

## **Spectroradiometric characterization (VNIR-SWIR) of magnetitic ore of the south-central portion of the state of Ceará**

Cassiano D. de Souza<sup>\*</sup>, Cynthia R. Duarte<sup>\*\*</sup>, Mateus de P. Miranda<sup>\*\*\*</sup>, Marcio R. R. de Oliveira<sup>\*\*\*\*</sup>, Sharon G. Ribeiro<sup>\*\*\*\*\*</sup>, Adunias dos S. Teixeira<sup>\*\*\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Mestrando em Geologia, Universidade Federal do Ceará – UFC, Ceará, Brasil. E-mail: cass.souzaa@gmail.com  
(autor correspondente)

<sup>\*\*</sup>Prof. Dra., Departamento de Geologia, UFC, Ceará, Brasil. E-mail: cynthia.duarte@ufc.br

<sup>\*\*\*</sup>Doutorando em Geologia, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, São Paulo, Brasil.  
E-mail: mateuspmiranda@gmail.com

<sup>\*\*\*\*</sup>Doutorando em Eng. Agrícola, UFC, Ceará, Brasil. E-mail: marcioreregys01@gmail.com

<sup>\*\*\*\*\*</sup>Mestranda em Ciência do Solo, UFC, Ceará, Brasil. E-mail: sharonribeiro@outlook.com

<sup>\*\*\*\*\*</sup>Prof. Ph.D., Departamento de Eng. Agrícola, UFC, Ceará, Brasil. E-mail: adunias@ufc.br

Received 23 October 2020; accepted 22 May 2021

### **Abstract**

Due to the practicality, speed and low cost of operation, the use of spectroradiometry has become an important tool in determining the composition of materials, being used in the characterization of boreholes, support and orientation of mining fronts, and as support to interpretation of remote sensing images. To perform the spectroradiometric characterization of the magnetitic ore of the state of Ceará (Brazil), the FieldSpec Pro FR spectroradiometer (350 to 2500 nm) was used. The samples were collected from the mines Cabeça de Negro, Riacho Fundo and Torto, and subsequently cut and polished in order to obtain uniform surfaces, and thus minimize the effect of the sample relief and of any surface weather. Data acquisition was carried out in the laboratory, without any interference from external lighting, with three spectral measurements made at different points of each sample. The spectral features that characterized the analyzed ore were attributed to iron (350 to 750 nm, 1000 nm and 1700 nm), water/hydroxyl (1390 nm, 1440 nm and 1940 nm), to the Mg-OH bond (2070 nm and 2390 nm) and carbonate (1850 nm, 1970 nm, 2130 nm and 2300 nm), with the albedo and intensity of the features being influenced by the presence of organic matter and particle size. According to the spectral characteristics, the magnetitic ore studied could be classified into four distinct groups, called hydrated magnesite, anhydrous magnesite, ferrous magnesite and carbonaceous magnesite.

**Keywords:** spectroradiometry, magnesite, carbonate, remote sensing.

### **Caracterização espectrorradiométrica (VNIR-SWIR) do minério magnésítico da porção centro-sul do estado do Ceará**

#### **Resumo**

Devido a praticidade, rapidez e baixo custo de operação, a utilização da espectrorradiometria vêm se tornando cada vez mais comum na determinação da composição dos materiais, sendo utilizada na caracterização de furos de sondagem, apoio e orientação de frentes de lavra, e como suporte à interpretação de imagens de sensoriamento remoto. Para a caracterização espectrorradiométrica do minério magnésítico do estado do Ceará (Brasil), empregou-se o espectrorradiômetro FieldSpec Pro FR FR (350-2500 nm). As amostras foram coletadas das minas Cabeça de Negro, Riacho Fundo e Torto, sendo posteriormente cortadas e polidas a fim de se obter superfícies uniformizadas, minimizando o efeito do relevo e de eventuais intempéries de superfície. A aquisição dos dados foi feita em laboratório, sem qualquer interferência oriunda de iluminação externa, sendo realizadas três medidas espectrais em pontos distintos de cada amostras. As feições espectrais que caracterizaram o minério analisado foram atribuídas ao ferro (350-750 nm, 1000 nm e 1700 nm), à água/hidroxila (1390 nm, 1440 nm e 1940 nm), à ligação Mg-OH (2070 nm e 2390 nm) e ao grupo carbonato (1850 nm, 1970 nm, 2130 nm e 2300 nm), com o albedo e a intensidade das feições sendo influenciadas pela presença de matéria orgânica e granulometria. De acordo com as características espectrais, o minério magnésítico estudado pôde ser classificado em quatro grupos distintos, denominados de magnesita hidratada, magnesita anidra, magnesita ferrífera e magnesita carbonosa.

**Palavras-chave:** espectrorradiometria, magnesita, carbonato, sensoriamento remoto.

## 1. Introdução

A interpretação das imagens multi- e hiperespectrais fundamentam-se, em geral, na análise do comportamento de reflectância dos materiais. Esses dados podem ser obtidos através da espectrorradiometria de reflectância, que consiste em uma técnica que mede a radiação eletromagnética refletida da superfície dos materiais, gerando uma curva de reflectância espectral.

A posição e a intensidade das feições na curva de reflectância espectral está diretamente associada com a estrutura e composição química dos materiais, constituindo uma ferramenta que permite uma rápida e não destrutiva análise química e mineralógica dos materiais (Gaffey, 1987; Van der Meer, 1995; Ducart et al., 2006).

Na literatura, percebe-se que há poucos trabalhos de espectrorradiometria de reflectância de rochas carbonáticas, e especialmente rochas carbonáticas de composição magnesítica. Trabalhos de destaque, como Hunt e Salisbury (1971), Gaffey (1985, 1986, 1987), Crowley (1986) e Van der Meer (1995), descrevem uma série de feições espectrais diagnósticas entre 1600 nm e 2500 nm ocasionadas pelos *overtones* e *combination tones* do grupo  $\text{CO}_3^{2-}$ .

Este trabalho tem como objetivo o estudo do comportamento espectral do minério magnesítico, visando ampliar a biblioteca espectral dos carbonatos, e analisar e discutir os efeitos das impurezas e não uniformidade mineralógica e granulométrica nas rochas carbonáticas.

## 2. Metodologia

### *Materiais utilizados*

No total, foram utilizadas 26 amostras carbonáticas, coletadas das minas Cabeça de Negro, Riacho Fundo e Torto, localizadas entre os municípios de Orós e Jucás, porção centro-sul do estado do Ceará (Figura 1). A Tabela 1 sumariza os litotipos analisados.

Geologicamente, as minas estão inseridas na denominada Faixa Orós, do domínio Orós-Jaguaribe, sendo composto por um conjunto metassedimentar composto sobretudo, por xistos aluminosos intercalados com quartzitos, mármore calcícos, dolomíticos e magnesíticos (Parente et al., 1998), com pequenas intrusões ígneas datadas de 1.8 Ga (Van Schmus et al., 1995, datação U/Pb em metariolitos) (Figura 2).

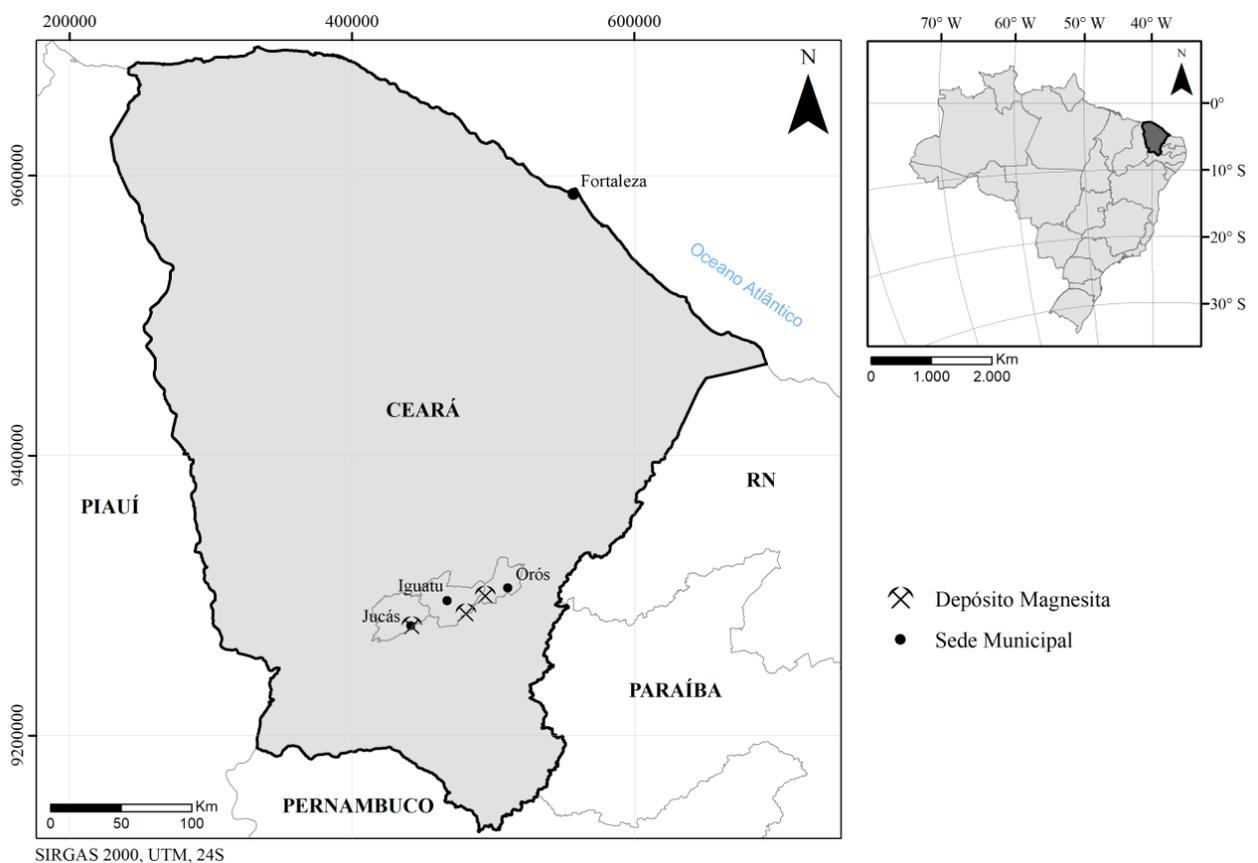


Figura 1 – Mapa de localização das minas magnesíticas do estado do Ceará.

Tabela 1 – 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.

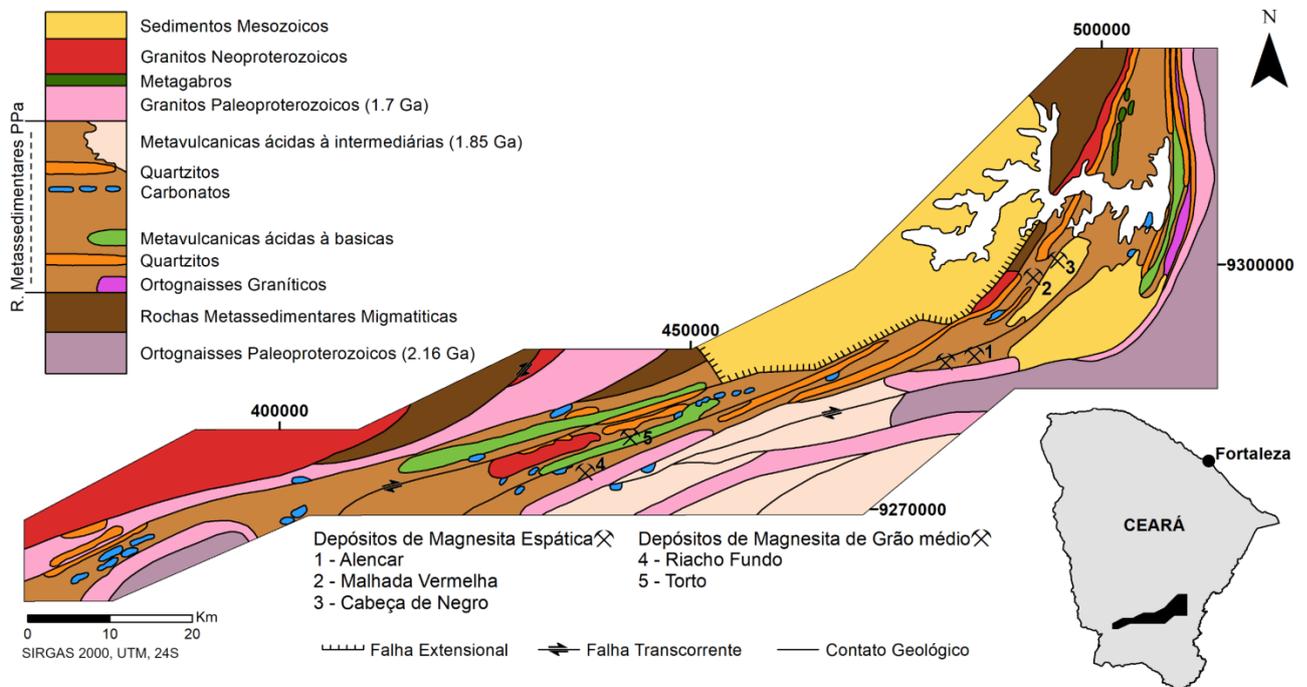


Figura 2 - Mapa geológico local das ocorrências de magnesita na Faixa Orós. Fonte: Modificado de Parente et al. (2004).

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),

apresentando crescimento granulométrico para o sentido nordeste, sendo classificados por Parente et al. (1998) em mármores magnésíticos espáticos (granulometria > 2 mm) na região de Alencar e Orós, e mármores magnésíticos de grão médio/fino (granulometria < 1mm) na região de Jucás.

Petrograficamente, as amostras da mina Cabeça de Negro possuem cristais em geral maiores que 2 mm, ocorrendo, porém, zonas de recristalização com menor granulometria. Há a presença de talco preenchendo fraturas, como microlamelas ou pequenos bolsões no interior dos carbonatos. Há também a presença de serpentina preenchendo fraturas e no contato entre os grãos. Em algumas amostras, é possível observar materiais opacos preenchendo fraturas. Macroscopicamente, a cor do minério é variável, indo de branco, cinza claro, cinza escuro a vermelho.

O minério da mina Riacho Fundo é composto majoritariamente por magnetita, com tamanho dos grãos menores que 1 mm. Há a presença de bolsões de talco de tamanhos variáveis, ocorrendo no contato entre grãos ou preenchendo fraturas, e como microinclusões no interior dos grãos. A cor do minério varia do branco ao cinza, ao cinza escuro e ao amarelo.

O minério da mina do Torto se assemelha ao presente na mina Riacho Fundo, com grãos também menos que 1 mm, e bolsões de talco de tamanho variáveis e como microinclusões no interior dos grãos. Se difere por ser em geral mais fraturado e possuir maior quantidade de talco, além de, eventualmente, possuir serpentina. A coloração do minério é variável, indo do branco ao cinza, ao cinza escuro.

#### *Procedimentos metodológicos*

As amostras de mármore magnésítico foram adquiridas das minas Cabeça de Negro, Riacho Fundo e Torto, localizadas na porções centro-sul do estado do Ceará. Os locais de coleta foram determinados pelas empresas responsáveis pelas minas, cobrindo todos as fácies do minério.

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 1 cm (comprimento x largura x espessura), e tiveram sua superfície polida/uniformizada.

Lâminas delgadas petrográficas foram analisadas a fim de determinar a mineralogia e granulometria das amostras.

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 (VNIR – SWIR).

Para impedir qualquer interferência oriunda de iluminação externa, as leituras foram executadas em ambiente escuro.

A aquisição dos dados foi realizada através do sensor de sonda de contato (*ASD Hi-Brite contact probe*), que possui iluminação interna e coleta os dados em contato direto com a superfície da amostra (tabletes), reduzindo assim o ruído e não necessitando testar diferentes geometrias de aquisição. A janela de aquisição da sonda de contato possui área de 1 cm<sup>2</sup>, tendo sido o espectrorradiômetro configurado para produzir uma média de 50 espectros coletados no mesmo ponto. Para cada amostra, foram realizadas três medidas em pontos distintos da amostra.

Os espectros coletados foram convertidos para fator de reflectância utilizando uma superfície lambertiana (spectralom) como amostra de referência, sendo realizada a calibração do equipamento a cada 20 minutos durante a coleta de dados. A resposta espectral característica de cada amostra representa a média de todas as três medidas realizadas na referida amostra.

Para o processamento e análise dos dados, utilizou-se dos programas Spectragryph 1.2, ENVI 4.8 e MS Excel.

Para acentuar as características espectrais do material, e determinar a posição, profundidade e largura das bandas de absorção, foi aplicado a técnica de remoção do contínuo, utilizando-se da metodologia definida por Clark e Roush (1984).

A posição, profundidade e largura das bandas de absorção foram determinadas segundo a definição proposta por Van der Meer (2004), onde a posição da banda corresponde ao ponto em que a feição de absorção chega no valor mínimo da curva e a profundidade de absorção é determinada pela Equação (1).

$$P_a = 1 - P_{CR} \quad (1)$$

Em que  $P_a$  representa a profundidade da absorção, e  $P_{CR}$  representa o fator de reflectância com o contínuo removido na posição da feição. A largura da feição de absorção foi obtida medindo-se a largura à meia alturas das feições.

Para as feições que não constituem um núcleo (feição que começa e termina com o valor máximo 1,0), ou que possuem 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, minimizando ou anulando o

feito do restante do espectro, tal como indicado por Clark et al. (2003).

### 3. Resultados e discussão

Os espectros brutos das amostras magnéticas podem ser visualizados na Figura 3A, enquanto os espectros com a remoção do contínuo podem ser visualizados na Figura 3B.

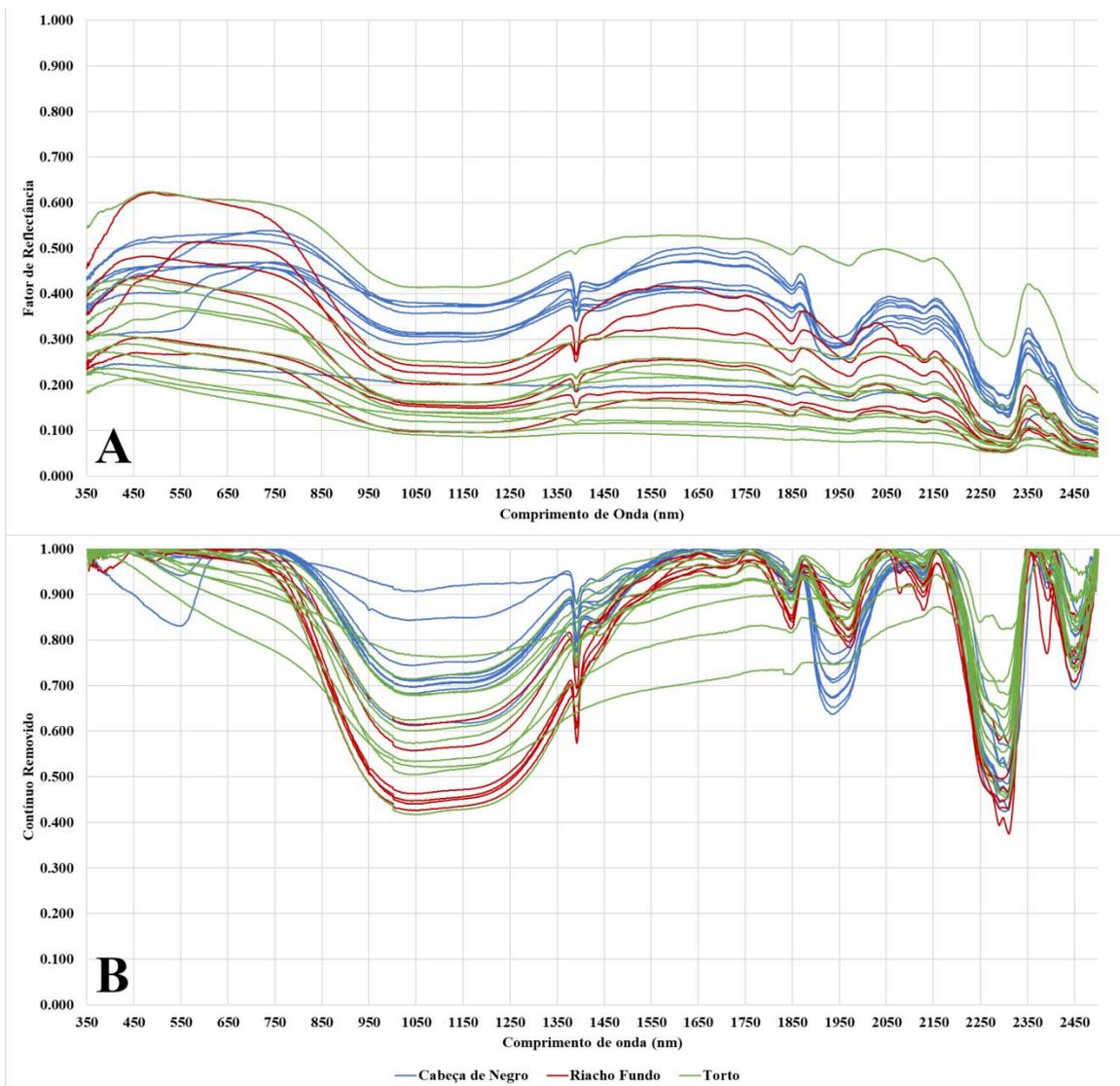


Figura 3 – Espectros de reflectância das amostras da mina Cabeça de Negro, Riacho Fundo e Torto sem a remoção do contínuo (A) e com a remoção do contínuo (B).

Nos espectros analisados, sete bandas de absorção se destacam por sua persistência e/ou intensidade, e configuram a assinatura espectral do minério magnético estudado (Tabela 2). 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 2 - Bandas de absorção características do minério magnético.

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

A feição de absorção em torno de 1000 nm – 1300 nm (Banda 1), é atribuída a presença de Fe, que facilmente substitui os íons de Mg, Zn e Mn nos carbonatos (Gaffey, 1985, 1986, 1987; Van der Meer, 1995). Essa banda é menos intensa e larga nos espectros da mina Cabeça de Negro, com valores médios de profundidade e largura de 0.266 e 456 nm, respectivamente, enquanto os espectros da mina do Torto e Riacho Fundo possuem os valores médios de profundidade de 0.399 e 0.508, e largura de 519 nm e 526 nm, respectivamente (Figura 3B).

O comportamento espectral nos menores comprimentos de onda (350 nm a 750 nm) é atribuído, também, às transições eletrônicas do Fe (Hunt e Salisbury, 1971; Hunt, 1977; Gaffey, 1985, 1987; Van der Meer, 1995), sendo o limite de detecção deste íon em torno de 0.01% (Gaffey, 1985). O decréscimo pronunciado da reflectância na região do VIS (em direção ao UV), observado na maioria dos espectros apresentados (Figura 3A), é uma das feições espectrais mais comumente observadas em diversos materiais, sendo atribuída a uma forte banda de absorção do  $Fe^{3+}$  (Hunt, 1977). 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.

A Banda 3, particularmente evidente nos espectros da mina Riacho Fundo (Figura 4B), ocorre no *wing* da intensa banda de absorção do Fe, não podendo ser isolada dessa banda ferrosa (Gaffey, 1987).

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

A fina banda de absorção centrada em 1390 nm, denominada Banda 2 (Tabela 2), pode estar relacionada 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 por volta de 1380 nm (Hunt, 1977; Clark et al., 1990), ou relacionada à ligação Mg – OH, sendo uma das feições diagnósticas do talco, bastante comum também no grupo da serpentina (Clark et al., 1990). Os espectros da mina do Torto possuem, em média, a Banda 2 menos intensa que as das outras minas analisadas (Figura 4A), com uma profundidade média de 0.032, com os espectros das minas Riacho Fundo e Cabeça de Negro possuindo profundidades médias de 0.133 e 0.095, respectivamente.

Os espectros das amostras CN-08 e CN-09, da mina Cabeça de Negro, 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, sendo esta feição mais intensa em alguns dos espectros da mina Riacho Fundo, sendo totalmente ausente nos espectros da mina do Torto. Os espectros também possuem feições espectrais em 2365 nm e por volta de 2390 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. As três feições citadas (2070 nm, 2365 nm e 2390 nm) são atribuídas à ligação Mg – OH (Pontual, 2008; Meneses et al., 2019), e são feições diagnósticas e/ou comuns do talco 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 2). 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).

Com exceção da amostra TO – 10, a Banda 4 é bem marcada em todos os espectros analisados com o contínuo removido (Figura 4C). A posição da banda varia entre 1846 nm e 1849 nm, excetuando-se o espectro da amostra CN – 05, onde a posição da banda está deslocada para 1860 nm. Os espectros da mina Riacho Fundo possuem, em média, a banda mais intensa que as demais, com um valor de profundidade médio de 0.118, enquanto os espectros das minas de Cabeça de Negro e Torto possuem profundidade média de 0.054 e 0.044, respectivamente.

Observando os espectros da mina Cabeça de Negro, após a remoção do contínuo (Figura 3B) percebe-se que a Banda 5 no espectro da amostra CN – 05 se difere em posição das demais amostras da mina, estando localizada em 1979 nm, enquanto nos demais espectros a banda está localizada em 1935 nm – 1939 nm (Figura 4D). A banda é também menos intensa e larga no espectro da amostra CN – 05, com valores de profundidade e largura de 0.098 e 59 nm, respectivamente, enquanto as demais amostras possuem, em média, valores de profundidade e largura de 0.249 e 106 nm respectivamente.

Nos espectros das minas Riacho Fundo e Torto, após a remoção do contínuo (Figura 3B) a Banda 5 se encontra em posição próxima à da amostra CN – 05, variando entre 1970 nm – 1972 nm para a mina Riacho Fundo, com uma profundidade e

largura médias de 0.167 e 69 nm, respectivamente, e entre 1964 nm - 1970 nm para a mina do Torto, com

profundidade e largura médias de 0.094 e 78 nm.

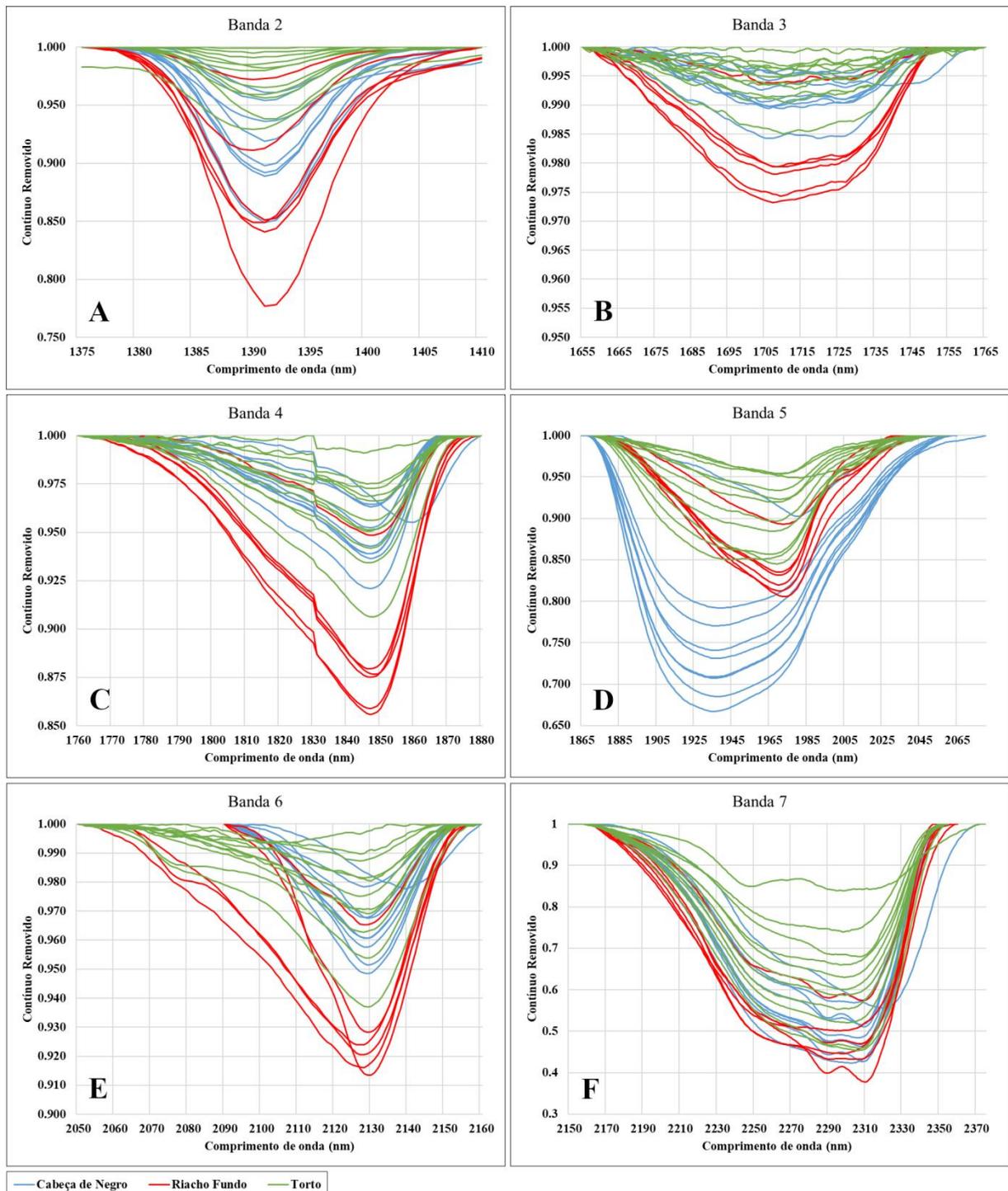


Figura 4 - Bandas características do minério magnésítico com o contínuo removido localmente. Banda 2 (A), estando relacionada à OH, H<sub>2</sub>O ou ligação Mg – OH. Banda 3 (B), ocasionada pelos processos de transição eletrônicas do ferro. Bandas 4 (C), 5 (D), 6 (E) e 7 (F), ocasionadas pelos *overtones* e *combination tones* dos modos vibracionais fundamentais do grupo CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>.

Os espectros da mina do Torto possuem a Banda 6 menos intensa que as demais, com profundidade e largura médias de 0.027 e 34 nm, enquanto nos espectros das minas de Cabeça de Negro e Riacho Fundo possuem uma profundidade média de 0.072 e 0.036, respectivamente, e largura

média de 21 nm e 34 nm, respectivamente. Por vezes, a banda forma, juntamente com a feição em 2070 nm, uma única feição, sendo comum nos espectros da mina Riacho Fundo (Figura 4E).

A intensa e larga banda de absorção em 2300 nm, denominada aqui Banda 7, é atribuída ao

overtone  $3\nu_3$  do grupo  $\text{CO}_3^{2-}$  (Hunt e Salisbury, 1971), estando presente em todos os espectros analisados, por vezes exibindo 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 (Figura 4F).

A posição da Banda 7 varia entre 2294 nm e 2319 nm, e é em geral mais profunda nos espectros da mina Riacho Fundo, que possui uma profundidade média de 0.533, enquanto que nos espectros das minas Cabeça de Negro e Torto a banda possui uma profundidade média de 0.509 e 0.393, respectivamente. 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 Figura 4F).

Nos espectros brutos (Figura 3A), após 2350 nm têm-se o início de uma intensa e larga banda de

absorção relacionada ao *combination tone*  $\nu_1 + 2\nu_3$  do grupo  $\text{CO}_3^{2-}$ , cujo o centro da banda se encontraria entre 2500 e 2550 nm (Hunt e Salisbury, 1971; Gaffey, 1987), estando fora do intervalo de análise do espectrorradiômetro utilizado. Com a aplicação da técnica de remoção do contínuo, onde os espectros obrigatoriamente vão começar e terminar em 1.0, essa feição é suprimida (Figura 3B), havendo somente uma denominada feição artefato (Pontual, 2008) por volta de 2450 nm, não tendo nenhuma relação mineralógica e/ou química com o material.

Gaffey (1987), através da análise de materiais carbonáticos anidros de composição diversas, indicou sete bandas espectrais características, enumeradas de acordo com a intensidade de absorção (Tabela 3), sendo o trabalho de maior destaque no que concerne ao estudo de espectrorradiometria de carbonatos. De um modo geral, as bandas 2, 4, 5, 6 e 7 do trabalho de Gaffey (Tabela 3) correspondem respectivamente às aqui determinadas bandas 7, 6, 5, 4 e 3 (Tabela 2).

Tabela 3 – Posição (em nm) das bandas carbonáticas indicadas por Gaffey (1987).

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

Como indicado anteriormente, a feição em torno de 2500 nm, que corresponderia a Banda 1 de Gaffey (1987), se encontra no limiar ou fora do limite de detecção do espectrorradiômetro utilizado neste artigo, e por esse motivo não consta como uma das bandas características (Tabela 2).

Nos espectros analisados, não foi observada nenhuma feição de absorção em torno de 2220 nm, local correspondente à Banda 3 do trabalho 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 sendo sobreposta pela banda em 2300 nm, aqui denominada Banda 7, correspondente a Banda 2 do trabalho de Gaffey (1987), que se destaca por sua intensidade e largura. Outra alternativa, seria que a feição em 2220 nm presente no trabalho de Gaffey (1987) pode ter sido devido, também, a *combination band* relacionado à 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,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e pela ligação  $\text{Mg-OH}$ .

Com exceção da Banda 5 dos espectros da mina Cabeça de Negro (excetuando o espectro da amostra CN – 05) e da amostra TO – 08, as bandas 4,

5 e 6 possuem a forma de um vale, com a borda da banda voltada para os menores comprimentos de onda possuindo formato de rampa (Figura 3A), sendo essa uma característica marcante destas bandas (Meneses et al., 2019), presente também nos trabalhos de Hunt (1977), Gaffey (1985, 1986, 1987), Crowley (1986) 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, 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 der Meer, 1995). Essa feição relacionada à presença de água pode mascarar 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.

Nos espectros brutos, foi possível observar que algumas amostras se destacam nos menores comprimentos de onda (350 nm a 750 nm) por possuírem um comportamento diferente do padrão (Figura 3A), como por exemplo os espectros das amostras CN – 04 e CN – 09, que são caracterizadas por serem uma linha horizontal ou levemente inclinada até 550 nm, onde há um aumento súbito da reflectância. Essa resposta espectral se assemelha a de uma das amostras utilizadas por Van der Meer (1995), não havendo, entretanto, uma discussão sobre o que causou essa feição, e apenas a indicação da presença de material opaco visto sobre o microscópio petrográfico. Nas lâminas petrográficas das amostras CN-04 e CN-09 também é possível observar a presença de materiais opacos semelhantes preenchendo fraturas, e nas amostras de mão as amostras também se destacam por possuírem uma coloração avermelhada/acinzentada. 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, levantando a hipótese de os 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).

Gaffey (1986) e Van der Meer (1995) discutiram sobre como a granulometria influencia no albedo geral e na intensidade das bandas carbonáticas. Em geral, materiais carbonáticos com granulometria mais fina tendem a ter maior albedo, porém possuem feições espectrais menos intensas 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 3A), percebe-se que, apesar de possuir uma granulometria maior, os espectros da mina Cabeça de Negro possuem, geralmente, um albedo um pouco maior que os espectros das 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.

Essas diferenças de albedo estão relacionadas à matéria orgânica, que mesmo em baixas quantidades, ocasiona um escurecimento das amostras de carbonato, e uma diminuição geral do albedo, como demonstrado nos trabalhos de Crowley (1986), Van der Meer (1995) e Pedrosa et al. (2010).

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. 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 (Figura 3 e Figura 4).

Uma maior quantidade de matéria orgânica pode ser também a causadora do menor albedo da amostra CN-05, porém não explicaria 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 der 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.

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. Não anula, também, os efeitos da saturação e influência de mistura mineral no espectro, 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 (Asadzadeh e Souza Filho, 2016).

Por fim, a partir da análise dos dados apresentados, foi possível através da espectrorradiometria de reflectância, diferenciar e classificar espectralmente o minério magnésítico em

quatro grandes grupos espectrais distintos: magnesita hidratada; magnesita anidra; magnesita ferrífera; e magnesita carbonosa (Tabela 4).

O grupo das magnesitas hidratadas embarca as amostras cujo os espectros possuem a feição de absorção em 1935 nm, indicativo da presença de água no material, e que se 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. A ausência dessas feições classifica as amostras espectralmente como magnesitas anidras.

As feições espectrais que diferenciam as magnesitas ferrosas/ferríferas estão localizadas nos menores comprimentos de onda (350 a 750 nm), o que se reflete na coloração macroscópica diferenciada dessas amostras, que apresentam tons

avermelhados, amarronzados e amarelados.

Como as feições espectrais que caracterizam os grupos acima mencionados ocorrem em porções diferentes no espectro eletromagnético, a classificação entre magnesita ferrífera e hidratada/anidra não são excludentes e sim complementares, de modo que uma amostra pode pertencer a dois grupos concomitantemente. Sendo assim, o grupo das magnesitas ferríferas foi dividida em duas subclasses, denominadas magnesita ferrífera hidratada e magnesita 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.

Tabela 4 – Tabela contendo a classificação atribuídas às amostras das minas de Cabeça de Negro, Riacho Fundo e Torto.

<b>Amostra</b>	<b>Classificação</b>	<b>Mina</b>
CN - 01	Magnesita hidratada	Cabeça de Negro
CN - 02	Magnesita hidratada	Cabeça de Negro
CN - 03	Magnesita hidratada	Cabeça de Negro
CN - 04	Magnesita ferrífera hidratada	Cabeça de Negro
CN - 05	Magnesita carbonosa	Cabeça de Negro
CN - 06	Magnesita hidratada	Cabeça de Negro
CN - 07	Magnesita hidratada	Cabeça de Negro
CN - 08	Magnesita ferrífera hidratada	Cabeça de Negro
CN - 09	Magnesita ferrífera hidratada	Cabeça de Negro
RF - 02	Magnesita anidra	Riacho Fundo
RF - 03	Magnesita anidra	Riacho Fundo
RF - 05	Magnesita ferrífera anidra	Riacho Fundo
RF - 06	Magnesita anidra	Riacho Fundo
RF - 08	Magnesita anidra	Riacho Fundo
RF - 10	Magnesita anidra	Riacho Fundo
TO - 01	Magnesita carbonosa	Torto
TO - 02	Magnesita anidra	Torto
TO - 04	Magnesita carbonosa	Torto
TO - 05	Magnesita anidra	Torto
TO - 06	Magnesita anidra	Torto
TO - 07	Magnesita carbonosa	Torto
TO - 08	Magnesita anidra	Torto
TO - 09	Magnesita anidra	Torto
TO - 10	Magnesita carbonosa	Torto
TO - 11	Magnesita carbonosa	Torto
TO - 12	Magnesita ferrífera anidra	Torto

Entre as amostras da mina Cabeça de Negro, há o predomínio de magnesita hidratada (amostras CN-01, CN-02, CN-03, CN-06, CN-07) e magnesita ferrífera hidratada (amostras CN-04, CN-08, CN-09), com a única exceção sendo a amostra CN-05, classificada como magnesita carbonosa, e possuindo também um menor teor de magnésio. As amostras da Mina Riacho Fundo são compostas majoritariamente por magnesitas anidras (amostras RF-02, RF-03, RF-

06, RF-08, RF-10), com uma amostra sendo classificada como magnesita 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 ferrífera (amostra TO-12).

#### 4. Conclusão

Com a utilização de espectrorradiometria de reflectância em laboratório, foi possível determinar as características espectrais do minério magnesítico da área de estudo.

Sete feições espectrais de absorção se destacaram por sua frequência e intensidade, sendo denominadas de Banda 1 a Banda 7, de acordo com a posição em que ocorrem no espectro eletromagnético, começando a partir dos menores comprimentos de onda. Essas bandas e outras feições espectrais menores estão relacionadas a íons de ferro, aos grupos  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{OH}^-$  e a ligação  $\text{Mg} - \text{OH}$ .

O comportamento espectral nos menores comprimentos de onda (350 nm - 750 nm) é predominantemente determinado pelos íons Fe, que também geram as bandas de absorção entre 1000 nm e 1300 nm, denominada Banda 1, e em 1700 nm, denominada Banda 3.

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 Banda 2 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, comumente presentes nas amostras analisadas. As amostras da mina Cabeça de Negro, com exceção da amostra CN - 05, possuem a Banda 5 mais intensa, larga, e ocorrendo em comprimentos de ondas menores devido a sobreposição e/ou interferência na feição, indicando que as amostras possuem  $\text{H}_2\text{O}$  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 é causada 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 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  $\text{H}_2\text{O}$ . 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 amostra. A técnica de remoção do contínuo auxiliou na melhor visualização das feições espectrais, assim como na determinação das características das feições.

O minério magnesítico do estado pôde então ser classificado em quatro categorias distintas, denominadas de magnesita hidratada, anidra, ferrífera e carbonosa. A classificação do minério magnesítico em ferrífero está relacionada ao comportamento espectral nos menores comprimentos de onda (350 - 750 nm). A classificação do minério magnesítico em hidratado e/ou anidro está relacionado respectivamente à presença ou ausência da feição espectral relacionada às moléculas de água (1935 nm), ocasionando uma sobreposição da Banda 5 (banda carbonática). O minério classificado como magnesita carbonosa se diferencia pela falta de feições espectrais e baixo albedo dos espectros, condição ocasionada pelo teor de matéria orgânica.

#### Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo financiamento da pesquisa.

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

#### Referências

- Asadzadeh, S., de Souza Filho, C.R., 2016. A review on spectral processing methods for geological remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 47, 69-90.
- Bizzi, L.A., Schobbenhaus, C., Vidotti, R.M., Gonçalves, J.H., 2003. *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: texto, mapas e SIG. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, Brasília.*
- Clark, R.N., Roush, T.L., 1984. Reflectance Spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 89, 6329-6340.
- Clark, R.N., King, T.V., Klejwa, M., Swayze, G.A., Vergo, N., 1990. High Spectral Resolution Reflectance Spectroscopy of Minerals. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 95, 12653-12680.
- Clark, R.N., Swayze, G.A., Livo, K.E., Kokaly, R.F., Sutley, S.J., Dalton, J.B., McDougal, R.R., Gent,

- C.A., 2003. Imaging spectroscopy: earth and planetary remote sensing with the USGS tetracorder and expert systems. *Journal of Geophysical Research: Planets* 108, 5131. doi: 10.1029/2002JE001847.
- Crowley, J.K., 1986. Visible and Near-infrared Spectra of Carbonate Rocks: reflectance variations related to petrographic texture and impurities. *Journal of Geophysical Research* 91, 5001-5012.
- Ducart, D.F., Crósta, A.P., Souza Filho, C.R., Coniglio, J., 2006. Alteration mineralogy at the Cerro La Mina epithermal prospect, Patagonia, Argentina: Field mapping, show-wave infrared spectroscopy, and ASTER images. *Economic Geology* 101, 981-996.
- Gaffey, S.J., 1985. Reflectance spectroscopy in the visible and near-infrared (0.35-2.55  $\mu\text{m}$ ): applications in carbonate petrology. *Geology*, 13, 270-273.
- Gaffey, S.J., 1986. Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and near infrared (0.35-2.55  $\mu\text{m}$ ): calcite, aragonite, and dolomite. *American Mineralogist* 71, 151-162.
- Gaffey, S.J., 1987. Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and near infrared (0.35-2.55  $\mu\text{m}$ ): anhydrous carbonate minerals. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 92, 1429-1440.
- Hunt, G.R., Salisbury, J.W., 1971. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks. II. Carbonates. *Modern Geology* 2, 23-30.
- Hunt, G.R., 1977. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near-infrared. *Geophysics* 42, 501-513.
- Meneses, P.R., Almeida, T., Baptista, G.M.M., 2019. *Reflectância dos Materiais Terrestres: análise e interpretação*. Oficina de Textos, São Paulo.
- Parente, C.V., Guillou, J.J., Arthaud, M.H., 1998. Geologia e geoquímica dos elementos maiores dos depósitos de magnesita pré-cambriana (~1.8 Ga) da faixa móvel orós (Ceará). *Revista Brasileira de Geociências* 28, 439-448.
- Pedrosa, S.A., Meneses, P. R., Carmelo, A.C., 2010. Espectrorradiometria de reflectância de rochas carbonáticas na região do infravermelho de ondas curtas. *Revista Brasileira de Geociências* 40, 593-599.
- Pontual, S., Merry, N., Gamson, P., 2008. *Spectral interpretation - field manual*. GMEX. Spectral analysis guides for mineral exploration. AusSpec International Pty, Victoria.
- Van der Meer, F., 1995. Spectral reflectance of carbonate mineral mixtures and bidirectional reflectance theory: quantitative analysis techniques for application in remote sensing. *Remote Sensing Reviews* 13, 67-94.
- Van der Meer, f., 2004. Analysis of spectral absorption features in hyperspectral imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 5, 55-68.
- Van Schmus, W.R., Brito Neves, B.B., Hackspacher, P.C., Babinski, M., 1995. U/Pb and Sm/Nd geochronological studies of the eastern Borborema province, Northeastern Brazil: initial conclusions. *Journal of South American Earth Sciences* 8, 267-288.