo ela menos intensa nas amostras TO – 07 e TO – 11, que possuem também as menores taxas de reflectância geral (Figura 14).

A banda de absorção em 1390 nm se manifesta menos intensamente em comparação com essa banda nas minas do Negro e Riacho Fundo, estando esta feição ausente nas amostras TO – 06, TO – 07, TO – 11, e fracamente presente nas amostras TO – 04, TO – 08 (Figura 14).

A amostra TO – 05 foi a única que apresentou, de forma bastante sutil, a feição de absorção em 1720 nm, estando ela presente menos perceptivelmente também nas amostras TO – 02 e TO – 09 (Figura 14).

A banda de absorção em 1850 nm não se manifesta somente nas amostras TO – 10 e TO – 11, estando presente muito fracamente nas amostras TO – 07 e TO – 12 (Figura 14). A banda apresenta a característica de rampa já citada anteriormente.

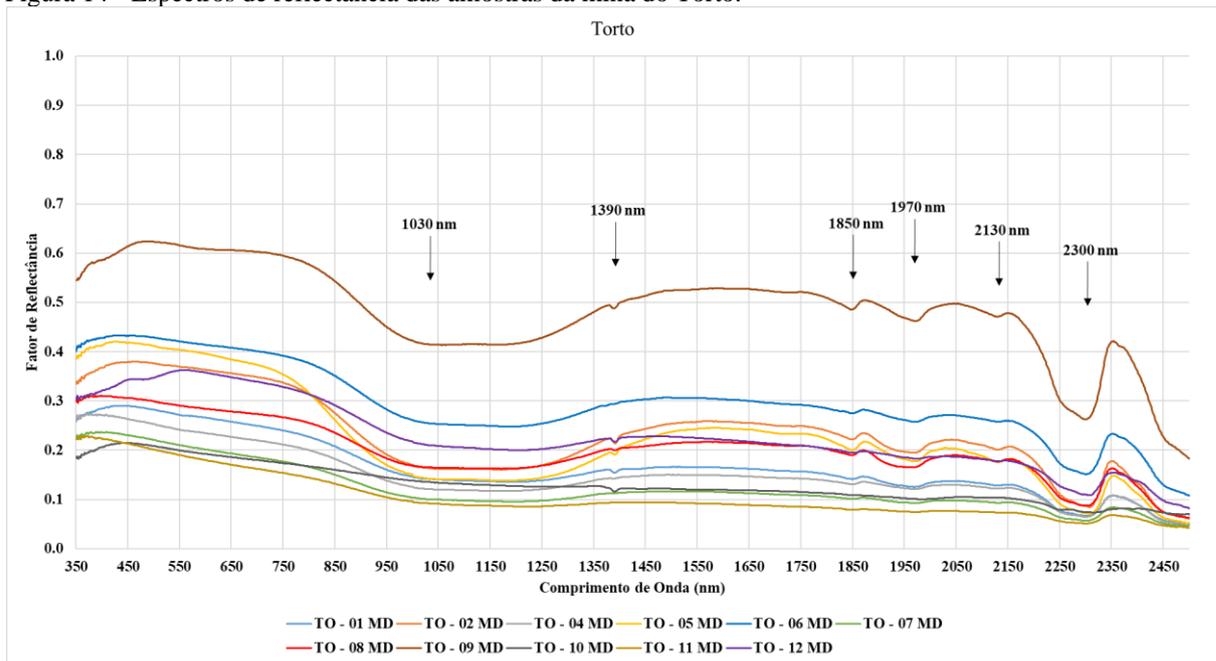
A banda de absorção em 1970 nm está ausente somente nas amostras TO – 10, TO – 11 e TO – 12, estando fracamente presente na amostra TO – 07 (Figura 14). Essa banda também apresenta a característica de rampa.

Os espectros possuem uma fraca banda e absorção em 2130 nm, sendo particularmente evidente nos espectros das amostras TO – 02, TO-08 e TO – 09 (Figura 14). Os demais espectros manifestam essa banda com menor intensidade, com exceção das amostras TO – 10, TO – 11 e TO – 12, que carecem totalmente dessa banda de absorção.

Todos os espectros da mina possuem a banda de absorção em 2300 nm, variando somente em intensidade (Figura 14).

De maneira geral, com exceção da amostra da amostra TO – 02, todos os espectros possuem feições espectrais menos intensas que as presentes nas minas Cabeça de Negro e Riacho Fundo, característica particularmente evidente nas amostras TO – 07, TO – 10, TO – 11 e TO – 12.

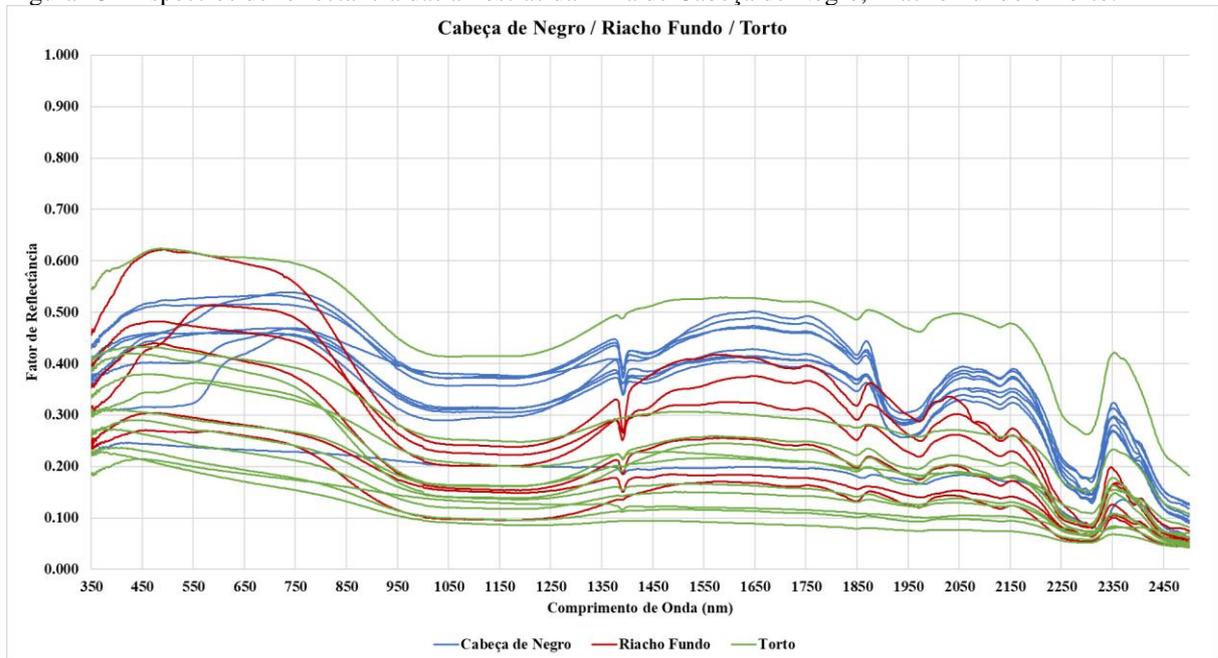
Figura 14 - Espectros de reflectância das amostras da mina do Torto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 15 contém todos os espectros de todas as amostras utilizadas no estudo.

Figura 15 - Espectros de reflectância das amostras da mina de Cabeça de Negro, Riacho Fundo e Torto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os espectros apresentados tiveram então o contínuo removido (técnica que consiste na remoção das feições contínuas dos espectros), sendo o contínuo definido como a função

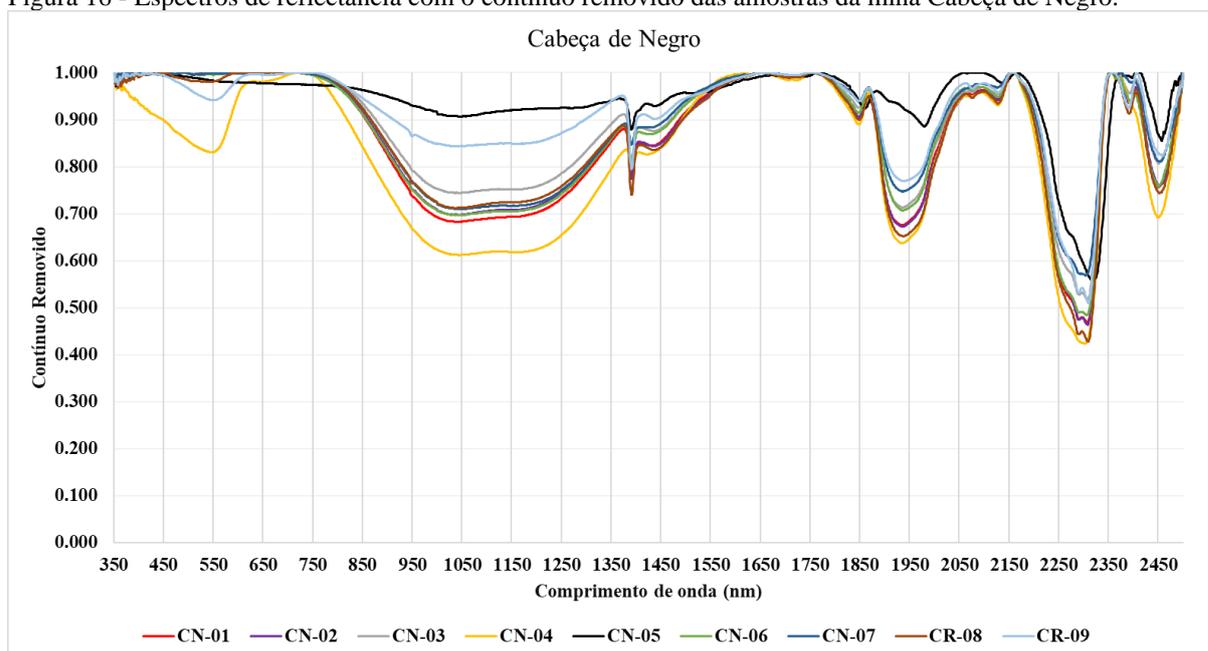
matemática que forma uma superfície convexa (*convex-hull*) que melhor se ajusta à parte superior dos espectros de reflectância (CLARK e ROUSH, 1984).

Têm como objetivo, portanto, a normalização dos dados por uma linha de base comum, de valor 1.0, com os pontos dos espectros sendo ajustados entre o contínuo e os espectros menores que 1.0, região onde ocorreu absorção (CLARK e ROUSH, 1984).

Com a remoção do contínuo, se torna possível uma melhor determinação das características das feições de absorção, e permite também a comparação de diferentes espectros (VAN DER MEER, 2000).

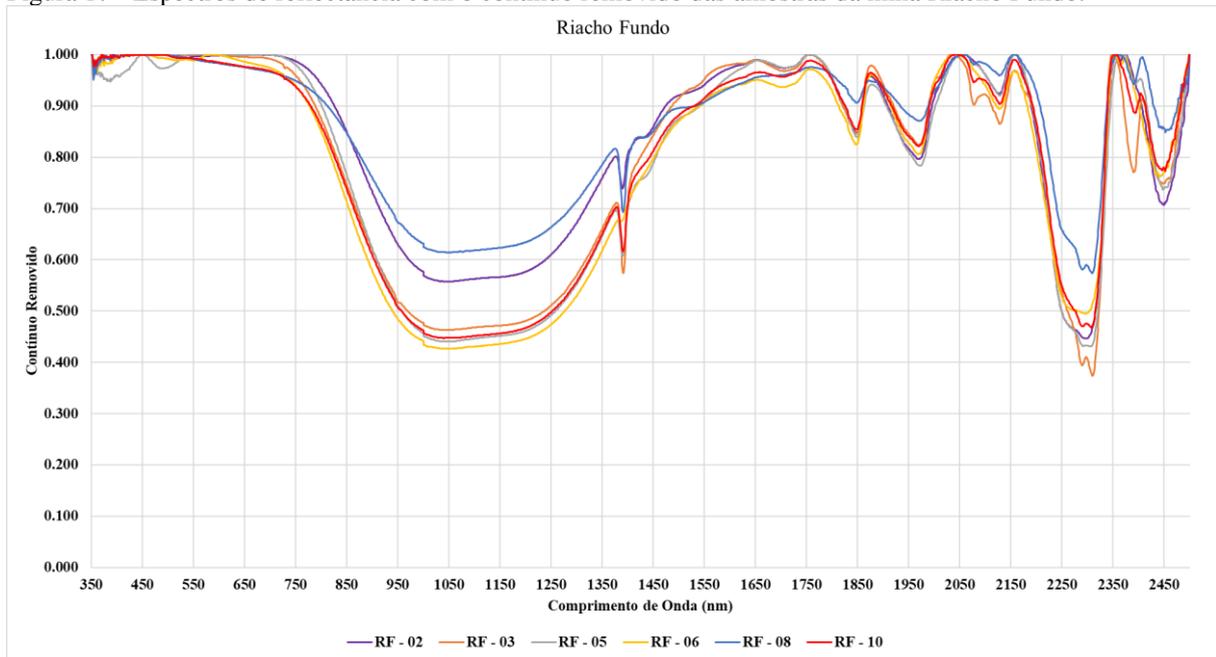
Os espectros de reflectância com o contínuo removido sempre terão o início e o final com o valor máximo 1.0. Os espectros de reflectância com o contínuo removido das amostras das minas de Cabeça de Negro, Riacho Fundo e Torto podem ser visualizadas na Figura 16, Figura 17 e Figura 18, respectivamente. A Figura 19 contém todos os espectros utilizados no estudo.

Figura 16 - Espectros de reflectância com o contínuo removido das amostras da mina Cabeça de Negro.



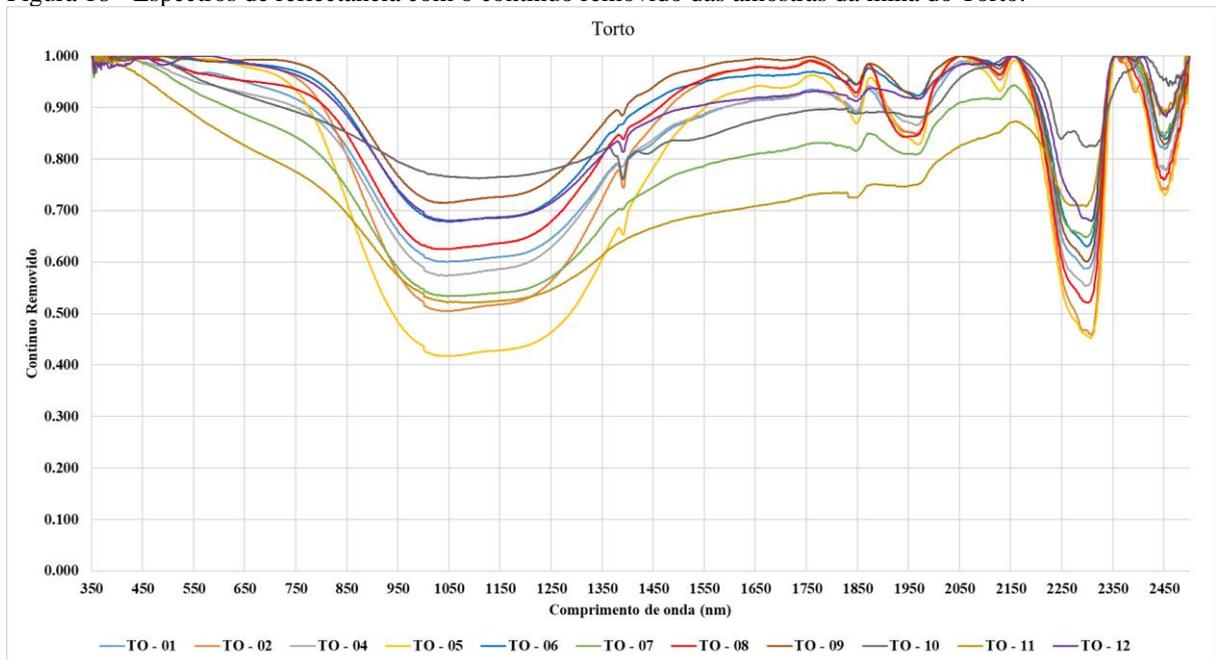
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17 - Espectros de reflectância com o contínuo removido das amostras da mina Riacho Fundo.



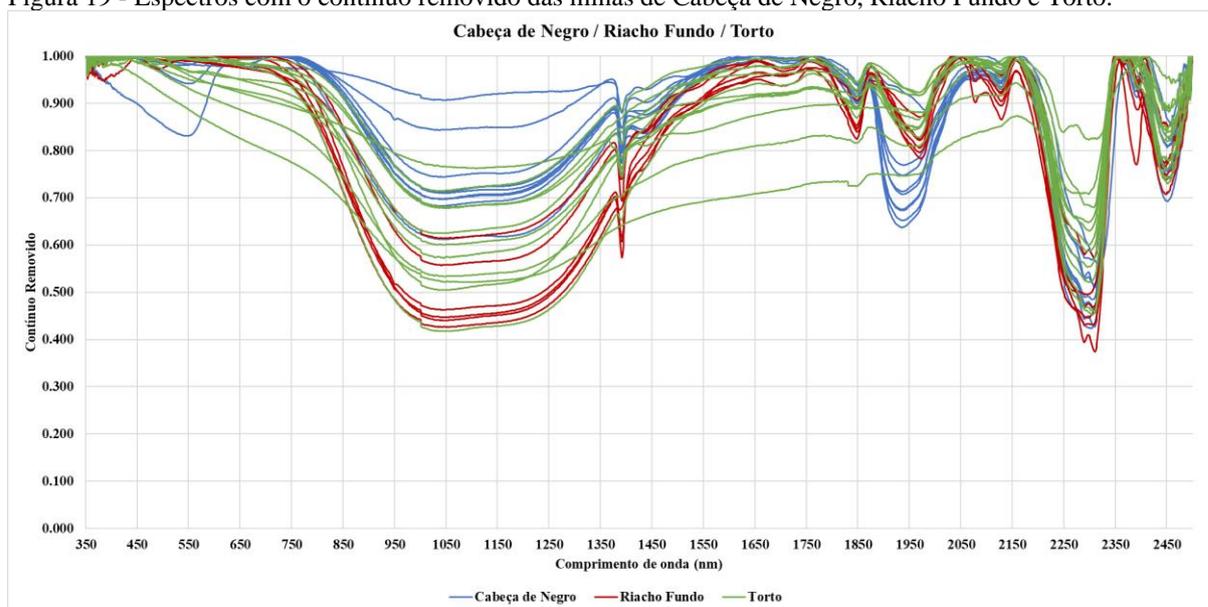
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 18 - Espectros de reflectância com o contínuo removido das amostras da mina do Torto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 - Espectros com o contínuo removido das minas de Cabeça de Negro, Riacho Fundo e Torto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos espectros analisados, sete bandas de absorção se destacam por sua frequência e/ou intensidade, e configuram a assinatura espectral do minério magnésítico estudado (Figura 6). Essas bandas foram enumeradas em ordem crescente, levando em consideração somente a posição em que ocorrem no espectro eletromagnético, começando a partir dos menores comprimentos de onda.

Tabela 6 - Bandas de absorção características do minério magnésítico.

	Posição observada (nm)	Largura média (nm)
Banda 1	1029 – 1063	498
Banda 2	1388 – 1391	11
Banda 3	1698 – 1707	54
Banda 4	1846 – 1860	35
Banda 5	1935 – 1979	84
Banda 6	2125 – 2139	29
Banda 7	2294 – 2319	105

Fonte: Elaborado pelo autor. Nota: A posição observada se refere ao intervalo em que o local de absorção mínima da feição esteve presente.

As feições espectrais dos carbonatos nos menores comprimentos de onda (350 nm a 600 nm) têm sido atribuídos às transições eletrônicas (efeito do campo cristalino e/ou transferência de carga) dos metais de transição, mais comumente o Fe^{2+} e Mn^{2+} (HUNT e

SALISBURY, 1971; HUNT, 1977; GAFFEY, 1985; GAFFEY, 1987; VAN DER MEER, 1995), sendo que o limite de detecção para estes dois íons em amostras está em torno de 0.1 % para o Mn, e 0.01 % para o Fe (GAFFEY, 1985).

O decréscimo pronunciado da reflectância na região do VIS ao UV, observada na maioria dos espectros apresentados aqui (Figura 15), é uma das feições espectrais mais comumente observadas em diversos materiais (HUNT, 1977), sendo atribuída à uma forte banda de absorção do Fe^{3+} (HUNT, 1977; VAN DER MEER, 1995). A intensidade do decréscimo varia para cada amostra, sendo notadamente menos intensa nas amostras da Mina do Torto, que, entretanto, possuem também a menor média de reflectância geral. Essa feição é suprimida quando se aplica a técnica de remoção do contínuo, como pode ser observado na Figura 19.

É possível notar que nos espectros sem remoção do contínuo, chamados também de espectros brutos, algumas amostras se destacam nos menores comprimentos de onda (350 nm a 600 nm) por possuírem um comportamento diferente do padrão (Figura 15). Os espectros das amostras CN-04 e CN-09 são caracterizadas por serem uma linha horizontal ou levemente inclinada, até 550 nm, onde há um aumento súbito da reflectância. Uma das amostras de carbonato utilizadas por Van der Meer (1995) obteve uma resposta espectral semelhante para essa região do espectro, não havendo, entretanto, uma discussão sobre o que causou essa feição, havendo apenas a indicação da maior quantidade de SiO_2 da amostra, e da presença de um material opaco visto sobre o microscópico petrográfico, que segundo o autor poderia ser constituído de material orgânico. Nas lâminas petrográficas das amostras CN-04 e CN-09 também é possível observar materiais opacos semelhantes preenchendo fraturas, e nas amostras de mão as amostras também se destacam por possuírem uma coloração avermelhada/acinzentada (Anexos B, C, K e M). A resposta espectral apresentada nessa região (350 nm a 600 nm) pelas amostras CN – 04 e CN – 09 se assemelham aos espectros dos óxidos e hidróxidos de ferro, como por exemplo a da hematita e goethita (MORRIS *et al.*, 1985), levantando a hipótese dos materiais opacos serem, pelo menos em parte, óxido/hidróxido de ferro, sendo que a presença ocorrência de óxidos/hidróxidos em carbonatos na região já foram indicadas por Parente *et al.* (1998).

É atribuído ao íon ferroso, também, pequenas bandas de absorção centradas em 550 nm, 510 nm, 450 nm e 430 nm, enquanto o íon férrico produziria pequenas bandas em 870 nm, 700 nm e 400 nm (HUNT, SALISBURY, e LENHOFF, 1971). Essas bandas de absorção podem ser responsáveis pelo comportamento da curva espectral nos pequenos comprimentos de onda (350 nm a 600 nm) das amostras CN – 08, RF – 05, TO – 09 e TO – 12. Espectros com

comportamentos semelhantes nessa região foram obtidos por Van der Meer (1995), ao adicionar diferentes quantidades de goethita ($\text{Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$) em uma mistura com calcita.

A feição de absorção em torno de 1000 nm – 1300 nm, denominada Banda 1 (Tabela 6), é atribuída a presença de Fe^{2+} , que facilmente substitui os íons de Mg, Zn e Mn nos carbonatos (GAFFEY, 1985; GAFFEY, 1986; GAFFEY, 1987; VAN DER MEER, 1995), sendo uma das feições de absorção mais intensas e largas entre todos os minerais de rocha (MENESES, ALMEIDA, e BAPTISTA, 2019). Os trabalhos de Van der Meer (1995) e Gaffey (1985, 1986 e 1987) demonstraram que essa feição difere em forma, comprimento e intensidade dependendo da quantidade de Fe presente na amostra, além do tipo, posição e simetria dos ligantes ao redor do Fe. Os autores observaram que a banda se torna mais intensa à medida que a quantidade de Fe^{2+} aumenta, obtendo valor máximo no mineral siderita, com composição química FeCO_3 , e que em magnesitas, a banda está centrada em torno de 1100 nm, enquanto que nas calcitas a banda está centrada em torno de 1300 nm, com os minerais dolomita e rodocrosita possuindo valores intermediários, e a siderita tendo valor semelhante ao da magnesita.

Essa banda é menos intensa e larga nos espectros da mina Cabeça de Negro (Figura 19 e Tabela 7), com valores médios de profundidade e largura de 0.266 e 453 nm, respectivamente. Nesses espectros, a banda é particularmente pouco intensa nas amostras CN – 05 e CN – 09, condizente com os espectros brutos, onde a banda é indetectável no espectro da amostra CN – 05, e menos intensa no espectro da amostra CN – 09 (Figura 12). Nos espectros normalizados, esses dois espectros contrastam com os outros espectros da mina, que por sua vez, com exceção da amostra CN – 04, que se destaca por possuir a banda mais larga e intensa entre os espectros da mina (Figura 16), possuem valores de profundidade e largura próximos entre si, com valores médios respectivos de 0.293 e 449 nm.

A Banda 1 nas amostras da mina do Torto possui valores médios de profundidade e largura de 0.399 e 519 nm, respectivamente, ocupando uma posição intermediária entre as amostras das minas Cabeça de Negro e Riacho Fundo (Figura 18 e Tabela 7). Entretanto, diferentemente das outras duas minas, que podem ser segregados em grupos com valores similares, os espectros da mina do Torto apresentam uma grande disparidade entre os espectros analisados, tanto nas medidas de profundidade quanto de largura (Tabela 7).

Nos espectros da mina Riacho Fundo, a Banda 1 é, em média, mais profunda e larga do que as das outras minas (Figura 19), possuindo valores médios de profundidade e largura de 0.508 e 526 nm, respectivamente (Tabela 7). Com exceção das amostras RF – 02 e RF – 08,

que possuem profundidade e largura menores, as demais possuem valores próximos entre si, com valores médios de profundidade e largura de 0.556 e 546 nm, respectivamente.

Tabela 7 - Tabela contendo os dados referentes a absorção em torno de 1030 – 1060 nm (Banda 1) nos carbonatos das minas de Cabeça de Negro, Riacho Fundo e Torto.

Amostra	Posição (nm)	Profundidade	Largura (nm)
CN - 01	1044	0.317	451
CN - 02	1044	0.303	460
CN - 03	1045	0.256	438
CN - 04	1045	0.388	487
CN - 05	1048	0.093	Inconclusivo
CN - 06	1043	0.303	452
CN - 07	1046	0.290	449
CN - 08	1037	0.288	446
CN - 09	1037	0.157	442
RF - 02	1041	0.443	480
RF - 03	1048	0.537	546
RF - 05	1051	0.560	541
RF - 06	1042	0.574	552
RF - 08	1047	0.386	492
RF - 10	1040	0.553	547
TO - 01	1033	0.399	538
TO - 02	1044	0.495	493
TO - 04	1046	0.427	513
TO - 05	1045	0.583	554
TO - 06	1056	0.322	470
TO - 07	1048	0.467	652
TO - 08	1029	0.375	483
TO - 09	1041	0.285	453
TO - 10	1108	0.238	Inconclusivo
TO - 11	1091	0.479	Inconclusivo
TO - 12	1063	0.320	517

Fonte: Elaborado pelo autor. Nota: Devido a forma geral do espectro, não foi possível determinar com precisão o início e/ou final da feição nos espectros das amostras CN – 05, TO – 10 e TO – 11, e as tentativas de se obter a largura resultaram em dados discrepantes se comparadas com as demais.

A sutil absorção observada em 1730 nm no espectro bruto de algumas das amostras, particularmente evidente nos espectros da mina Riacho Fundo, ocorre em região similar à denominada Banda 7 do trabalho de Gaffey (1987). Essa banda de absorção ocorre no *wing* da intensa banda de absorção do Fe^{2+} , não podendo ser isolada dessa banda ferrosa.

Ao se aplicar a remoção do contínuo, têm-se uma pequena mudança no local determinado como o ponto mínimo da banda, que passa a ficar entre o intervalo de 1698 nm e 1707 nm, correspondendo a denominada Banda 3 (Tabela 6). A remoção do contínuo também realçou e permitiu a detecção da banda em alguns espectros onde antes era pouco perceptível ou dada como inexistente.

Nos espectros com a remoção do contínuo de todo o espectro, a posição da banda é relativamente constante, com a exceção da amostra CN – 05, onde a banda foi deslocada para os maiores comprimentos de onda (Tabela 8).

Nos espectros da mina Cabeça de Negro, a Banda 3 perfaz um núcleo de absorção, o que significa que a feição começa e termina com o valor 1.0, diferentemente do que ocorre com a banda nos espectros das minas Riacho Fundo e Torto. Isso ocorre devido a forma do espectro bruto, e de como ela se encaixa na linha de base comum (*convex-hull*) utilizada para a remoção do contínuo, podendo levar a falsas impressões de intensidade da banda em alguns espectros, como ocorre nos espectros das amostras RF – 06 e TO – 05.

Então, para a normalização dos dados da banda, foi realizado a remoção do contínuo localmente, utilizando-se dos limites iniciais e finais da feição. Os dados referentes à remoção do contínuo localmente estão contidos na coluna “Profundidade Local” da Tabela 8, enquanto os dados referentes a remoção do contínuo de todo o espectro estão contidos na coluna “Profundidade”.

Tabela 8 - Tabela contendo os dados referentes a absorção em torno de 1710 nm (Banda 3) nos carbonatos das minas de Cabeça de Negro, Riacho Fundo e Torto.

Amostra	Posição (nm)	Profundidade	Profundidade Local	Largura (nm)
CN - 01	1706	0.011	0.011	57
CN - 02	1705	0.009	0.009	55
CN - 03	1704	0.007	0.007	49
CN - 04	1706	0.016	0.016	58
CN - 05	1738	0.007	0.007	Inconclusivo
CN - 06	1706	0.010	0.010	57
CN - 07	1706	0.006	0.006	60

CN - 08	1709	0.011	0.011	83
CN - 09	1710	0.005	0.005	51
RF - 02	1707	0.027	0.022	49
RF - 03	1706	0.032	0.027	55
RF - 05	1707	0.026	0.021	48
RF - 06	1701	0.063	0.026	51
RF - 08	1709		0.006	Inconclusivo
RF - 10	1706	0.043	0.021	42
TO - 01	1706		0.006	Inconclusivo
TO - 02	1699	0.024	0.010	Inconclusivo
TO - 04	1712		0.007	Inconclusivo
TO - 05	1698	0.062	0.015	41
TO - 06	1707		0.004	Inconclusivo
TO - 07	1710		0.005	Inconclusivo
TO - 08	1706		0.009	Inconclusivo
TO - 09	1706		0.005	Inconclusivo
TO - 10				
TO - 11	1710		0.004	Inconclusivo
TO - 12	1710		0.003	Inconclusivo

Fonte: Elaborado pelo autor. Nota: Devido a forma e/ou intensidade da feição, não foi possível ou se optou por não mensurar a largura em alguns dos espectros.

De acordo com os dados obtidos pela remoção do contínuo de todo o espectro (Tabela 8), a Banda 3 da mina Cabeça de Negro tem uma profundidade média de 0.009, e uma largura média de 59 nm. Nos espectros da mina Riacho Fundo, a Banda 3 possui uma profundidade média de 0.038, e uma largura média de 49 nm, estando ausente ou pouco perceptível na amostra RF – 08. Nos espectros da mina do Torto, a Banda 3 está presente somente nos espectros das amostras TO – 02 e TO – 05.

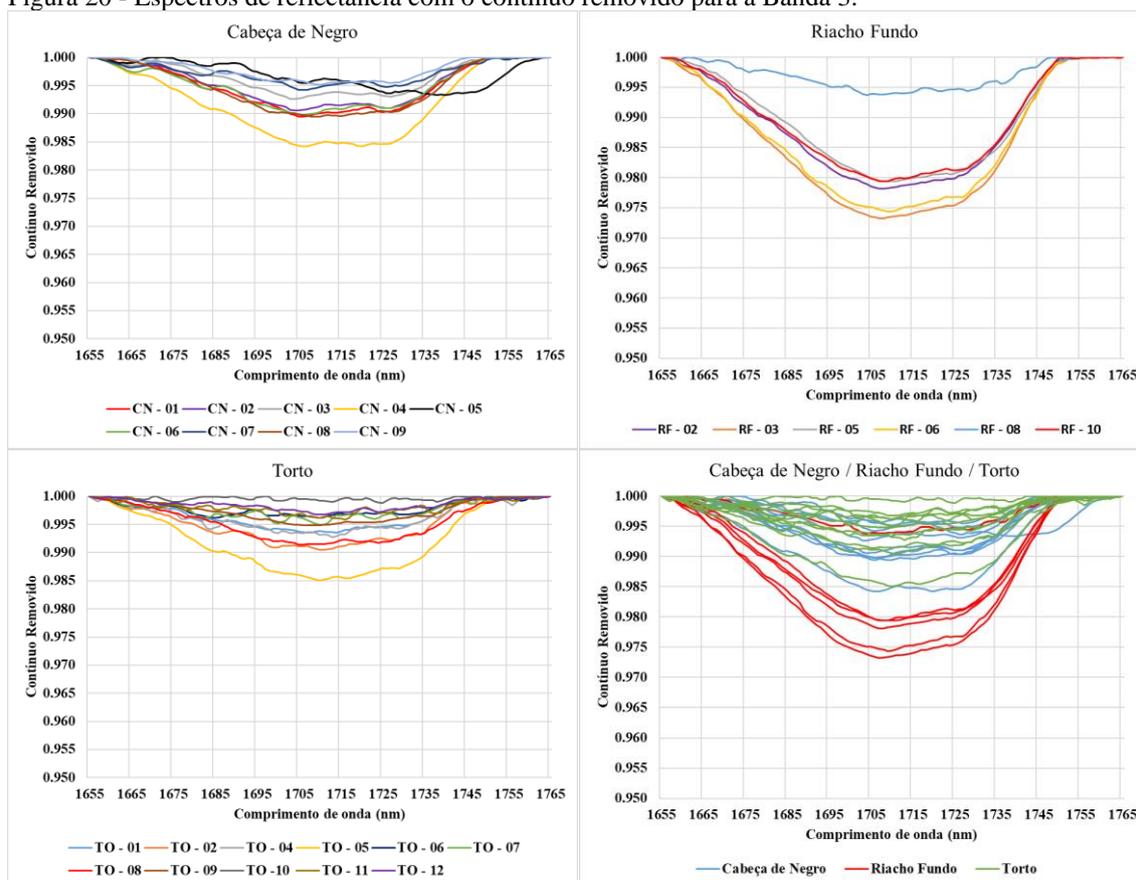
Com a remoção do contínuo local (Figura 20), não houve qualquer alteração dos valores previamente observados dos espectros da mina Cabeça de Negro (referente aos dados da remoção do contínuo de todo o espectro), pois como citado anteriormente, a banda nesses espectros já constituía um núcleo de absorção.

Nos espectros da mina Riacho Fundo com o contínuo removido localmente (Figura 20), foi possível observar a banda no espectro RF – 08, embora seja pouco intensa

(profundidade de 0.006) se comparada com os demais espectros da mina, que possuem profundidade média de 0.023.

Com a remoção do contínuo localmente nos espectros da mina do Torto, foi possível notar a presença da Banda 3 em quase todos os espectros, excetuando-se o da amostra TO – 10 (Figura 20). A banda, porém, é em geral muito pouco intensa, com valor de 0.005 ou menores. No geral, a banda apresentou uma profundidade média de 0.007.

Figura 20 - Espectros de reflectância com o contínuo removido para a Banda 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As demais feições de absorção observadas nos espectros de reflectância das amostras, são devido aos *overtones* e *combination tones* das vibrações fundamentais dos grupos CO_3^{2-} , OH^- e H_2O , ou aos *combination bands*, particularmente o $\text{Mg} - \text{OH}$.

A fina banda de absorção centrada em 1390 nm, denominada Banda 2 (Tabela 6), está relacionado com a presença de OH^- , que possui o primeiro *overtone* centrado em 1400 nm, ou à presença de água, cujo o *combination tone* $\nu_1 + \nu_3$ se manifesta em 1380 nm (HUNT, 1977; CLARK *et al.*, 1990). Clark *et al.* (1990) demonstraram haver uma fina e intensa banda de absorção relacionada à ligação $\text{Mg} - \text{OH}$ em 1391 nm, podendo ser uma das feições

diagnósticas do talco, mineral bastante presente nas amostras de magnesita deste presente estudo.

Apesar de ter sido citado especificamente a relação do talco com a hidroxila, há diversos outros minerais que possuem a mesma feição devido a ligação Mg – OH em 1390 nm, como a flogopita (HUNT, 1977), a clorita, tremolita, a actinolita (CLARK *et al.*, 1990), e os minerais do grupo da serpentina (KING e CLARK, 1989). A pequena mudança da feição de 1400 nm para 1390 nm, pode, assim como indicado por CLARK *et al.* (1990), ser uma questão de resolução espectral ou calibração do instrumento.

A Banda 2 é mais intensa nos espectros das minas Cabeça de Negro e Riacho Fundo do que nos espectros da mina do Torto, como pode ser visualizado nos espectros brutos (Figura 15) e nos espectros normalizados (Figura 19).

De acordo com os dados obtidos pela remoção do contínuo de todo o espectro (Tabela 9), essa banda nos espectros da mina Cabeça de Negro têm uma profundidade média de 0.196. A largura da banda é relativamente constante, com valor médio de 12 nm.

Nos espectros da mina Riacho Fundo, a banda possui uma profundidade média de 0.349, sendo mais intensa do que ocorre nas outras minas, e possuindo uma largura que varia de 11 m a 12 nm (Tabela 9). Quanto a posição da banda, observa-se por vezes um pequeno desvio para os menores comprimentos de onda, como ocorre nas amostras RF – 02, RF – 05 e RF – 06.

Nos espectros da mina do Torto, a Banda 2 está ausente nas amostras TO – 06 e TO – 11, e é muito pouco desenvolvida nas amostras TO – 04 e TO – 07. Em média, a banda possui valores médios de profundidade e largura de 0.220 e 9 nm, respectivamente (Tabela 9). Assim como ocorre nos espectros da mina Riacho Fundo, os espectros das amostras do Torto também apresentam por vezes uma pequena mudança de posição para menores comprimentos de onda.

Tabela 9 - Tabela contendo os dados referentes a absorção em torno de 1390 nm (Banda 2) nos carbonatos das minas de Cabeça de Negro, Riacho Fundo e Torto.

Amostra	Posição (nm)	Profundidade	Profundidade Local	Largura (nm)
CN - 01	1391	0.226	0.108	11
CN - 02	1391	0.225	0.111	12
CN - 03	1391	0.192	0.102	11
CN - 04	1391	0.198	0.039	10
CN - 05	1391	0.120	0.064	14
CN - 06	1391	0.189	0.081	11

CN - 07	1391	0.152	0.046	11
CN - 08	1391	0.260	0.149	13
CN - 09	1391	0.205	0.151	13
RF - 02	1390	0.261	0.089	11
RF - 03	1391	0.426	0.223	11
RF - 05	1390	0.393	0.151	12
RF - 06	1388	0.325	0.028	Inconclusivo
RF - 08	1391	0.307	0.159	12
RF - 10	1391	0.384	0.149	11
TO - 01	1390	0.236	0.041	10
TO - 02	1391	0.256	0.062	9
TO - 04	1388	0.216	0.014	6
TO - 05	1390	0.346	0.044	7
TO - 06	1390		0.005	Inconclusivo
TO - 07	1390		0.009	Inconclusivo
TO - 08	1391	0.161	0.018	7
TO - 09	1390	0.116	0.020	8
TO - 10	1390	0.240	0.071	14
TO - 11				
TO - 12	1391	0.187	0.035	10

Fonte: Elaborado pelo autor. Nota: Devido a forma e/ou intensidade da feição, não foi possível ou se optou por não mensurar a largura em alguns dos espectros.

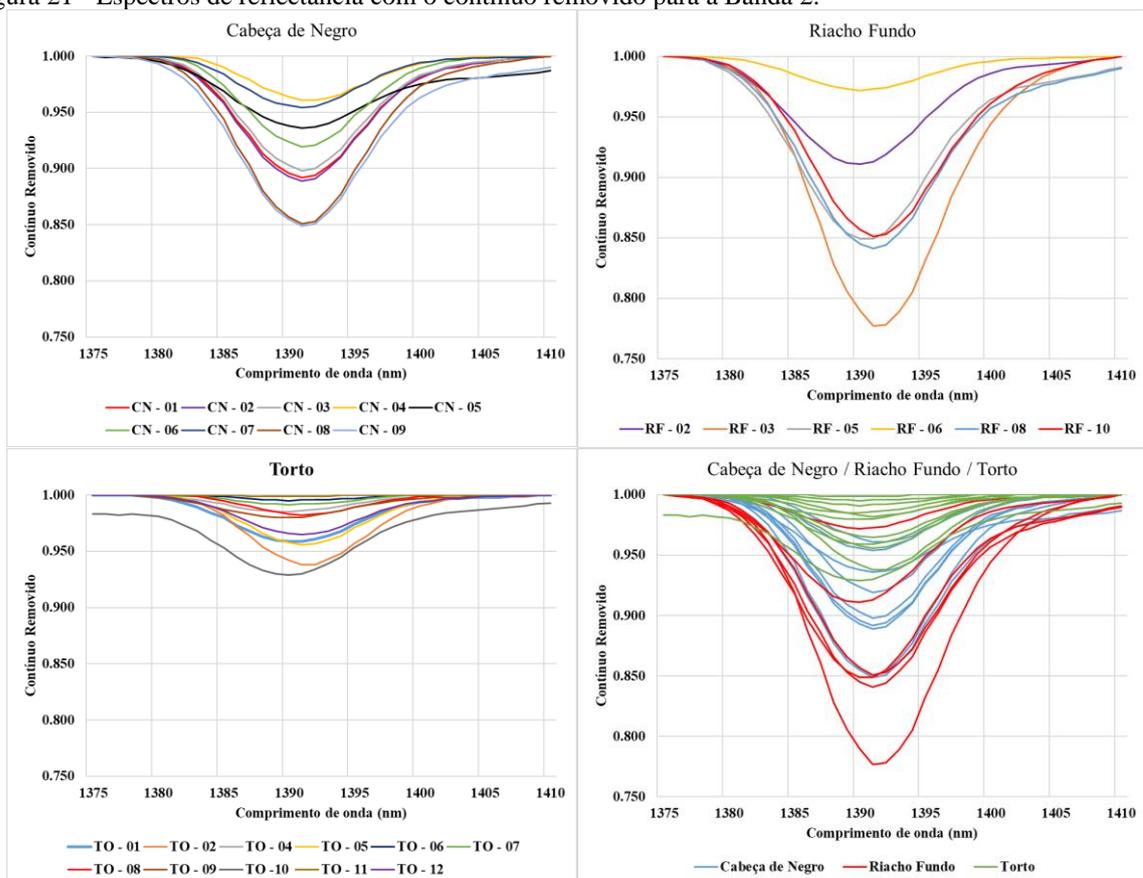
Porém, observando os espectros (Figura 19), nota-se que essa banda é fortemente influenciada pela Banda 1, estando contida dentro desta. Conseqüentemente, os valores apresentados na coluna “Profundidade” da Tabela 9, referentes aos valores obtidos ao remover o contínuo de todo o espectro, também são influenciados/enviesados pela intensidade da Banda 1, e induzem também a uma falsa impressão de intensidade, sendo esse efeito particularmente evidente quando se observa, por exemplo, a Banda 2 na amostra RF – 06, ou nas amostras da mina do Torto, que, apesar de possuírem valores de profundidade em geral maiores que 0.250, não são bandas intensas e/ou bem marcadas, contrastando por exemplo com a Banda 2 nos espectros das amostras da mina Cabeça de Negro, que possuem profundidade em geral menores ou por volta de 0.200.

Para minimizar esse feito, também foi aplicado a remoção do contínuo somente na região que corresponde a área da Banda 2. Os novos valores obtidos de profundidade estão contidos na coluna denominada “Profundidade Local”. Os espectros gerados podem ser visualizados na Figura 21.

Os dados referentes à remoção do contínuo local evidenciam o enviesamento mencionado. Diferentemente do que os valores anteriormente indicavam (coluna ‘Profundidade’, Tabela 9), as amostras da mina do Torto possuem, em média, a Banda 2 menos intensa que as das outras minas analisadas, tendo uma profundidade média de 0.032, sendo particularmente pouco intensas nas amostras TO – 06 e TO – 07, sendo a TO – 06 anteriormente indetectável no espectro com a remoção do contínuo ao longo de todo o espectro (Figura 18).

Na mina Cabeça de Negro, a Banda 2 possui uma profundidade média de 0.095, enquanto nas amostras da mina Riacho Fundo, a profundidade média é de 0.133, sendo particularmente intensa na amostra RF – 03, e pouco intensa na amostra RF – 06.

Figura 21 - Espectros de reflectância com o contínuo removido para a Banda 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A intensidade da banda de absorção não parece estar relacionada somente com a quantidade de talco e/ou clorita e/ou serpentina da amostra, visto que algumas amostras com

pouco talco (como por exemplo a amostra RF-03) possuem a feição de absorção mais intensa que amostras com quantidade superior desses minerais (como por exemplo a amostra RF-06). Além destes exemplos citados, outro fator que indica que a quantidade de talco e/ou clorita e/ou serpentina não é o único fator influenciador na intensidade desta banda de absorção, é o fato dos espectros das minas do Riacho Fundo e de Cabeça de Negro possuírem essa feição mais intensa que os espectros da mina do Torto, que possui uma maior quantidade de talco e/ou clorita e/ou serpentina.

Sendo assim, a hidroxila pode estar contida na estrutura cristalina do material como um todo, e não necessariamente somente nos filossilicatos presentes (talco e/ou clorita e/ou serpentina), com a banda de absorção em 1390 nm podendo ser resultado de qualquer um dos casos (*combination tone* $v_1 + v_3$ da água; primeiro *overtone* da hidroxila; ligação Mg – OH, relacionada ou não com filossilicatos).

Hunt e Salisbury (1970) discutiram sobre os diversos motivos que levariam ao primeiro *overtone* da hidroxila a estar ausente no espectro, sendo os principais prováveis motivos a orientação do grupo OH⁻, e/ou a baixa concentração de OH⁻ na amostra, ambos os casos podendo ser utilizados como explicação para a ausência ou baixa intensidade dessa banda de absorção nos espectros das amostras da Mina do Torto.

Os espectros das amostras CN-08 e CN-09 são os únicos que possuem uma pequena feição de absorção em 950 nm, estando relacionado ao segundo *overtone* da hidroxila (CLARK *et al.*, 1990).

Os espectros da mina Cabeça de Negro, com exceção da amostra CN – 05, possuem uma fraca feição de absorção em 2070 nm (Figura 16). Os espectros das amostras RF – 03, RF – 08 e RF – 10 possuem essa feição bastante mais intensa, estando ausente nos demais espectros da mina (Figura 17), e também nos espectros da mina do Torto (Figura 18).

Os espectros também possuem feições espectrais em 2365 nm e por volta de 2390 nm (varia entre 2390 nm e 2397 nm), geralmente ocorrendo somente uma das duas em cada espectro, mas havendo casos em que as duas se manifestam, como nos espectros das amostras CN – 05, CN – 06, CN – 07 e TO – 12 (Figura 16, Figura 17, Figura 18).

A feição de absorção em 2390 nm é particularmente intensa nos espectros das amostras CN – 08, CN – 09, RF – 03, RF – 08 e RF – 10, que possuem, também, a feição de 2070 nm mais intensas que as demais, sendo que essas duas feições podem ser diagnósticas do talco (CLARK *et al.*, 1990; PONTUAL, 2008; MENESES, ALMEIDA e BAPTISTA, 2019).

As três feições citadas (2070 nm, 2365 nm e 2390 nm) são atribuídas à ligação Mg – OH (PONTUAL, 2008; MENESES, ALMEIDA e BAPTISTA, 2019), e são feições diagnósticas e/ou comuns do talco, clorita e serpentina.

As absorções em 1850 nm, 1970 nm e 2130 nm estão relacionadas com os *overtones* e *combination tones* dos modos vibracionais fundamentais do grupo CO_3^{2-} (HUNT e SALISBURY, 1971; HUNT, 1977), correspondendo respectivamente às aqui denominadas Banda 4, Banda 5 e Banda 6 (Tabela 6), que por sua vez correspondem às Banda 6, Banda 5 e Banda 4 do trabalho de Gaffey (1987) (Tabela 3). Hunt e Salisbury (1971) atribuíram essas absorções aos *combination tones* $\nu_1 + 3\nu_3$ (absorção em 1850 nm), $2\nu_1 + 2\nu_3$ (absorção em 1970 nm), e $\nu_1 + 2\nu_3 + \nu_4$ ou $3\nu_1 + 2\nu_4$ (absorção em 2130 nm) (Tabela 2).

A Banda 4 é bem marcada em quase todos os espectros analisados com o contínuo removido, excetuando-se o espectro da amostra TO – 10 (Figura 16, Figura 17, e Figura 18), onde a feição está ausente.

A posição da banda varia entre 1846 nm a 1849 nm, com exceção da amostra CN – 05, onde a posição da banda está deslocada para 1860 nm (Tabela 10). Levando-se em conta os valores de profundidade do contínuo removido de todo o espectro (Tabela 10, coluna ‘Profundidade’), os espectros da mina Riacho Fundo possuem, em média, a Banda 4 mais intensa que as demais, tendo uma profundidade média de 0.147, e largura de 38 nm. A banda nos espectros da mina do Torto possui valores intermediários, com profundidade média de 0.115 e largura 42 nm. A mina Cabeça de Negro possui uma profundidade média de 0.084, e uma largura média de 26 nm.

Tabela 10 - Tabela contendo os dados referentes a absorção em torno de 1850 nm (Banda 4) nos carbonatos das minas de Cabeça de Negro, Riacho Fundo e Torto.

Amostra	Posição (nm)	Profundidade	Profundidade Local	Largura (nm)
CN - 01	1848	0.096	0.061	28
CN - 02	1848	0.094	0.057	25
CN - 03	1848	0.074	0.048	26
CN - 04	1848	0.110	0.079	30
CN - 05	1860	0.076	0.045	23
CN - 06	1847	0.085	0.061	28
CN - 07	1848	0.061	0.037	24
CN - 08	1848	0.100	0.063	27
CN - 09	1849	0.060	0.036	24

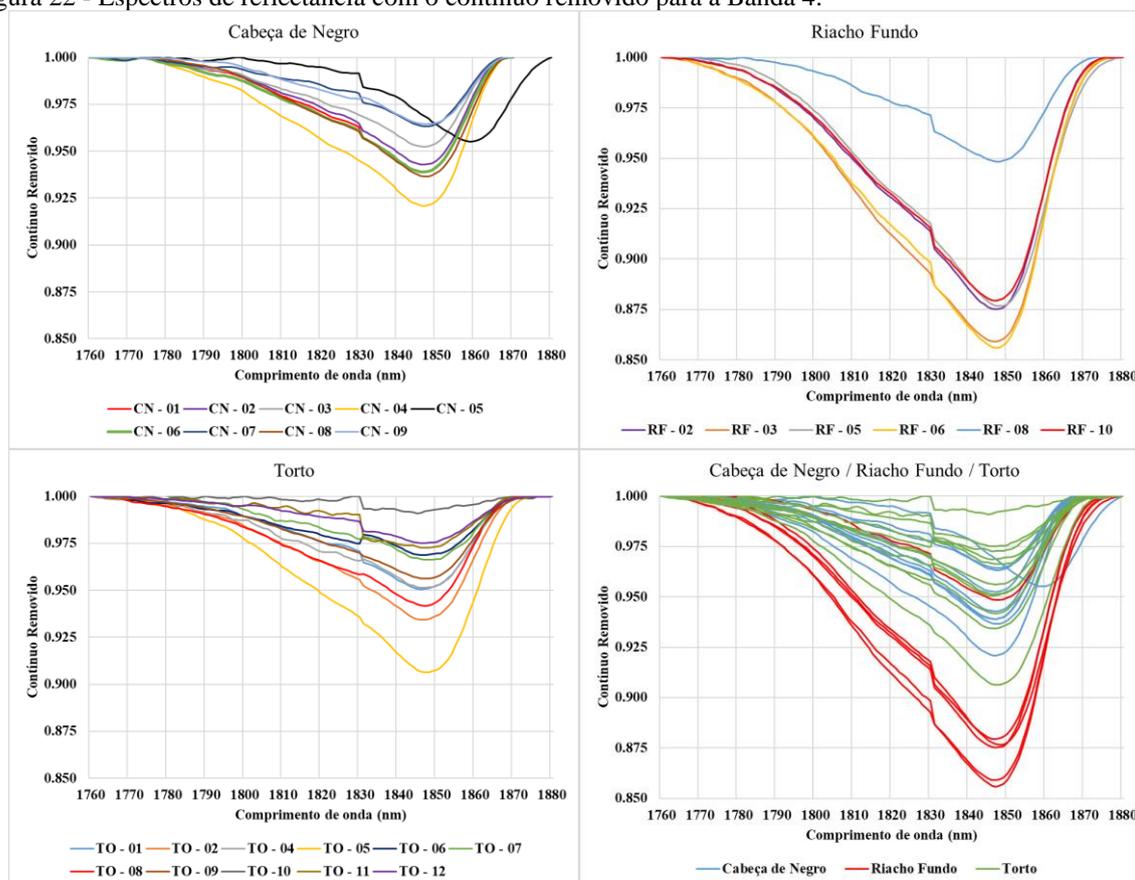
RF - 02	1848	0.152	0.125	36
RF - 03	1847	0.154	0.141	46
RF - 05	1849	0.161	0.123	32
RF - 06	1847	0.175	0.144	45
RF - 08	1848	0.094	0.052	30
RF - 10	1847	0.146	0.121	41
TO - 01	1846	0.111	0.049	40
TO - 02	1847	0.079	0.066	39
TO - 04	1846	0.106	0.049	53
TO - 05	1847	0.130	0.094	44
TO - 06	1846	0.056	0.031	58
TO - 07	1846	0.184	0.033	35
TO - 08	1847	0.071	0.058	44
TO - 09	1848	0.055	0.044	37
TO - 10	1845		0.009	Inconclusivo
TO - 11	1846	0.275	0.027	24
TO - 12	1846	0.087	0.025	45

Fonte: Elaborado pelo autor. Nota: Devido a forma e/ou intensidade da feição, não foi possível ou se optou por não mensurar a largura em alguns dos espectros.

Com a remoção do contínuo localmente (Figura 22), os espectros da mina Riacho Fundo continuam tendo, em média, a Banda 4 mais intensa que as demais, com um valor de profundidade de 0.118, sendo notadamente menos intensa no espectro da amostra RF – 08 (Tabela 9, coluna ‘Profundidade Local’).

A banda nos espectros da mina Cabeça de Negro possuem, em média, uma profundidade de 0.054, sendo mais intensa que se comparada com o da mina do Torto, que possui profundidade média de 0.044 (Tabela 10).

Figura 22 - Espectros de reflectância com o contínuo removido para a Banda 4.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Banda 5 é bem marcada em quase todos os espectros com o contínuo removido analisados, excetuando-se os espectros das amostras TO – 10 e TO – 11, onde a banda está ausente ou não é detectável (Figura 16, Figura 17 e Figura 18).

Observando os espectros com o contínuo removido da mina Cabeça de Negro, percebe-se que a banda no espectro da amostra CN – 05 se difere em posição, intensidade e formato das demais amostras (Tabela 11, coluna ‘Profundidade’). Quanto a posição, na amostra CN – 05 a banda está localizada em 1979 nm, enquanto nos demais espectros da mina, a banda está localizada em 1935 nm – 1939 nm. A banda é também menos intensa e larga no espectro da amostra CN – 05, com valores de profundidade e largura de 0.114 e 59 nm, respectivamente, enquanto as demais amostras possuem, em média, valores de profundidade e largura de 0.303 e 106 nm respectivamente (Tabela 11).

Nos espectros com o contínuo removido da mina Riacho Fundo, a Banda 5 se encontra em posição próxima à da CN – 05, variando entre 1970 nm – 1972 nm, com uma largura média de 69 nm, e uma profundidade média de 0.137, sendo a banda notadamente menos intensa no espectro da amostra RF – 08 (Tabela 11, coluna ‘Profundidade’).

Nos espectros com o contínuo removido das amostras da mina do Torto, a posição da banda varia entre 1964 nm e 1970 nm, excetuando-se a amostra TO – 08, onde a banda está localizada em 1944 nm (Tabela 11, coluna ‘Profundidade’). A banda possui uma profundidade média de 0.166, e uma largura média de 78 nm.

Tabela 11 - Tabela contendo os dados referentes a absorção em torno de 1930 – 1980 nm (Banda 5) nos carbonatos das minas de Cabeça de Negro, Riacho Fundo e Torto.

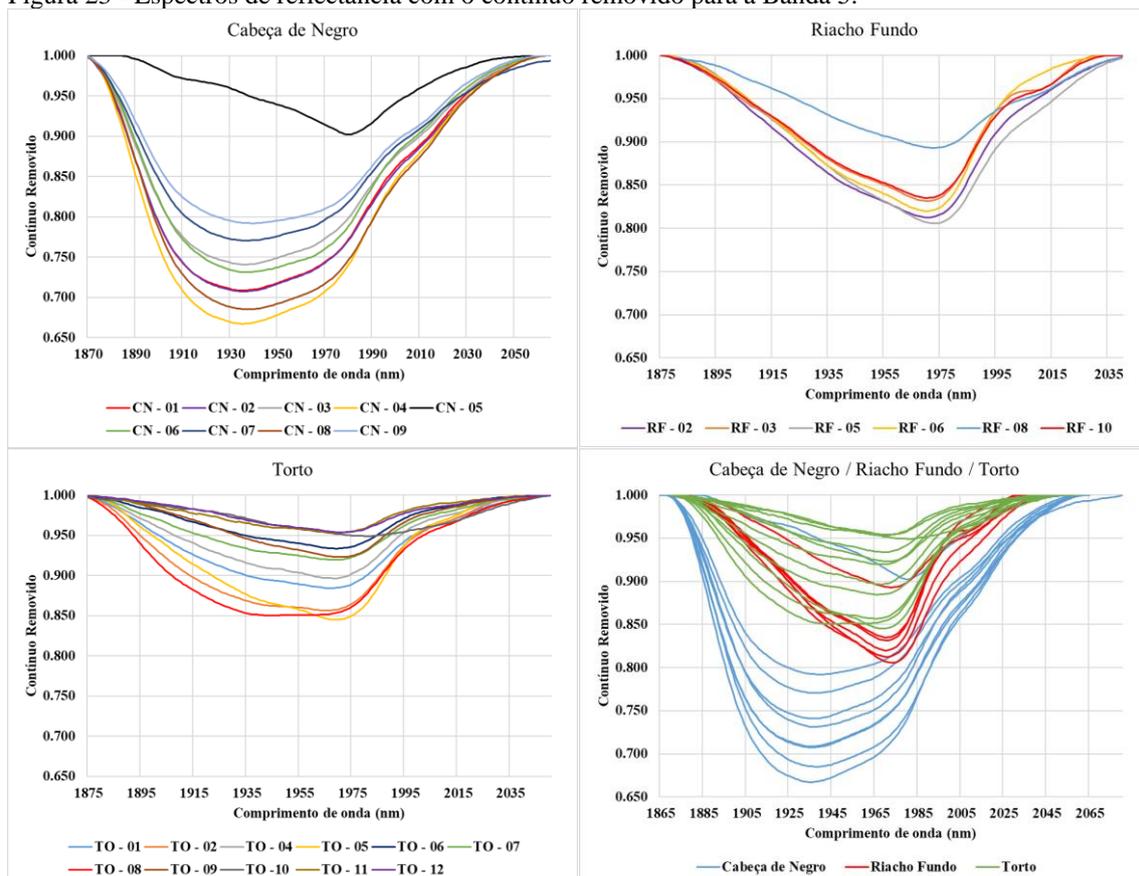
Amostra	Posição (nm)	Profundidade	Profundidade Local	Largura (nm)
CN - 01	1935	0.324	0.291	105
CN - 02	1936	0.327	0.293	107
CN - 03	1936	0.286	0.259	107
CN - 04	1935	0.363	0.333	106
CN - 05	1979	0.114	0.098	59
CN - 06	1936	0.293	0.269	102
CN - 07	1937	0.252	0.230	106
CN - 08	1938	0.348	0.315	107
CN – 09	1939	0.231	0.208	106
RF - 02	1970	0.204	0.188	73
RF - 03	1970	0.176	0.168	70
RF - 05	1972	0.217	0.194	69
RF - 06	1970	0.194	0.180	67
RF - 08	1971	0.129	0.107	66
RF - 10	1970	0.178	0.165	70
TO - 01	1965	0.151	0.116	85
TO - 02	1964	0.150	0.143	90
TO - 04	1965	0.134	0.104	80
TO - 05	1968	0.172	0.155	79
TO – 06	1968	0.077	0.066	73
TO - 07	1963	0.191	0.080	77
TO - 08	1944	0.157	0.150	93
TO - 09	1970	0.083	0.077	68
TO - 10	1980		0.051	Inconclusivo
TO - 11	1968		0.047	Inconclusivo
TO - 12	1968	0.083	0.046	58

Fonte: Elaborado pelo autor. Nota: Devido a forma e/ou intensidade da feição, não foi possível ou se optou por não mensurar a largura em alguns dos espectros.

Com a remoção do contínuo local, a Banda 5 do espectro da amostra CN – 05 passou a ter uma profundidade de 0.098, enquanto a banda nos demais espectros obtiveram uma profundidade média de 0.275 (Tabela 11, coluna ‘Profundidade Local’; e Figura 23).

Os espectros da mina Riacho Fundo e Torto continuam tendo valores de profundidade inferiores aos da mina Cabeça de Negro (Tabela 11, coluna ‘Profundidade Local’). Na mina Riacho Fundo, a Banda 5 possui um valor médio de profundidade de 0.167, enquanto nos espectros da mina do Torto, a banda teve um valor médio de 0.094, com a remoção do contínuo local demonstrando haver a banda nos espectros das amostras TO – 10 e TO – 11, embora menos intensas que as demais amostras da mina, e, no caso da amostra TO – 10, havendo um pequenos deslocamento da posição da banda para 1980 nm (Figura 23).

Figura 23 - Espectros de reflectância com o contínuo removido para a Banda 5.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Banda 6 é geralmente bem marcada em todos os espectros com o contínuo removido analisados, com exceção das amostras TO – 10 e TO – 11, onde a feição não está visível, e nas amostras TO – 07 e TO – 12, onde a feição está presente de modo mais sutil

(Figura 16, Figura 17, Figura 18). Por vezes, a banda forma, juntamente com a feição em 2070 nm, um único núcleo de absorção, sendo bem marcado e comum nos espectros da mina Riacho Fundo.

A posição da banda varia entre 2126 nm a 2130 nm, com exceção do espectro da amostra CN – 05, onde a banda está localizada em 2139 nm. Levando-se em conta os valores de profundidade do contínuo removido de todo o espectro (Tabela 12, coluna ‘Profundidade’), os espectros da mina do Torto possuem, em média, a menor profundidade, com um valor de 0.037, e largura média de 34 nm. Os espectros da mina Cabeça de Negro, apesar de possuírem a banda com uma profundidade média 0.049, maior que a dos espectros da mina do Torto, possuem uma menor largura, com valor de 21 nm. A banda é mais intensa nos espectros da mina Riacho Fundo, com uma profundidade média de 0.089, e uma largura média de 34 nm.

Tabela 12 - Tabela contendo os dados referentes a absorção em torno de 2130 nm (Banda 6) nos carbonatos das minas de Cabeça de Negro, Riacho Fundo e Torto.

Amostra	Posição (nm)	Profundidade	Profundidade Local	Largura
CN - 01	2127	0.058	0.042	19
CN - 02	2127	0.056	0.039	19
CN - 03	2127	0.046	0.032	19
CN - 04	2127	0.070	0.051	21
CN - 05	2139	0.023	0.022	29
CN - 06	2127	0.052	0.039	22
CN - 07	2127	0.032	0.022	19
CN - 08	2128	0.066	0.049	20
CN – 09	2128	0.042	0.032	22
RF - 02	2127	0.076	0.076	42
RF - 03	2128	0.135	0.087	24
RF - 05	2128	0.080	0.080	51
RF - 06	2128	0.105	0.084	37
RF - 08	2128	0.040	0.035	27
RF - 10	2128	0.096	0.072	26
TO - 01	2126	0.034	0.029	29
TO - 02	2129	0.046	0.046	35
TO - 04	2129	0.033	0.031	33
TO - 05	2129	0.068	0.063	40

TO – 06	2128	0.019	0.019	34
TO - 07	2130		0.020	Inconclusivo
TO - 08	2128	0.037	0.037	34
TO - 09	2127	0.025	0.025	37
TO - 10	2106		0.06	Inconclusivo
TO - 11	2127		0.010	Inconclusivo
TO - 12	2128		0.013	Inconclusivo

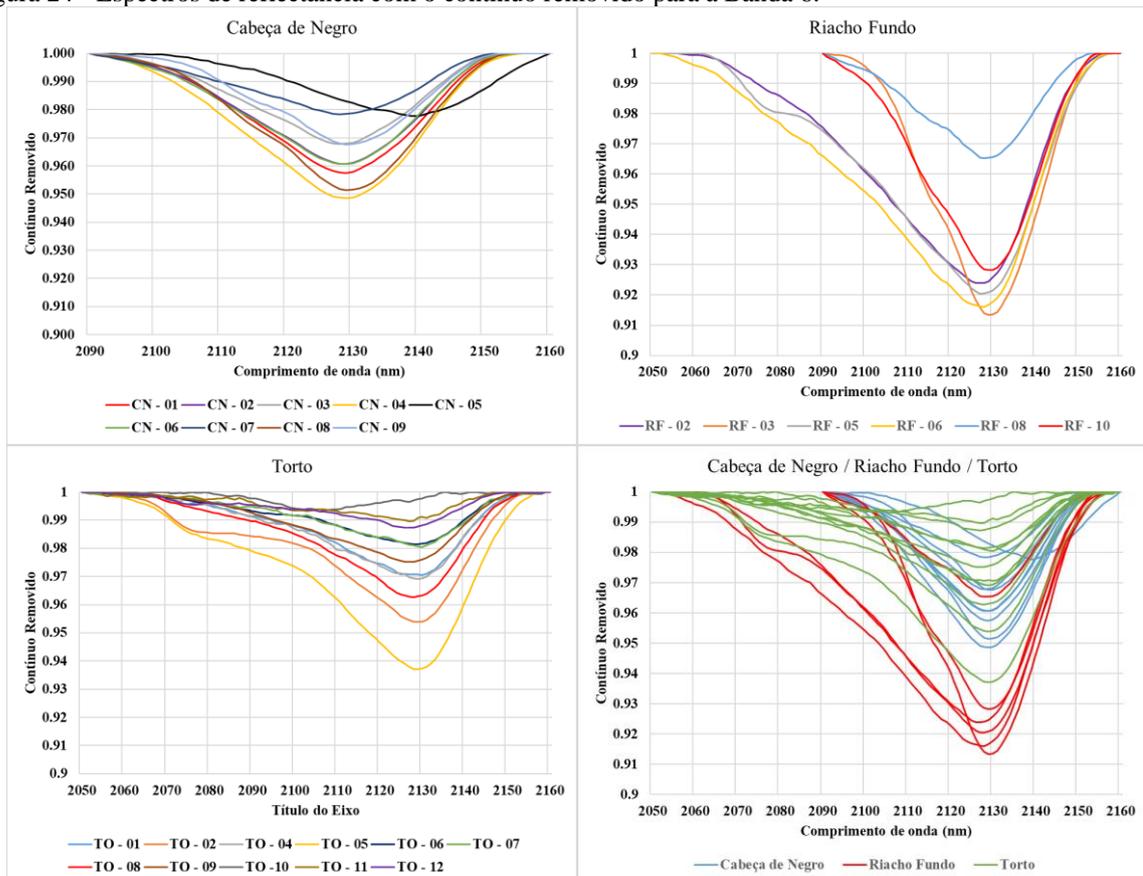
Fonte: Elaborado pelo autor. Nota: Devido a forma e/ou intensidade da feição, não foi possível ou se optou por não mensurar a largura em alguns dos espectros.

Com a remoção do contínuo local (Tabela 12, coluna ‘Profundidade Local’; e Figura 24), os espectros da mina do Torto continuam a ter, em média, a Banda 6 menos profunda que as demais, com um valor de profundidade de 0.027, enquanto os espectros da mina Riacho Fundo e Cabeça de Negro possuem a banda com uma profundidade média de 0.072 e 0.036, respectivamente.

Com a remoção do contínuo de todo o espectro (Figura 19), a Banda 6 de alguns espectros da mina Riacho Fundo e Torto constituíram um núcleo, começando e terminando em 1.0. Consequentemente, esses espectros possuem o mesmo valor quando se aplica a remoção do contínuo local.

Com a remoção do contínuo local, foi possível identificar a Banda 6 nos espectros das amostras TO – 07, TO – 10, TO - 11 e TO – 12 (Figura 24), que estavam ausentes ou pouco aparentes nos espectros brutos e/ou com a remoção do contínuo de todo o espectro (Figura 14 e Figura 18, respectivamente). Entretanto, a profundidade da banda nos espectros TO – 10, TO – 11 e TO – 12 é muito abaixo da média das outras amostras (Tabela 12, coluna ‘Profundidade Local’).

Figura 24 - Espectros de refletância com o contínuo removido para a Banda 6.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com exceção da Banda 5 dos espectros das amostras da mina Cabeça de Negro (excetuando o espectro da amostra CN – 05) e da amostra TO – 08, as três bandas anteriormente citadas possuem a forma de um vale, com a borda da banda voltada para os menores comprimentos de onda possuindo um formato de rampa (característica visível principalmente ao se observar os espectros brutos (Figura 15)), sendo essa uma característica marcante destas bandas (MENESES, ALMEIDA e BAPTISTA, 2019), presente também nos trabalhos de Hunt (1977), Gaffey (1985, 1986, 1987) e Van der Meer (1995).

A ausência dessa característica nos espectros da mina Cabeça de Negro, juntamente com o aumento da largura da Banda 5, agora centrada em 1935 nm nos espectros da mina Cabeça de Negro, e em 1944 nm no espectro da amostra TO - 08, pode ser atribuída à presença de água, sendo que o fato dessa banda não ser acompanhada por feições em 2200 nm, indica que a água está presente ou como inclusões fluídas, ou como moléculas isoladas na estrutura cristalina do material, não havendo ligação com impurezas de materiais argilosos (HUNT e SALISBURY, 1970; HUNT, 1977; Clark *et al.*, 1990; Van deer Meer, 1995). Essa feição devido a água mascara a feição carbonática que ocorre na mesma região, com casos semelhantes sendo indicados por exemplo por Gaffey (1985, 1986) e Crowley (1986).

A presença de uma banda de absorção em torno de 1430 nm – 1440 nm nos espectros da mina Cabeça de Negro, reforça o indicativo da presença de moléculas de água no material, estando essa feição ausente no espectro da amostra TO – 08.

A presença da banda de absorção em 1390 nm, porém não acompanhada de feições de absorção em 1900 nm, indica que há apenas a hidroxila no material (HUNT e SALISBURY, 1970; HUNT, 1977; Clark *et al.*, 1990), sendo o caso das amostras das minas Riacho Fundo e Torto, que geralmente também não possuem feições de absorção em 1430 nm – 1440 nm.

A intensa e larga banda de absorção em 2300 nm é atribuída ao *overtone* $3\nu_3$ do grupo CO_3^{2-} (Tabela 2), sendo aqui denominada de Banda 7 (Tabela 6), correspondendo a Banda 2 do trabalho de Gaffey (1987). Apesar desta banda não aparecer no espectro bruto da amostra TO – 10, ela aparece em todos os espectros com o contínuo removido, por vezes exibindo uma feição dupla, como consequência do aumento da degeneração da estrutura mineral ou do sítio do ânion (Clark *et al.*, 1990), sendo uma característica comum nas amostras da mina Cabeça de Negro e Riacho Fundo.

A posição da Banda 7 varia entre 2294 nm e 2319 nm (Tabela 13), e é, em média, mais profunda nos espectros da mina Riacho Fundo, que possui uma profundidade média de 0.535. A banda nos espectros da mina Cabeça de Negro possuem um valor médio um pouco abaixo da média da mina Riacho Fundo, com um valor de profundidade de 0.509. Os espectros da mina Torto possuem, em média, a menor profundidade para a banda, com um valor médio de 0.393. A largura é relativamente constante, com os espectros da mina Cabeça de Negro, Riacho Fundo e Torto possuindo valores médios de 103 nm, 112 nm e 105 nm respectivamente.

Nos espectros da mina Cabeça de Negro com o contínuo removido, com exceção das amostras CN – 04, CN – 05 e CN – 07, a Banda 7 possui a feição dupla bem marcada. Essa característica está presente também nos espectros das amostras RF – 03, RF – 08, RF – 10 e TO – 10 (Figura 16, Figura 17, Figura 18).

Tabela 13- Tabela contendo os dados referentes a absorção em torno de 2300 nm (Banda 7) nos carbonatos das minas de Cabeça de Negro, Riacho Fundo e Torto.

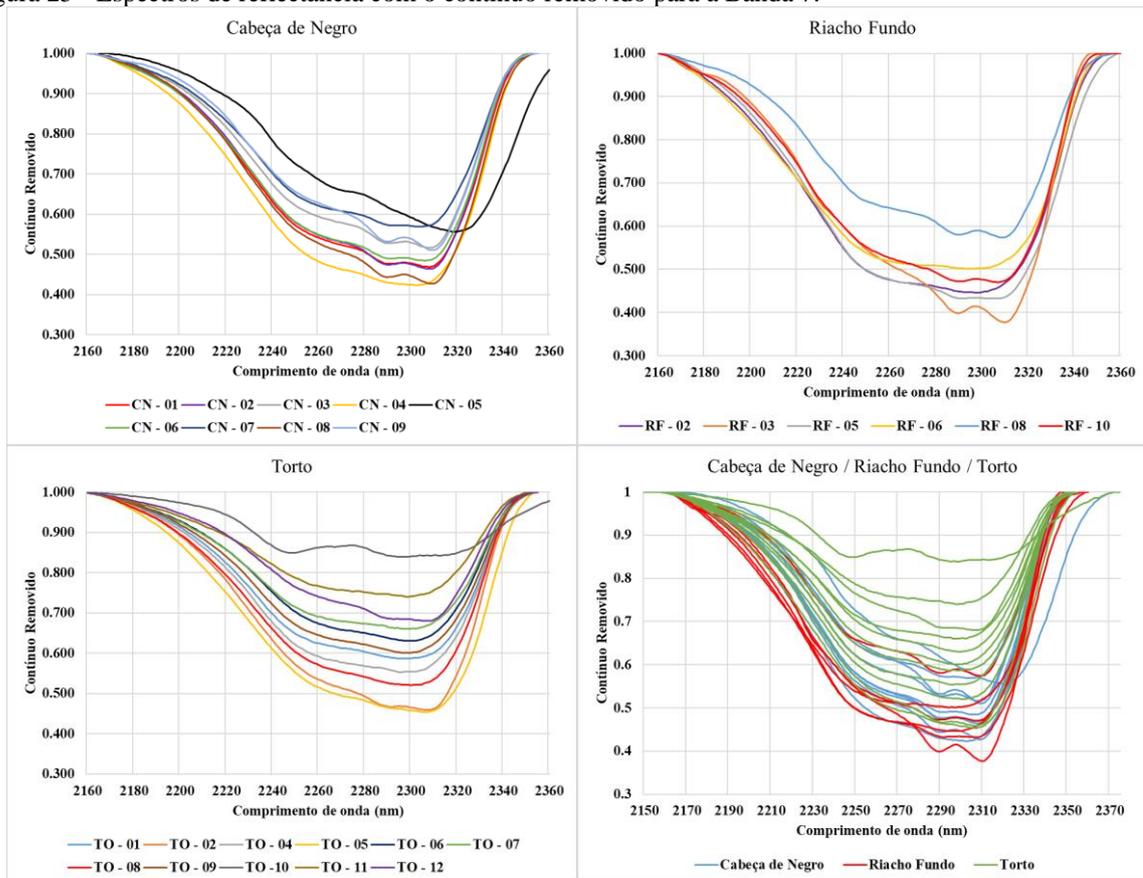
Amostra	Posição (nm)	Profundidade	Profundidade Local	Largura (nm)
CN - 01	2307	0.531	0.531	104
CN - 02	2307	0.536	0.536	102
CN - 03	2308	0.484	0.584	101
CN - 04	2302	0.577	0.577	108

CN - 05	2319	0.443	0.433	104
CN - 06	2306	0.515	0.515	104
CN - 07	2304	0.431	0.431	102
CN - 08	2308	0.573	0.573	103
CN - 09	2309	0.490	0.490	98
RF - 02	2298	0.554	0.554	115
RF - 03	2310	0.626	0.623	104
RF - 05	2308	0.569	0.568	115
RF - 06	2294	0.505	0.499	120
RF - 08	2309	0.426	0.426	105
RF - 10	2307	0.532	0.530	111
TO - 01	2299	0.413	0.413	106
TO - 02	2307	0.541	0.541	104
TO - 04	2296	0.447	0.447	106
TO - 05	2306	0.548	0.546	111
TO - 06	2299	0.370	0.370	101
TO - 07	2297	0.352	0.340	102
TO - 08	2301	0.479	0.479	106
TO - 09	2298	0.399	0.399	103
TO - 10	2299	0.169	0.161	120
TO - 11	2298	0.292	0.260	94
TO - 12	2307	0.320	0.320	97

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Banda 7 geralmente perfaz um núcleo de absorção, com exceção de poucos espectros das minas Riacho Fundo e Torto. Com a remoção do contínuo local (Tabela 13, coluna ‘Profundidade Local’; e Figura 25), não houve qualquer alteração entre os valores de profundidade para os espectros da mina Cabeça de Negro, enquanto para as minas Riacho Fundo e Torto, houve pequenas alterações, com os novos valores médios de profundidade de 0.533 e 0.389.

Figura 25 - Espectros de reflectância com o contínuo removido para a Banda 7.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos espectros brutos, após 2350 nm têm-se o início de uma intensa e larga banda de absorção, cujo o centro da banda se encontra entre 2500 e 2550 nm (Figura 15). Essa banda de absorção estaria relacionada com o *combination tone* $v_1 + 2v_3$ (Tabela 2), correspondendo à Banda 1 do trabalho da Gaffey (1987). Devido ao *modus operandi* da remoção do contínuo, onde os espectros obrigatoriamente começam e terminam em 1.0, essa feição não existe nos espectros normalizados (Figura 19), havendo somente uma denominada feição artefato (PONTUAL, 2008) por volta de 2450 nm, que não tem relação com a mineralogia e/ou química do material.

Em suma, as bandas espectrais 2, 4, 5, 6 e 7 do trabalho de Gaffey (1987), contidos na Tabela 3, correspondem as aqui denominadas bandas 7, 6, 5, 4 e 3 (Tabela 6). A feição em 2500 nm, que corresponde a Banda 1 de Gaffey (1987), se encontra no limiar ou fora do limite de detecção do espectrorradiômetro utilizado neste trabalho, como discutido anteriormente.

Nos espectros analisados, não foi observada nenhuma feição de absorção em torno de 2220 nm, local correspondente à Banda 3 de Gaffey (1987). Essa banda também não é citada e nem aparece nos espectros de trabalhos como Hunt e Salisbury (1971), Crowley (1986) e Van

der Meer (1995). Essa banda pode estar sobreposta pela Banda 7 (2300 nm), que se destaca pela sua intensidade e largura. Outra alternativa, seria que a feição em 2220 nm presente no trabalho de Gaffey (1987) se deva à *combination band* relacionada a hidroxila (Hunt, 1977), que ou não se manifestou nos demais trabalhos, ou que está relacionada com impurezas argilosas presentes nas amostras utilizadas por Gaffey (1987).

As demais diferenças entre os espectros aqui analisados e os espectros apresentados por Gaffey (1987), estão relacionadas a presença de íons de ferro, OH⁻, H₂O e pela ligação Mg-OH.

Em carbonatos, a matéria orgânica pode estar presente na forma de carbono, e/ou mais comumente na forma de querogênio (Van der Meer, 1995). A matéria orgânica é conhecida por mesmo em baixas quantidades, ocasionar um escurecimento nas amostras de carbonato, assim como a diminuição geral do albedo, como demonstrado nos trabalhos de Crowley (1986), Van der Meer (1995), Pedrosa, Meneses e Carmelo (2010).

Estes trabalhos demonstraram que mesmo em quantidades inferiores a 0.1%, a matéria orgânica disseminada ocasiona uma considerável redução na reflectância total do espectro, atenuando ou mesmo mascarando totalmente as bandas de absorção. Van der Meer (1995), entretanto, indica que o grau da diminuição do albedo é função direta do tamanho das partículas da matéria orgânica, sendo o efeito sobre o albedo bastante menos intenso quando o tamanho da partícula orgânica é relativamente grande se comparado com o do material carbonático, se tornando progressivamente mais intenso a medida que a matéria orgânica se torna mais fina e disseminada no material.

A matéria orgânica pode ser a responsável pelo albedo médio geral menor das amostras da mina do Torto, sendo possível notar que as amostras possuem uma coloração mais escura se comparada com as amostras das outras minas (Anexo A a Anexo I).

A granulometria do material é outro fator influenciador do albedo das amostras. Gaffey (1986) e Van der Meer (1995) demonstraram que em geral, materiais com granulometria mais fina tendem a terem um maior albedo, porém possuem feições espectrais mais fracas do que se comparadas a materiais com granulometria mais grosseiras, não sendo, porém, uma variação sistemática, com diferentes bandas possuindo diferentes respostas à variação granulométrica.

Entretanto, ao se analisar os espectros brutos (Figura 15), percebe-se que, apesar de possuir uma granulometria maior (ver Anexos), os espectros da mina Cabeça de Negro possuem, geralmente, um albedo um pouco maior que os espectros da minas Riacho Fundo, e um albedo significativamente maior que os espectros da mina do Torto. Os espectros da mina

Cabeça de negro, porém, se comparados por exemplo com os espectros da mina Riacho Fundo, possuem uma menor intensidade das feições, excetuando-se a Banda 5. Ao se comparar os espectros das minas do Torto e Riacho Fundo, percebe-se também, que apesar das granulometrias similares, há uma grande disparidade nos albedos e nas intensidades das feições. Isso indica que há influência tanto da granulometria quanto da matéria orgânica, cada uma influenciando mais ou menos em cada espectro analisado.

A influência da matéria orgânica pode ser a causa da amostra CN – 09 possuir a Banda 1 pouco intensa, contrastando com o espectro da amostra CN – 04, que possui a Banda 1 mais intensa entre os espectros da mina Cabeça de Negro, sendo que ambas possuem granulometria similares, materiais opacos e cores avermelhadas, além de comportamento espectral semelhantes nos menores comprimentos de onda, podendo indicar presença de óxidos e/ou hidróxidos de ferro. O fato da amostra CN – 09 possuir também a intensidade das outras bandas menores que a média, só sendo mais intensas que as bandas da amostra CN – 05, corrobora o indicativo da influência da matéria orgânica.

A matéria orgânica e/ou granulometria podem ser também as causadoras do menor albedo da amostra CN-05, porém não explicariam a mudança de forma e posição das bandas de absorção. A mudança de posição observada para as bandas carbonáticas, deslocadas para 1860 nm, 1980 nm e 2320 nm, pode estar relacionada com uma menor quantidade de Mg (amostra mais calcítica/dolomítica), como demonstrado pelos trabalhos de Gaffey (1985, 1986 e 1987) e Van deer Meer (1995). A banda em 1980 nm se assemelha em forma a aquelas centradas em 1950 nm nos espectros das amostras das minas Riacho Fundo e Torto, não possuindo a feição atribuída a moléculas de água encontradas nos espectros das amostras da mina Cabeça de Negro.

Entre as amostras da mina do Torto, os espectros brutos das amostras TO-07, TO-10 e TO-11 são as que possuem o menor albedo e/ou menor intensidade das feições espectrais, com as amostras TO-07 e TO-11 ainda demonstrando uma leve absorção em 1000 nm e 2300 nm, e a amostra TO-10 possuindo somente a banda de absorção centrada em 1390 nm. A amostra TO-12, apesar de possui um maior albedo, não possui feições espectrais no intervalo entre 1400 nm e 2200 nm, possuindo, porém, a banda de ferro em 1040 nm e a banda carbonática em 2300 nm bem marcadas.

A remoção do contínuo do espectro minimiza, em parte, o efeito visual da matéria orgânica e granulometria nos espectros, permitindo o discernimento de feições pouco aparentes nos espectros brutos, como pode ser visto, por exemplo, em vários espectros da mina do Torto.

Entretanto, a remoção do contínuo não anula, de fato, o efeito da matéria orgânica e granulometria na intensidade e formato das feições espectrais.

A remoção do contínuo também não anula os efeitos da saturação e influência de mistura mineral no espectro (ASADZADEH e SOUZA FILHO, 2016), o que dificulta uma correlação entre intensidade de feição e composição química/quantificação mineral quando se estuda espectros de rocha, sem o controle da granulometria e composição do material.

Tendo isso em vista, levando-se em consideração os dados disponíveis, têm-se que os valores de profundidade citados anteriormente não podem ser, de fato, atribuídos a abundância química do elemento/mineral, e devem ser vistos como índices de auxílio comparativo entre as amostras.

A partir da análise dos dados apresentados, foi possível, através da espectrorradiometria de reflectância, diferenciar e classificar espectralmente o minério magnésítico do estado em quatro grandes grupos espectrais distintos: 1) magnesita hidratada; 2) magnesita anidra; 3) magnesita ferrosa/ferrífera; e 4) magnesita carbonosa.

Como discutido anteriormente, as magnesitas hidratadas são aquelas que possuem a feição espectral em 1935 nm, indicativo da presença de água no material, e que sobrepõem a feição carbonática em 1970 nm (Banda 5). Os espectros das magnesitas hidratadas também se diferenciam por possuírem a feição espectral em 1440 nm, também relacionada aos *combination tones* da água. A ausência dessas feições classifica as amostras espectralmente como magnesitdas anidras.

A feição espectral característica das magnesitas ferrosas/ferríferas está localizada nos menores comprimentos de onda (350 a 750 nm), na região do visível, o que se reflete na coloração macroscópica diferenciada dessas amostras, que apresentam tons avermelhados, amarronzados e amarelados (ver Anexos). Esta região, nos espectros das amostras ferrosas/ferríferas, se caracteriza por possuírem ‘ombros’ em 450 nm e/ou 550 nm e/ou 600 nm e/ou 750 nm, adquirindo um aspecto semelhante aos espectros dos óxidos e hidróxidos de ferro (MORRIS *et al.*, 1985). Como essas feições espectrais ocorrem em uma porção do espectro eletromagnético diferente daquela em que ocorrem as feições espectrais que caracterizam as amostras como hidratadas/anidras, a classificação entre magnesita ferrosa/ferrífera e hidratada e/ou anidra não são excludentes e sim complementares, de modo que por exemplo, uma amostra classificada como magnesita ferrosa/ferrífera ainda sim pode ser classificada como hidratada ou anidra. Devido a esse fator, a classificação dentro do grupo se dará por meio de duas subclasses, denominadas magnesita ferrosa/ferrífera hidratada e magnesita ferrosa/ferrífera anidra.

As magnesitas classificadas como carbonosas são caracterizadas espectralmente pela carência de feições espectrais e baixo albedo observados nos espectros brutos. Macroscopicamente, essas amostras se destacam por possuírem a coloração preta, ou cinza escuro.

A classificação de cada amostra analisada está contida na Tabela 14. De modo geral, as amostras da mina Cabeça de Negro são classificadas em magnesita hidratada (amostras CN-01, CN-02, CN-03, CN-06, CN-07) e magnesita ferrosa/ferrífera hidratada (amostras CM-04, CN-08, CN-09), com exceção da amostra CN-05, classificada como magnesita carbonosa, possuindo também um menor teor de magnésio. A mina Riacho Fundo é composta majoritariamente por magnesitas anidras (amostras RF-02, RF-03, RF-06, RF-08, RF-10), com uma amostra sendo classificada como magnesita ferrosa/ferrífera anidra (amostra RF-05). As amostras da mina do Torto variam entre magnesita carbonosa (amostras TO-01, TO-04, TO-07, TO-10, TO-11) e magnesita anidra (TO-02, TO-05, TO-06, TO-08, TO-09), com uma amostra sendo classificada como magnesita ferrosa/ferrífera anidra (amostra TO-12).

Tabela 14 - Tabela contendo a classificação atribuídas às amostras das minas de Cabeça de Negro, Riacho Fundo e Torto.

Amostra	Classificação
CN - 01	Magnesita hidratada
CN - 02	Magnesita hidratada
CN - 03	Magnesita hidratada
CN - 04	Magnesita ferrosa/ferrífera hidratada
CN - 05	Magnesita carbonosa
CN - 06	Magnesita hidratada
CN - 07	Magnesita hidratada
CN - 08	Magnesita ferrosa/ferrífera hidratada
CN - 09	Magnesita ferrosa/ferrífera hidratada
RF - 02	Magnesita anidra
RF - 03	Magnesita anidra
RF - 05	Magnesita ferrosa/ferrífera anidra
RF - 06	Magnesita anidra
RF - 08	Magnesita anidra
RF - 10	Magnesita anidra
TO - 01	Magnesita carbonosa

TO - 02	Magnesita anidra
TO - 04	Magnesita carbonosa
TO - 05	Magnesita anidra
TO - 06	Magnesita anidra
TO - 07	Magnesita carbonosa
TO - 08	Magnesita anidra
TO - 09	Magnesita anidra
TO - 10	Magnesita carbonosa
TO - 11	Magnesita carbonosa
TO - 12	Magnesita ferrosa/ferrífera anidra.

Fonte: Elaborado pelo autor.

6 CONCLUSÕES

Com a utilização de espectrorradiometria de reflectância em laboratório, foi possível determinar as características espectrais do minério magnésítico do estado do Ceará, assim como classifica-los em quatro grupos espectrais distintos, denominados de 1) magnesita hidratada, 2) magnesita anidra, 3) magnesita ferrosa/ferrífera e 4) magnesita carbonosa.

No geral, sete feições espectrais de absorção se destacaram por sua frequência e intensidade, sendo denominadas de Banda 1 a Banda 7. Essas bandas e outras feições espectrais menores estão relacionadas a íons de ferro, aos grupos CO_3^{2-} , H_2O , OH^- e a ligação $\text{Mg} - \text{OH}$.

O comportamento espectral nos menores comprimentos de onda é predominantemente determinado pelos íons de Fe^{2+} e Fe^{3+} . A presença de óxido e/ou hidróxido de ferro seriam responsáveis pelo comportamento espectral anômalo das amostras CN - 04 e CN - 09 entre 350 nm e 650 nm. Também é atribuído à presença do ferro o comportamento espectral entre 350 nm e 600 nm dos espectros brutos das amostras CN - 08, RF - 05, TO - 09 e TO - 12, a intensa e larga banda de absorção entre 1000 nm e 1300 nm (Banda 1), e a discreta banda de absorção em 1700 nm (Banda 3) presente nos espectros da mina Cabeça de Negro, e em alguns dos espectros das minas Riacho Fundo e Torto.

Devido à presença de feição espectral em 1390 nm (Banda 2), e ausência de interferência ou sobreposição de feição espectral em 1900 nm (Banda 5), é possível afirmar que nas amostras pertencentes às minas Riacho Fundo, Torto, e na amostra CN - 05 da mina Cabeça de Negro, só há a presença de hidroxila, sem presença de água nem como inclusão fluída nem inserida na estrutura cristalina do material. A feição de 1390 nm pode ser devido tanto à hidroxila inserida na estrutura cristalina do material, quanto da presença da ligação $\text{Mg} - \text{OH}$, comuns nos minerais de talco e serpentina.

As amostras da mina Cabeça de Negro, com exceção da amostra CN - 05, possuem tanto a Banda 2, quanto a Banda 5, essa última sendo mais intensa, larga, e ocorrendo em comprimentos de ondas menores devido a sobreposição e/ou interferência na feição, indicando que as amostras possuem H_2O ou como inclusões fluídas ou como moléculas isoladas na estrutura cristalina do material.

A presença de feição de absorção em 950 nm nas amostras CN - 08 e CN - 09 são causadas pelo segundo *overtone* da hidroxila, e as feições de absorção em 2070 nm, 2365 nm e 2390 nm presentes em algumas amostras são atribuídos à ligação $\text{Mg} - \text{OH}$, sendo feições diagnósticas e/ou comuns do talco, clorita e serpentina.

As bandas de absorção carbonáticas estão localizadas em torno de 1850 nm (Banda 4), 1970 nm (Banda 5), 2130 nm (Banda 6) e 2300 nm (Banda 7). As bandas 4, 5 e 6 possuem o formato característico de rampa nas amostras das minas do Riacho Fundo, Torto, e na amostra CN – 05. A ausência dessa feição nas amostras da mina Cabeça de Negro, excetuando a CN – 05, e o deslocamento do centro da absorção para 1940 nm é, como citado anteriormente, devido à banda de absorção de H₂O. A banda de absorção em 2300 nm é bem marcada e intensa em quase todos os espectros.

Tanto a matéria orgânica quanto a granulometria afetam o albedo e a intensidade das feições. Porém, com os dados disponíveis, não foi possível indicar o efeito individual de cada um desses fatores em cada amostras.

A técnica de remoção do contínuo auxiliou na melhor visualização das feições espectrais, assim como na determinação das características das feições. Devido à técnica não anular os efeitos da matéria orgânica e/ou granulometria, os dados de profundidade foram utilizados como parâmetro comparativo, não sendo correlacionados com percentual de elementos e/ou abundância mineralógica.

O minério magnesítico do estado pôde então ser classificado em quatro categorias distintas, denominadas magnesita ferrosa/ferrífera, hidratada, anidra e carbonosa. A classificação do minério magnesítico em ferroso/ferrífero está relacionada ao comportamento espectral nos menores comprimentos de onda do material, se assemelhando ao comportamento espectral na mesma região para os óxidos e/ou hidróxidos de ferro, com feições em 450 nm e/ou 550 nm e/ou 600 nm e/ou 750 nm. A classificação do minério magnesítico em hidratado e/ou anidro está relacionado respectivamente à presença ou ausência das feições relacionadas a moléculas de água no material, localizadas em 1935 nm, ocasionando uma sobreposição da Banda 5 (banda carbonática) e uma leve feição de absorção em 1440 nm. O minério classificado como magnesita carbonosa é caracterizado através da falta de feições espectrais, e pelo baixo albedo dos espectros brutos, condição ocasionada pelo teor de matéria orgânica.

As amostras da mina Cabeça de Negro são compostas majoritariamente por magnesitas hidratadas e magnesitas ferrosas/ferríferas, enquanto entre as amostras da mina Riacho Fundo predomina a presença de magnesitas anidras. As amostras da mina do Torto variam em sua maioria entre magnesitas carbonosas e magnesitas anidras.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Anuário Mineral Estadual – Ceará. Ano base 2017**. Coord. José Eduardo da Costa Duarte; Vanessa Maria Mamede Cavalcanti; Marcos Aurélio Marcelino Moreira, v. 1, 2018. 31p.
- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. N. **The upper Precambrian of South America**. Boletim IG, São Paulo, v. 28, p. 45-80. 1976.
- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. N.; FUCK, R. A. **Províncias Estruturais Brasileiras**. In: Simpósio de Geologia do Nordeste, 8., 1977, Campina Grande. Atas... Campina Grande: SBG, 1977. p. 363-391.
- ARAUJO, C. E. G. **Evolução Tectônica da Margem Ativa Neoproterozóica do Orógeno Gondwana Oeste na Província Borborema (NE-Brasil)**. 2014. 243 p. Tese (Doutorado em Geologia), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- ARTHAUD, M. H. **Evolução Neoproterozóica do Grupo Ceará (Domínio Ceará Central, NE Brasil): da sedimentação à colisão continental brasileira**. 2007. 132 p. Tese (Doutorado em Geologia), Universidade de Brasília, Brasília, 2007.
- ASADZADEH, S.; DE SOUZA FILHO, C. R. **A review on spectral processing methods for geological remote sensing**. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, [S.I.]. v. 47, p. 69-90. 2016.
- BISHOP, C. A.; LIU, J. G.; MASON, P. J. **Hyperespectral remote sensing for mineral exploration in Pulang, Yunnan Province, China**. International Journal of Remote Sensing, [S.I.]. v. 32, n. 9, p. 2409-2426. 2011.
- BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H (Eds.). **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: texto, mapas e SIG**. 1. ed. Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2003. 692 p.
- BRITO NEVES, B. B. **Regionalização Geotectônica do Precambriano Nordestino**. 1975. 207p. Tese (Doutorado em Geologia), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1975.
- BRITO NEVES, B. B.; SANTOS, E. J.; VAN SCHMUS, W. R. Tectonic History of the Borborema Province, Northeastern Brazil. In: CORDANI, U. G.; MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D. A. (Eds). **Tectonic Evolution of South America**. International Geological Congrss, 31., 2000, Rio de Janeiro. Livro... Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências e Departamento Nacional da Produção Mineral, 2000. p. 151-182.
- CABY, R.; ARTHAUD, M. H. **Major Precambrian Nappes of the Brazilian Belt, Ceará, Northeast Brazil**. Geology, [S.I.]. v. 14, p. 871-874. 1986.
- CAVALCANTE, J. C.; FERREIRA, C. A.; ARMESTO, R. C. G.; MEDEIROS, M. F. **Mapa Geológico do Estado do Ceará**. Fortaleza, Ministério do Interior e Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), 1983. 1 mapa, color. Escala: 1:500.000.

CAVALCANTE, J. C. **Limites e Evolução do Sistema Jaguaribeano, Província Borborema, Nordeste do Brasil**. 1999. 169 p. Dissertação (Mestrado em Geologia), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 1999.

CLARK, R. N.; ROUSH, T. L. **Reflectance Spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications**. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, [S.I.]. v. 89, n. B7, p. 6329-6340. 1984.

CLARK, R. N.; KING, T. V.; KLEJWA, M.; SWAYZE, G. A.; VERGO, N. **High Spectral Resolution Reflectance Spectroscopy of Minerals**. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, [S.I.]. v. 95, n. B8, p. 12653-12680. 1990.

CLARK, R. N.; SWAYZE, G. A.; LIVO, K. E.; KOKALY, R. F.; SUTLEY, S. J.; DALTON, J. B.; MCDUGAL, R. R.; GENT, C. A. **Imaging Spectroscopy: Earth and planetary remote sensing with the USGS Tetracorder and expert systems**. Journal of Geophysical Research: Planets, [S.I.]. v. 108, n. E12. 2003.

COLWELL, R. N. (Ed). **Manual of Remote Sensing**. 2. Ed. Falls Church, Virginia: American Society of Photogrammetry, 1983. 2440 p.

CROWLEY, J. K. **Visible and Near-infrared Spectra of Carbonate Rocks: reflectance variations related to petrographic texture and impurities**. Journal of Geophysical Research, [S.I.]. v. 91, n. B5, p. 5001-5012. 1986.

CRÓSTA, A. P.; SOUZA FILHO, C. R.; DIEGO, F. D. **Alteration Mapping for gold Exploration in Patagonia, Argentina, using ASTER Imagery**. In: Proceedings of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) 2003. Annual Conference: Technology: Converging at the top of the world. 2003. p.1-12.

DUCART, D. F.; CRÓSTA, A. P.; SOUZA FILHO, C. R.; CONIGLIO, J. **Alteration mineralogy at the Cerro La Mina epithermal prospect, Patagonia, Argentina: Field mapping, show-wave infrared spectroscopy, and ASTER images**. Economic Geology, [S.I.]. v. 101, n. 5, p. 981-996. 2006.

FARMER, V. C. **The Infrared Spectra of Minerals**. Mineralogical Society, [S.I.]. 1974. 539p.

GAFFEY, S. J. **Reflectance Spectroscopy in the visible and near-infrared (0.35-2.55 μm): applications in carbonate petrology**. Geology, [S.I.]. v. 13, n. 4, p. 270-273. 1985.

GAFFEY, S. J. **Spectral Reflectance of Carbonate Minerals in the Visible and Near Infrared (0.35-2.55 μm): calcite, aragonite, and dolomite**. American Mineralogist, [S.I.]. v. 71, n. 1-2, p. 151-162. 1986.

GAFFEY, S. J. **Spectral Reflectance of Carbonate Minerals in the Visible and Near Infrared (0.35-2.55 μm): Anhydrous carbonate minerals**. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, [S.I.]. v. 92, n. B2, p. 1429-1440. 1987.

- GOETZ, A. F., ROWAN, L. C., KINGSTON, M. J. **Mineral identification from orbit: initial results from the shuttle multispectral infrared radiometer**. *Science, [S.I.]*. v. 218, n. 4576, p. 1020-1024. 1982.
- GUPTA, R. P. **Remote Sensing Geology**. 3. ed. Berlim, Alemanha: Springer, 2018. 428 p.
- HERRMANN, W.; BLAKE, M.; DOYLE, M.; HUSTON, D.; KAMPRAD, J.; MERRY, N.; PONTUAL, S. **Short wavelength infrared (SWIR) spectral analysis of hydrothermal alteration zones associated with base metal sulfide deposits at Rosebery and Western Tharsis, Tasmania, and Highway-Reward, Queensland**. *Economic Geology, [S.I.]*. v. 96, n. 5, p. 939-955. 2001.
- HOFFMAN, P. F. **Did the Breakout of Laurentia turn Gondwanaland inside-out?**. *Science, [S.I.]*. v. 252, n. 5011, p. 1409-1412. 1991.
- HUNT, G. R.; SALISBURY, J. W. **Visible and Near Infrared Spectra of Minerals and Rocks. I. Silicate minerals**. *Modern Geology, [S.I.]*. v. 1, p. 283-300. 1970.
- HUNT, G. R.; SALISBURY, J. W. **Visible and near infrared spectra of minerals and rocks. II. Carbonates**. *Modern Geology, [S.I.]*. v. 2, p. 23-30. 1971.
- HUNT, G. R.; SALISBURY, J. W.; LENHOFF, C. J. **Visible and near infrared spectra of minerals and rocks. III. Oxides and Hydroxides**. *Modern Geology, [S.I.]*. v. 2, p. 195-205. 1971.
- HUNT, G. R. **Spectral Signatures of Particulate Minerals in the Visible and Near-infrared**. *Geophysics, [S.I.]*. v. 42, n. 3, p. 501-513. 1977.
- HUNT, G. R. **Near-infrared (1.3-2.4) μm Spectra of Alteration Minerals- potencial for use in remote sensing**. *Geophysics, [S.I.]*. v. 44, n. 12, p. 1974-1986. 1979.
- HUNT, G. R. **Eletromagnetic Radiation: the communication link in remote sensing**. *In: SIEGAL, B. S.; GILLEPIE, A. R. (Eds). Remote Sensing in Geology: Wiley, Nova York, 1980. p. 5-45.*
- HUO, H., NI, Z.; JIANG, X.; ZHOU, P.; LIU, L. **Mineral mapping and ore prospecting with HyMap data over eastern Tien Shan, Xinjiang Uygur Autonomous Region**. *Remote Sensing, [S.I.]*. v. 6, n. 12, p. 11829-11851. 2014
- JARDIM DE SÁ, E. F. **A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e o seu Significado Geodinâmico na Cadeira Brasileira/Pan Africana**. 1994. 803 p. Tese (Doutorado em Geologia), Universidade de Brasília, Brasília. 1994.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2. ed. Tradução J. C. N. Epiphanyo (Coord *et al*). São José dos Campos, São Paulo: Parêntese, 2009. 598 p.
- KING, T. V.; CLARK, R. N. **Spectral Characteristics of Chlorites and Mg-serpentine using high-resolution reflectance spectroscopy**. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, [S.I.]*. v. 94, n. B10, p. 13997-14008. 1989.

KRUSE, F. A.; LEFKOFF, A. B.; BOARDMAN, J. W.; HEIDEBRECHT, K. B.; SHAPIRO, A. T.; BARLOON, P. J.; GOETZ, A. F. H. **The Spectral Image Processing System (SIPS) – Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data**. Remote Sensing of Environment, [S.I.]. v. 44, n. 2-3, p. 145-163. 1993.

LYON, R. J. P. **Minerals in the Infrared: a critical bibliography embracing the fields of: absorption, reflection, emission, transmission in minerals, and related minerals**. Menlo Park, Calif: Stanford Research Institute, 1962. 76 p.

LYON, R. J. P. **Analysis of Rocks by Spectral Infrared Emission (8 to 25 microns)**. Economic Geology, [S.I.]. v. 60, n. 4, p. 715-736. 1965.

MENDONÇA, J. C. G. S.; BRAGA, A. P. G. **As Faixas Vulcano-sedimentares de Orós e Jaguaribe: um greenstone belt?**. Revista Brasileira de Geociências, [S.I.]. v. 17, n. 3, p. 225-241. 1987.

MENESES, P. R.; NETTO, J. D. S. M. **Sensoriamento Remoto: reflectância dos alvos naturais**. 1. ed. Brasília: Editora Universidade de Brasília; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. 262 p.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. 1. ed. Brasília: Universidade de Brasília (UNB) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), 2012. 266 p.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T.; BAPTISTA, G. M. M. (Orgs). **Reflectância dos Materiais Terrestres: análise e interpretação**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. 334 p.

MOGHTADERI, A.; MOORE, F.; MOHAMMADZADEH, A. **The application of advanced space-born thermal emission and reflection (ASTER) radiometer data in the detection of alteration in the Chadormalu paleocrater, Bafq region, Central Iran**. Journal os Asian Earth Sciences, [S.I.]. v. 30, n. 2, p. 238-252. 2007.

MORRIS, R. V.; LAUER Jr, H. V.; LAWSON, C. A.; GIBSON Jr, E. K.; NACE, G. A.; STEWART, C. **Spectral and other physicochemical properties of submicron powders of hematite (α -Fe₂O₃), maghemite (γ -Fe₂O₃), magnetite (Fe₃O₄), goethite (α -FeOOH), and lepidocrocite (γ -FeOOH)**. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, [S.I.]. v. 90, n. B4, p. 3126-3144. 1985.

NEVES, S. P. **Proterozoic History of the Borborema Province (NE Brazil): correlations with neighboring cratons and Pan-African belts and implications for the evolution of western Gondwana**. Tectonics, [S.I.]. v. 22, n. 4. 2003.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008. 363 p.

PARENTE, C. V.; ARTHAUD, M. H. **O Sistema Orós-Jaguaribe no Ceará, NE do Brasil**. Revista Brasileira de Geociências, [S.I.]. v. 25, n. 4, p. 297-306. 1995.

PARENTE, C. V.; GUILLOU, J. J.; ARTHAUD, M. H. **Geologia e Geoquímica dos Elementos Maiores dos Depósitos de Magnesita Pré-cambriana (~1.8 Ga) da Faixa Móvel Orós (Ceará)**. Revista Brasileira de Geociências, [S.I.]. v. 28, n. 4, p. 439-448. 1998.

PARENTE, C. V.; RONCHI, L. J.; SIAL, A. N.; GUILLOU, J. J.; ARTHAUD, M. J.; FUZIKAWA, K., VERÍSSIMO, C. U. V. **Geology and Geochemistry of Paleoproterozoic Magnesite Deposits (1.8 Ga), State of Ceará, Northeastern Brazil**. Carbonates and Evaporites, [S.I.]. v. 19, n. 1, p. 28-50. 2004.

PEDROSA, S. A.; MENESES, P. R.; CARMELO, A. C. **Espectrorradiometria de Reflectância de Rochas Carbonáticas na Região do Infravermelho de Ondas Curtas**. Revista Brasileira de Geociências, [S.I.]. v. 40, n. 4, p. 593-599. 2010.

PONTUAL, S. **GMEX spectral analysis guides for mineral exploration**. AusSpe International Ltd, Australia. 2008.

PRADO, E. M.; SILVA, A. M.; DUCART, D. F.; TOLEDO, C. L. B.; de ASSIS, L. M. **Reflectance spectroradiometry applied to a semi-quantitative analysis of the mineralogy of the N4ws deposit, Carajás Mineral Province, Pará, Brazil**. Ore Geology Reviews, [S.I.]. v. 78, p. 101-119. 2016.

SÁ, J. M. **Evolution geodynamique de la ceinture proterozoïque d'Oros, Nord-Est du Brésil**. 1991. 177 p. Tese (Doutorado em Geologia), Universidade de Nancy, Nancy, FRA. 1991.

SÁ, J. M.; MCREATH, I.; LETERRIER, J. **Petrology, Geochemistry and Geodynamic Setting of Proterozoic Igneous Suits of the Orós Fold Belt (Borborema Province, Northeast Brazil)**. Journal of South American Earth Sciences, [S.I.]. v. 8, n. 3-4, p. 299-314. 1995.

SABINS, F. F. **Remote sensing for mineral exploration**. Ore Geology Reviews, [S.I.]. v. 14, n. 3-4, p. 157-183. 1999.

SALEM, S.M.; EL GAMMAL, E. A. **Iron ore prospection East Aswan, Egypt, using remote sensing techniques**. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, [S.I.]. v. 18, n. 2, p. 195-206. 2015.

SANTOS, E. J.; COUTINHO, M. G. N.; COSTA, M. P. A.; RAMALHO, E. **A Região de Dobramentos Nordeste e a Bacia do Parnaíba, incluindo o Cráton de São Luis e as bacias marginais**. In: SCHOBENHAUS C. C.; DERZE G. R.; ASMUS H. E. (Eds). **Geologia do Brasil**. Brasília: Departamento Nacional de Pesquisa Mineral (DNPM), 1984. p. 131-189.

SHIMABUKURO, Y. E.; PONZONI, F. J. **Spectral Mixture for Remote Sensing: linear model and applications**. Springer, 2019. 80 p.

SOE, M.; TAKASHIMA, I.; ZAW, K.; SWE, Y. M. **Remote Sensing and GIS studies of alteration and predictive mineral exploration in the Central Volcanic Arc, Myanmar**. Geological Society, Londres, v. 48, n. 1, p. 473-496. 2017

VAN DER MEER, F. **Spectral Reflectance of Carbonate Mineral Mixtures and Bidirectional Reflectance Theory: quantitative analysis techniques for application in remote sensing.** Remote Sensing Reviews, [S.I.]. v. 13, n. 1-2, p. 67-94. 1995.

VAN DEER MEER, F. **Spectral curve shape matching with a continuum removed CCSM algorithm.** International Journal of Remote Sensing, [S.I.]. v. 21, n. 16, p. 3179-3185. 2000.

VAN DEER MEER, F. **Analysis of spectral absorption features in hyperspectral imagery.** International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, [S.I.]. v. 5, n. 1, p. 55-68. 2004.

VAN SCHMUS, W. R.; BRITO NEVES, B. B.; HACKSPACHER, P. C.; BABINSKI, M. **U/Pb and Sm/Nd Geochronological Studies of the Eastern Borborema Province, Northeastern Brazil: initial conclusions.** Journal of South American Earth Sciences, [S.I.]. v. 8, n. 3-4, p. 267-288. 1995.

VAUCHEZ, A.; NEVES, S.; CABY, R.; CORSINI, M.; EGYDIO-SILVA, M.; ARTHAUD, M.; AMARO, V. **The Borborema Shear Zone System, NE Brazil.** Journal of South American Earth Sciences, [S.I.]. v. 8, n. 3-4, p. 247-266. 1995.

ANEXO A – GALERIA MACROSCÓPICA DAS AMOSTRAS DA MINA CABEÇA DE NEGRO (AMOSTRAS CN-01, CN-02, CN-03)

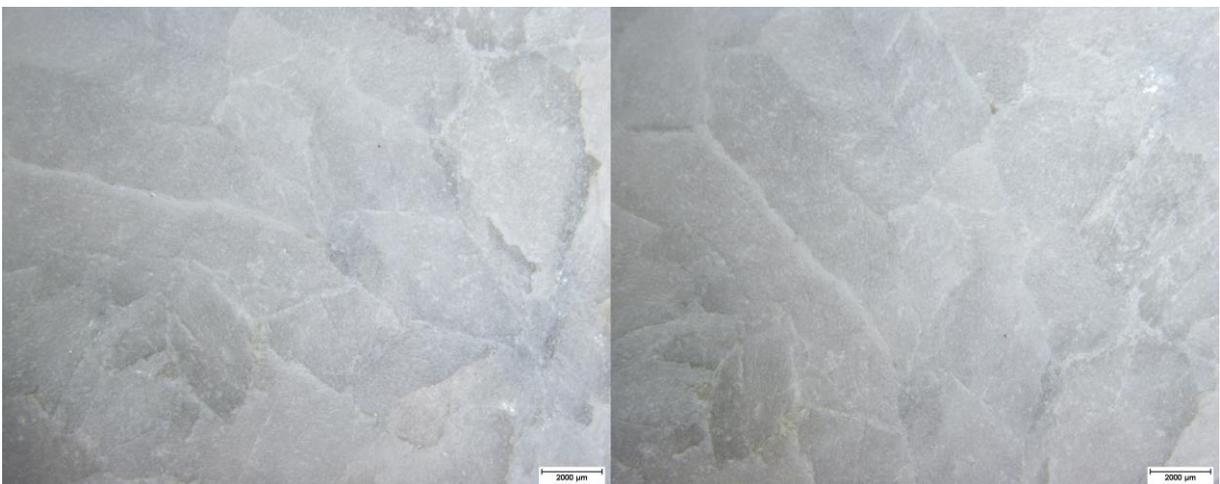
Amostra CN – 01:



Amostra CN – 02:

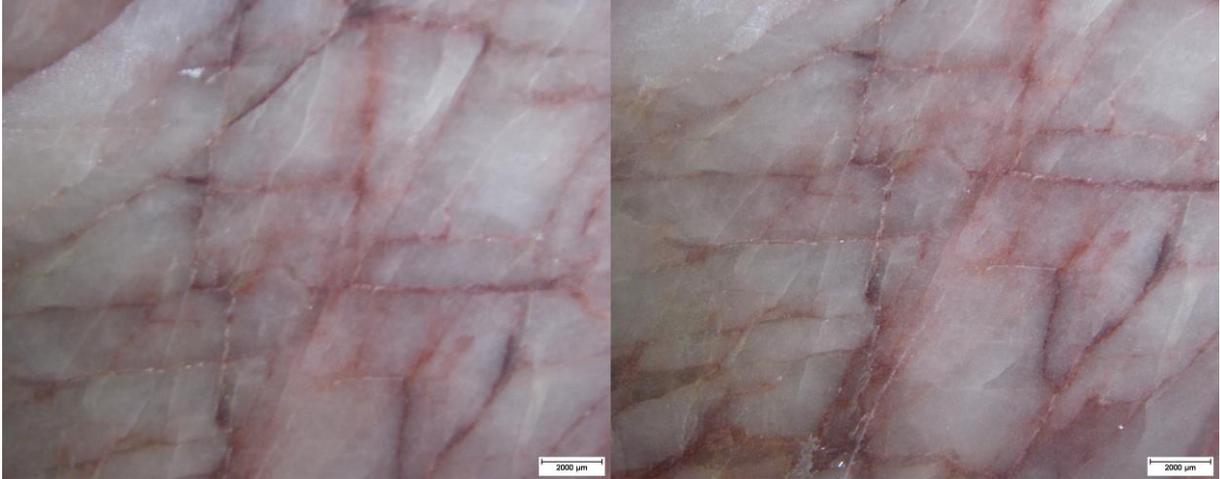


Amostra CN – 03:

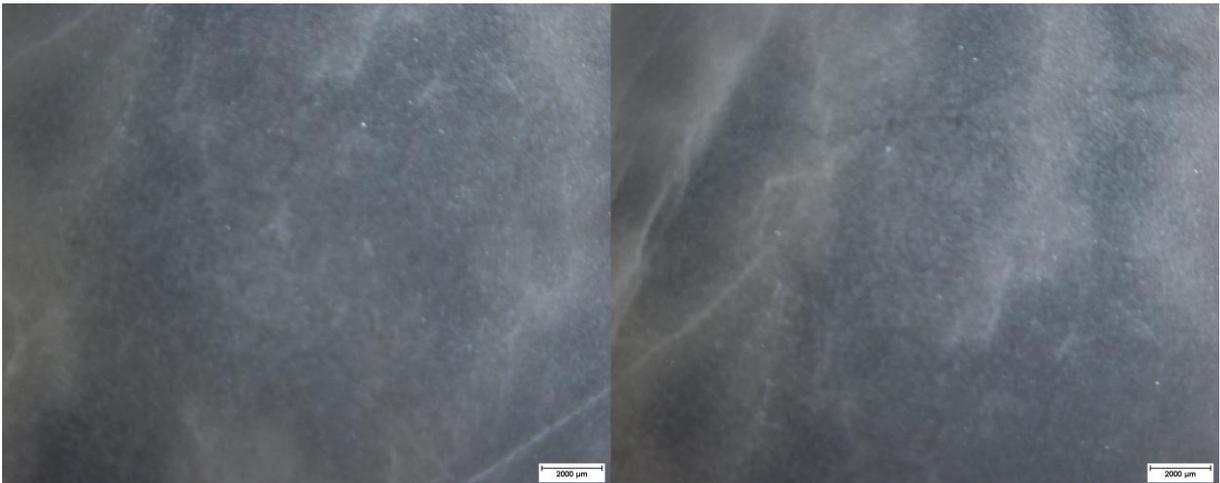


ANEXO B – GALERIA MACROSCÓPICA DAS AMOSTRAS DA MINA CABEÇA DE NEGRO (AMOSTRAS CN-04, CN -05, CN-06)

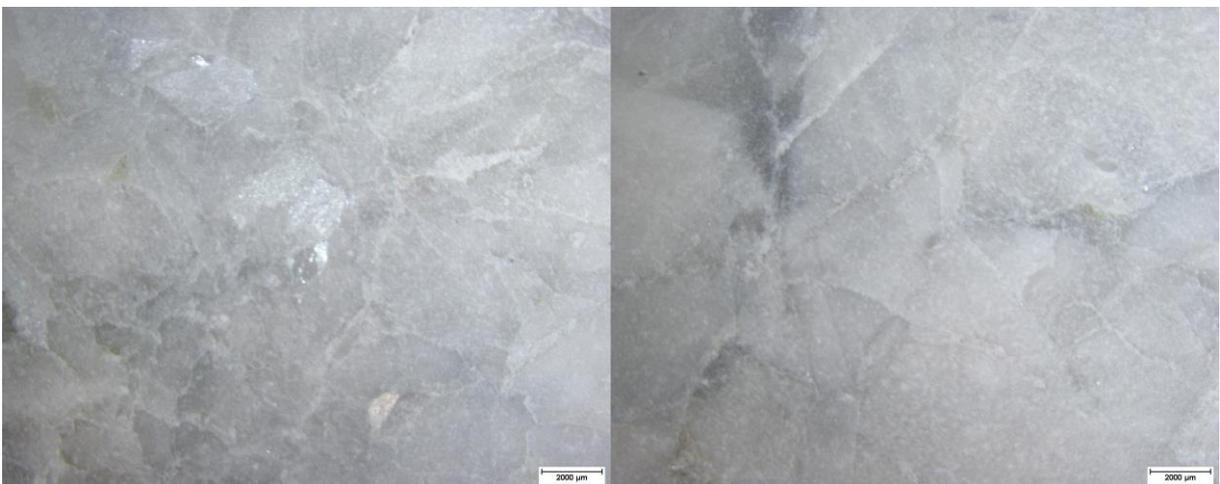
Amostra CN – 04:



Amostra CN – 05:



Amostra CN – 06:



ANEXO C – GALERIA MACROSCÓPICA DAS AMOSTRAS DA MINA CABEÇA DE NEGRO (AMOSTRAS CN-07, CN-08, CN-09)

Amostra CN – 07:



Amostra CN – 08:

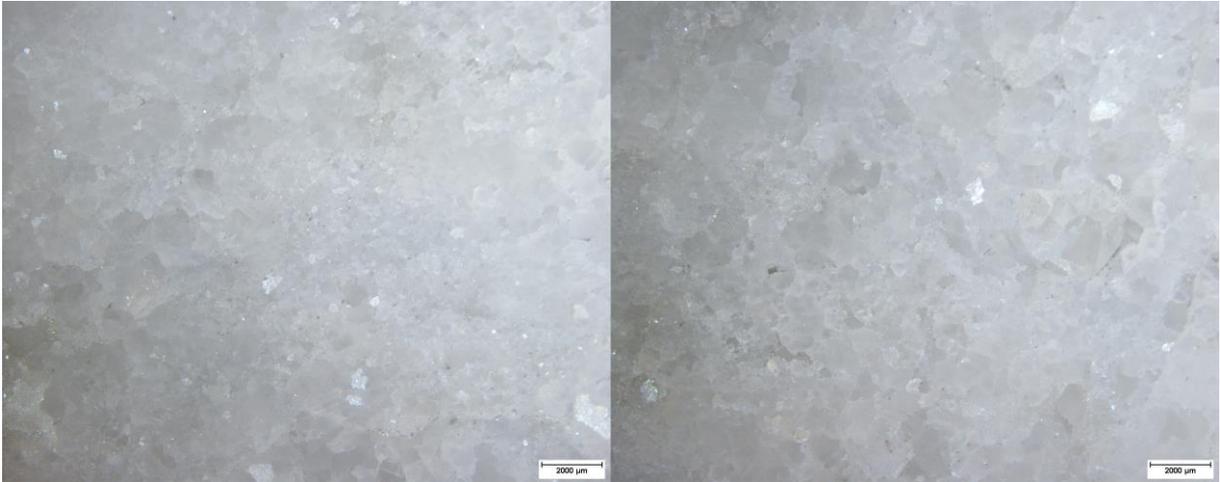


Amostra CN – 09:

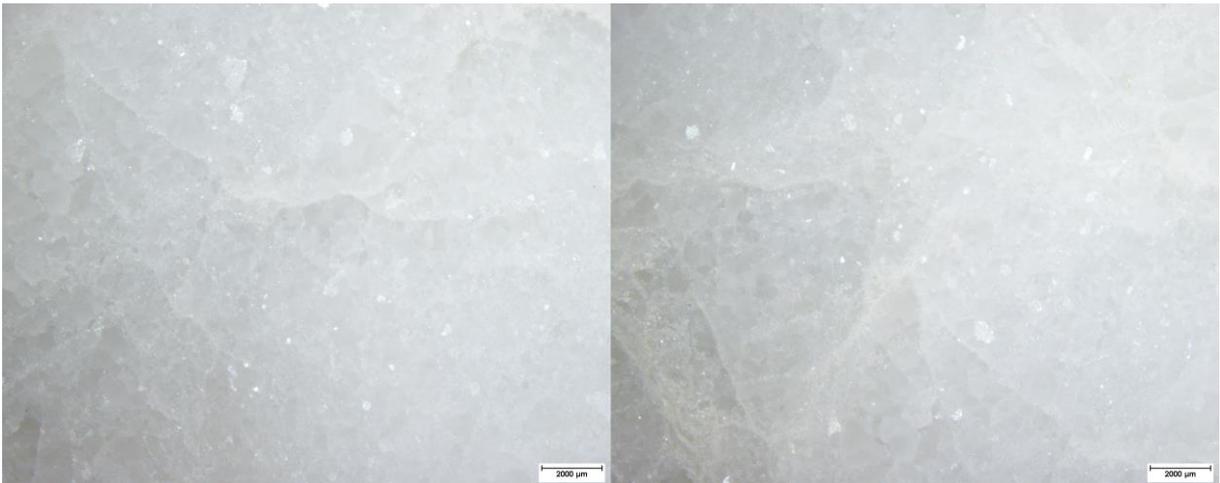


ANEXO D – GALERIA MACROSCÓPICA DAS AMOSTRAS DA MINA RIACHO FUNDO (AMOSTRAS RF-02, RF-03, RF-05)

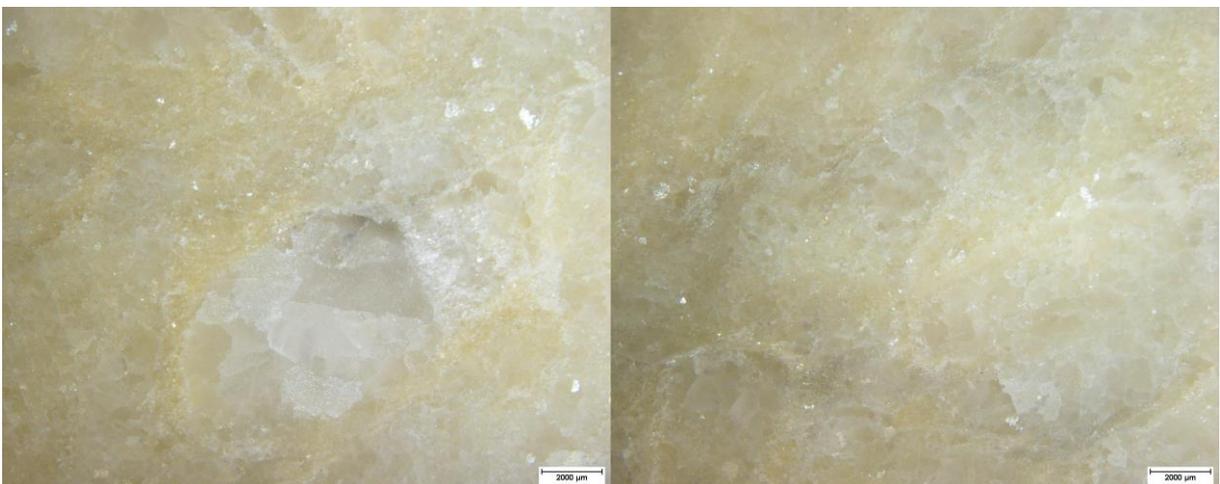
Amostra RF – 02:



Amostra RF – 03:

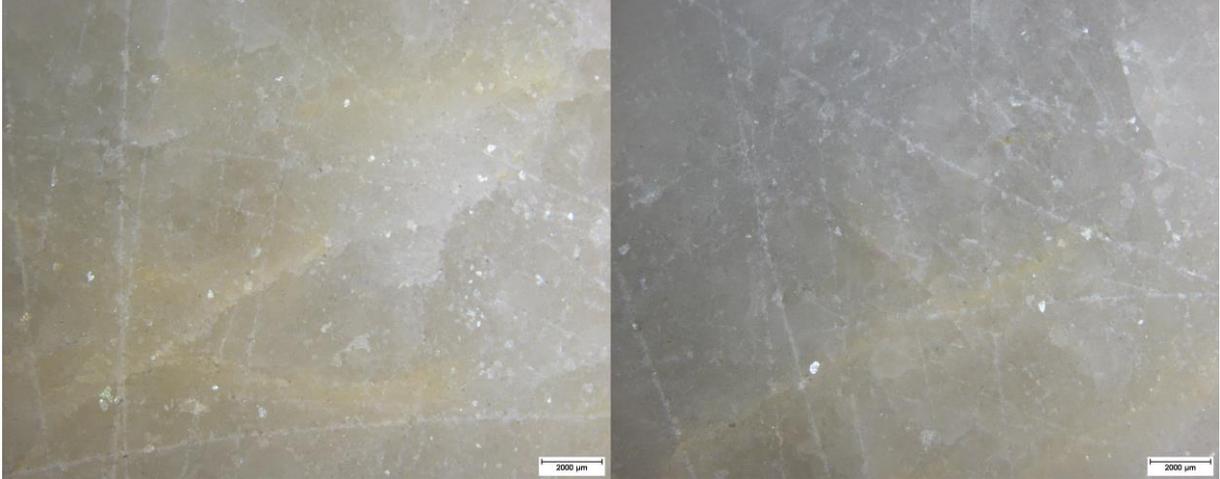


Amostra RF – 05:

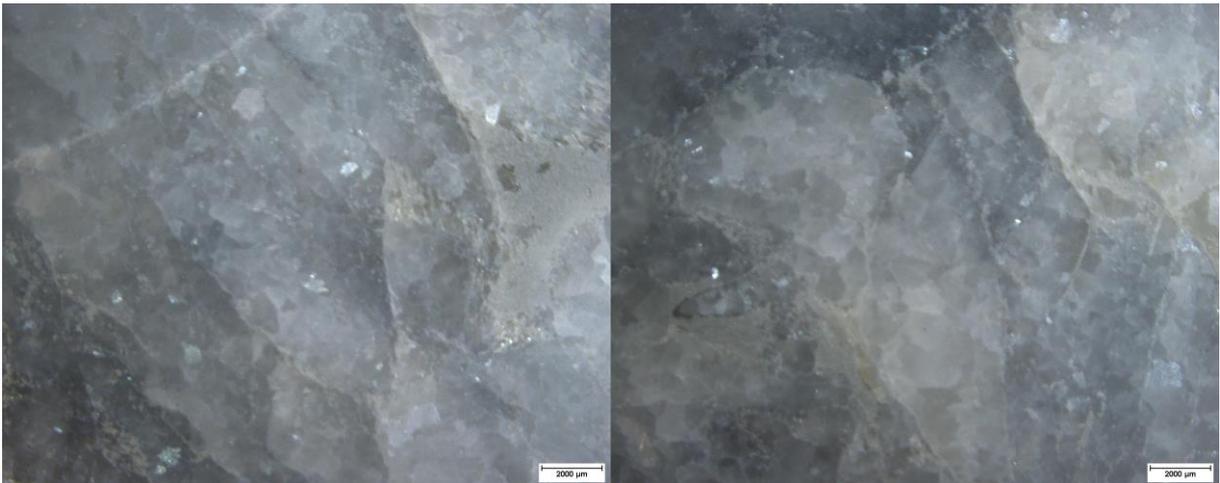


ANEXO E – GALERIA MACROSCÓPICA DAS AMOSTRAS DA MINA RIACHO FUNDO (AMOSTRAS RF-06, RF-08, RF-10)

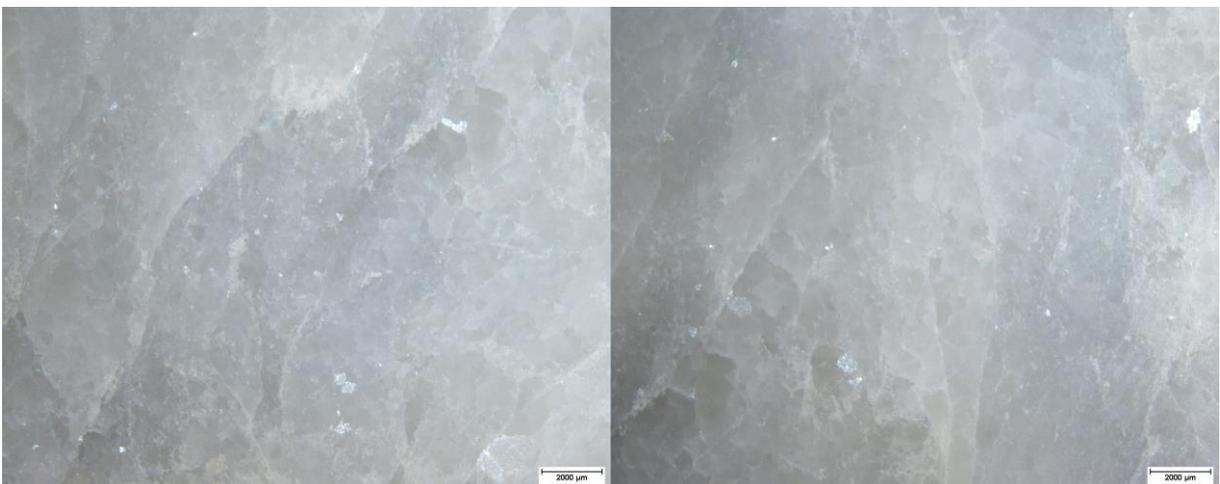
Amostra RF – 06:



Amostra RF – 08:

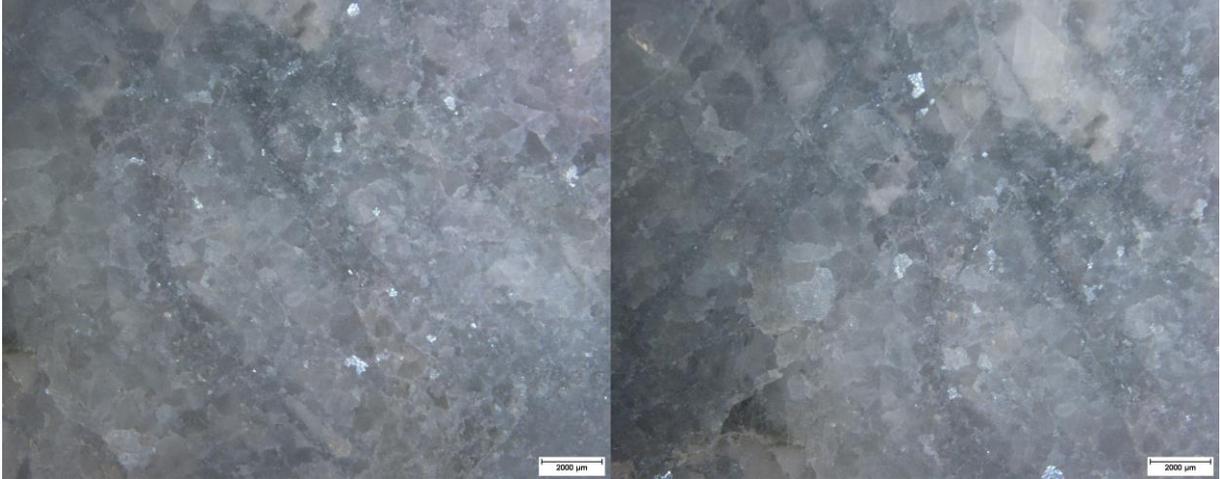


Amostra RF – 10:

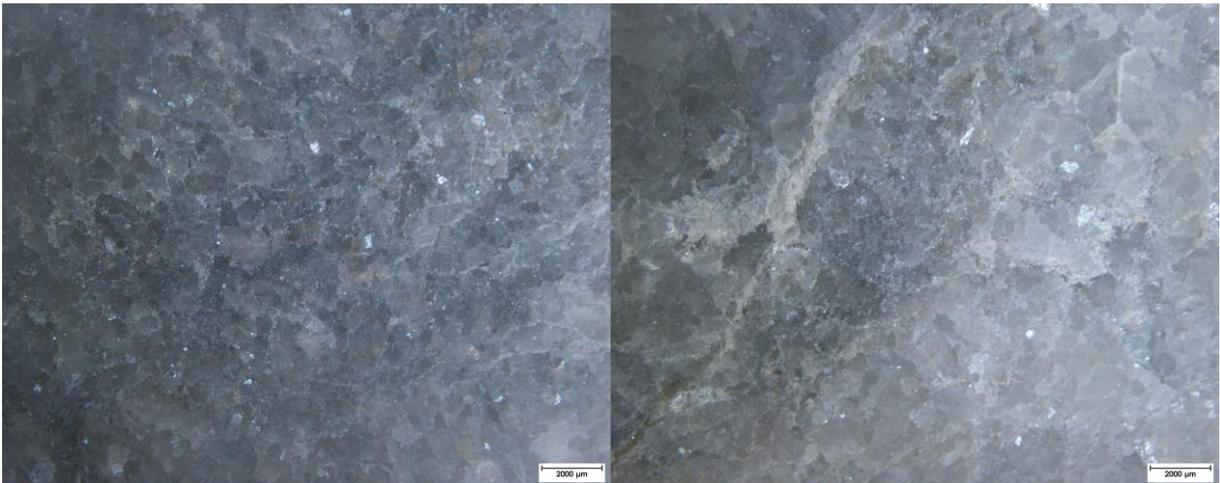


**ANEXO F – GALERIA MACROSCÓPICA DAS AMOSTRAS DA MINA DO TORTO
(AMOSTRAS TO-01, TO-02, TO-04)**

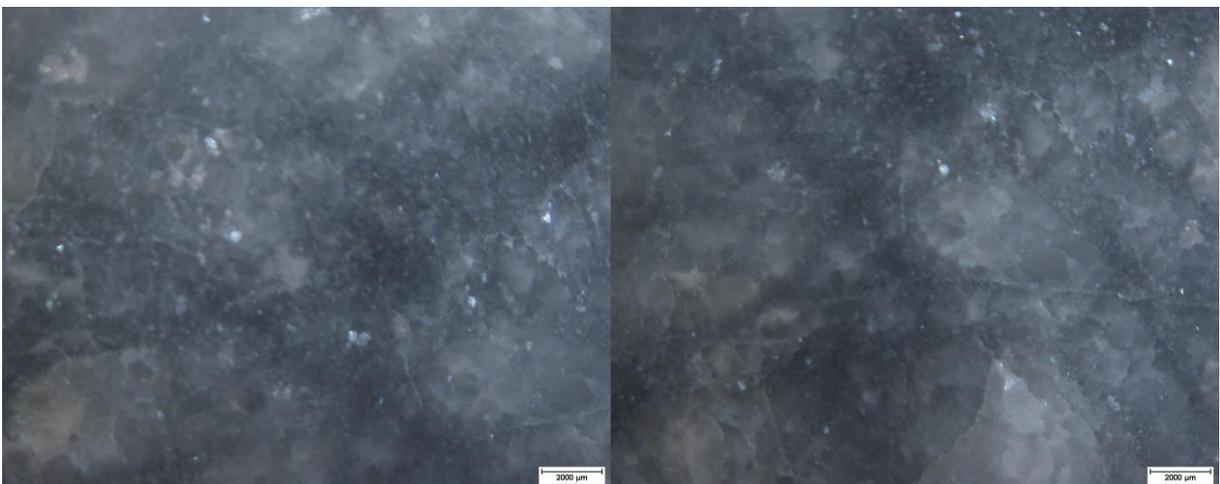
Amostra TO – 01:



Amostra TO – 02:

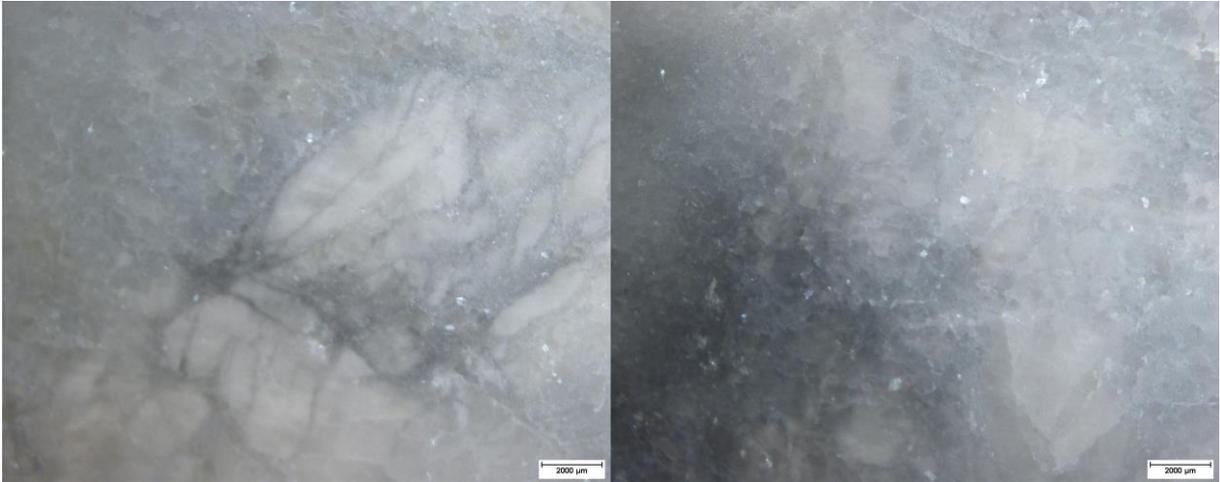


Amostra TO – 04:



**ANEXO G – GALERIA MACROSCÓPICA DAS AMOSTRAS DA MINA DO TORTO
(AMOSTRAS TO-05, TO-06, TO 07)**

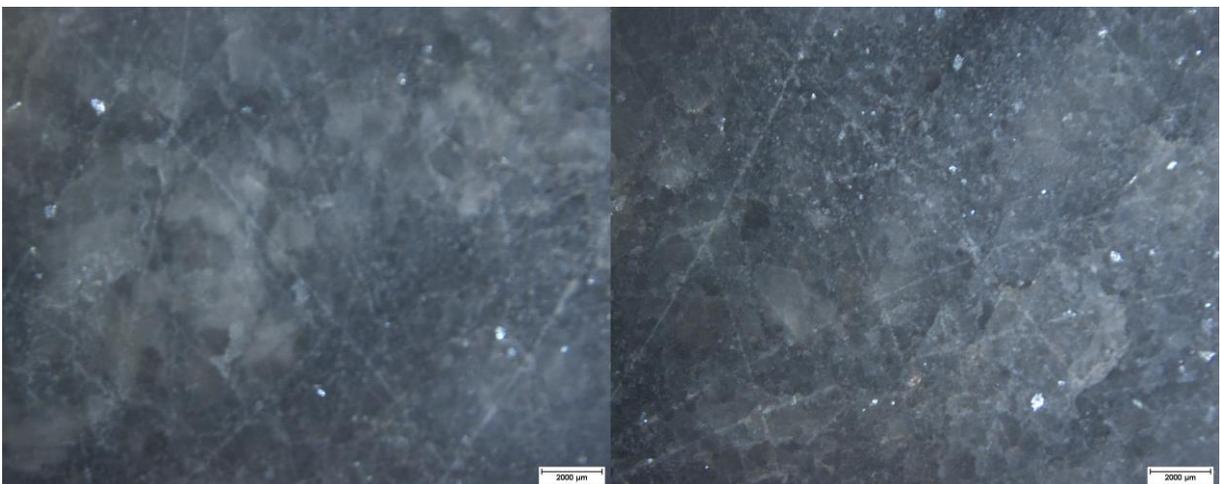
Amostra TO – 05:



Amostra TO – 06:



Amostra TO – 07:

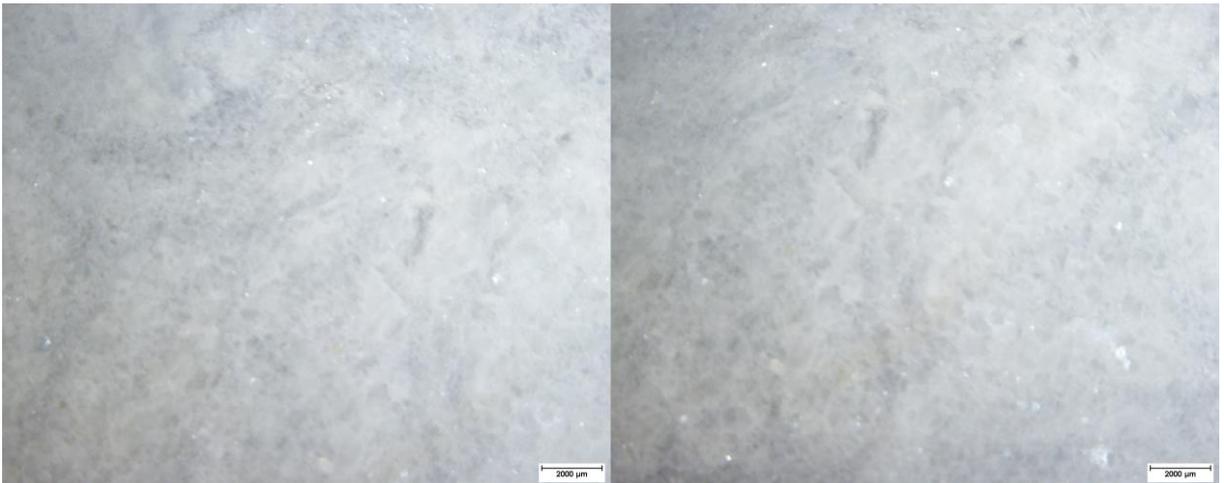


**ANEXO H – GALERIA MACROSCÓPICA DAS AMOSTRAS DA MINA DO TORTO
(AMOSTRAS TO-08, TO-09, TO-10)**

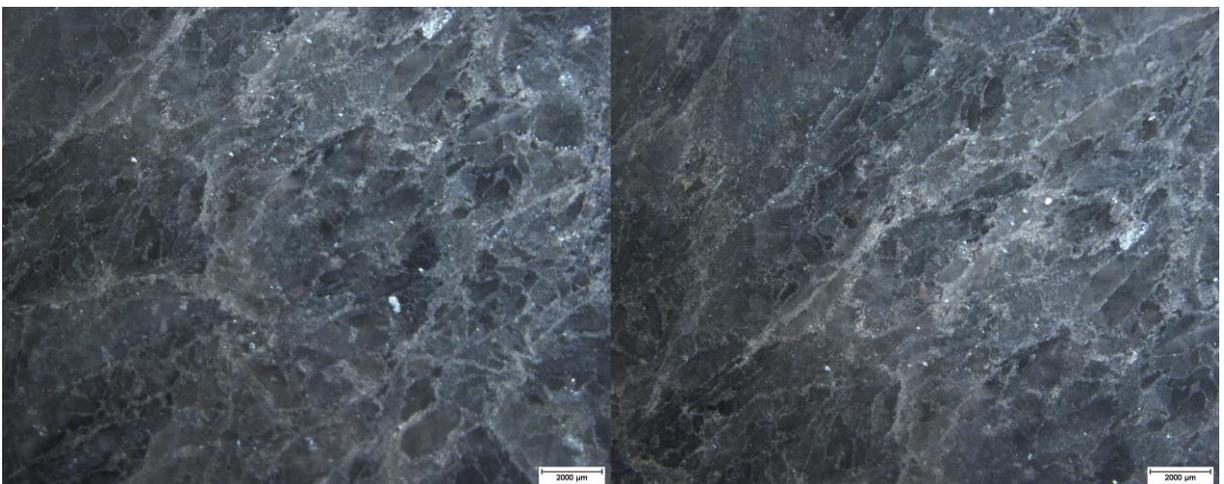
Amostra TO – 08:



Amostra TO – 09:

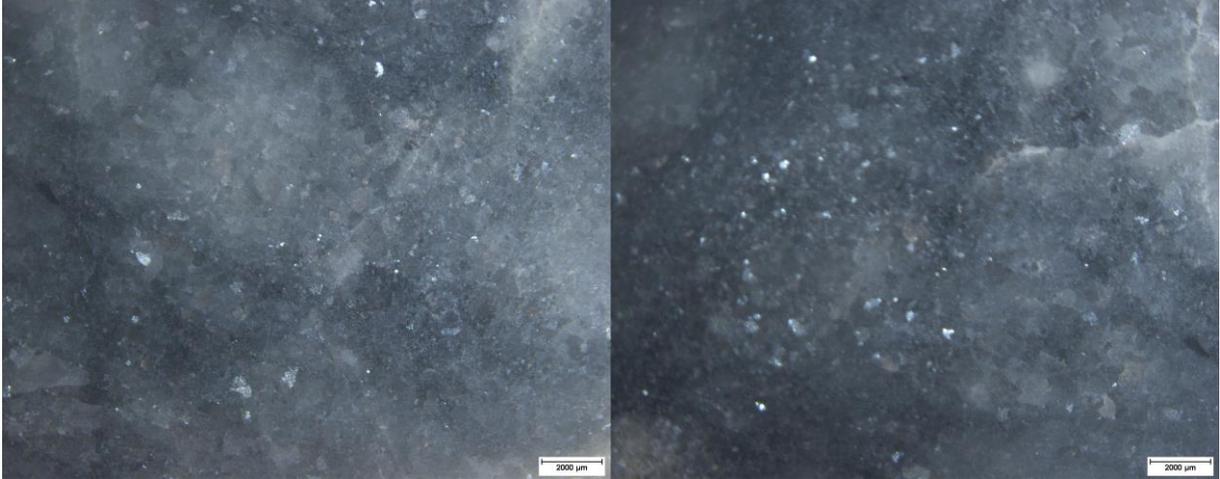


Amostra TO – 10:

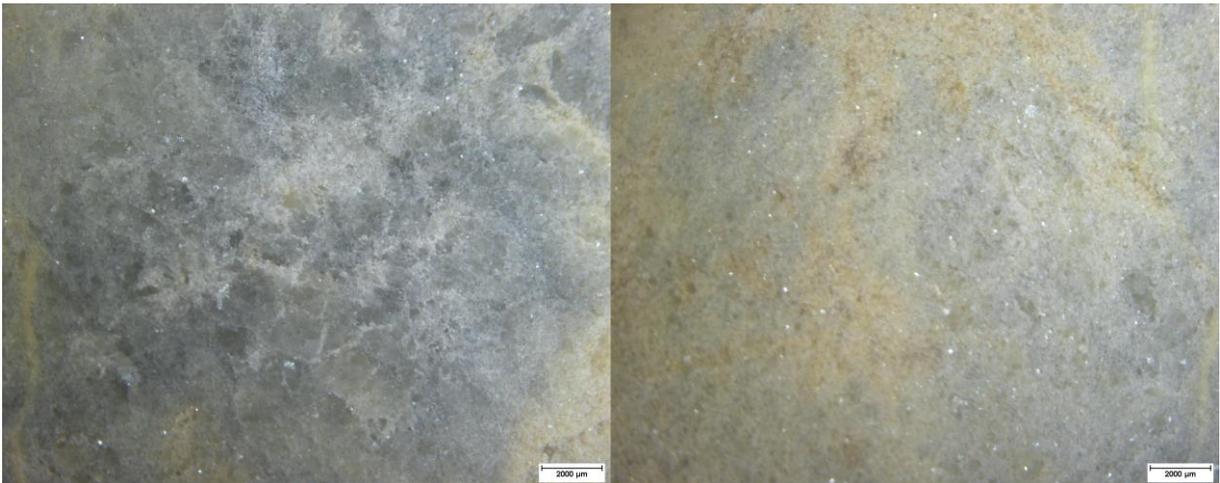


**ANEXO I – GALERIA MACROSCÓPICA DAS AMOSTRAS DA MINA DO TORTO
(AMOSTRAS TO-11, TO-12)**

Amostra TO – 11:



Amostra TO – 12:



ANEXO J – LÂMINA PETROGRÁFICA (AMOSTRA CN – 03)

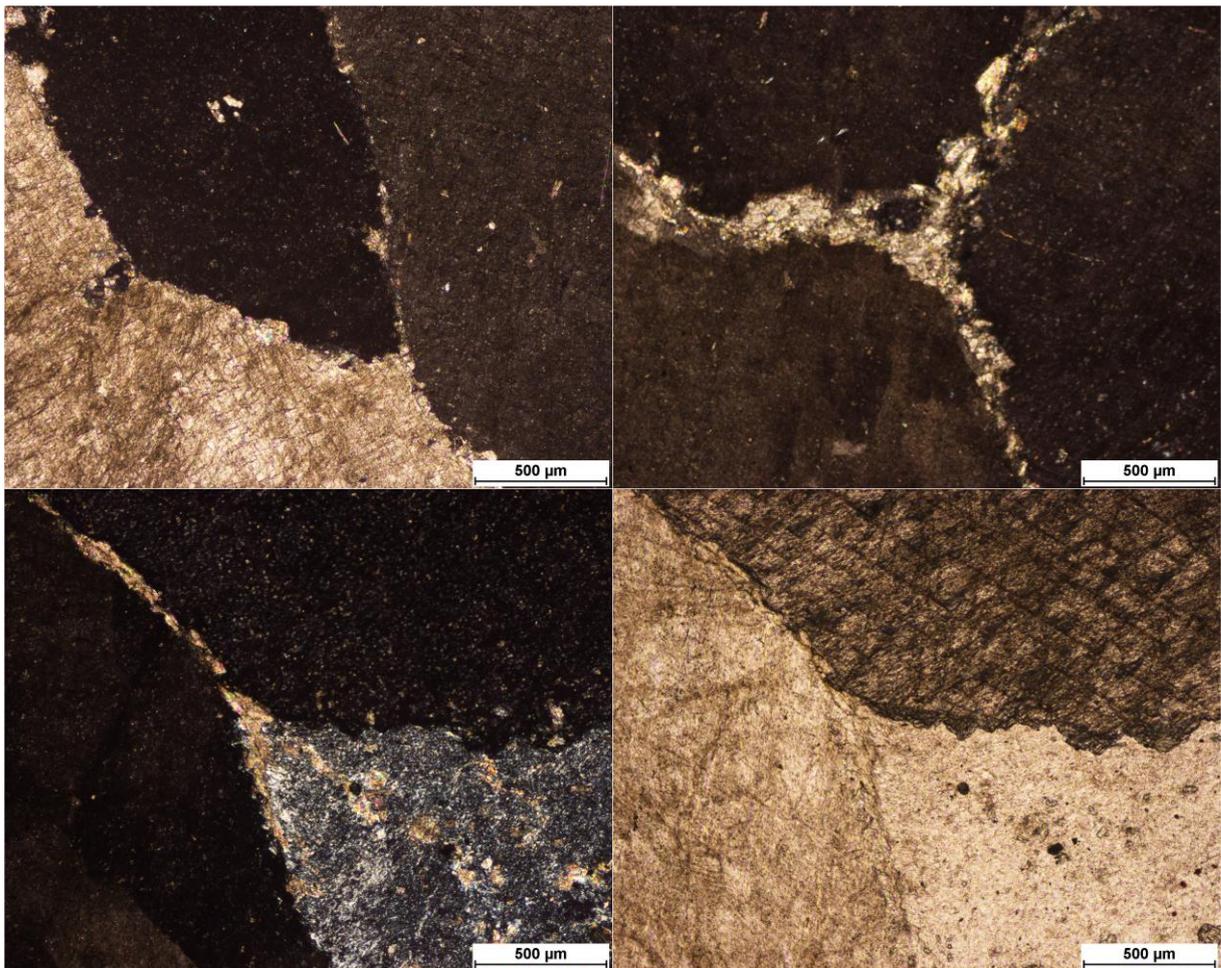
Classificação: Mármore magnésítico espático. Composto predominantemente por carbonato, com presença de talco e serpentina.

Os carbonatos são incolores, sem pleocroísmo, com relevo baixo e clivagem romboédrica geralmente bem marcada. Os grãos são anedrais ou subédrais, maiores que 2 mm, com contatos irregulares, por vezes com bordas de recristalização.

Talco aparece em pequenos bolsões, preenchendo fraturas ou como microlamelas no interior dos carbonatos. São incolores e anedrais, sem pleocroísmo, relevo baixo e cor de interferência de alta ordem.

A serpentina é incolor, anedral, sem pleocroísmo e relevo baixo, se diferencia do talco pelo hábito e pela cor de interferência.

Fotomicrografias 5X a nicóis cruzados (NX) e a nicóis descruzados (NII).



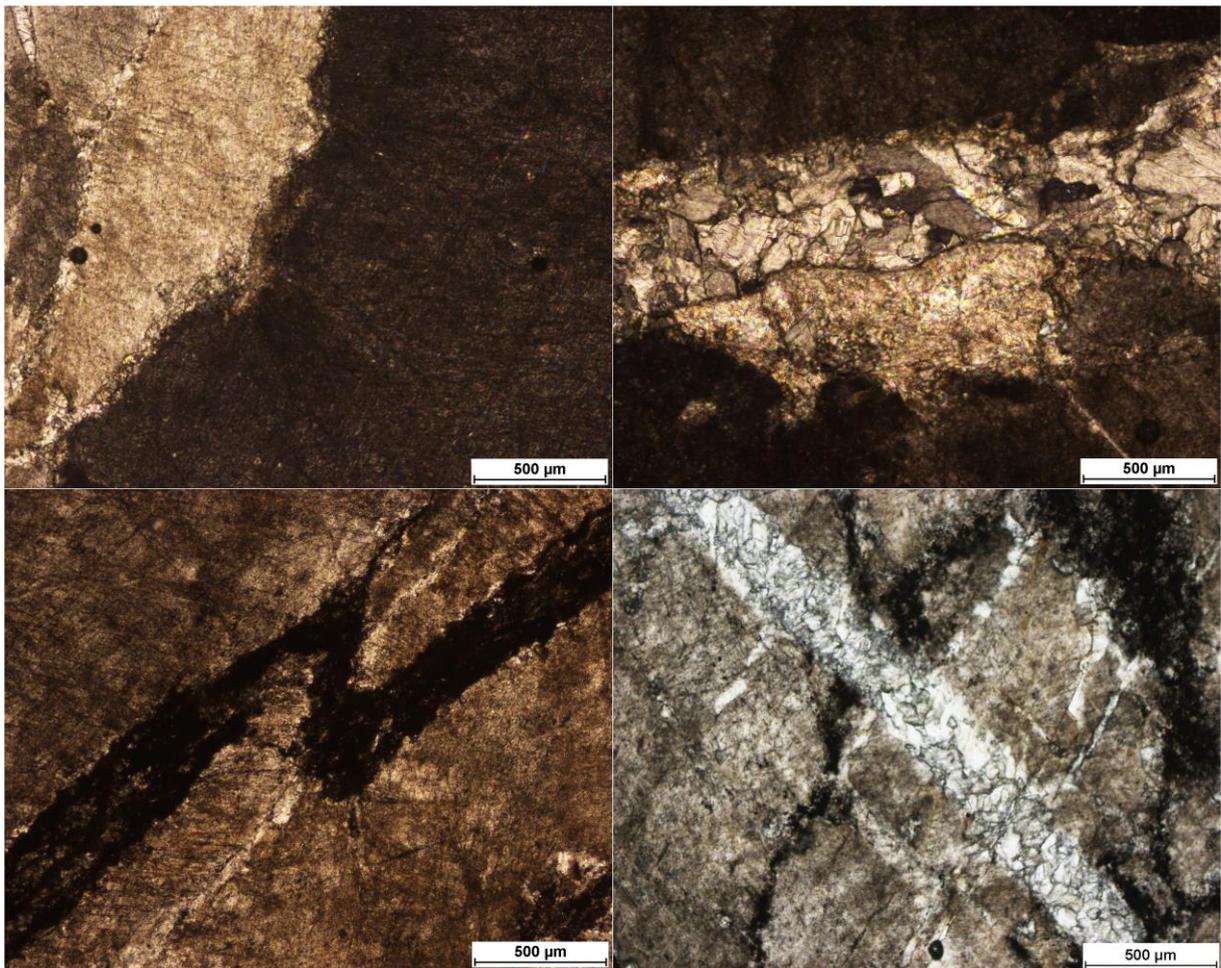
A) grãos de carbonato a NX com contato irregular; B) contato irregular entre grãos de carbonatos, marcado pela presença de carbonato recristalizado e talco; C) serpentina (material branco/acinzentado) e talco, que aparece preenchendo uma fratura entre os grãos, e em pequenos bolsões dentro da serpentina; D) mesmo local que fotomicrografia (C), a NII.

ANEXO K – LÂMINA PETROGRÁFICA (AMOSTRA CN – 04)

Classificação: Mármore magnésítico espático. Composto predominantemente por carbonato, com presença de talco e material opaco.

Os carbonatos são incolores, sem pleocroísmo e com relevo médio. Os grãos são anedrais ou subédrais, com contatos irregulares. Toda a lâmina é recortada por extensas fraturas irregulares preenchidas ora por carbonatos recristalizados, geralmente acompanhadas por bolsões de talco, ora por um material opaco. O material carbonático que preenche as fraturas é anedral a subédral, possuindo granulometria mais fina, menores que 1mm, contrastando com o restando da lâmina. O talco aparece em grandes bolsões, em contatos ou como microlamelas no interior dos carbonatos. São incolores, anedrais, sem pleocroísmo, possuem relevo baixo e cor de interferência de alta ordem.

Fotomicrografias 5X a nicóis cruzados (NX) e a nicóis descruzados (NII).



A) cristais de carbonato com contato irregular, a NX e aumento de 5X; B) fratura preenchida por calcita recristalizada, acompanhada por um bolsão de talco; C) fratura preenchida por um material opaco; D) fratura preenchida por calcita recortando fraturas preenchidas por opacos.

ANEXO L – LÂMINA PETROGRÁFICA (AMOSTRA CN – 07)

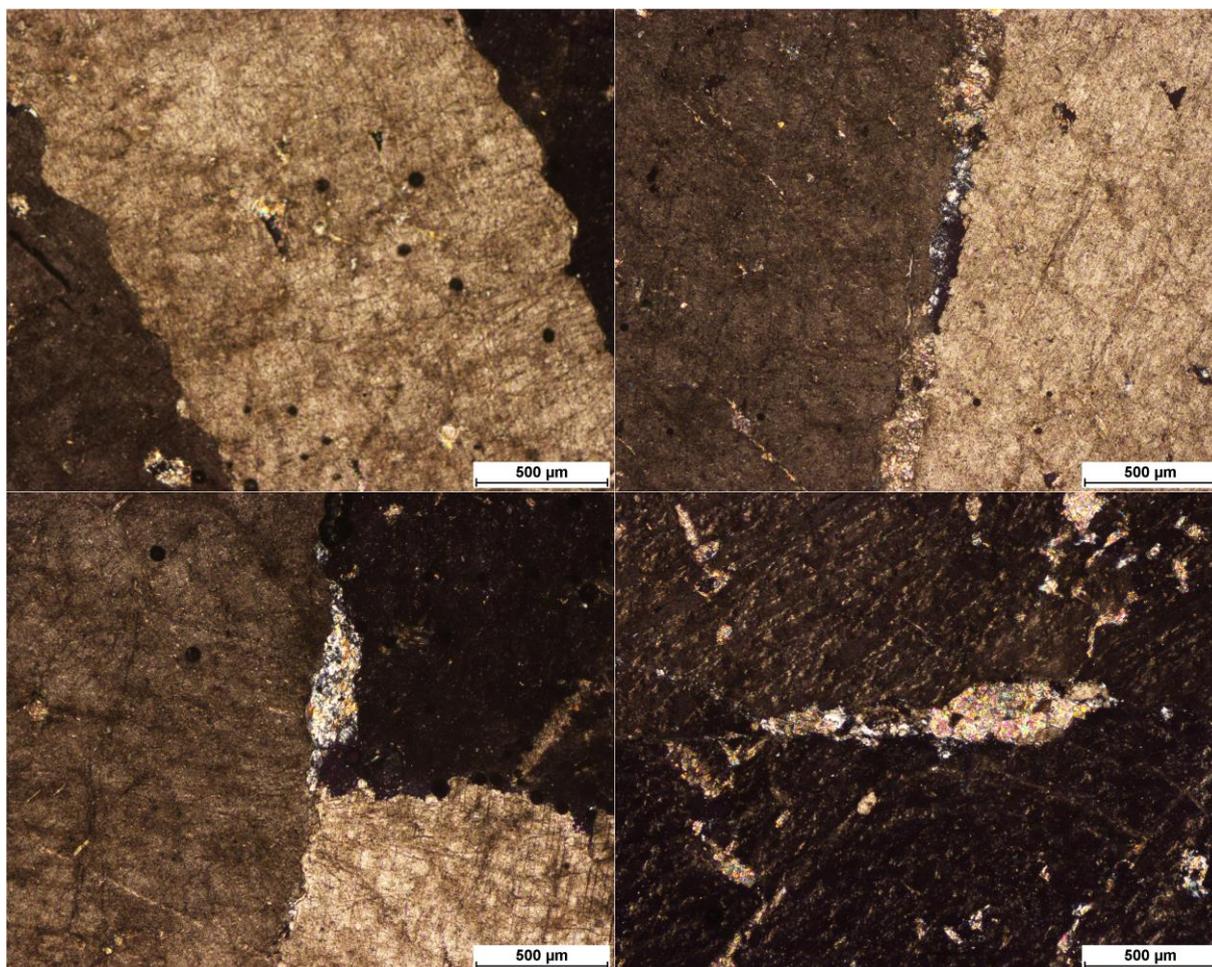
Classificação: Mármore magnesítico espático. Composto predominantemente por carbonato, com presença de talco e serpentina.

Os carbonatos são incolores, sem pleocroísmo e com relevo médio. Os grãos são anedrais ou subédrais, maiores que 2 mm, com contatos irregulares.

O talco está presente preenchendo fraturas ou como microlamelas ou pequenos bolsões no interior dos carbonatos. São incolores e anedrais, sem pleocroísmo, relevo baixo e cor de interferência de alta ordem.

A serpentina aparece em fraturas e no contato entre grãos. São incolores, anedrais e sem pleocroísmo, se diferenciando do talco pelo hábito e pela cor de interferência.

Fotomicrografias 5X a nicóis cruzados (NX).



A) grãos de carbonato com pequenas inclusões de talco; B) talco e serpentina preenchendo fratura entre grãos de carbonato; C) serpentina preenchendo fratura entre grãos de carbonato; D) talco preenchendo fratura e em pequenos bolsões no interior dos carbonatos.

ANEXO M – LÂMINA PETROGRÁFICA (AMOSTRA CN – 09)

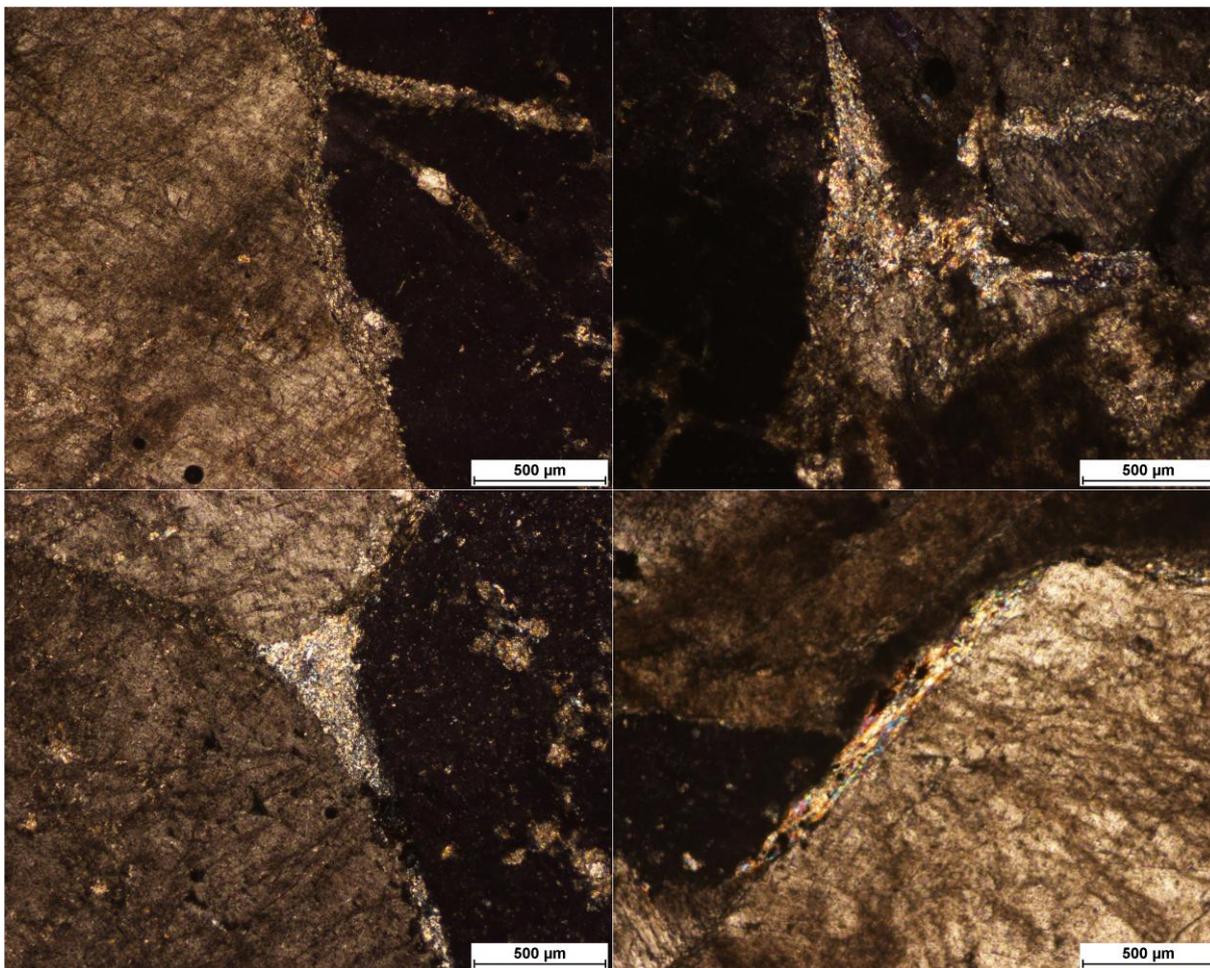
Classificação: Mármore magnésítico espático. Composto predominantemente por carbonato, com presença de talco, serpentina e por vezes material opaco.

Os carbonatos são incolores, sem pleocroísmo, e com relevo médio. Os grãos são anedrais ou subedrais, contatos irregulares, geralmente marcados por recristalização e ou talco.

O talco está presente preenchendo fraturas ou como microlamelas ou pequenos bolsões no interior dos carbonatos. São incolores e anedrais, sem pleocroísmo, relevo baixo e cor de interferência de alta ordem.

A serpentina aparece em fraturas e no contato entre grãos. São incolores, anedrais e sem pleocroísmo, se diferenciando do talco pelo hábito e pela cor de interferência.

Fotomicrografias 5X a nicóis cruzados (NX).



A) contato irregular entre grãos de carbonato, havendo a presença de talco entre os grãos; B) talco e serpentina preenchendo fratura; C) serpentina entre grãos de carbonato. É possível observar pequenos bolsões de talco no interior dos carbonatos ; D) Talco preenchendo fratura.

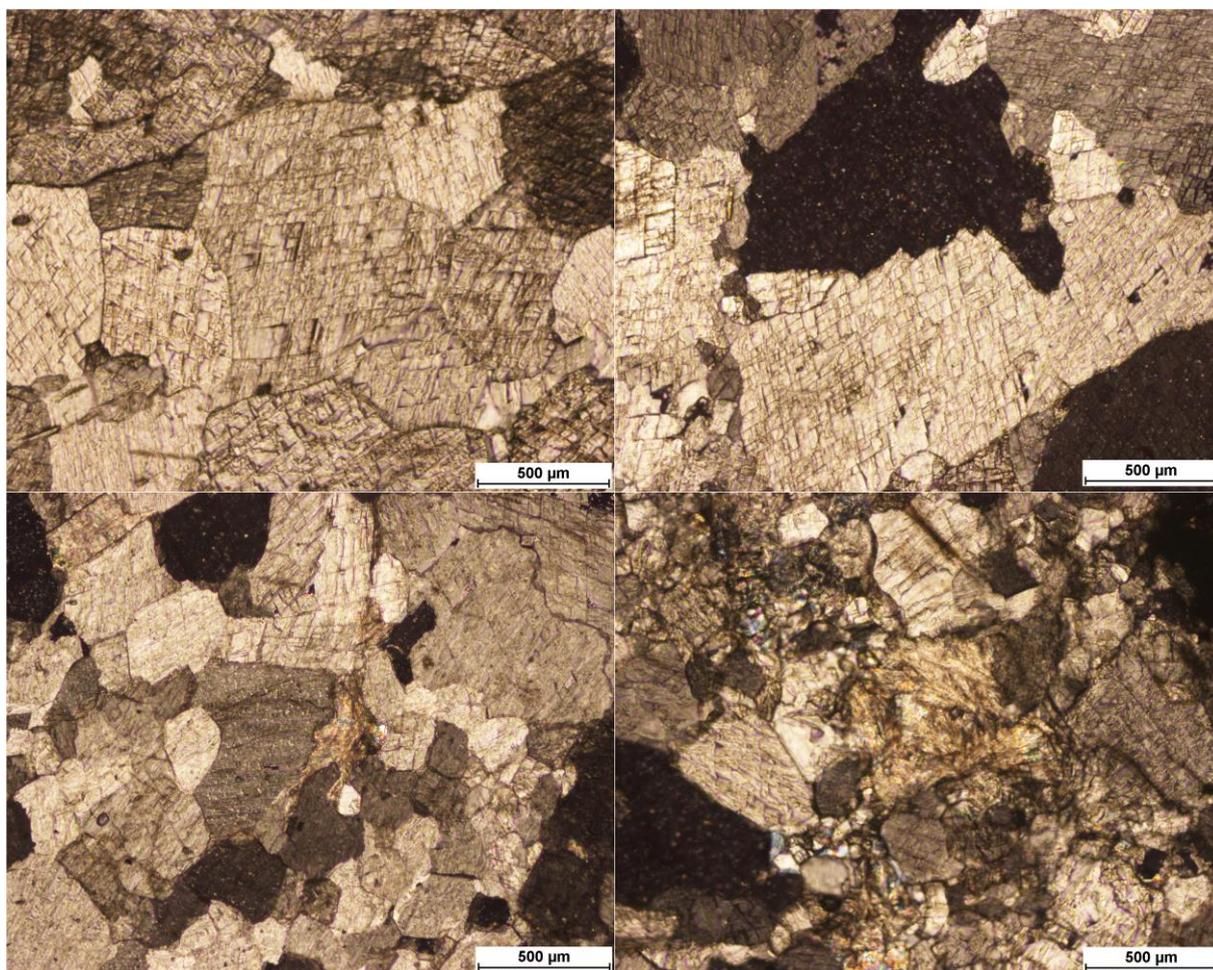
ANEXO N – LÂMINA PETROGRÁFICA (AMOSTRA RF – 03)

Classificação: Mármore magnésítico de grão fino. Composto predominantemente por carbonato, com presença de talco.

Os carbonatos são incolores, sem pleocroísmo, e com relevo médio. Os grãos são em sua maioria subedrais, geralmente em torno ou menores que 1 mm, com clivagem romboédrica bem marcada. É comum microinclusões de talco no interior dos grãos.

O talco está presente como pequenos bolsões entre os grãos de carbonato. São incolores, anedrais, sem pleocroísmo, possuem relevo baixo e cor de interferência de alta ordem.

Fotomicrografias 5X a nicóis cruzados (NX) e a nicóis descruzados (NII).



A) grãos de carbonato a NII, com clivagem romboédrica bem marcada; B) grãos de carbonato de granulometria média a NX, com clivagem bem marcada; C) bolsão de talco alongado entre grãos de carbonato a NX; D) bolsão de talco entre grãos anédricos/subédricos de carbonato a NX.

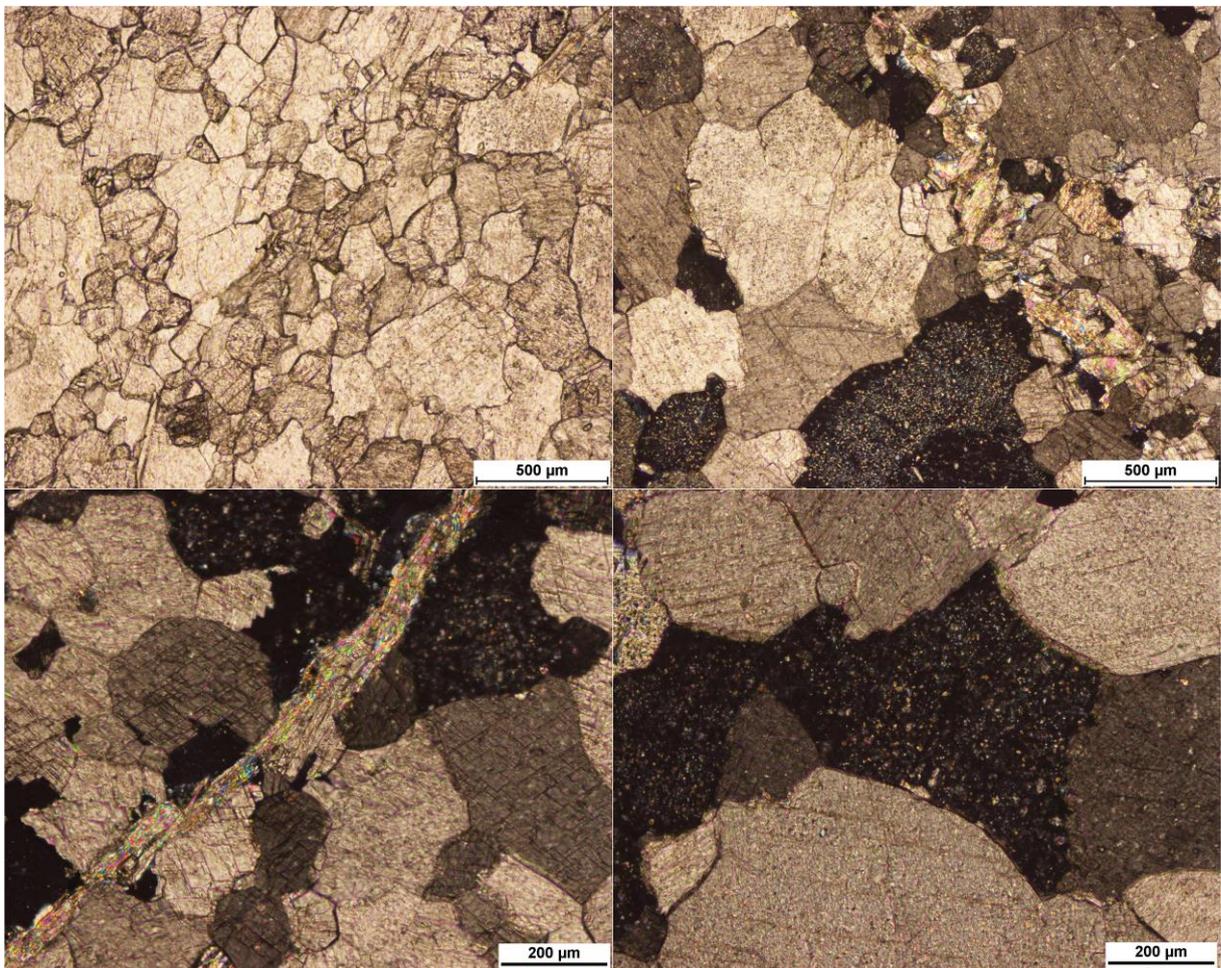
ANEXO O – LÂMINA PETROGRÁFICA (AMOSTRA RF – 06)

Classificação: Mármore magnésítico de grão fino. Composto predominantemente por carbonato, com presença de talco.

Os carbonatos são incolores, sem pleocroísmo, com relevo médio. Os grãos são em sua maioria subédrais, menores que 1 mm, podendo demonstrar clivagem romboédrica bem marcada ou não. Os grãos em sua maioria apresentam microlamelas de talco em seu interior.

Além das microlamelas, o talco aparece também com hábito lamelar bem desenvolvido entre os grãos de carbonato. São incolores, subédrais, sem pleocroísmo, possuem relevo baixo e cor de interferência de alta ordem.

Fotomicrografias 5X e 10 X a nicóis cruzados (NX) e a nicóis descruzados (NII).



A) grãos de carbonato a NII e aumento de 5X; B) talco lamelar entre grãos de carbonato a NX e aumento de 5X; C) talco lamelar entre grãos de carbonato a NX e aumento de 10X; grão de carbonato com microlamelas de talco a NX e aumento de 10X.

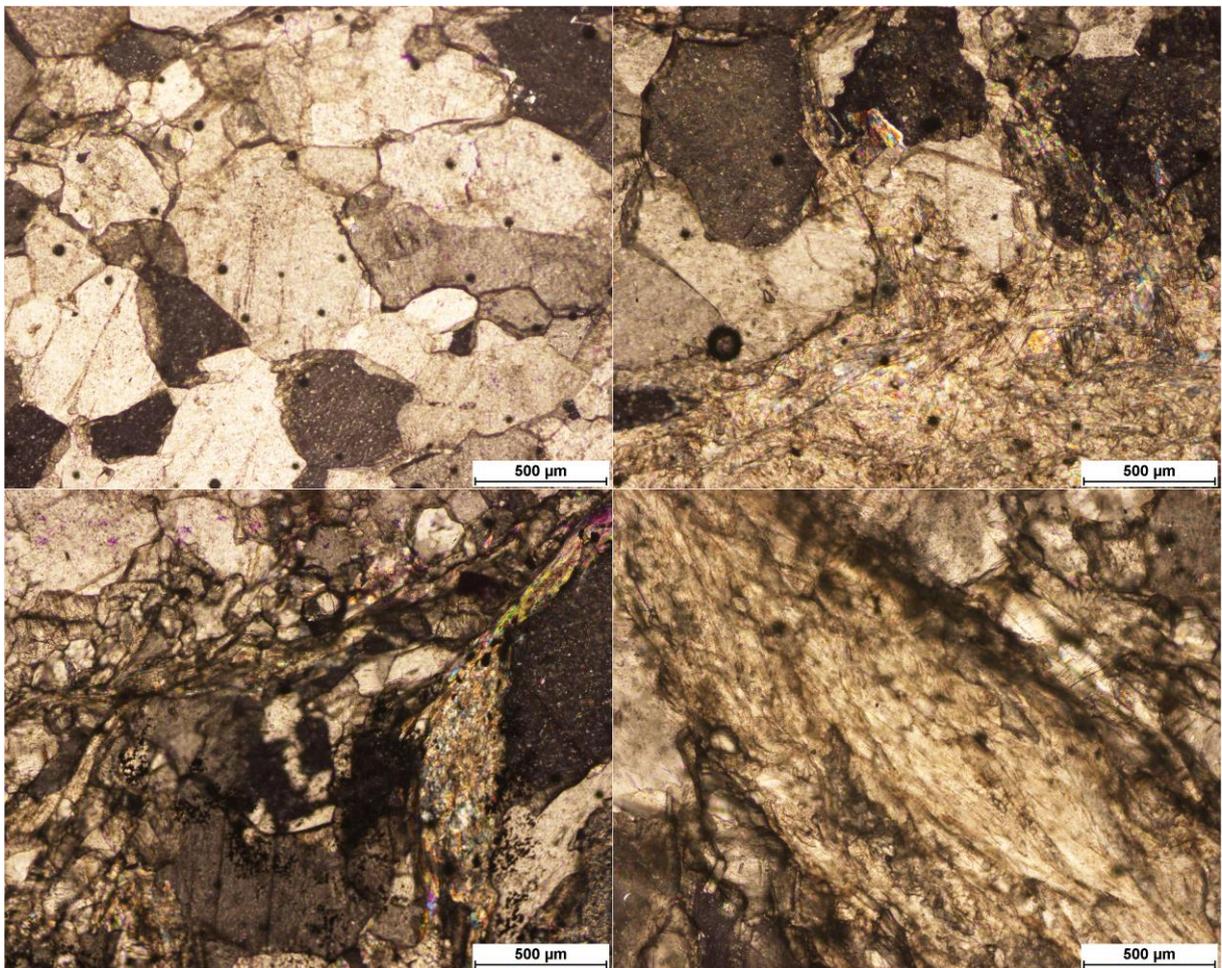
ANEXO P – LÂMINA PETROGRÁFICA (AMOSTRA RF – 10)

Classificação: Mármore magnésítico de grão fino. Composto por carbonato e talco.

Os carbonatos são incolores, sem pleocroísmo, com relevo médio. Os grãos são anedrais ou subédrais, menores que 1 mm. Zonas intensamente fraturadas são comuns, havendo recristaliação de carbonatos de menor granulometria, e presença de grandes fraturas preenchidas por talco.

O talco aparece em grandes bolsões, preenchendo fraturas presentes em toda a amostra. São incolores, anedrais, sem pleocroísmo, possuem relevo baixo e cor de interferência de alta ordem.

Fotomicrografias 5X a nicóis cruzados (NX) e a nicóis descruzados (NII).



A) grãos de carbonatos a NX. É possível observar pequenos bolsões de talco entre alguns grãos; B) bolsão de talco anedral na porção sul. Possível notar que talco percolando fraturas entre os grãos de carbonato, localizados na porção superior; C) zona fraturada, com recristalização de carbonato e fraturas preenchidas por talco; D) fratura preenchida por talco a NII.

ANEXO Q – LÂMINA PETROGRÁFICA (AMOSTRA TO – 04)

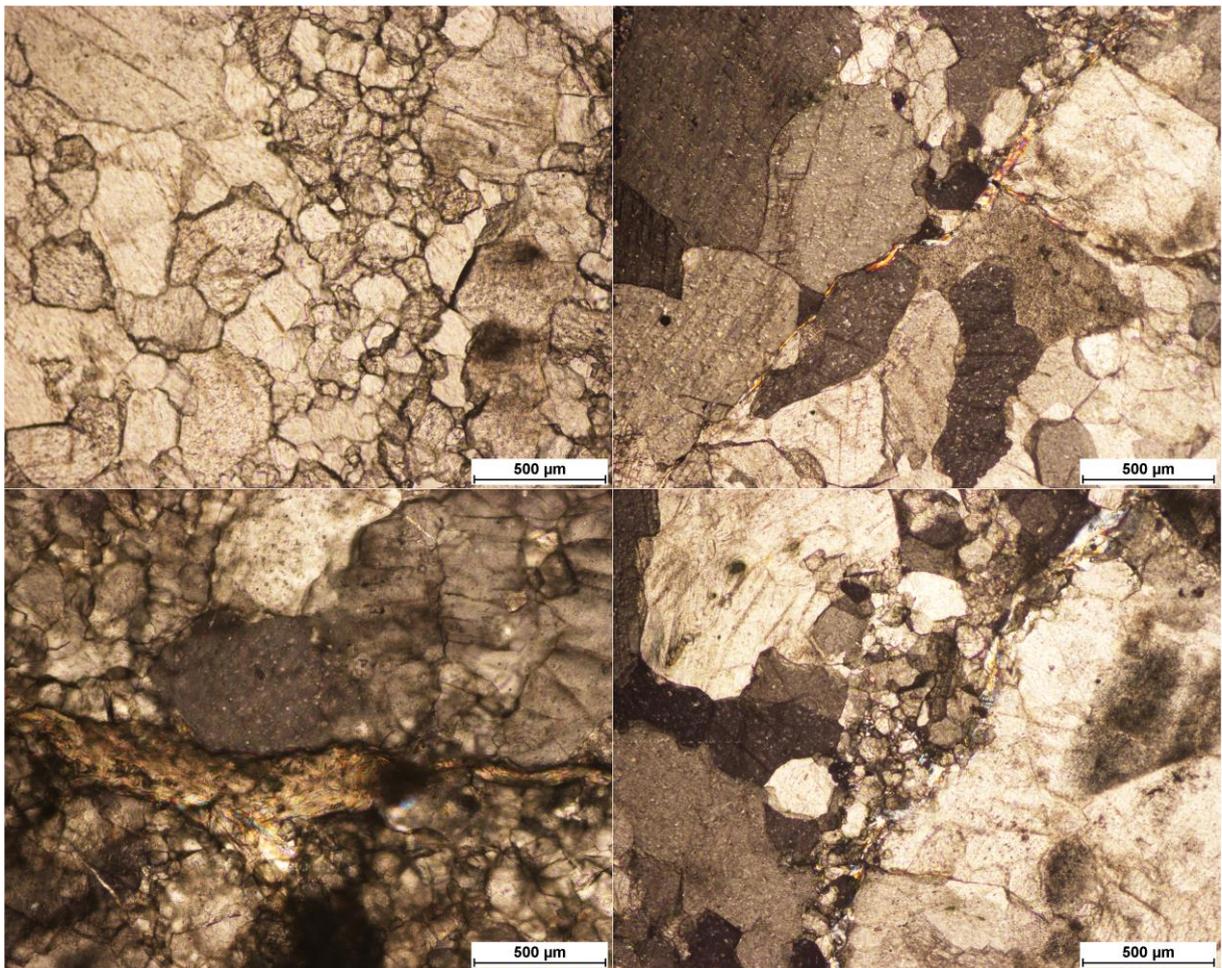
Classificação: Mármore magnésítico de grão fino. Composto predominantemente por carbonato, com presença de talco e eventualmente serpentina.

Os carbonatos são incolores, sem pleocroísmo, e com relevo médio. Os grãos são em geral anedrais, menores que 1 mm. Zonas fraturadas são comuns, marcadas pela recristalização de carbonato com granulometria menor, por vezes acompanhadas de talco e serpentina.

O talco está presente em microlamelas dentro dos grãos de carbonato, ou preenchendo fraturas, geralmente ligadas às zonas de recristalização e menor granulometria dos carbonatos. São incolores, anedrais, sem pleocroísmo, relevo baixo e cor de interferência de alta ordem.

Eventualmente a serpentina aparece em pequenas fraturas, sempre acompanhadas pelo talco. São incolores, sem pleocroísmo, e se diferenciam do talco pela cor de interferência.

Fotomicrografias 5X a nicóis cruzados (NX) e a nicóis descruzados (NII).



A) grãos de carbonato de diferentes granulometrias a NII; B) talco preenchendo pequenas fraturas entre grãos de carbonato a NX; C) talco preenchendo fratura a NX; D) talco e tremolita preenchendo microfraturas entre grãos de carbonato a NX.

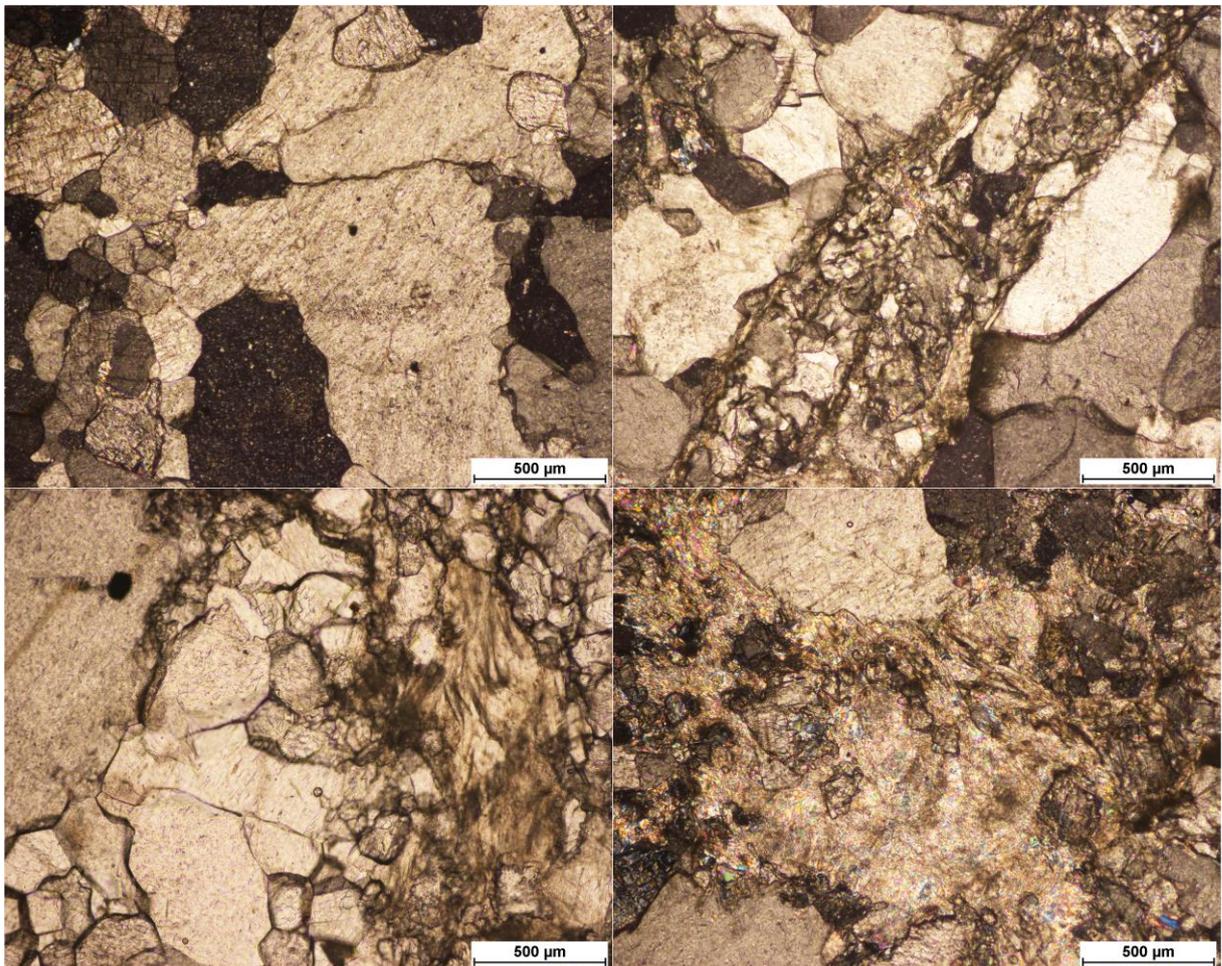
ANEXO R – LÂMINA PETROGRÁFICA (AMOSTRA TO – 05)

Classificação: Mármore magnésítico de grão fino. Composto por carbonato e talco.

Os carbonatos são incolores, sem pleocroísmo, e com relevo médio. Os grãos são anedrais ou subédrais, menores ou em torno de 1 mm. Extensas zonas de faturamento são comuns, marcadas pela recristalização de carbonatos com granulometria menor e pela presença de talco.

O talco está presente em microlamelas dentro dos grãos de carbonato, ou como bolsões de tamanhos variados, geralmente relacionados a zona de faturamento e recristalização. São incolores, anedrais, sem pleocroísmo, relevo baixo e cor de interferência de alta ordem.

Fotomicrografias 5X a nicóis cruzados (NX) e a nicóis descruzados (NII).



A) grãos de carbonato com granulometria variada a NX; B) zona de faturamento preenchida, marcada pela recristalização de carbonatos e pela presença de talco a NX; C) zona de faturamento preenchida, marcada por um bolsão de talco e carbonato recristalizado a NII; D) bolsão de talco em zona de faturamento a NX.

ANEXO S – LÂMINA PETROGRÁFICA (AMOSTRA TO – 09)

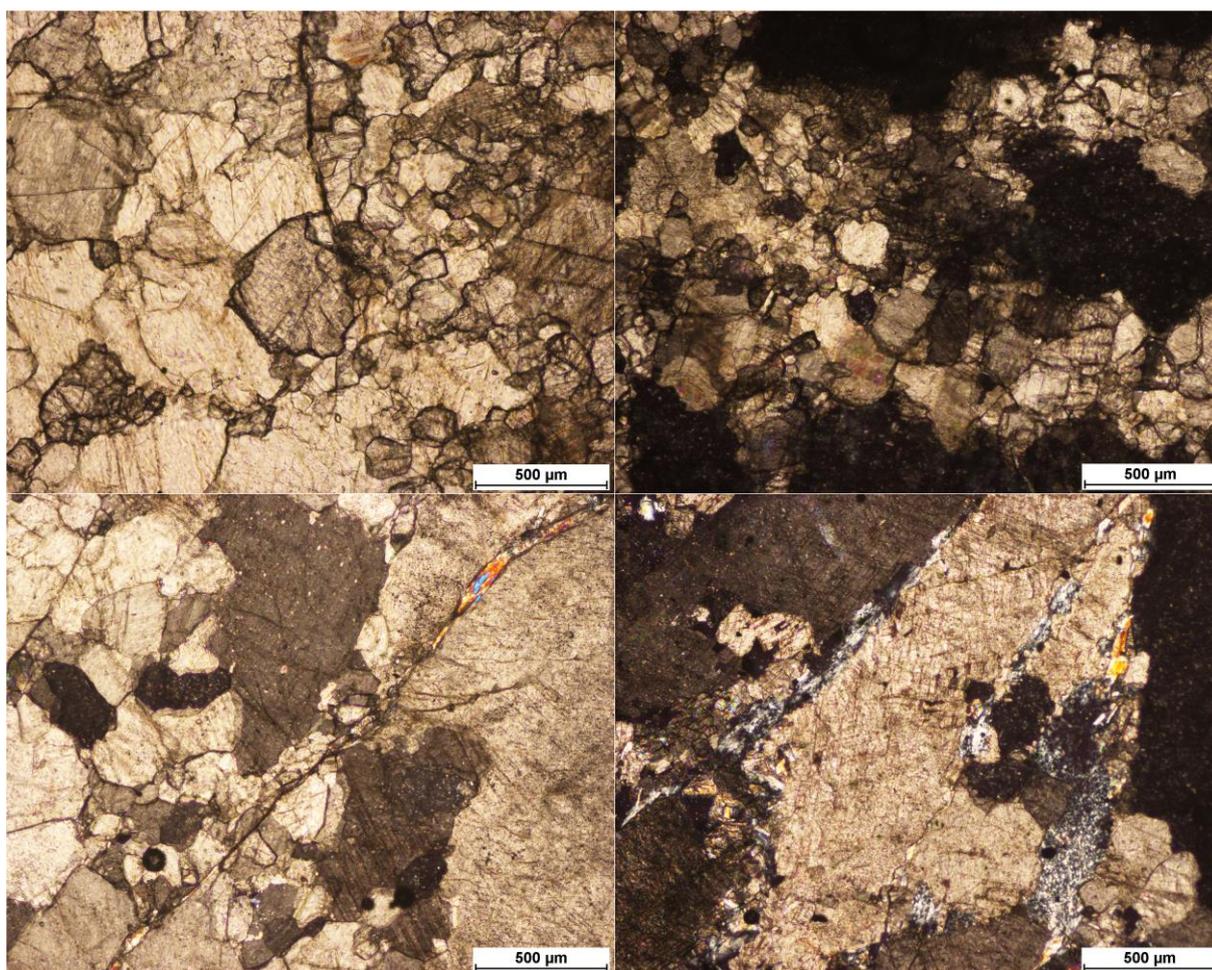
Classificação: Mármore magnésítico de grão médio. Composto por carbonato, com presença de talco e serpentina.

Os carbonatos são incolores, sem pleocroísmo, e com relevo médio. Os grãos são anedrais ou subédrais, geralmente abaixo de 1 mm, ocorrendo também grãos de até 2 mm. Zonas de faturamento são comuns, marcadas pela recristalização de carbonatos com granulometria menor e pela presença de taco.

O talco está presente em microlamelas dentro dos grãos de carbonato, ou preenchendo fraturas. São incolores, anedrais, sem pleocroísmo, relevo baixo e cor de interferência de alta ordem.

A serpentina aparece em fraturas entre os grãos, podendo estar acompanhada por talco. São incolores, sem pleocroísmo, e se diferenciam do talco pela cor de interferência.

Fotomicrografias 5X a nicóis cruzados (NX) e a nicóis descruzados (NII)



A) grãos de carbonato com diferentes granulometrias a NII; B) zona de faturamento com recristalização de carbonato e presença de talco a NX; C) talco preenchendo fratura entre grãos de carbonato a NX; D) serpentina preenchendo fraturas entre grãos de carbonato a NX.

ANEXO T – LÂMINA PETROGRÁFICA (AMOSTRA TO – 10)

Classificação: Mármore magnésítico de grão médio. Composto por carbonato, talco e serpentina.

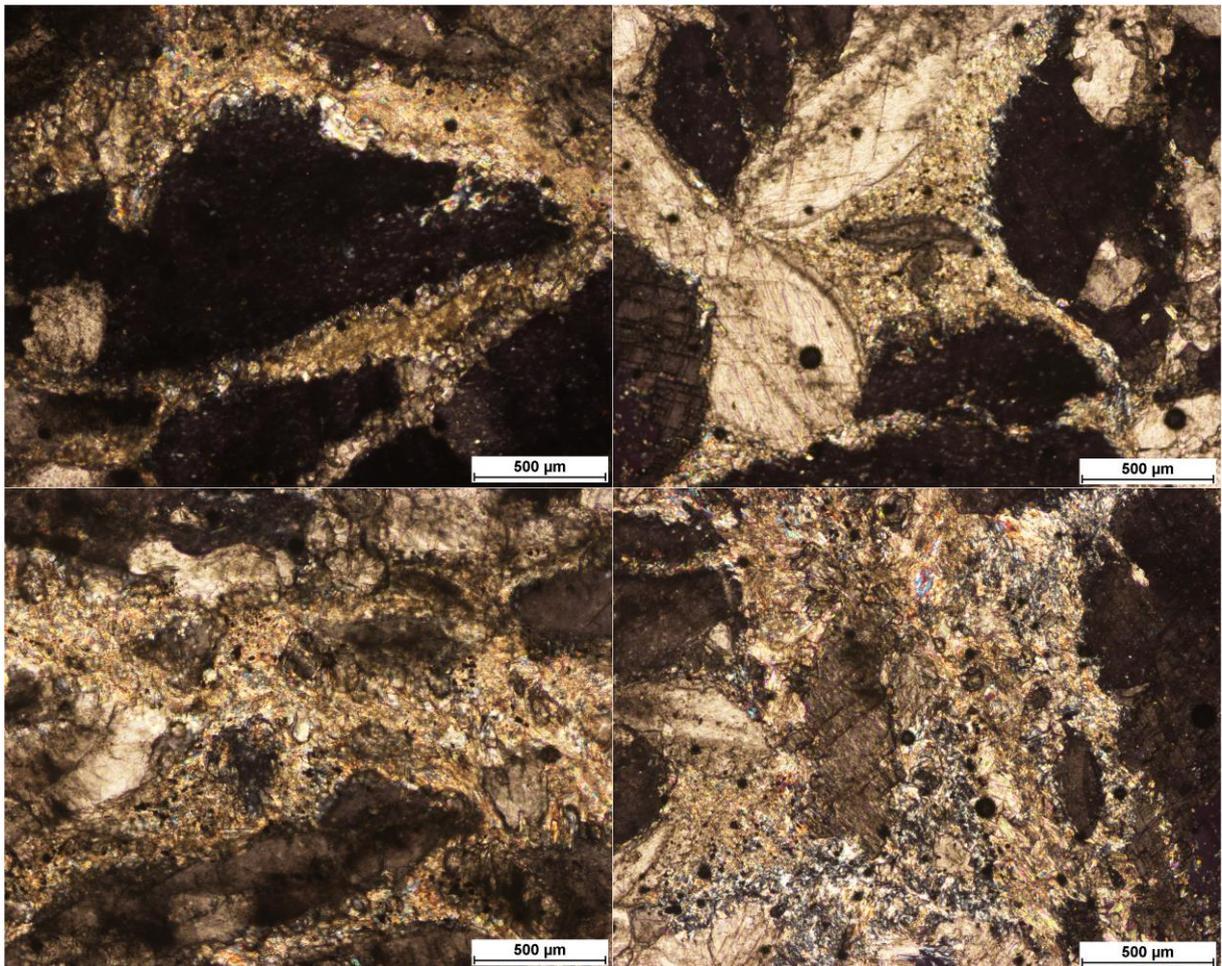
Os carbonatos são incolores, sem pleocroísmo, e com relevo médio. Os grãos são anedrais, menores que 2 mm. São recortados por extensas e frequentes zonas de faturamento preenchidas por talco e/ou clorita.

O talco está presente em microlamelas dentro dos grãos de carbonato, ou preenchendo fraturas.

São incolores, anedrais, sem pleocroísmo, relevo baixo e cor de interferência de alta ordem.

A serpentina aparece preenchendo fraturas. São incolores, sem pleocroísmo, e se diferenciam do talco pela cor de interferência.

Fotomicrografias 5X a nicóis cruzados (NX).



A) fraturas preenchidas por bolsões talco entre grãos de carbonato; B) bolsão de talco entre grãos de carbonato; C) rede de fraturas preenchidas por talco entre carbonato; D) fratura preenchida por talco e serpentina entre carbonato.