



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
CURSO DE GEOLOGIA

RONALDO PEREIRA DA SILVA FILHO
VINICIUS ARAÚJO ALHO

AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DOS ELEMENTOS DELETÉRIOS NO
DEPÓSITO DE MAGNESITA DO TORTO/CE VIA MODELAMENTO
GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL

FORTALEZA – CE

2018

RONALDO PEREIRA FILHO

VINICIUS ARAUJO ALHO

AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DOS ELEMENTOS DELETÉRIOS NO DEPÓSITO
DE MAGNESITA DO TORTO/CE VIA MODELAMENTO GEOLÓGICO
TRIDIMENSIONAL

Monografia apresentada ao Curso de Geologia
do Departamento de Geologia da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial para
obtenção do título de Geólogo.

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Valentim Berni.

Co-orientador: Prof. Dr. Clóvis Vaz Parente.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R675a Ronaldo Pereira da Silva Filho, Vinicius Araújo Alho, .
Avaliação da distribuição dos elementos deletérios no depósito de magnesita do Torto/CE via
modelamento geológico tridimensional / Ronaldo Pereira da Silva Filho, Vinicius Araújo Alho. – 2018.
72 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências,
Curso de Geologia, Fortaleza, 2018.

Orientação: Prof. Dr. Gabriel Valentim Berni.

Coorientação: Prof. Dr. Clóvis Vaz Parente.

1. Magnesita. 2. Elementos deletérios. 3. Modelamento geológico. I. Título.

CDD 551

RONALDO PEREIRA FILHO
VINICIUS ARAUJO ALHO

AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DOS ELEMENTOS DELETÉRIOS NO DEPÓSITO
DE MAGNESITA DO TORTO/CE VIA MODELAMENTO GEOLÓGICO
TRIDIMENSIONAL

Monografia apresentada a coordenação do curso de graduação em Geologia, do Departamento do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Geólogo.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gabriel Valentim Berni (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Sebastián Gonzáles Chiozza
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Walter David Sánchez Callacná
Magnesium do Brasil S/A

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Gabriel Valentim Berni, pela motivação, críticas e constante apoio durante execução deste trabalho.

Ao co-orientador Clóvis Vaz Parente, pela atenção e as contribuições para o presente trabalho.

À Magnesium do Brasil S/A, pelo apoio logístico, pela hospedagem em Jucás.

À toda equipe de sondagem da REFRANOR REFRAATÁRIOS S/A, em especial a equipe de sondagem Léo, Jônatas, Mariton, Rômulo, pelo apoio nos trabalhos de campo.

A todos os professores do departamento de Geologia que contribuíram para nossa formação, em especial aos professores pelo apoio nas descrições petrográficas.

Aos funcionários da UFC, em especial aos laminadores Joel Pedrosa e Girlano pela confecção das seções delgadas e polidas.

Aos colegas de curso que participaram de vários momentos durante a graduação.

Eu, Ronaldo, agradeço infinitamente a minha mãe Noélia, ao meu pai Ronaldo, e aos meus irmãos Ronald e Ramon, por estarem presentes na minha vida por tanto tempo. Agradeço, também, a minha amada Júlia, pelo companheirismo nesse momento na minha vida. Agradeço a Família, especialmente a Alda (in memoriam). Agradeço ao Vinícius, parceiro no presente trabalho e na vida. Agradeço a Alan e Jonathan pela parceria nas equipes de campo. Agradeço aos amigos e a todos os que contribuíram para eu estar aqui. Serei sempre grato.

Eu, Vinícius, agradeço a toda minha família, minha base, que sempre me apoiaram e me incentivaram em todas etapas de minha formação acadêmica e pessoal durante a graduação, agradecer em especial aos meus pais, Victor e Erondina que sempre me aconselharam e apoiaram em minhas decisões, e aos meus irmãos Victor, Alisson e Alexandre, que sempre me aconselharam e contribuíram em minha evolução nos diversos momentos de minha trajetória.

RESUMO

O depósito de Magnesita do Torto está localizado no município de Jucás/CE, porção centro-leste do Sistema Orós-Jaguaribe (1.8Ga.), inserido na Faixa Móvel Orós. Esta última, é representada por sequências metavulcanossedimentares recortadas por intrusões ácidas e máficas, metamorfasadas em fácies xisto verde baixo a granulito; as rochas metassedimentares são predominantemente de composição pelítica, formadas por xistos aluminosos com intercalações de quartzitos, mármore calcíticos, dolomíticos e magnésíticos, rochas calcissilicáticas e quartzitos carbonosos. Existe um zoneamento composicional nos mármore, que possuem composição calcítica para oeste e magnésítica na porção centro-leste da Faixa Móvel Orós. O depósito do Torto é hospedado por mármore magnésíticos e localmente dolomíticos, encaixados por xistos e mármore impuros. O corpo de minério ocorre na forma de lente subvertical, de escala quilométrica, sutilmente boudinada na direção NE-SW. A magnesita é de granulação fina, com textura homogênea, geralmente coloração cinza, e branca quando recristalizada. Os principais elementos deletérios associados ao minério são SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 provenientes de minerais secundários como talco e clorita, comumente associados às zonas de fratura. Este trabalho visa caracterizar e avaliar a distribuição dos minerais com elementos deletérios presentes no minério, combinando observações geológicas na descrição de 6050 metros de testemunhos de sondagem, com o mapeamento da frente de lavra e dados de análises geoquímicas. A descrição dos testemunhos e mapeamento da frente de lavra foi realizada com o objetivo de definir os principais tipos litológicos aflorantes no depósito, a densidade de fraturas preenchidas por talco e clorita, visando seu controle estrutural. Amostras das rochas encaixantes e dos principais tipos de minério foram coletadas para a caracterização petrográfica e textural. As informações obtidas foram combinadas em um banco de dados, para o modelamento geológico da mina, utilizando o software Leapfrog Geo[®]. O modelo foi realizado em duas etapas: (1) o modelamento litológico e estrutural com nove seções geológicas; (2) avaliação da distribuição espacial dos elementos deletérios combinando informações de geoquímica e densidade de fraturas catalogadas na frente de lavra e nos testemunhos de sondagem. O resultado do trabalho é um modelo geológico tridimensional do depósito do Torto com a combinação de modelos numéricos que representam a distribuição dos teores de MgO e o comportamento dos elementos deletérios (Fe_2O_3 , CaO, SiO_2 , Al_2O_3) servindo como base para um futuro planejamento de longo prazo da mina.

ABSTRACT

The magnesite the Torto deposit is located in the municipality of Jucás / CE, located to the east of the Orós-Jaguaribe System (1.8Ga.), inserted in the Faixa Móvel Orós. The latter, is represented by metavuligated and cut off sequences by acid and mafic intrusions, metamorphosed in green schist phatic granulite; the metasedimentary rocks are predominantly of pelitic formation, formed by aluminous shales with intercalations of quartzites, calcitic, dolomitic and magnesite marbles, catalytic calculations and carbonaceous quartzites. There is a composite zoning in the marbles, which had the function of making calculations to the west and magnetic in the center-east portion of the Faixa Móvel Orós. The Torto deposit is made by magnetic marbles and dolomitic sites, embedded by shales and impure marbles. The ore body occurs under the sub-stratified, kilometer-scale lens, subtly in the NE-SW direction. Magnesite is fine-grained, with a homogeneous texture, generally gray, and white when recrystallized. The main contributors associated with the ore are SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 are talose and chlorite, commonly associated with fracture zones. This work aims to evaluate and evaluate the distribution of minerals with present characteristics, including geological data in the description of 6050 meters of sounding samples, with the mapping of data front and geochemical data analysis. The description of the fields and mapping of the mining front was done with the purpose of defining the types of materials to be stored, the density of fractions filled by each phase and by chlorite, aiming at its structural control. Samples of the rocks and the main types of ores were collected for the petrographic, textural and geochemical characterization, in the sampling of new intervals of ore in the printed version and in the range of the carbonates of the Faixa Orós. The information was combined in a database for geological modeling of the mine using Leapfrog Geo[®] software. The model was constructed in two stages: (1) the lithological and structural model with nine geological sections; (2) posterior distribution of distributed spatial elements in the treatment of geochemistry and density in fractures cataloged in front of mining and in the testimonies of probing. The result is a three-dimensional geological model of the Torto deposit with a series of MgO contents and deleterious elements (SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3), which can be used as a basis for future long-term planning.

SUMÁRIO

RESUMO	6
CAPÍTULO 01 – INTRODUÇÃO.....	9
1.1 – Objetivos	9
1.2 – Metodologia	9
1.2.1 – <i>Revisão bibliográfica</i>	9
1.2.2 – <i>Descrição de testemunho de sondagem</i>	9
1.2.3 – <i>Mapeamento geológico de frente de lavra</i>	11
1.2.4 – <i>Petrografia</i>	11
1.2.5 – <i>Análises químicas multielementares</i>	11
1.2.6 – <i>Tratamento de dados</i>	12
1.2.7 – <i>Modelamento Geológico</i>	13
1.3 – Localização e Vias de Acesso	14
1.4 – Aspectos Fisiográficos	14
CAPÍTULO 02 - GEOLOGIA REGIONAL	15
2.1 – Domínio Médio Coreaú (DMC) ou Noroeste Ceará.....	17
2.2 – Domínio Ceará Central (DCC)	17
2.3 – Domínio Orós Jaguaribe (DOJ)	18
2.4 – Domínio Rio Grande do Norte (DRN).....	21
CAPÍTULO 03 - GEOLOGIA LOCAL.....	22
3.1 – Litoestratigrafia.....	22
3.1.1 – <i>Mármorees Magnesíticos</i>	22
3.1.2 – <i>Mármorees Dolomíticos</i>	25
3.1.3 – <i>Xistos</i>	27
3.2 – Geologia Estrutural	30
3.2.1 – <i>Regime Dúctil Transcorrente - Dn</i>	30
3.2.2 – <i>Regime Rúptil Tardi-tectônico – Dn+1</i>	30
3.3 – Geoquímica	31
3.3.1 – <i>Geoquímica dos Carbonatos da Faixa Orós</i>	32
3.3.2 – <i>Geoquímica do Minério da mina do Torto</i>	36
CAPÍTULO 04 - MODELAMENTO GEOLÓGICO 3D.....	39
4.1. – Topografia e definição dos limites do modelo.....	40
4.2 – Importação dos dados geológicos de sondagem e superfície.....	41
4.3 – Subdivisão dos litotipos	42
4.4 – Geração dos sólidos	42
4.5 – Reservas Medidas e Indicadas + Inferidas.....	45
4.6 – Distribuição dos elementos maiores	46
4.7 – Grau de Fraturamento	48
CAPÍTULO 05 – DISCUSSÃO.....	53
5.1 - Separação dos carbonatos com HCL	53
5.2 – Caracterização do minério	53
5.3 – Geoquímica da lente principal	54
5.4 – Distribuição dos deletérios e grau de fraturamento	54
CAPÍTULO 06 – CONCLUSÕES	56
REFERÊNCIAS.....	57
ANEXOS.....	62

CAPÍTULO 01 – INTRODUÇÃO

Este trabalho é referente à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) do curso de graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará. Foi realizado sob a orientação do Prof. Dr. Gabriel Valentim Berni e co-orientação do Prof. Dr. Clóvis Vaz Parente.

O trabalho contou com a parceria da empresa Magnesium do Brasil S/A para realização do mapeamento geológico e acesso aos testemunhos de sondagem da Mina do Torto além do apoio financeiro para confecção das lâminas delgadas e análises químicas multielementares.

1.1 – Objetivos

Este trabalho visa caracterizar e avaliar a distribuição dos minerais com elementos deletérios presentes no minério da mina de magnesita do Torto/CE via modelamento geológico tridimensional. Os deletérios são os contaminantes, por isso esses elementos químicos têm percentuais máximos definidos para o controle de qualidade do produto final.

Combinando observações geológicas, a partir da redescrição de 6050 metros de testemunhos de sondagem, mapeamento da frente de lavra e dados de análises geoquímicas, foi desenvolvido um robusto banco de dados com os aspectos mineralógicos e estruturais que auxiliam na operação da mina. O resultado deste trabalho é a elaboração de um modelo geológico tridimensional dos principais litotipos presentes na mina do Torto e da distribuição dos elementos deletérios.

1.2 – Metodologia

Para o desenvolvimento deste trabalho, a metodologia empregada foi dividida em 7 etapas.

1.2.1 – Revisão bibliográfica

Esta etapa consistiu em uma revisão bibliográfica buscando trabalhos anteriores relacionados as características geológicas regionais da Faixa Orós, aspectos genéticos e petrográficos dos principais depósitos e ocorrências de magnesita no Brasil e no mundo, e caracterização do minério com foco em aplicações para indústria.

1.2.2 – Descrição de testemunho de sondagem

Etapla realizada durante campanha de campo, consistiu na redescrição do total de 65 testemunhos de furos de sondagem para definir os principais logs do modelo, a partir da descrição litológica, que consistiu na identificação dos principais minerais que compõem a rocha, textura e estruturas dos litotipos.

Devido à grande semelhança textural dos carbonatos do depósito, foi desenvolvida uma técnica para auxiliar a individualizar o minério de estéril, respectivamente carbonatos magnesíticos de grão fino de mármore dolomítico.

1.2.2.1 – Individualização de Minério X Estéril

A principal dificuldade em relação a definição de logs, se deu em função da difícil separação entre os mármore dolomítico e magnesítico. Para tal, foi desenvolvida uma técnica a partir de teste com diferentes concentrações de Ácido Clorídrico (HCl). Em intervalos dos testemunhos de sondagem com química conhecida, foi obtida a concentração que permitiu a individualização dos tipos de mármore. Com o gotejamento de HCl a 25%, ocorreu a reação de descarbonatação do mármore dolomítico, enquanto que os intervalos que não reagiram, foram descritos como mármore dolomítico.

Quando aplicado o ácido em amostras com teores de MgO menores que 22%, foi possível visualizar a olho nu o desprendimento de CO₂, identificando o mármore dolomítico, definido como estéril. Quando aplicado em amostras com teores acima de 22% de MgO, não ocorreu a reação, o que definiu tais intervalos como minério.

1.2.2.2 – Amostragem para análises químicas

A partir da separação dos mármore, foram definidos novos intervalos de minério. Foram descritos 54 intervalos de minério que eram tidos como estéril. Esses intervalos totalizam 422.83 metros de mármore magnesítico sem dados químicos.

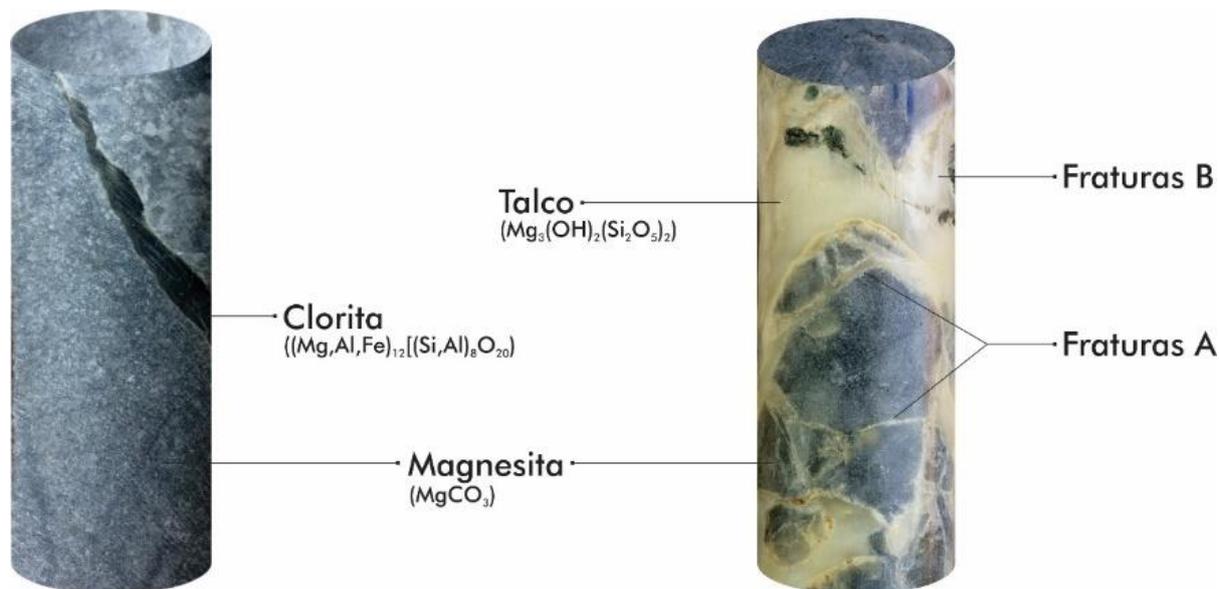
Os intervalos definidos foram amostrados e reanalisados. O Relatório desta etapa foi repassado a empresa, onde foram analisados e alguns intervalos foram descartados a partir de critérios de prioridades relacionados ao tamanho da amostra, e avanço da mina.

1.2.2.3 – Estimativa de densidade de fraturas

Restrita aos intervalos de minério que foram definidos nas etapas anteriores, foi realizada uma contagem das fraturas preenchidas por minerais portadores de elementos deletérios. Esses veios predominantemente compostos por talco e clorita, foram quantificados na tentativa de estimar como se distribuem ao longo dos corpos de minério.

A contagem de fraturas foi realizada obedecendo os intervalos de manobra das caixas de testemunho de sondagem. Foram definidos dois grupos de fraturas, o Grupo A representando as fraturas com espessura aproximada de ~1mm, e Grupo B representando as fraturas com espessura aproximada de ~4mm (FIGURA 01), para intervalos intensamente fraturados foi adotado o valor >100.

Figura 01 – Principais minerais portadores de elementos deletérios e classificação do faturamento.



Fonte: Elaborado pelos autores.

1.2.3 – Mapeamento geológico de frente de lavra

O mapeamento realizado teve como objetivo principal delimitar os contatos da mega lente de mármore magnésítico com os mármore dolomíticos e xistos definidos como rochas encaixantes do depósito a partir da aquisição de dados estruturais referentes aos planos de contato e foliação dos litotipos que ocorrem na área estudada.

Acompanhado com o mapeamento estrutural das principais estruturas que controlam a distribuição dos elementos deletérios, a partir da aquisição de medidas estruturais referentes as fraturas preenchidas essencialmente por talco e clorita, minerais que possuem elementos deletérios.

1.2.4 – Petrografia

Foram selecionadas amostras dos diversos litotipos do depósito, para confecção de 16 sessões delgadas e 5 sessões polidas no Laboratório de Laminação (LAMIN) da Universidade Federal do Ceará, para caracterização petrográfica via microscopia ótica.

1.2.5 – Análises químicas multielementares

As análises geoquímicas foram realizadas e cedidas pela empresa Magnesium do Brasil S/A, as amostras são referentes aos testemunhos de furos de sondagem de longo prazo da mina, testemunhos que possuem o objetivo de permitir uma caracterização geral do depósito, a partir de suas características descritas e analisadas, com os intervalos litológicos definidos, foram amostrados intervalos de minério definidos em campanhas anteriores e de novos intervalos de

minério não amostrados definidos durante a campanha de redescrição de testemunhos de sondagem, executada durante a etapa de campo.

O principal método utilizado foi a análise por Fluorescência de Raios X (FRX) pelo equipamento S2 RANGER da marca BRUKER®, a metodologia consiste em uma análise quantitativa, técnica não destrutiva que permite identificar os elementos presentes em uma amostra, definindo a concentração de cada elemento medido na amostra.

Para a validação do banco de dados também foram analisadas amostras de mármore calcínicos, dolomíticos e magnésínicos coletados em afloramentos à beira da estrada e em depósitos conhecidos distribuídos ao longo da Faixa Orós, para determinar os elementos maiores e terra raras.

As análises para determinação quantitativa dos elementos químicos das amostras, foram realizadas no laboratório da SGS-GEOSOL, as amostras selecionadas foram fundidas com $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, procedimento de alta temperatura que dissolve os minerais formadores das rochas, essas soluções permitem ser analisadas pelos métodos de ICP-AES e ICP-MS, o pacote comercial recebe o nome de ICP95A/IMS95A.

O método ICP-AES (Inductively Coupled Plasma – Atomic Emission Spectrometry) tem como objetivo analisar o comportamento dos elementos maiores, definindo os teores em % de MgO, CaO, Al_2O_3 , MnO, Na_2O , Fe_2O_3 , K_2O , P_2O_5 , Cr_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 .

Para a análise de elementos terras raras (ETR's), foi utilizado o método ICP-MS (Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry), para determinar os teores em ppm de Ba, Sr, Cs, Rb, Sn, W, Ta, Nb, Hf, Zr, V, U, Cu, Zn, Ni, Co, Ga, Th, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Y, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y/Ho, Sm/Nd, Pr/Yb.

1.2.6 – Tratamento de dados

A partir dos 6050 metros de testemunho de sondagem redescritos, os dados foram combinados em um banco de dados composto por informações com a localização espacial dos furos de sondagem, características litológicas, estruturais, dados de análises químicas cedida pela Magnesium do Brasil S/A e Índice de Fraturamento desenvolvido para um a melhor interpretação do depósito.

1.2.6.1 – Banco de Dados

O banco de dados é constituído por tabelas de “colar”, “survey”, “litho”, “assay” e “frac” com informações (descritivas, quantitativas e qualitativas) para execução do modelo geológico:

- 1) “collar” – identificação do furo, localização espacial e profundidade máxima;
- 2) “survey” – o mergulho, azimute e profundidade máxima da perfuração;
- 3) “litho” – descrição e códigos dos litotipos do depósito;
- 4) “assay” – códigos das amostras, intervalos de amostragem, comprimento da amostra, e composição química.
- 5) “frac” – densidade de fraturas preenchidas por talco e clorita no minério, classificada de acordo com sua espessura média, obedecendo os intervalos de manobra das caixas de testemunho de sondagem.

1.2.6.2 – Índice de Fraturamento

Com o objetivo de interpretar e combinar os dados coletados referente a contagem de fraturas preenchidas por minerais deletérios, foi desenvolvido um Índice de Fraturamento, a partir da seguinte expressão:

$$IF = nfA + (nfB * 4) / [(from - to) * 1000]$$

- Onde:
- IF - Índice de Fraturamento (valor em decimal);
 - nfA - Quantidade de fraturas com espessura ~1mm;
 - nfB - Quantidade de fraturas com espessura ~4mm;
 - From - Início do intervalo da manobra (em metro);
 - To - Fim do intervalo da manobra (em metro).

Os intervalos de manobra correspondem aos intervalos registrados em tocos nas caixas dos testemunhos com a metragem do furo de sondagem, a medida em que o sondador responsável pela perfuração troca a hastes de sondagem é registrado e inserido o intervalo com a respectiva profundidade da operação.

Em diversos furos descritos a perfuração é encerrada ainda no minério, não atingindo a rocha encaixante, fator que dificulta o modelamento geológico e interpretação de seções. Os dados das análises químicas foram exportados diretamente do Excel em formato CSV, e importados para o software Leapfrog Geo® para a execução do modelamento geológico.

1.2.7 – Modelamento Geológico

O modelamento geológico tridimensional foi realizado com o uso do software Leapfrog Geo®, pioneiro no modelamento geológico implícito e um dos líderes da indústria, teve como objetivo a modelagem dos diferentes tipos litológicos presentes na mina, para uma melhor caracterização litológica e geométrica dos corpos de minério e suas encaixantes.

Na primeira etapa do modelamento, foram gerados os sólidos das rochas encaixantes que limitam o corpo mineralizados, correspondente principalmente aos xistos e rochas hospedeiras correspondentes a rocha mineralizada, o mármore magnésítico, definidos pela integração e interpretação de dados litológicos, estruturais e geoquímicos, consolidando na criação um modelo geológico tridimensional.

A segunda etapa consistiu no refinamento do modelo geológico tridimensional preliminar, e na criação de um modelo com a distribuição dos elementos deletérios (SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3) e seu controle estrutural, servindo como base para um futuro planejamento de longo prazo da mina.

1.3 – Localização e Vias de Acesso

A Mina do Torto localiza-se nas dependências da mineradora Magnesium do Brasil S/A, a cerca de 4 km do centro de Jucás ($6^{\circ}31'31.001''\text{S}$, $39^{\circ}31'39''\text{W}$), região centro-sul do Estado do Ceará. A Mina do Torto encontra-se no km 25 da rodovia CE-375 (Iguatu-Campo Sales), a cerca de 400 km de Fortaleza.

1.4 – Aspectos Fisiográficos

Mina A região possui clima tropical quente semi-árido com temperatura entre 26° e 28°C , e pluviometria média de 819,9 mm, com chuvas concentradas de janeiro a abril, altitude média de 246,96 metros. Seu relevo é caracterizado por unidades geomorfológicas, depressão sertaneja e maciços residuais, com solos aluviais, litólicos, latossolo vermelho-amarelo e podzólico vermelho amarelo. A vegetação predominante é a caatinga arbustiva e floresta caducifólia espinhosa (FIGURA 02), bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe (IPECE, 2017).

Figura 02 – Vegetação de caatinga arbustiva e latossolo de cor vermelho-amarelo, na área da mina do Torto.



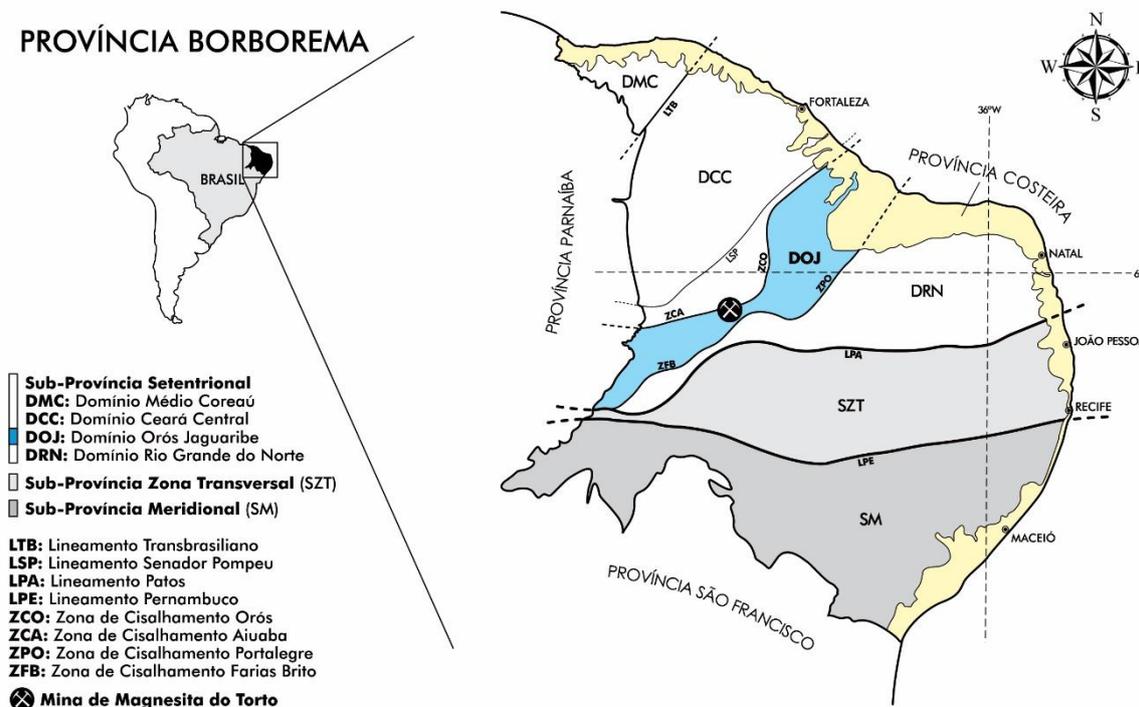
Fonte: Elaborado pelos autores.

CAPÍTULO 02 - GEOLOGIA REGIONAL

A mina do Torto está inserida na província geotectônica Borborema (ALMEIDA et al., 1977; SANTOS E BRITO NEVES, 1984), dentro do domínio Orós-Jaguaribe (ARTHAUD et al., 2007). A Província Borborema (FIGURA 03) foi construída ao longo da Orogenia Brasileira/ Pan-Africana (ALMEIDA et al. 1981), pela convergência entre os Cratóns Amazônico, São Francisco-Congo e São Luís-West África, por volta de 600 Ma, durante a constituição do Supercontinente Gondwana Ocidental (TROMPETTE, 1994; HOFFMAN, 1991, GANADE DE ARAÚJO et al., 2014).

Figura 03 – Domínio Orós Jaguaribe e demais domínios da Província Borborema, editado segundo a definição de ARTHAUD et al. (2007), para os limites do Domínio Orós Jaguaribe, destacado em azul.

PROVÍNCIA BORBOREMA



Fonte: BIZZI et al. (2003).

A Província Borborema foi resultado de duas colisões Brasileiras (GANADE DE ARAUJO et al., 2014), que construíram um complexo mosaico de terrenos com características tectono-estratigráficas distintas (ARTHAUD et al., 2007). A primeira colisão entre 620 e 610 Ma. aconteceu entre os Cratóns Amazônico e África Ocidental e os embasamentos das Províncias Parnaíba e Borborema. A zona de sutura formada por essa convergência foi reativada em uma cinemática dextral gerando o Lineamento Transbrasiliiano. Tal movimento propiciou a Província da Borborema a colidir contra o Cráton Francisco ao sul, entre 590 e 580 Ma. Os vetores resultantes das duas colisões, com empurrões para leste e norte, deram origem

a uma extensa rede de zonas de cisalhamento (VAUCHEZ et al., 1995) em toda a província, forçando sua extrusão para o nordeste.

O desenvolvimento de estruturas lineares e planares nas sequências supracrustais e o retrabalhamento dos gnaisses do embasamento da PB, aconteceram principalmente sob condições termo-barométricas de fácies anfíbolito (NEVES, 2015), e ainda experimentaram três etapas principais de magmatismo granítico, 650-625 Ma, 580-570 Ma e 545-520 Ma (BRITO NEVES et al., 2002).

A etapa mais tardia do magmatismo (540-520 Ma), tem relação direta com a reativação cambriana das zonas de cisalhamento (ALMEIDA et al. 1981; BRITO NEVES et al. 2000) e com a consolidação do presente arranjo dos domínios da PB (BRITO NEVES et al. 2000).

A geometria atual, no entanto, foi consolidada durante a abertura do Oceano Atlântico no Mesozóico (Jurássico-Cretáceo), que levou a ruptura de Pangea (e do Gondwana Ocidental) (ALMEIDA et al., 1977). Os limites desta área de aproximadamente 450,000 km², são definidos ao norte e leste pelas Bacias Costeiras e de Margem Continental Passiva, a oeste, pela Bacia do Parnaíba, e ao sul pelo Cráton São Francisco (VAN SCHMUS et al., 1995).

A Província Borborema é segmentada por duas zonas de cisalhamento (ZC) brasileiras, de tendência E-W, integradas ao Sistema de Cisalhamento Oriental da Borborema (VAUCHEZ et al. 1995). Uma destas, a ZC Patos separa as Subprovíncias Setentrional ao norte e da Zona Transversal no centro, em latitude próxima à cidade de João Pessoa. A ZC Pernambuco, limita os terrenos das Subprovíncias Transversal e Meridional, mais ao sul (BRITO NEVES et al., 2000; NEVES, 2002; ARTHAUD et al., 2007; VAN SCHMUS et al., 2011).

Dentro da Sub-província Setentrional, foram descritos terrenos granito-greenstone arqueanos e domos TTG, remanescentes de embasamento arqueano/paleoproterozóico, um terreno neoarqueano, domínios e terrenos paleoproterozóicos, bacias rifte paleomesoproterozoica, o orógeno mesoproterozóico Cariris Velhos e faixas supracrustais brasileiras (BIZZI et al. 2003).

Aqui daremos uma maior ênfase a Subprovíncia Norte ou Setentrional, que é subdividida em quatro domínios separados por zonas de cisalhamento, sendo eles, de leste para oeste: Domínio Rio Grande do Norte, Domínio Orós-Jaguaribe, Domínio Ceará Central e Domínio Noroeste Ceará (Médio Coreau) (ARTHAUD et al., 2007). Alternativamente, Brito Neves & Cordani (1991), Brito Neves et al. (2000) e Santos & Amaral (2008), subdividem a Subprovíncia Setentrional utilizando os lineamentos Senador Pompeu e Transbrasiliano como limite dos domínios Rio Grande do Norte, Ceará Central e Médio Coreau respectivamente.

2.1 – Domínio Médio Coreaú (DMC) ou Noroeste Ceará

Almeida et al. (1977), escreveram sobre um sistema de dobramento de rochas metassedimentares no extremo noroeste da Província. Décadas depois, esse agrupamento de rochas foi definido como Domínio Médio Coreaú por Brito Neves et al. (2000). Tem seus limites constituídos pelo lineamento Transbrasiliano e pela margem do cráton São Luís-West África (BRITO NEVES et al., 2000).

Santos et al. (2001), divide as rochas do embasamento desta porção crustal em ortognaisses de natureza tonalítica-trondhjemítica-granodiorítica, granulitos de natureza orto e paraderivada (respectivamente correspondendo aos granulitos máficos e enderbitos e aos kondalitos), e migmatitos derivados da anatexia dos gnaisses da suíte TTG. Estas rochas agrupadas no Complexo Granja (SANTOS et al., 2008a), são típicas de ambiente tectônico de arco magmático e foram metamorfizadas em fácies granulito. Esse processo de granulitização com migmatização associada, tem idade neoproterozóica e foi datado entre 553 e 557 Ma, através do método da isócrona mista de Sm-Nd nesses granulitos (SANTOS, 1999).

Estes ortognaisses TTG, datados pelo método U-Pb em zircão, por Fetter et al. (2000), entre 2.36 e 2.30 Ga, constituem o embasamento de dois cinturões móveis, o Grupo metavulcano-sedimentar Martinópole (mais arcoseano) o Grupo Ubajara (majoritariamente metapelítico-carbonático), todos de idade Toniana (SIQUEIRA et al., 2014). Ocorrem rochas meta-vulcânicas associadas, que apresentam radiocronometria de 1.78 Ga (SANTOS et al., 2008).

Siqueira et al. (2014), relaciona o fim do evento tectônico compressivo do Brasileiro, com o magmatismo plutônico gerador dos granitos Tauá e Meruoca e com a sedimentação da bacia de eopaleozóica de Jaúbaras. O mesmo autor cita que no cenozoico, a deposição da Formação Barreiras recobre parte da área desse domínio.

2.2 – Domínio Ceará Central (DCC)

Uma região de grande expressão territorial que abrange grande parte do estado do Ceará, geologicamente inserida entre o lineamento Transbrasiliano (ZC Sobral-Pedro II) e a Zona de Cisalhamento Orós-Aiuába (JARDIM DE SÁ, 1994; ARTHAUD et al., 2007).

Este domínio é formado por um embasamento constituído por um núcleo arqueano acrescido juntamente de terrenos paleoproterozóicos. Estes embasam as sequências metassedimentares neoproterozóicas do Grupo Ceará, formado um pacote de rochas que foi intrudido pelo Complexo Tamboril-Santa Quitéria e por rochas ígneas plutônicas com idades variando do paleoproterozóico ao cambriano (FETTER et al., 2003; ARTHAUD et al., 2007).

O embasamento Arqueano e Paleoproterozóico compreende três unidades, denominadas Complexo Cruzeta, Suíte Madalena e Unidade Algodões. Estas unidades, constituíam um mesmo fragmento de crosta continental que sofreu um evento extensional entre 850 e 750 Ma. Como reflexos dessa extensão, ocorreram afinamento crustal, rifteamento, vulcanismo bimodal e sedimentação passiva plataformar (ARTHAUD et al., 2007).

Essa sedimentação molássica de caráter quartzo-pelítico-carbonática, deu origem ao Grupo Ceará, que agrega as unidades Independência, Canindé, Quixeramobim e Arneiroz, e o Complexo Acopiara. Estas rochas foram submetidas a um metamorfismo de alto grau, no mínimo de fácies anfíbolito de alta temperatura, durante a orogênese brasileira (ARTHAUD et al., 2007). Essas condições metamórficas, transformaram os protólitos sedimentares dessas unidades em uma sequência litoestratigráfica dominada por xistos e gnaisses pelíticos ou semipelíticos, com intercalações de quartzitos, mármore, rochas calcissilicáticas e subordinadas metagrauvas (ARTHAUD et al., 2007).

As rochas intrusivas ao embasamento e às supracrustais são representadas pelos migmatitos do Complexo anatético-ígneo Tamboril-Santa Quitéria e pelos granitos cedocollisionais, sin-cinemáticos, tardi-tectônicos e pós-orogênicos (ARTHAUD et al., 2007). Estes últimos possuem idade cristalização um pouco mais velha que o fim da sedimentação das bacias molássicas, que foram depositadas entre 560 e 440 Ma., segundo Parente et al., (2004).

2.3 – Domínio Orós Jaguaribe (DOJ)

Neste domínio, estão englobados terrenos gnáissicos migmatíticos, rochas supracrustais e rochas intrusivas, aflorantes entre as zonas de cisalhamento Orós-Aiuába e Portalegre-Farias Brito, sendo sobrepostas pelas coberturas sedimentares fanerozóicas da Formação Barreiras, à nordeste, e da Bacia do Parnaíba, à sudoeste (JARDIM DE SÁ, 1994; ARTHAUD et al., 2007).

Essa região, é destacada por suas supracrustais estarianas (1.8 a 1.6 Ga.). Sá (1991), obteve essa idade ao datar metavulcânicas ácidas pelos métodos U-Pb de zircão e Rb-Sr e Sm-Nd em rocha total. Essas rochas seriam resultantes de um expressivo rifteamento, associado a uma sedimentação característica e um magmatismo bimodal bem distribuído regionalmente, durante da Fissão ou Tafrogênese Estarariana (MAGINI et al., 1999).

Rochas com essa idade aparecem também no centro-leste do Brasil, (ALKMIN et al. 1993), bem como no cinturão Pan-Africano na África Ocidental (CABY & ANDREOPOULOS-RENAUD, 1983).

As rochas contidas dentro desse Domínio, são divididas nos Grupos Orós e Serra de São José. O primeiro de maior expressão tem as Fm. Santarém (paraderivada) e Fm. Campo

Alegre (metavulcânica) definindo as rochas supracrustais, que são recortadas pela Suíte Magmática Serra do Deserto, componente metaplutônico do grupo. Essas formações e a suíte magmática que compõem o Grupo Orós, têm expressão variada nas faixas Jaguaribe e Peixe Gordo (CAVALCANTE, 1999).

Jardim de Sá (1994), descreveu na Faixa Extremo Oeste Potiguar, região mais oriental do DOJ, um grupo correlato ao supracitado ao qual nomeou de Serra de São José. Esse grupo é subdividido na Fm. Catolezinho de base e na Fm. Minhuins de topo.

Ao longo desse Domínio, blocos de embasamento como o Jaguaritama, o São Nicolau e o Iracema, separam e/ou embasam as faixas meta vulcano-sedimentares Orós, Jaguaribe, Peixe Gordo e Extremo Oeste Potiguar. Duas dessas faixas, são destacadas no Sistema Orós-Jaguaribe (PARENTE & ARTHAUD, 1995).

As rochas paraderivadas dessa área, apontam para uma variação regional da sedimentação dos protólitos. No leste do domínio, dentro da Faixa Extremo Oeste Potiguar, os metaconglomerados da Fm. Minhuins, indicam um ambiente sedimentar típico de um rifte. Em contraste, as rochas da Fm. Santarém aflorantes na Faixa Orós, no limite oeste do DOJ, são derivadas de uma sequência quartzito-pelito-carbonática, comum em margem continental passiva (PARENTE & ARTHAUD, 1995).

A Faixa Móvel Orós (FMO) (SÁ, 1991; CAVALCANTE et al., 1999; PARENTE & ARTHAUD, 1995), possui geometria sinuosa, espessura variável entre 2 e 13 km e extensão longitudinal em torno de 500 km. Ao longo de sua dimensão ocorrem duas inflexões, a primeira próxima a cidade de Banabuiú-CE, onde seguia sentido NE-SW e passa para quase N-S, até a cidade de Icó-CE, onde ocorre a segunda inflexão deste alinhamento, que passa a ter sentido E-W.

O grau metamórfico aumenta de oeste para leste e varia de xisto verde a granulito. A deformação tem estilo mais transcorrente na porção E-W do Sistema, com mergulho das foliações superiores a 45° a um espessamento crustal limitado.

Na região entre Banabuiú e Icó, as rochas exibem uma foliação de alto ângulo, associada a uma deformação transpressional. Essas foliações não sobrepõem estruturas pretéritas evidenciando o caráter monocíclico da deformação e a unicidade do regime transcorrente dextral (PARENTE & ARTHAUD, 1995).

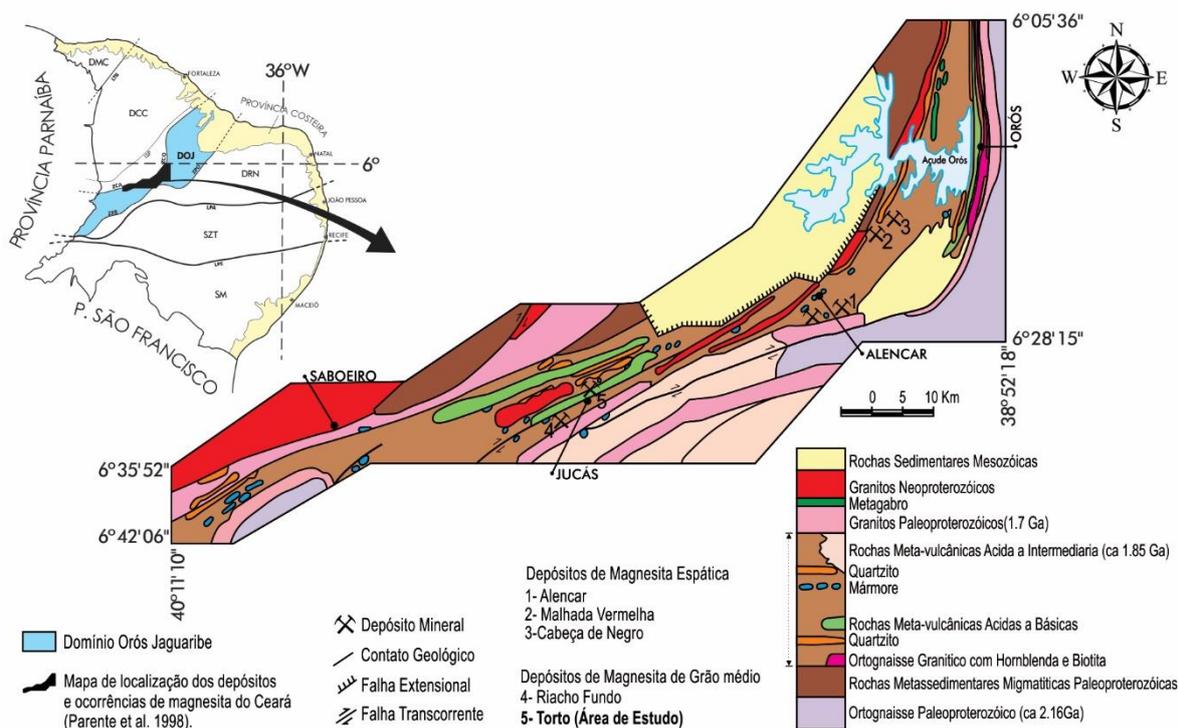
A fração paraderivada da FMO, é parte da Fm. Santarém (CAVALCANTE, 1999). Sua litoestratigrafia é representada por lentes de quartzitos, de mármore e de calcissilicáticas intercaladas em uma sequência dominada por xistos. A base desta sequência litoestratigráfica

é dominada por xistos aluminosos com andalusita e os xistos negros aluminosos com granada, estauroлита e andalusita. O topo é representado por xistos com duas micas e feldspáticos.

Parente et al. (1998) caracterizaram a distribuição dessas lentes pela abundância de quartzitos no nordeste da Faixa, que diminuem progressivamente de volume em direção ao extremo sudoeste. Esse comportamento é inverso para as rochas carbonáticas, que predominam e são mais calcíticas no extremo sudoeste, na região entre Pio IX/PI e Aiuába/CE, diminuindo em extensão e volume, e tornando-se mais magnesiana em direção a nordeste.

Os mármores magnesíticos apresentam um crescimento granulométrico para o sentido nordeste, e são de grão médio na região de Jucás e espáticos na região de Alencar e Orós (PARENTE et al., 1998), cidades do centro-sul do Ceará (FIGURA 04). Em uma dessas lentes dos mármores de grão médio, está implantada a Mina de Magnesita do Torto, foco do presente estudo.

Figura 04 - Mapa de localização dos depósitos e ocorrências de magnesita do Ceará, Brasil. A área de estudo é o depósito destacado em negrito.



Fonte: Modificado de Parente et al. (1998).

Em vários níveis da sequência litoestratigráfica ocorrem as rochas da Fm. Campo Alegre (CAVALCANTE, 1999), que tem expressão bimodal da FMO (PARENTE & ARTHAUD, 1995). As metavulcânicas ácidas variam, petrograficamente, de composição entre dacitos, riodacitos e riolitos com fenocristais de feldspato e quartzo. Já as vulcânicas máficas

e/ou básico-intermediárias são representadas por xistos com clorita, metabasaltos e metandesitos (PARENTE & ARTHAUD, 1995). Ortognaisses facoidais tipo Lima Campos, datados por U/Pb em 1.7 Ga. (SÁ, 1991), são a parcela principal da Suíte Magmática Serra do Deserto (CAVALCANTE, 1999), que recorta a sequência supracrustal (PARENTE & ARTHAUD, 1995).

2.4 – Domínio Rio Grande do Norte (DRN)

Este domínio é composto pela faixa móvel Seridó, e pelos terrenos Rio Piranhas, São José do Campestre e Granjeiro. Está limitada a oeste pela zona de cisalhamento Orós-Aiuába e ao sul pela Zona de Cisalhamento Patos. A leste e a norte, o domínio é encoberto pelas rochas sedimentares da Província Costeira e da Bacia do Apodi, respectivamente.

O terreno Rio Piranhas é o embasamento paleoproterozóico da Faixa Seridó, em uma discordância no contato marcada pela ocorrência de metaconglomerado polimítico com seixo do Complexo gnaíssico-migmatítico Caicó (JARDIM DE SÁ, 1994).

A Faixa Seridó é de grande importância econômica na Província Borborema, em virtude dos importantes depósitos de scheelita, ouro e pegmatitos historicamente explorados. Possui litoestratigrafia definida pelo Grupo Seridó, composto, da base para o topo, pelas formações Jucurutu, Equador e Seridó. O embasamento é representado pelos complexos São Vicente e Caicó, de idades U-Pb respectivas de 2,16 e 2,24 Ga e pela Suíte Poço da Cruz, com suas rochas metaluminosas a peraluminosas, similares aos granitos crustais sin a tardicolisionais (LEGRAND et al., 1991; JARDIM DE SÁ, 1994; BIZZI et al. 2003).

No extremo leste do DRN, temos o Terreno São José do Campestre (SANTOS, 1996), datado por U-Pb entre 3.45 e 2.7 Ga. por Dantas et al. (2004). Nesta região próxima a Natal-RN, ocorrem entre outras, rochas trondjemíticas e sienograníticas, que se agrupam para formar um núcleo arqueano circundado pelo Complexo Caicó. Essas rochas foram metamorfizadas em fácies anfíbolito com migmatização associada (ARTHAUD et al., 2007).

Entre a zona de cisalhamento Farias Brito e o Lineamento Patos, afloram as rochas metabasico-ultramáficas, formações ferríferas, gonditos, micaxistos a cordierita, quartzitos, metacalcários. Estas foram descritas como participantes da última unidade do domínio, o Terreno Granjeiro (VASCONCELOS et al., 1993), com idades U-Pb em torno de 2.55 Ga (SILVA et al. 2002).

CAPÍTULO 03 - GEOLOGIA LOCAL

A mina do Torto encontra-se inserida entre os limites da Faixa Móvel Orós. Localiza-se na cidade de Jucás, centro-sul do estado do Ceará. Nessa altura da Faixa Orós afloram mármores e xistos. Essa rocha marmórea fonte de MgO, é o minério lavrado pela Refratários do Nordeste S/A e beneficiado pela Magnesium do Brasil S/A. Nesta região estão impressas as principais feições estruturais associadas ao Ciclo Brasileiro.

As principais atividades consistiram na descrição dos testemunhos de furos de sondagem e no mapeamento geológico da cava da mina e do entorno. Além de produzir um novo banco de dados de sondagem englobando litologia e grau de faturamento da mina, foi construído um mapa na escala de 1:2.000, utilizando o software ArcGIS (FIGURA 05).

3.1 – Litoestratigrafia

A descrição de testemunho de sondagem proporcionou a visualização a diversidade litológica em subsuperfície. Foram possíveis distinguir variações petrográficas dos carbonatos e dos xistos. Na área da mina, foram cartografadas lentes de mármores magnesíticos, dolomíticos e calcíticos. Esses corpos lenticulares estão encaixados em pacote de xisto, que apresenta intercalação de quartzito, no NE da cava.

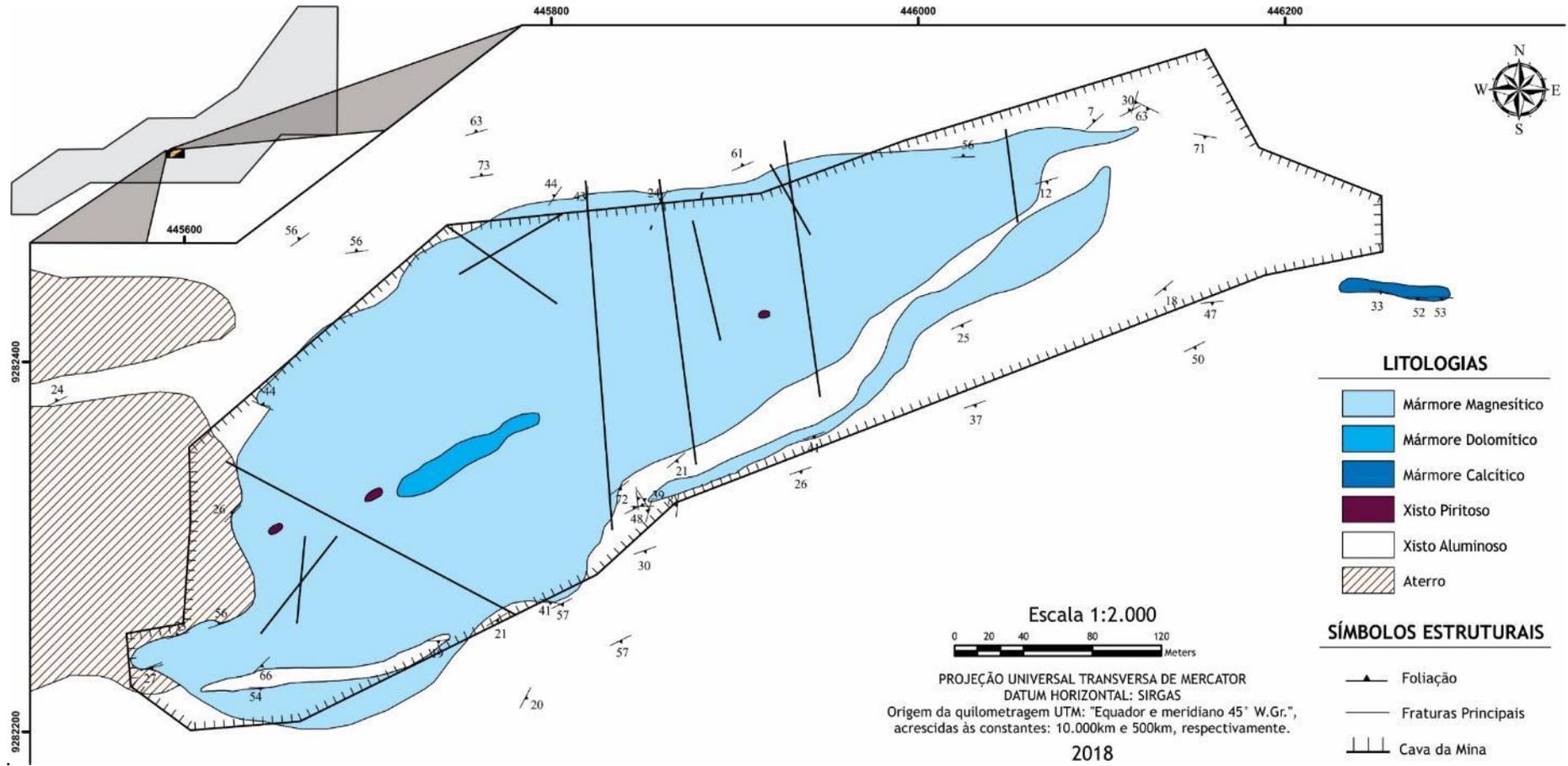
Foram identificadas 3 lentes de mármores aflorantes na área na mina do Torto (FIGURA 05). A lente principal da rocha magnesiana se estende quase E-W e orienta o desenvolvimento da cava da mina. A segunda lente de magnesita ocorre na porção SE da lente principal, separada da mesma por uma fina camada de xisto de aproximadamente 350 metros. A terceira lente é de mármore calcítico e localiza-se à sudoeste da mina.

As encaixantes, são compostas por xistos e quartzitos intercalados. Localmente, apresentam camadas com quartzo predominante e camadas ricas em pirita. Esses xistos piritosos, assim como mármores dolomíticos, também ocorrem internos a lente principal de mármore magnesítico.

3.1.1 – Mármores Magnesíticos

São mármores de grão fino com alguns cristais recristalizados. O principal corpo de minério é formado por uma lente boundinada de aproximadamente um quilômetro extensão longitudinal (FIGURA 06 A), que está variavelmente fraturada e intercalada em um pacote de xistos com intercalações de quartzitos. Esse corpo lenticular possui fechamento ao leste. Ao norte da cava, notou-se que o esse corpo está em contato abrupto de alto ângulo com a encaixante. O mergulho da lente é para sul.

Figura 05 – Mapa Geológico da Mina do Torto. A forma geométrica cinza representa o Mapa de localização dos depósitos e ocorrências de magnesita do Ceará, Brasil, de Parente et al. (1998).

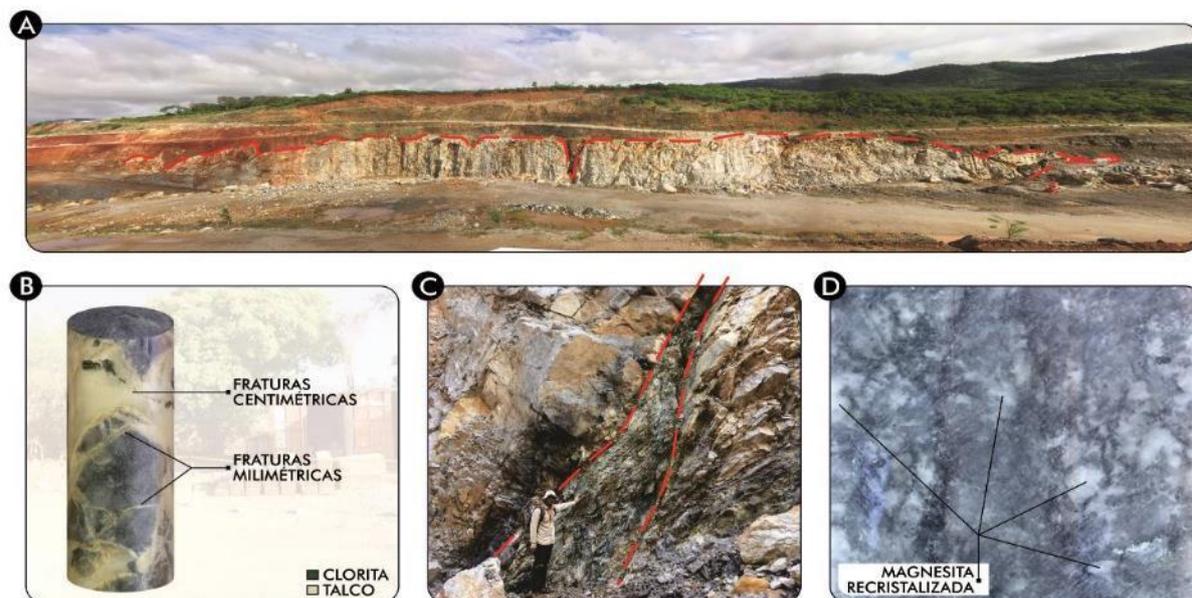


Fonte: Elaborado pelos autores.

O intenso fraturamento ao longo da extensão dessa lente principal permite a ocorrência de veios preenchido por talco e clorita. Esses minerais metamórficos foram produzidos pelo metassomatismo de magnesita ($MgCO_3$) com fluidos hidrotermais. Esses veios frutos de alteração hidrotermal apresentam espessuras variando de milimétricas a centimétricas (FIGURA 06 B), chegando a uma expressão métrica no leste do nível mais inferior da cava (FIGURA 06 C).

A coloração deste carbonato é branca, em zonas mais puras, enquanto varia em tons de cinza, ao longo de porções mais impuras do volume de rocha. As magnesitas de grão fino com a cor branca estão associadas à recristalização, localmente com cristais de maior granulometria. (FIGURA 06 D). Parte dessa característica foi melhor compreendida a partir da descrição dos testemunhos de sondagem e de suas seções delgadas. A partir da interpretação dos furos descritos, foram delimitadas outras duas lentes que não afloram.

Figura 06 – Lente de Magnesita, espessuras das fraturas e níveis de recristalização. A) Lente boudinada (~1 km de extensão longitudinal) destacada em vermelho; B) Espessuras de fraturas e minerais contidos; C) Maior espessura de fratura com preenchimento talco-clorítico, NE do nível inferior da cava; D) Recristalização disseminada em Magnesita cinza.

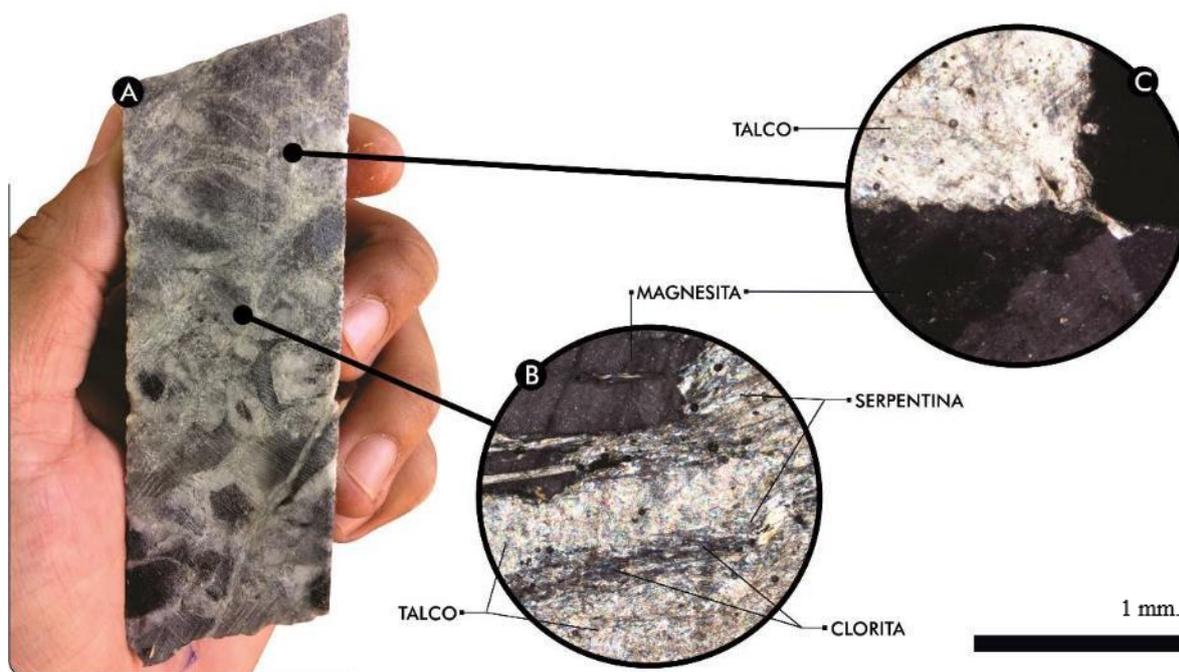


Fonte: Elaborado pelos autores.

Ao microscópio, observou-se que a mineralogia desse mármore é composta predominantemente por magnesita (~90%), sendo que quase 10% da mesma é composta pelos silicatos de magnésio descritos na figura 07 A. Os cristais desse carbonato apresentam forma anédrica, tamanho variado, clivagens perfeitas com ângulos de 120° e 60° entre si. Os outros minerais componentes desta rocha são discriminados na Figura 07 B entre esses minerais

predomina o Talco, que é o principal portador do elemento deletério SiO_2 , além da clorita e localmente serpentina (FIGURA 07 B e C). Um maior detalhamento petrográfico desse litotipo está no Anexo 01.

Figura 07 – A) Minerais associados às fraturas na Magnesita. B) Magnesita associada a Talco, Clorita e Serpentina em veios; C) Talco em bolsão e venular em Magnesita. Ambas imagens via microscópio a nicóis cruzados. Barra preta no canto inferior direito representa 1 mm.



Fonte: Elaborado pelos autores.

3.1.2 – Mármore Dolomíticos

São mármore com granulometria fina, com coloração desde branca a tons de cinza e com textura variando de maciça a bandada. Ocorrem em contato e intercalados na lente principal de magnesita. Os mármore podem ser puros e impuros. A mineralogia a olho nu, é representada predominantemente por dolomita, nos mármore puros. Já os mármore impuros, estão geralmente bandados, onde camadas de dolomita se intercalam com finas bandas escuras contendo anfibólios, talco e outros filossilicatos.

No talude oeste do nível mais inferior da cava da mina, está o maior afloramento representado no mapa da mina (FIGURA 08 A). Nesse ponto, temos uma lente com textura maciça e em outro nível mais superior, aflora uma camada de mármore dolomítico bandado com S0 subvertical (FIGURA 08 B).

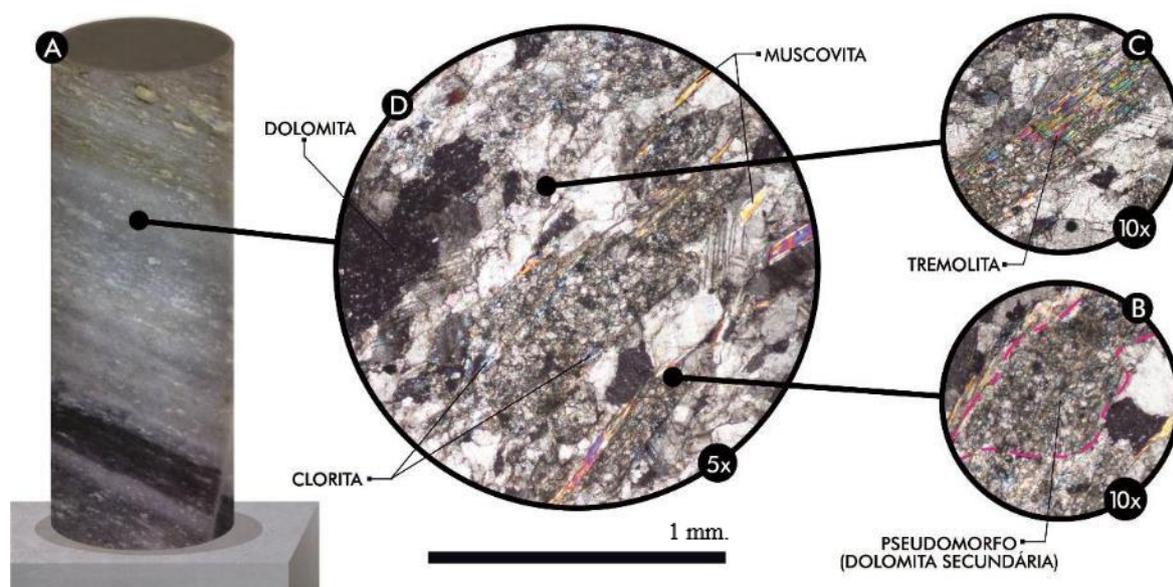
Figura 08 – Setor W da cava. A) Afloramento de Mármore maciço; B) Afloramento de mármore bandado.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os níveis com textura maciça localmente apresentam sulfetos disseminados, além de dolomita ou magnesita recristalizada. Os níveis do bandamento composicional de coloração mais clara são dominados por dolomita (FIGURA 09 A). Os níveis mais escuros representam fácies ricos em matéria orgânica, que podem conter pirita disseminada, calcita, dolomita e magnesita recristalizadas, assim como talco e clorita em venulações. Ocorrem ainda intercalações rítmicas com camadas xistosas com pirita e mármores magnesíticos.

Figura 09 – A) Rocha bandada interceptada pela sondagem; B) Seção delgada a nicóis cruzado com a objetiva de 5x, seguida pela barra de escala de 1mm; C) Tremolita sendo substituída para Carbonatos secundários; D) Pseudomorfo de Tremolita.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Microscopicamente, este mármore é composto predominantemente por dolomita. Essa rocha granoblástica teria tido um estágio de geração de porfiroblastos de tremolita e actinolita, sucedidos por uma intensa substituição por carbonatos secundários (FIGURA 09 B). A identificação desse mineral ocorreu em raros cristais que ainda estavam preservados. Neles a alteração se limitou as bordas, o que proporcionou um claro entendimento da reação (FIGURA 09 C).

Na maioria dos cristais de anfibólio a alteração evoluiu até formar uma massa de carbonatos preenchendo todo o hábito do mineral substituído. A alteração desses porfiroblastos também gera muscovita e talco, em alinhamento bem marcado com megacristais de dolomita, em uma matriz do mesmo carbonato (FIGURA 09 D). Ocorrem subordinados quartzo, plagioclásio e feldspato potássico. A ficha de descrição microscópica dessa litologia é o Anexo 02.

3.1.3 – Xistos

A variedade litológica mais abundante da área. Apresenta coloração amarronzada, e é comumente alterada para um solo vermelho. Sua foliação é sub-horizontal em alguns pontos, chegando a estar sub verticalizada no contato com a lente de mármore lavrada.

Intercalações centimétricas de bandas dominadas por quartzo (com feldspato subordinado) são recorrentes, e registram estruturas dúcteis, como crenulações e dobras, e rúpteis, como falhas e fraturas (FIGURA 10 A). No leste da cava, ocorre uma camada quartzito com espessura métrica, coloração cinzenta e finas camadas brancas que se mostram crenuladas (FIGURA 10 B).

Figura 10 – A) Quartzito impuro dobrado; B) Crenulação superimposta; C) Xisto bandado fraturado e falhado.



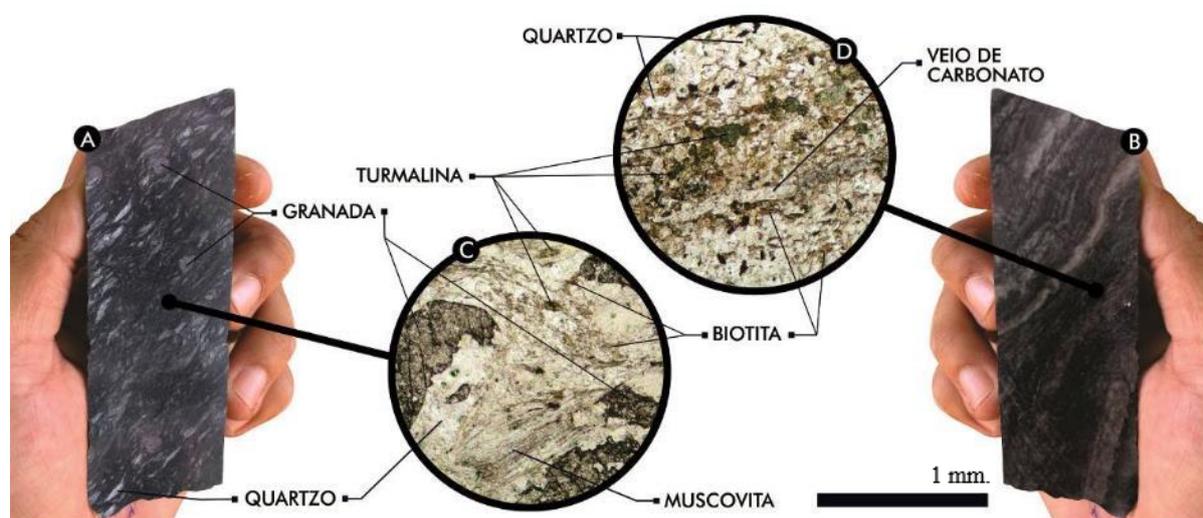
Fonte: Elaborado pelos autores.

Nos testemunhos de sondagem, a rocha encaixante sã apresentou uma paragênese composta por muscovita, biotita e granada, apontando um caráter aluminoso, típico de rochas de derivação sedimentar (FIGURA 11 A).

A banda quartzosa de expressão métrica, aflorante em área pontual da cava, ganha em profundidade, uma variação composicional, textural e de cor, que chama atenção. A coloração dessas camadas varia entre branco, preto, verde e rosado, podendo estar intercaladas (FIGURA 11 B).

Cristas de pirita, granada, k-feldspato e dolomita ocorrem disseminados. Essa rocha quartzítica pode ter um bandamento marcado por talco, clorita, muscovita e/ou biotita. Ocorrem ainda, veios com pirita. Em certos níveis de transição, essas camadas silicosas se intercalam com xistos piritosos.

Figura 11 – Relação macroscópica entre o xisto (A) e o quartzito (B), e suas respectivas microscopias, (C) e (D).



Fonte: Elaborado pelos autores. A barra preta vale 1 mm e serve de escala para as seções delgadas C e D.

As seções delgadas e polidas obtidas a partir da amostragem dos referidos litotipos propiciaram uma expansão do entendimento dessas rochas. A rocha encaixante é predominantemente representada por um granada-biotita-muscovita-quartzo xisto com turmalina (FIGURA 12 A).

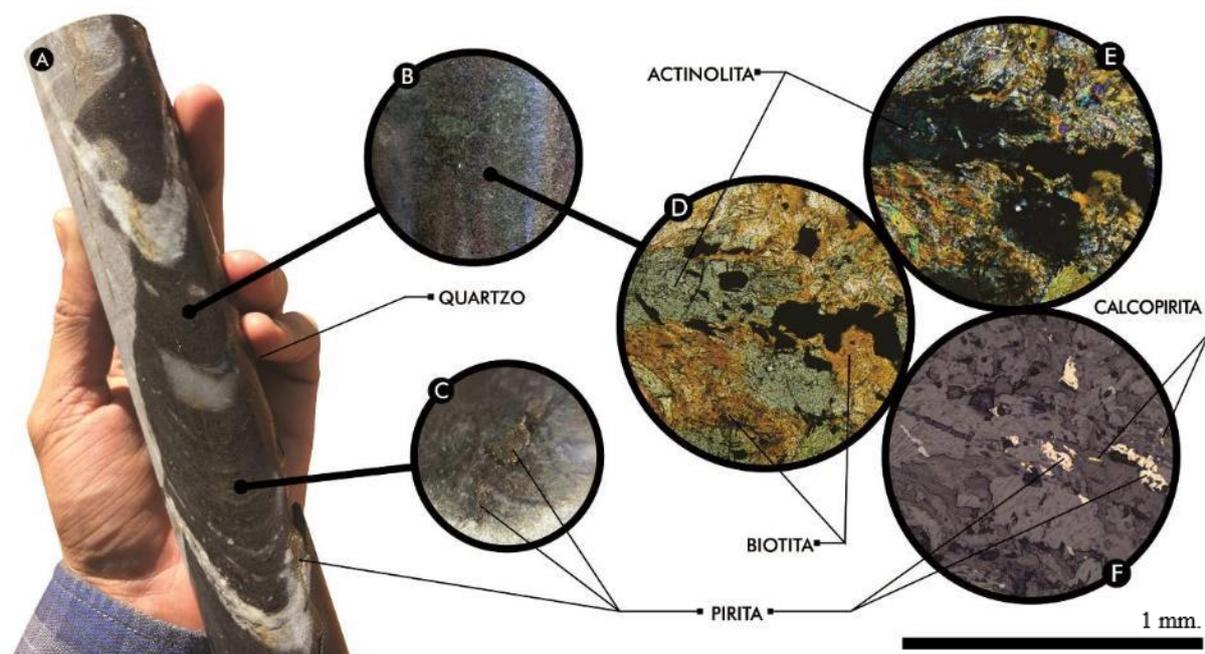
Nessa rocha lepidoblástica, as biotitas e as muscovitas estão orientadas em planos descontínuos e sinuosos, estruturando uma foliação acompanhada por cristais de turmalina e granada (FIGURA 12 C). Este último mineral ocorre em porfiroblastos fraturados e cominuídos e em finas bandas intercaladas com quartzo.

Ao microscópio, foi possível observar que as bandas onde predomina quartzo, apresentam lamelas de biotita acompanhando foliação tectônica, por vezes associada a cristais

verdes de turmalina, idênticos aos que ocorrem no xisto aluminoso descrito acima (FIGURA 12 D).

Os xistos com pirita não afloram, mas foram descritos a partir dos testemunhos, tanto em camadas da rocha encaixante, quanto em pequenas intercalações lenticulares nos mármores com espessura variando de 30 centímetros a alguns metros. São destacados por apresentarem sulfetos disseminados e em venulações (FIGURA 12 E). Essa rocha tem cor dominante variando entre verde e marrom, podendo estar bandada entre as duas cores. Calcita e quartzo em veios ocorrem e em finas camadas paralelas a foliação. Um bandamento composicional é marcado por bandas carbonáticas e bandas de quartzosas.

Figura 12 – A) Xisto com bandas félsicas e pirita disseminada e em veios; B) Variação de cor, entre verde e marrom-avermelhado; C) Pirita disseminada vista por lupa com aumento de 10x; D) Seção delgada a luz natural; E) Seção delgada a Nicóis cruzados; F) Sulfetos descritos em seção polida.



Fonte: Elaborado pelos autores. Todas as seções delgadas são do mesmo ponto da lâmina, em objetiva com aumento de 5x; A barra de escala preta representa 1 mm.

A coloração desta rocha é relacionada à abundância dos minerais presentes. A cor verde está associada a anfibólios, enquanto que a marrom expressa a presença de biotita. Esses xistos podem apresentar variada presença de quartzo, com plagioclásio subordinado. O entendimento da mineralogia desta rocha só foi completo, quando foram utilizadas técnicas de investigação dos minerais opacos, que revelaram uma predominância de pirita, associada com calcopirita e alguns óxidos de ferro e titânio. Os anexos 03, 04, 05 e 06 trazem mais detalhes da descrição petrográfica.

3.2 – Geologia Estrutural

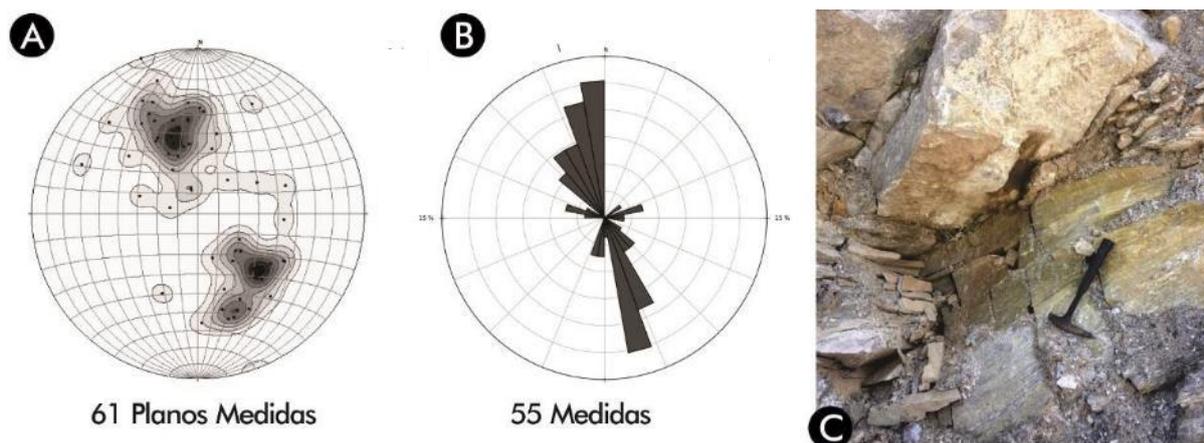
A mina do Torto encontra-se inserida entre os limites da Faixa Móvel Orós, onde as principais feições estruturais associam-se ao processo de transcorrência e deformação da faixa, associada ao final do Ciclo Brasileiro.

Foi denominado o evento Dn, caracterizado por um regime dúctil transcorrente, visível nas foliações e bandamentos das rochas encaixantes do depósito, e posteriormente um regime rúptil de caráter tardi-tectônico, denominado Dn+1, relacionado a falhas e fraturas preenchidas com talco e clorita que ocorrem nos mármore magnésíticos.

3.2.1 – Regime Dúctil Transcorrente - Dn

O regime Dúctil Transcorrente (Dn) é marcado por estruturas como a foliação principal imprimida nos xistos em contato com a mega lente de magnesita do depósito, apresentando-se deformada com feições de boundinagem, os xistos apresentam feições de dobras, em algumas parte com mais intensidade e com feições de crenulação, foliação Sn concordante com o trend preferencial NE-SW da região, onde os pólos dos planos se distribuem heterogeneamente nos dois hemisférios dos estereograma representados na figura 13 A, com mergulhos para S e N, e plano axial de 312/41° (FIGURA 13).

Figura 13 - A) Estereograma de polos gerado a partir de 61 pontos calculados, referentes aos planos Sn dos xistos, representando os contatos entre o xisto e magnesita, máximos em 132/48.6° nos polos; B) Diagrama de roseta referente ao sentido de mergulho NW-SE das foliações dos xistos; C) Contato do xisto, rocha foliada e de coloração escura com lente de magnesita, grão fino de cor cinza, deformada.



Fonte: Elaborado pelos autores.

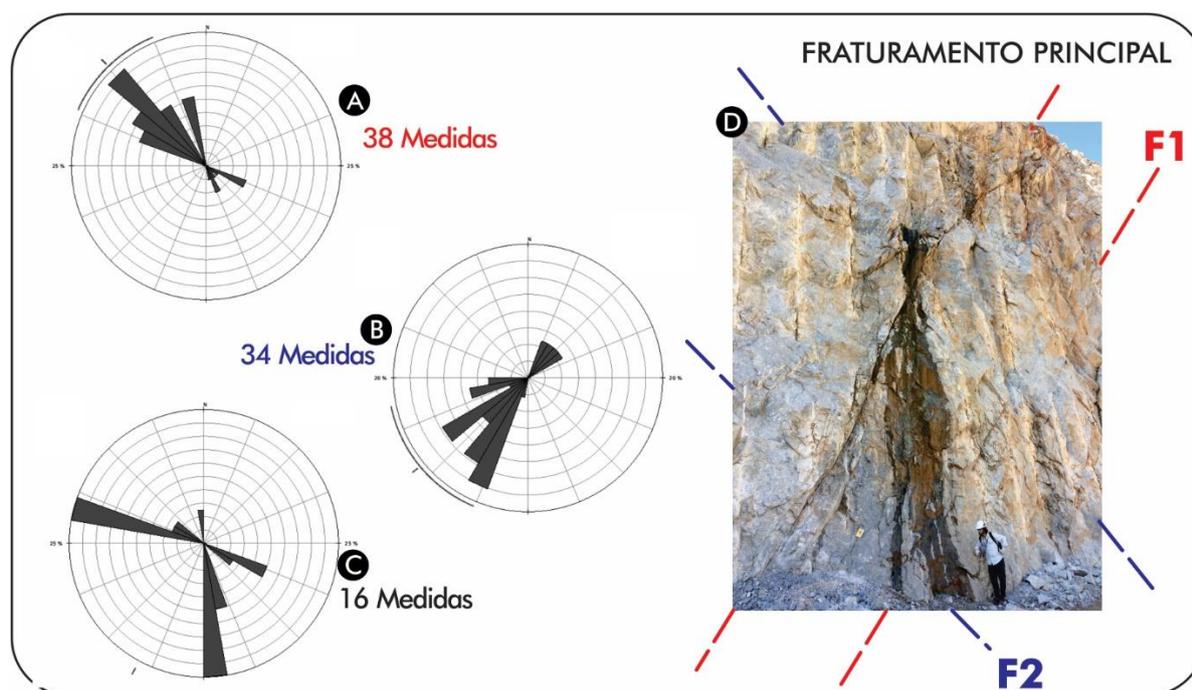
3.2.2 – Regime Rúptil Tardi-tectônico – Dn+1

O componente deformacional (Dn+1) é representado pela ocorrência de falhas e fraturas subverticais a verticais, preenchidas por talco e clorita por processo metassomático durante o período de fraturamento da lente de mármore magnésítico.

Com direções e mergulhos distintos, foram definidas as principais famílias de fraturas (FIGURA 14) que controlam os minerais com elementos deletérios no depósito, as zonas de intenso fraturamento ocorrem mais próximas das fraturas principais, que possuem maior extensão e largura, são representadas pela família de fratura I com maior desenvolvimento de talco e clorita nas estruturas.

A Família de Fraturas I possui mergulhos variando de 43-73° para direção SW e a Família de Fraturas II as estruturas mergulham em direção SE com intensidade entre 39-70°. Já na Família de Fraturas III, foram agrupados os dados das fraturas, com mergulhos de maior intensidade, para fraturas com orientação NW-SE a intensidade do mergulho varia de 73-75°, e para as fraturas N-S os mergulhos variam de 83-88°.

Figura 14 - A) Diagrama de roseta gerado a partir de 38 medidas referente a Família de Fraturas I com direção média de 315° com mergulho SW; B) Diagrama gerado a partir de 34 medidas referente a Família de Fraturas II com direção média de 225° com mergulho SE; C) Família de Fraturas III são representadas no diagrama de roseta a partir de 16 medidas, foram agrupadas as fraturas com alta intensidade de mergulho variando de 73-88° com direções NW-SE e N-S; D) Representação das famílias de fraturas I e II, principais estruturas que controlam a mineralização de talco e clorita nos mármore magnésiticos, presentes na Mina do Torto.



Fonte: Elaborado pelos autores.

3.3 – Geoquímica

As análises geoquímicas foram realizadas e cedidas pela empresa Magnesium do Brasil S/A, foram analisadas o total de 1110 amostras representando intervalos de 3 metros, referentes aos intervalos definidos como minério a partir 50 furos de testemunho de sondagem de longo prazo da Mina do Torto.

Os elementos maiores foram determinados pelo método de Fluorescência de Raios X em laboratório próprio da Magnesium do Brasil S/A conforme descrito no item 1.2.5 Análises químicas multielementares no capítulo 1.2 Metodologia.

Para a validação do banco de dados e comparação dos mármore da mina do Torto com os mármore ao longo da Faixa Orós, foram analisadas o total de 19 amostras de mármore calcícticos, dolomícticos e magnesícticos coletados em afloramentos à beira da estrada e em depósitos conhecidos distribuídos ao longo da Faixa Orós.

3.3.1 – Geoquímica dos Carbonatos da Faixa Orós

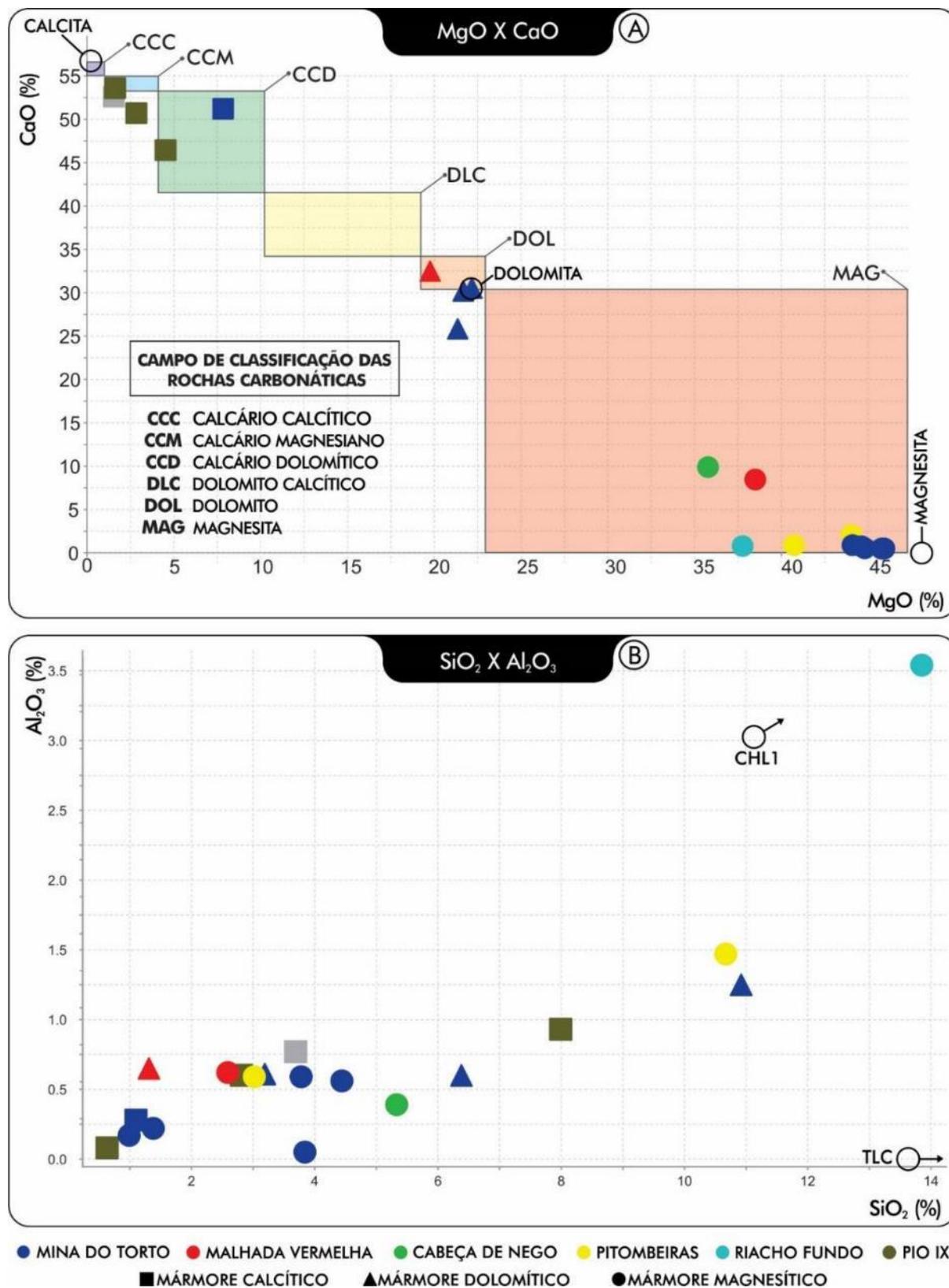
Entre as 19 amostras coletadas para a avaliação da geoquímica dos carbonatos da Faixa Orós, foram coletadas 5 amostras de mármore calcícticos da região de Pio IX, no extremo SE do depósito da Faixa Orós, 05 amostras de a mármore dolomícticos que ocorrem nos depósitos de Malhada Vermelha e Torto, localizados na porção centro-leste da Faixa e 9 amostras de magnesita. As amostras de magnesita são referentes aos depósitos de Cabeça de Nego, Malhada Vermelha, Pitombeiras, Riacho Fundo e Torto.

3.3.1.1 – Comportamento dos Elementos Maiores

A figura 15 A apresenta a classificação dos mármore dolomícticos da Faixa Orós de acordo com o conteúdo de cálcio e magnésio, e os campos de classificação de carbonatos de acordo com Pettijohn (1975). Apenas duas amostras de mármore dolomíctico da Mina do Torto, plotam fora dos campos propostos, devido à contaminação por elementos deletérios secundários. As amostras podem ser consideradas como representativas de carbonatos relativamente puros.

Em relação os principais elementos deletérios (SiO_2 e Al_2O_3) plotados no diagrama da figura 15 B, não existe nenhuma correlação entre o tipo de mármore ou a localidade, com os teores de SiO_2 e Al_2O_3 relacionado aos elementos deletérios, principalmente com o mineral talco. As amostras variam entre 1 a 12% de sílica com no máximo 3.5 wt. % de alumínio. Dentre as amostras da Mina do Torto, os teores de SiO_2 são de no máximo 4.4 wt. %. É importante ressaltar que foram escolhidas amostras de testemunhos sem fraturas preenchidas por talco ou clorita.

Figura 15 – A) Relação entre MgO e CaO dos carbonatos da Faixa Orós. Composições estequiométricas dos principais carbonatos estão plotadas como círculo abertos. Retângulos representam os campos de classificação de rochas carbonáticas de acordo com Pettijohn et al., 1975, B) Relação entre Al_2O_3 - SiO_2 dos carbonatos da Faixa Orós. Composições estequiométricas do talco e clorita estão plotadas como círculo abertos.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os demais elementos maiores não apresentam correlação direta, porém é possível observar diferentes tipos de distribuição de acordo com composição calcítica, dolomítica ou magnesítica do mármore (FIGURA 16).

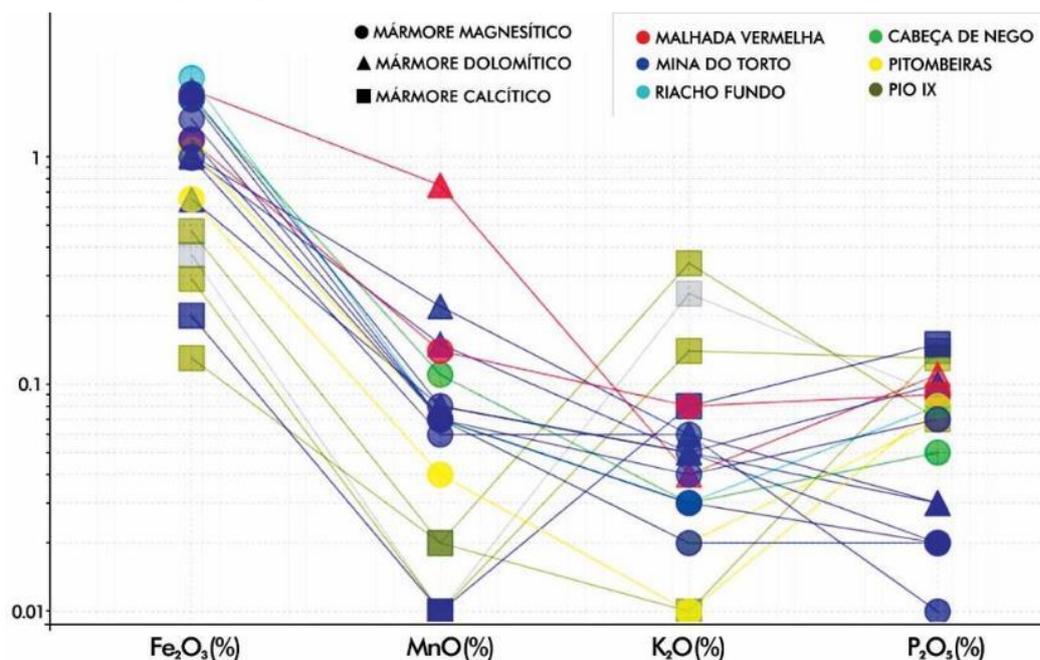
Em relação aos outros elementos maiores, os mármore magnesíticos apresentam teores de MgO variando de 35.77 a 45.93 wt. %; os teores de Fe₂O₃ variam de 0.65 a 2.22wt. %; MnO varia de 0.04 a 0.14wt. %; os teores de K₂O são próximos ao limite de detecção, entre 0.01 a 0.08wt. %; os teores de CaO limitam-se nos intervalos de 0.49-9.89wt. %; Teores de P₂O₅ variam entre 0.01 e 0.09wt. %.

Os mármore dolomíticos apresentam teores MgO entre 17.94-19.73wt. %; Fe₂O₃ variando de 0.65-1.97wt. %; os teores de MnO variam de 0.08-0.75wt. %; os teores de K₂O são praticamente invariáveis, 0.04-0.06wt. %; os teores de CaO variam de 25.85-32.5wt. %; E os teores de P₂O₅ variam de 0.03-0.11wt. %.

Os mármore calcíticos possuem teores de MgO variando de 0.31 a 4.14wt. %; Fe₂O₃ entre 0.13-0.47wt. %; os teores de MnO variam de 0.01-0.2wt. %; os teores de K₂O variam de 0.01-0.34wt. %; os teores de CaO são elevados, variam de 46.44-53.59wt. %; E os teores de P₂O₅ de 0.07-0.15wt. %.

Apesar de não apresentar correlação com magnésio, os teores de ferro e manganês são consistentemente menores nos mármore calcíticos em comparação com mármore magnesíticos e dolomíticos (FIGURA 16). Potássio e fósforo por sua vez, são consistentemente maiores nos mármore calcíticos em relação aos demais.

Figura 16 – Diagrama spider representando os elementos maiores dos carbonatos da Faixa Orós.



Fonte: Elaborado pelos autores.

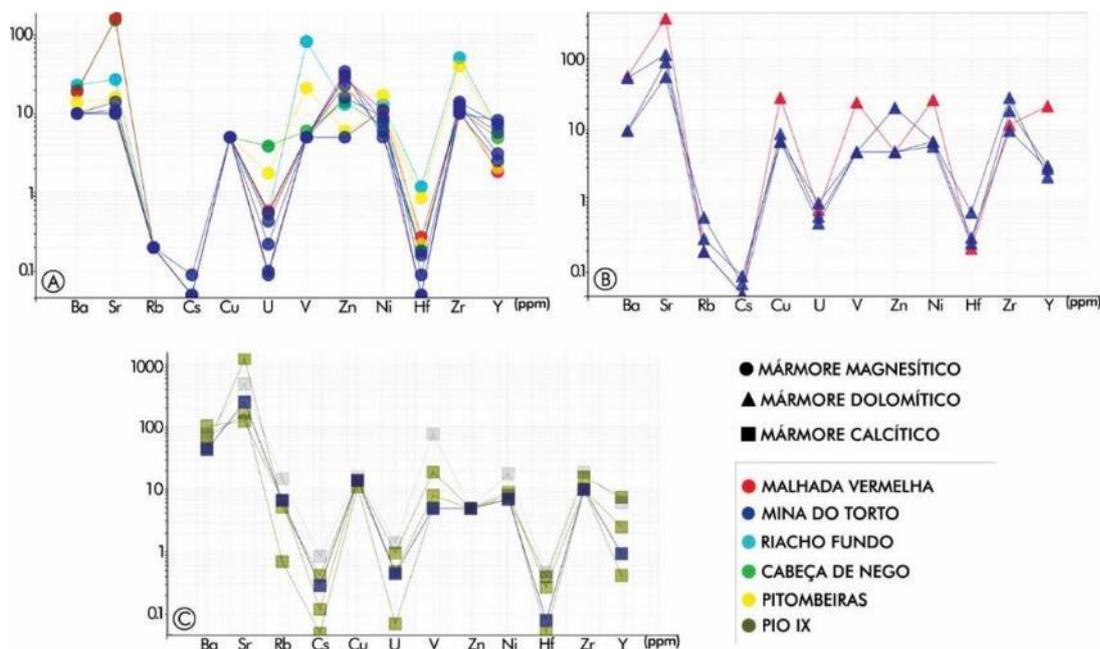
3.3.1.2 – Comportamento dos Elementos Menores e Traços

Foram determinados 12 elementos-traços (Ba, Sr, Rb, Cs, Cu, U, V, Zn, Ni, Hf, Zr e Y), e os elementos Sn, W, Ta, Nb, Ga, Th, Sm, Eu, Tb, Ho, Er, Tm, Yb, e Lu ficaram abaixo do limite de detecção. A figura 17 mostra a distribuição dos elementos traços nas amostras analisadas Faixa Orós.

Os mármore calcíticos apresentam maior concentração dos elementos LILE (*large ion lithophile elements*) em relação aos mármore dolomíticos e magnésíticos que apresentam semelhantes concentrações nestes elementos. Teores de Ba e Sr são da ordem de 10 e 100 ppm respectivamente para os mármore magnésíticos (FIGURA 17 A) e dolomíticos (Figura 17 B) enquanto que os mármore calcíticos apresentam valores na ordem de 100 a 1000 ppm. Os demais elementos LILE seguem a mesma tendência, com valores de Rb entre 0.2-0.8 ppm para os mármore magnésíticos e dolomíticos e entre 1 e 10 para os mármore calcíticos. Cs possui valores inferiores a 0.1 ppm para os mármore magnésíticos e dolomíticos e valores pouco maiores para os mármore calcíticos, entre 0.1 e 0.5 ppm.

Os demais elementos traços apresentam composição similar independente da composição do mármore. Os teores de cobre variam entre 7 e 29 ppm para os mármore dolomíticos e calcíticos, os mármore magnésíticos obtiveram valores abaixo do limite de detecção; Os valores de U variam de 0.07 a 3.86 ppm para todos os tipos de mármore; Os teores de V, Zn e Ni são da ordem de 5 a 82 ppm; Valores de Hf variando de 0.08 e 1.18 ppm; O Zr possui valores entre 10 e 51 ppm e valores de Y variam de 0.42 a 22.06 ppm.

Figura 17 – Diagrama spider representando os elementos traços dos carbonatos da Faixa Orós.



Fonte: Elaborado pelos autores.

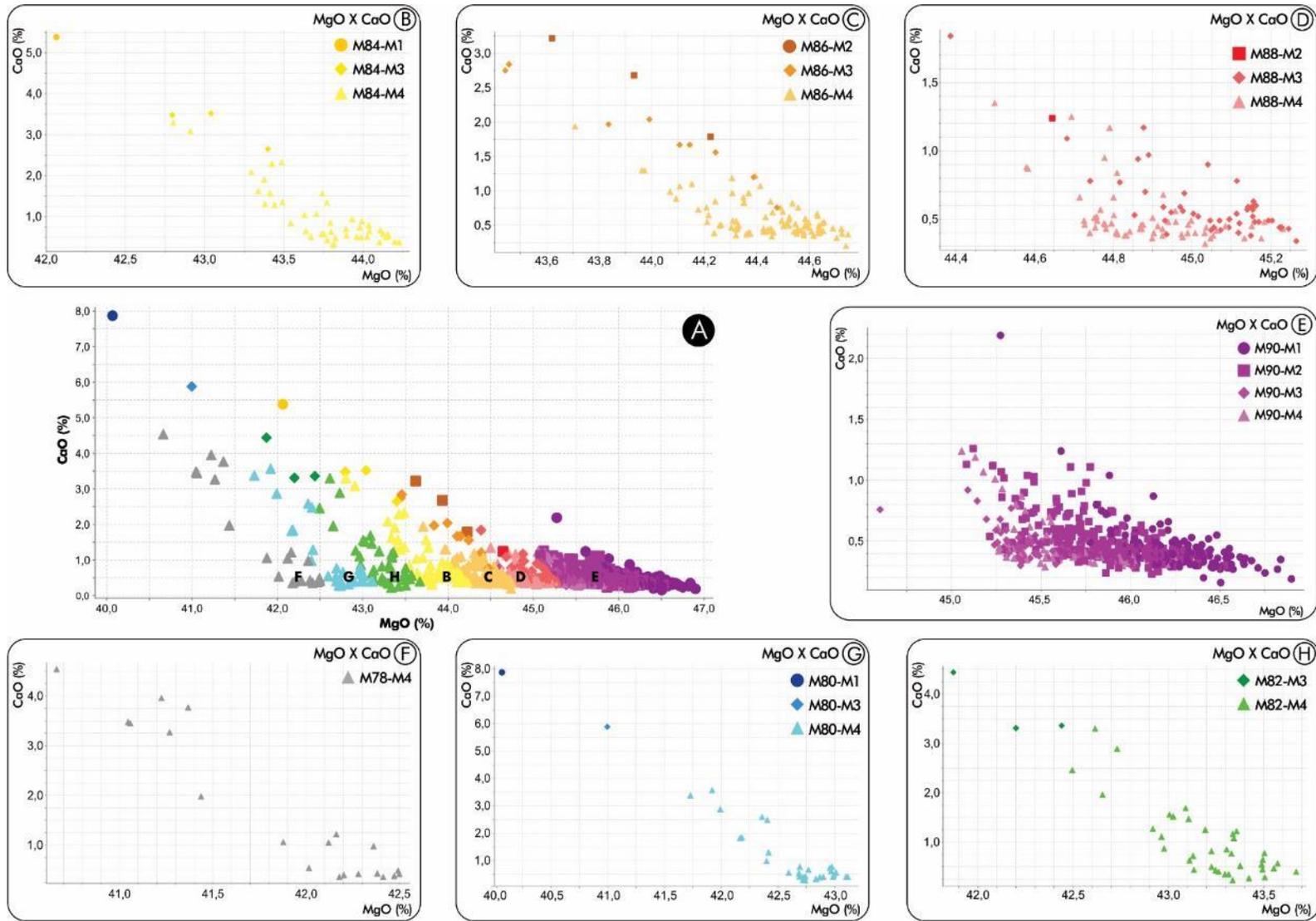
3.3.2 – Geoquímica do Minério da mina do Torto

As análises geoquímicas do minério da mina do Torto são relativas ao total de 798 amostras, referentes a intervalos descritos como minério de mármore magnésítico, a figura 18 representa um gráfico relacionando MgO com CaO, principais componentes dos mármore magnésíticos, os valores de CaO são todos inferiores a 10% e as amostras estão classificadas de acordo com as especificações geometalúrgicas da Mina do Torto estabelecida pela empresa de acordo com os limites de teor de MgO Calcinado, SiO₂, Fe₂O₃ e Al₂O₃.

Baseado nos teores de MgO calcinado os minérios de magnesita são classificados em seis classes: M78 (78.00-79.99wt. %), M80 (80.00-83.99wt. %), M84 (84.00-85.99wt. %), M86 (86.00-87.99wt. %), M88 (88.00-89.99wt. %) e M90 (>90.00wt. %).

E de acordo com os teores dos elementos deletérios, o minério recebe uma subclassificação de M1 a M4. Primeiro de acordo com a sílica, M1 (até 1 wt. %), M2 (até 2 wt. %), M3 (até 3 wt. %) e M4 (>3 wt. %). Adicionalmente, valores de Al₂O₃ e Fe₂O₃ maiores que 1.5 e 2 wt. % respectivamente também classificam o minério como M4 independente teor de sílica.

Figura 18 – Relação entre MgO e CaO no minério da Mina do Torto.



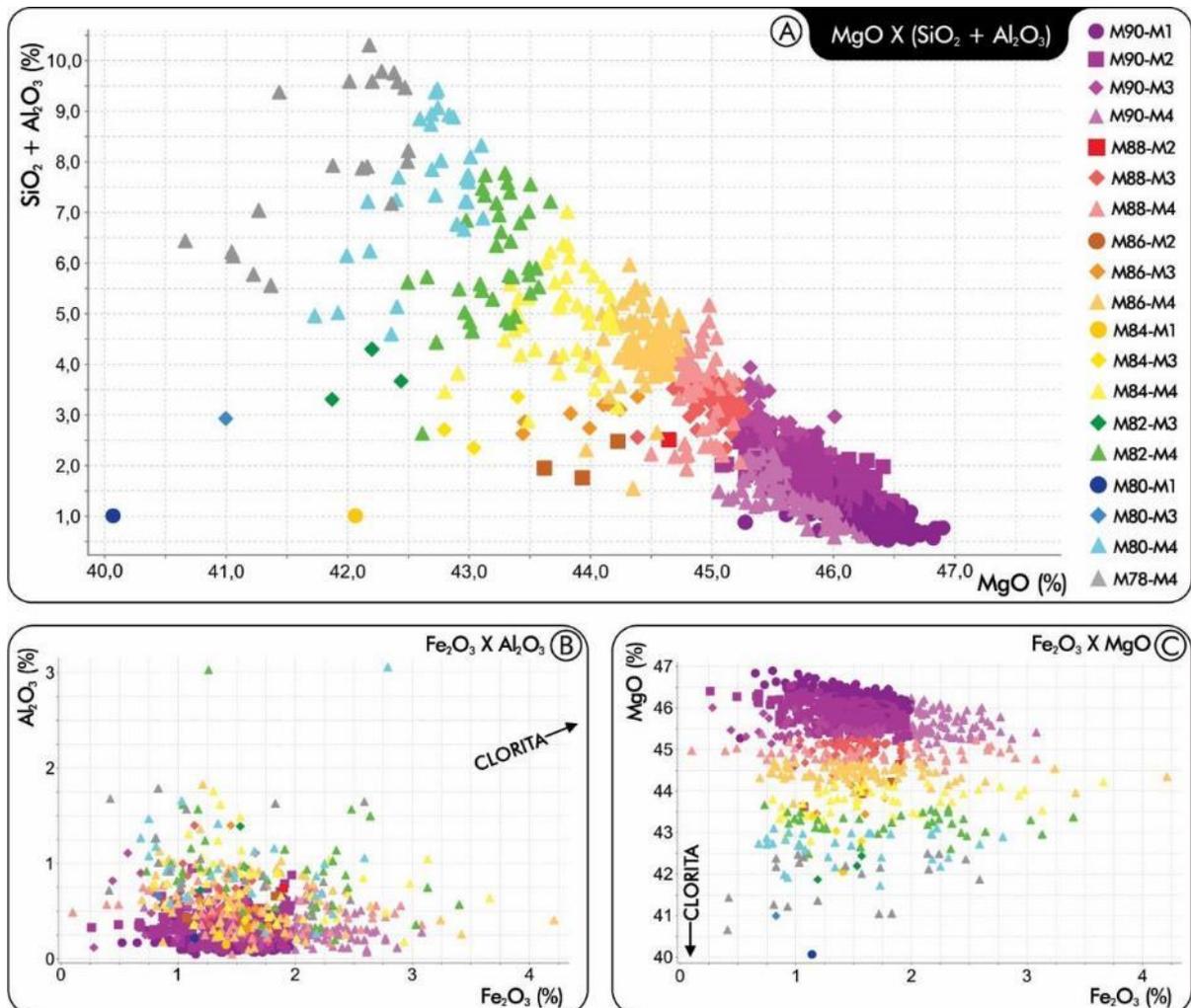
Fonte: Elaborado pelos autores.

A figura 19 A mostra a distribuição dos teores de MgO vs as amostras de magnesita classificadas de acordo com as especificações da mina, os teores de MgO são inversamente proporcionais aos teores de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$.

O gráfico representado na figura 19 B mostra a relação entre $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3$ nas magnesitas, os pontos plotados encontram-se dispersos e podemos concluir que os teores de Fe_2O_3 e de Al_2O_3 medidos não possuem relação com o mineral Clorita ($\text{Mg}_5\text{Al}_2\text{SiO}_{10}(\text{OH})_8$).

Na figura 19 C o gráfico representa a relação $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ nas magnesitas analisadas, a maioria das amostras encontram-se dispersas, não havendo correlação do MgO com Fe_2O_3 .

Figura 19 – Relação entre MgO e o somatório da SiO_2 e do Al_2O_3 no minério da Mina do Torto. B) Relação entre Fe_2O_3 e Al_2O_3 e C) Relação entre MgO e Fe_2O_3 no minério magnésíficos da Mina do Torto. Fórmula da Clorita: $\text{Mg}_5\text{Al}_2\text{SiO}_{10}(\text{OH})_8$.



Fonte: Elaborado pelos autores.

CAPÍTULO 04 - MODELAMENTO GEOLÓGICO 3D

A construção de modelos geológicos tridimensionais é uma tarefa realizada rotineiramente por geólogos de mina e geólogos de exploração. A precisão e a qualidade desse modelo são de extrema importância para a economia da mina, pois influenciam diretamente no planejamento da lavra a curto e longo prazo.

O modelamento consiste na criação de sólidos gerados a partir de dados categorizados (e.g. litologia, alteração hidrotermal) ou numéricos (e.g. grau de faturamento e geoquímica). Essa modelagem pode ser explícita ou implícita, e se baseia principalmente nos dados litológicos de superfície e de furos de sondagem. A metodologia explícita utiliza a interpretação de perfis geológicos bidimensionais, extrapolando lateralmente estas seções para a geração dos sólidos tridimensionais.

O modelamento geológico explícito requer a digitalização manual de cada contato litológico, sendo um processo mais trabalhoso e demorado. Qualquer atualização no modelo (por exemplo, devido à uma nova campanha de sondagem) exige a re-digitalização de todas as seções geológicas e a geração de modelos geológicos com diferentes interpretações é praticamente impossível devido ao tempo gasto na vetorização.

A metodologia implícita não é baseada na interpretação de seções geológicas. Os pontos de contato dos intervalos descritos para as litologias do modelo são convertidos do código litológico para valores numéricos, onde o ponto do contato litológico recebe o valor zero. Valores positivos são atribuídos para os pontos dentro da superfície, aumentando à medida que se afastam do contato. Valores negativos crescentes são atribuídos para os pontos fora da superfície a medida que se afasta do ponto contato. (COWAN et al., 2003). Assim, a iso-superfície zero pode ser extraída da função como sendo uma superfície de contato entre as duas litologias em qualquer resolução. Esse método se utiliza da interpolação de função de base radial (RBF), uma função básica de interpolação matemática (HARDY, 1971 *apud* COWAN et al., 2003).

A escolha da metodologia aplicada vai de acordo com a preferência do profissional, mas a modelagem implícita é a mais recomendável. Quando a sondagem não atravessa todo o corpo investigado, o banco de dados gerado não fornece todos os contatos necessários para o sólido seja modelado. Nesse caso, o corpo interpretado pode ser modelado com a adição de linhas vetoriais auxiliares.

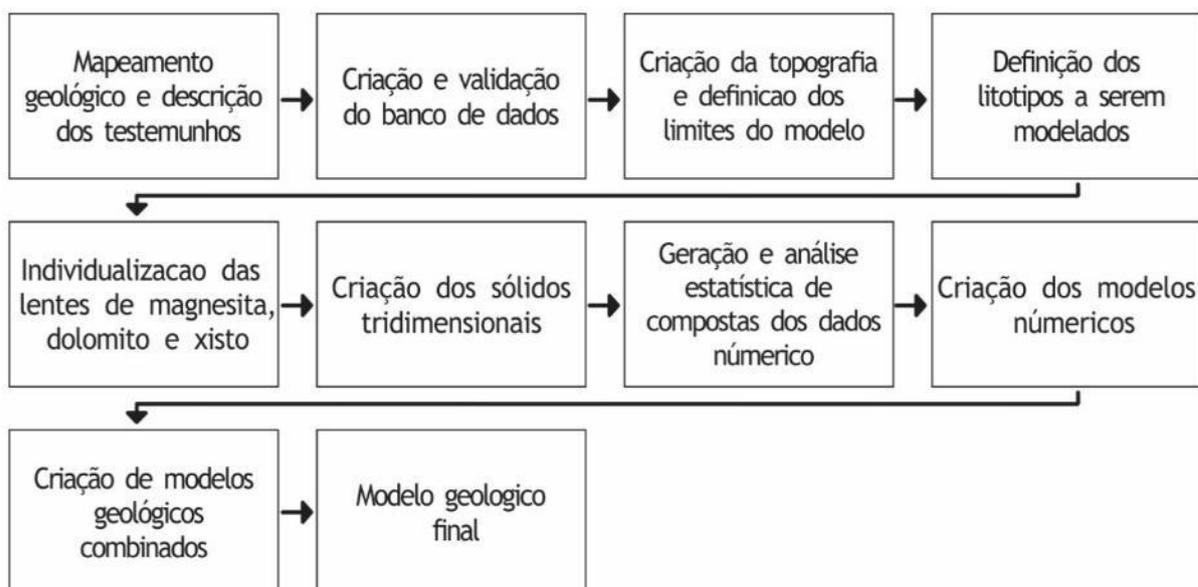
Os furos de sonda na Mina do Torto têm profundidade máxima da ordem de 150 metros, e geralmente não ultrapassa o volume da lente de minério principal. O modelamento geológico

implícito foi realizado com o auxílio de linhas tridimensionais que orientam a interpolação (baseado em critérios geológicos) onde não existe informação de sondagem.

A modelagem geológica foi realizada com o software LeapFrog Geo 3D, disponibilizado pela parceria do SEG Student Chapter UFC com a empresa Seequent Limited, responsável pelo desenvolvimento do software. O programa exige pré-requisitos para construir um modelo tridimensional. A superfície topográfica é mandatória e os dados espaciais e litológicos dos furos de sondagem, alimentam o modelo. Além de ter ferramentas dedicadas para tratar dados químicos, esse software permite a importação e interpolação de qualquer dado numérico ou categorizado. Todos os dados são importados a partir de arquivos, .CSV (*comma-separated values*).

A figura 20 mostra o fluxograma do modelamento geológico realizado neste trabalho:

Figura 20 – Fluxograma do modelo geológico tridimensional.



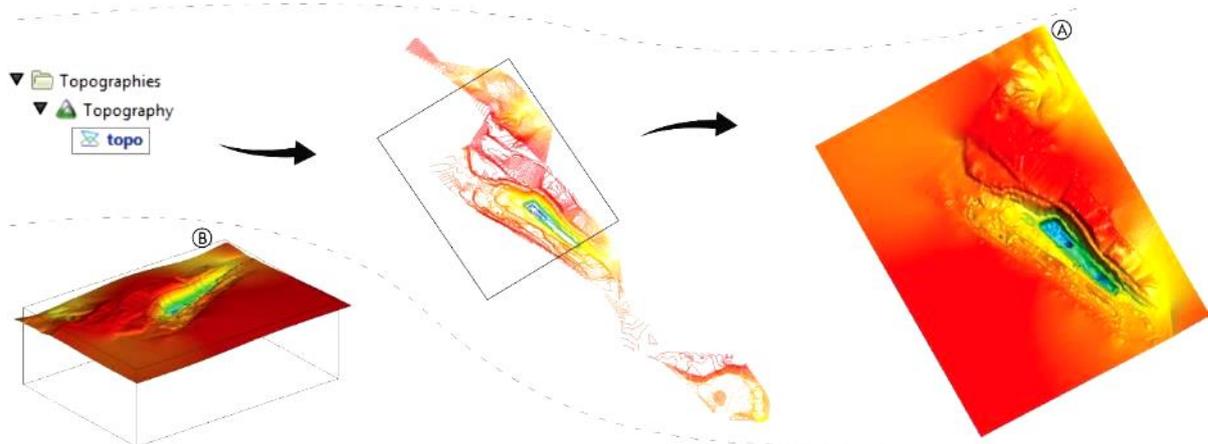
Fonte: Elaborado pelos autores.

4.1. – Topografia e definição dos limites do modelo

No modelamento geológico implícito, a primeira etapa é definir os limites do modelo geológico. O limite superior é definido pela superfície topográfica, enquanto que os limites laterais são verticais e definidos pelo usuário de acordo com a distribuição das informações geológicas.

Neste trabalho os dados topográficos foram importados à partir de curvas de nível fornecidas em arquivo shapefile (.shp) pela Magnesium do Brasil S.A. Os dados de curva de nível são triangularizados e geram a superfície Topography (FIGURA 21 A). Ao mesmo tempo que essa superfície recorta o sólido (FIGURA 21 B), o mesmo é georreferenciado.

Figura 21 – Inserindo a Topografia.



Fonte: Elaborado pelos autores.

4.2 – Importação dos dados geológicos de sondagem e superfície

É necessário a importação dos dados de contato litológico, tanto em superfície, quanto em profundidade. A cartografia da cava e do entorno foi vetorizada no ArcGIS, forneceu o arquivo shapefile delimitando os contatos entre os carbonatos e xistos aflorantes em planta. Esta linha é então projetada na superfície topográfica para alimentação do modelo.

Para a definição de um furo de sonda no espaço, algumas informações são necessárias: (1) Collar, tabela composta por dados de x, y e z, (2) Survey, quem atribui dados de inclinação aos furos. A Figura 22 mostra o passo-a-passo da importação, possibilidade de se importar outras tabelas de categoria ou numéricas (*interval tables*). Foram importadas na categoria de intervalos, as tabelas que continham os dados de litologia, os dados químicos dos carbonatos da Mina e a tabela do índice de faturamento.

Figura 22 – Importando dados de furos de sondagem.



Fonte: Elaborado pelos autores.

4.3 – Subdivisão dos litotipos

As litologias descritas nos logs de sondagem estão sumarizadas na figura 23. Elas incluem: Mármore magnésíticos, mármore dolomíticos puros e impuros, xistos, metassedimentos piritosos e metassedimentos silicosos (Figura 23). Estes dados alimentaram o banco de dados para a visualização dos intervalos descritos em um ambiente tridimensional. Com isso, isso é avaliar como estão dispostos os corpos de mesma litologia em subsuperfície.

Figura 23 – Logs descritos em campo.

Cód.	Litologia	Descrição
SOL	Solo	Sedimento inconsolidado, resultado da alteração dos outros litótipos.
XXX	Não recuperado	Intervalos perdidos pelo durante a sondagem.
MAG	Magnesita	Rocha carbonática de variada coloração e textura, que não reage ao ácido clorídrico à 25%
MDP	Mármore dolomítico puro	Rocha carbonática de corloração variando de branca a cinza claro, que reage ao ácido clorídrico à 25%.
MDI	Marmore dolomítico impuro	Rocha com variado tom de cinza associada a uma variação textural e associação a minerais silicosos, que reage ao ácido clorídrico à 25%.
MSP	Metasedimento piritoso	Rocha rica em minerais do grupo da mica com associação de pirita em variadas expressões.
MSS	Metasedimento silicoso	Rocha rica em minerais do grupo da mica com associação de quartzo, chegando a estar totalmente silicificada.
XIS	Xisto	Rocha rica em minerais do grupo da mica podendo conter granada.

Fonte: Elaborado pelos autores.

A partir dessa observação, iniciou-se o desenhar dos contatos e estruturas dos volumes que seriam modelados. Nessa etapa foi possível separar rochas de uma mesma litologia, tendo em vista que faziam parte de corpos distintos.

Para essa subdivisão de uma mesma litologia, foi criada uma coluna de litologia secundária, individualizando as diferentes lentes de magnesitas, dolomitos e metassedimento piritoso intercalados em meio às magnesitas e xistos encaixantes e a camada de solo superficial. Essa nova classificação permite refinar dos corpos distintos, separando cada intervalo que irá ser modelado. O minério magnésítico, foi interpretado como ocorrendo em uma lente principal, e mais 3 de menor expressão.

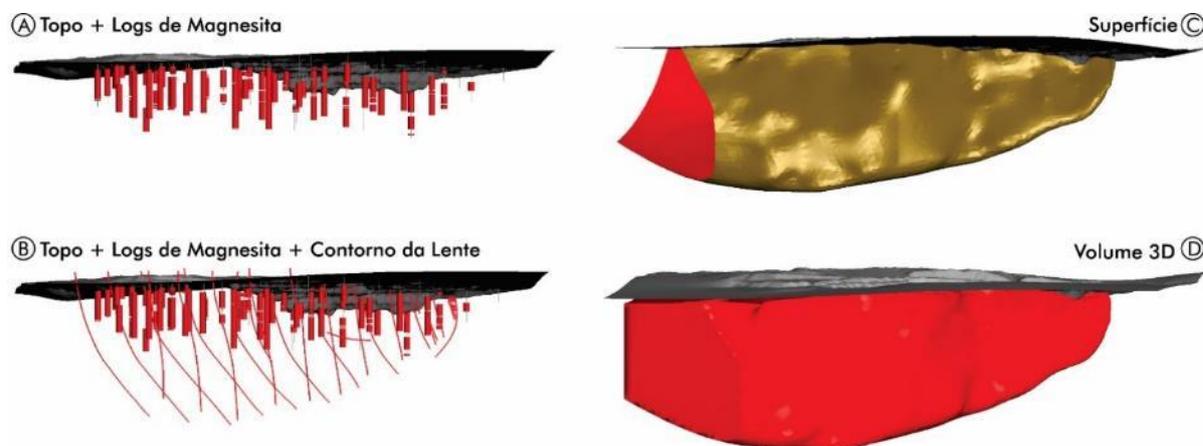
4.4 – Geração dos sólidos

Na Figura 24, está discriminado todo o processo de geração da lente principal de mármore magnésítico por modelamento implícito. Esse corpo foi apresenta mergulho variando entre 55° e 70° para sul, indicado a partir de observações em campo e da relação entre encaixante e minério, em subsuperfície.

Foram realizados 9 perfis geológicos, orientados a 150°/90°, em alinhamento com a malha de sondagem, que é a principal base de dados para a geração da superfície (FIGURA 24 A). Linhas auxiliares foram desenhadas nestes perfis para orientar o modelamento geológico

implícito. Estas, linhas de contorno do corpo servem de base para delimitar o volume modelado (FIGURA 24 B).

Figura 24 – Modelando a Lente Principal de Minério.



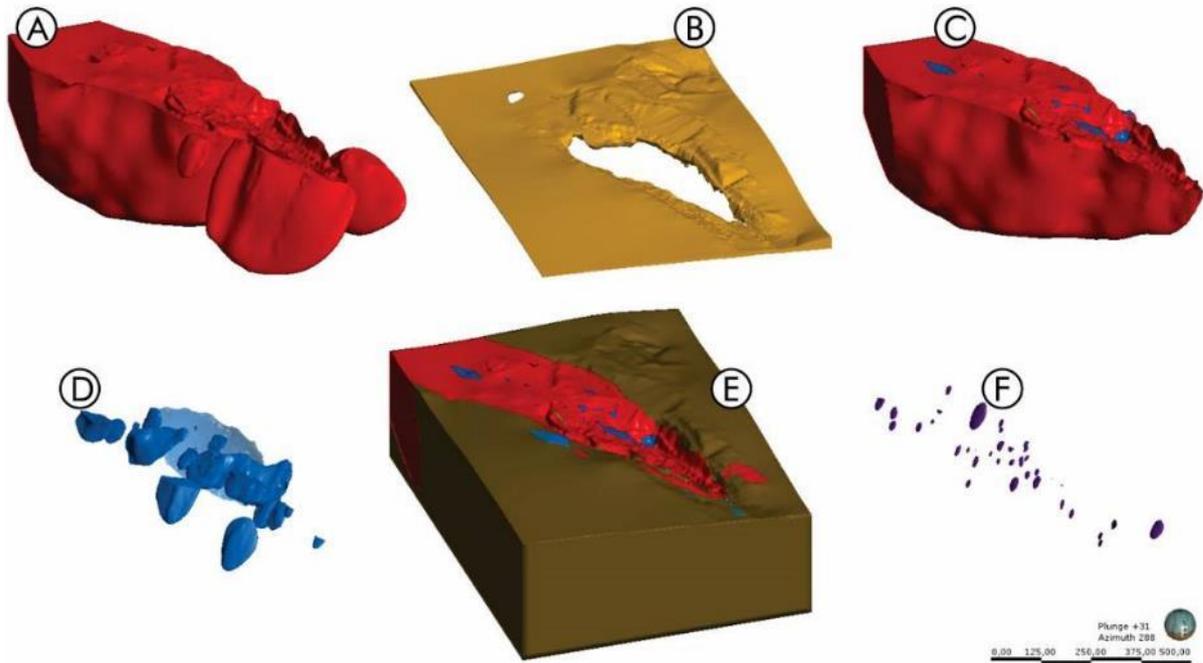
Fonte: Elaborado pelos autores.

A interpolação entre os dados de sondagem e as linhas auxiliares, desenhadas em seção, geram uma superfície (FIGURA 24 C) que irá cortar o volume a ser modelado (definido pela topografia e os limites laterais). O recorte deste volume resulta em dois domínios, um interno e outro externo à superfície. Na figura 24 D, temos a lente principal de minério magnésítico, modelada tridimensionalmente pela interpolação dos dados de sondagem e linhas auxiliares.

Ao todo, foram modeladas 4 lentes de minério (FIGURA 25 A). Os outros intervalos são modelados da mesma maneira, de forma que no final todas as superfícies cortam os limites do modelo geológico de acordo com uma sequência pré-estabelecida.

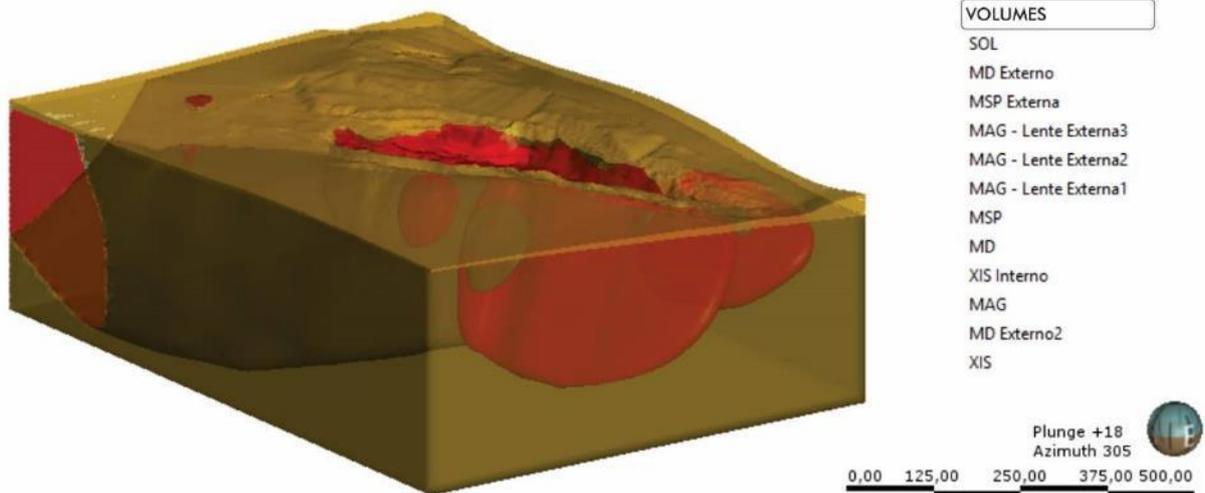
O único sólido que não foi gerado diretamente pelo modelamento geológico implícito utilizando apenas os dados de sondagem e linhas auxiliares foi solo (FIGURA 25 B). A quantidade de pontos de contato existentes era insuficiente para delimitar a camada de solo. Para isso, foi feita uma atribuição automática da medida da profundidade da camada, nos pontos sem dado de contato. O offset surface, utilizou o valor numérico da cota topográfica subtraído por 10 metros, nos pontos do volume que a interpolação foi necessária. Essa superfície erosiva, recorta todos os outros volumes já modelados (FIGURA 25 A-F), gerando o sólido final (FIGURA 26).

Figura 25 – Partes do sólido gerado. A) Lentes de Magnesita; B) Solo; C) Lente principal de minério com intercalações de mármore dolomítico e xisto; D) Lentes de mármore dolomítico; E) Modelo sem solo; F) Lentes de MSP.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 26 – Volume tridimensional da Mina do Torto.



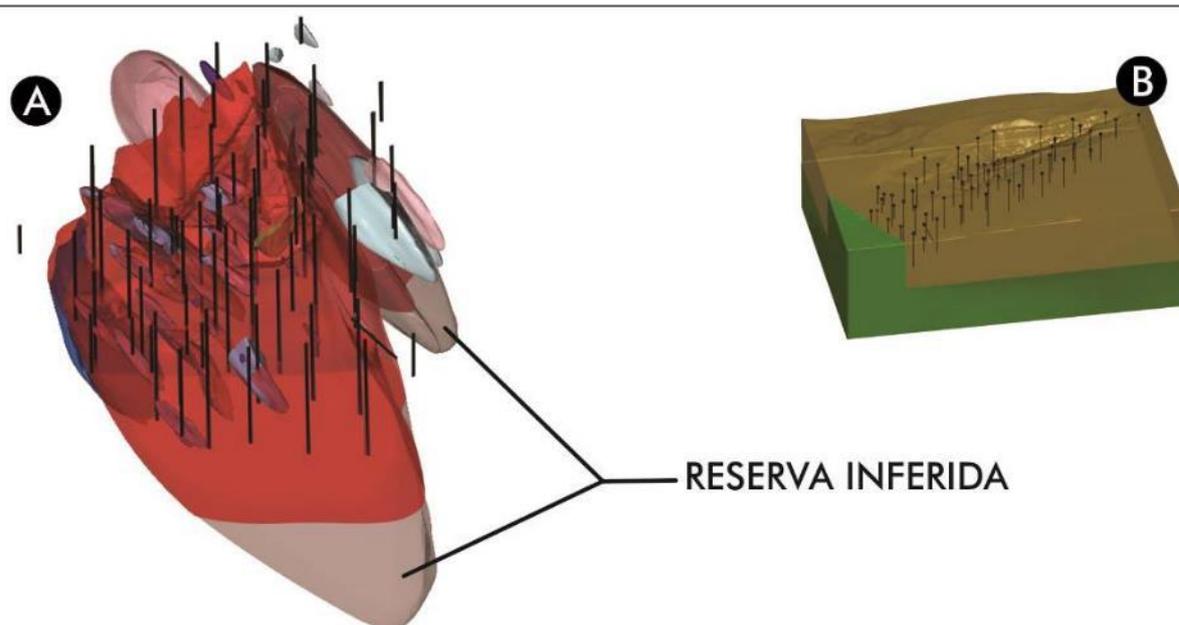
Fonte: Elaborado pelos autores.

4.5 – Reservas Medidas e Indicadas + Inferidas

As Reservas Medida, Indicada e Inferida da Mina do Torto (FIGURA 27A, B) foram baseadas em um banco de dados com informações geológicas de testemunhos de furos de sondagem e amostragem com informações geoquímicas, combinadas em modelos numéricos, com quantidades de amostras bem definidas.

O boundary que define o volume de reserva medida (FIGURA 27 B) da Mina do Torto, tem a cota da sua superfície inferior definida pela distância de 25 metros do último intervalo de mármore magnésítico interceptado. Esse sólido tem seu limite leste representado pelo fechamento da lente de minério. Como não foi possível o determinar o fechamento oeste da lente, esse volume foi limitado por uma distância de 50 metros da última linha da malha de sondagem.

Figura 27 – A) Representação da reserva indicada com cor vermelho e reserva inferida em tons de cinza; B) Reserva medida representada pelo boundary de cor marrom, limitado por furos de sondagem e limites da malha de sondagem.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A reserva indicada e inferida foi definida a partir da modelamento geológico do depósito, a partir da combinação de informações de furos de sonda, análises geoquímicas e interpretações geológicas para definir geometria e indicar os limites da lente de magnesita.

4.6 – Distribuição dos elementos maiores

Os modelos numéricos foram feitos a partir de compostas de 6 e 9 metros para representar a distribuição dos elementos maiores: MgO, CaO, SiO₂ e Al₂O₃ na lente principal de magnesita.

De maneira geral, há uma forte correlação na a distribuição de CaO, SiO₂ e Al₂O₃, ao longo da lente principal, que é inversa a distribuição de MgO (FIGURA 28).

As zonas de maior concentração destes elementos ocorrem na porção sul da mina enquanto que as maiores concentrações de MgO ocorrem na porção norte.

A figura 28 A representa a distribuição de MgO no corpo de minério, na porção sul da lente concentram-se teores superiores a 90 wt. % de MgO, concentrando-se principalmente na porção SW e nos extremos da lente, caracterizando uma magnesita de maior pureza e na porção norte da lente, um minério mais impuro, com teores de baixa ordem, inferiores a 78 wt. % de MgO.

A distribuição do cálcio é inversa à de magnésio (FIGURA 28 B) predominando na porção sul zonas com teores baixos e na zona norte os teores mais elevados, que variam de 1 a 5 wt. %, na porção NE da lente o CaO atinge teores superiores a 5 wt. %, caracterizando uma magnesita mais impura.

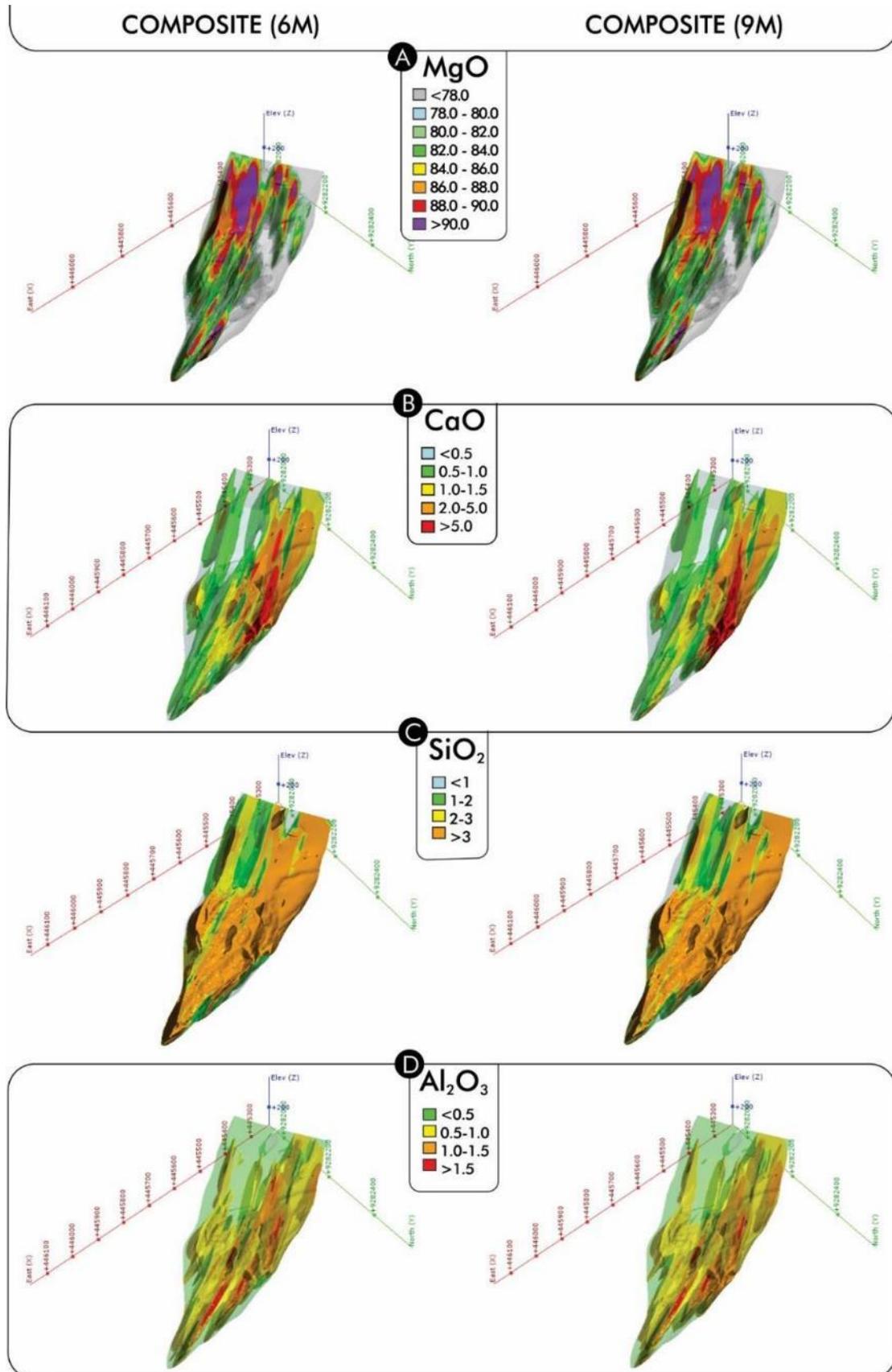
Sílica (FIGURA 28 C) e alumínio (FIGURA 28 D) estão distribuídos de maneira similar no depósito, com maiores concentrações distribuídas de maneira homogênea na lente.

Na figura 28 C há uma distribuição homogênea dos teores acima de 2 wt. % de SiO₂, com porção SW predominando teores mais baixos, inferiores a 2 wt. %.

O Al₂O₃ possui os baixos teores distribuídos homogeneamente na zona sul da lente, na porção norte concentram os teores mais altos, com os teores superiores a 1.5 wt. % concentrados na porção NE da lente.

Nas figuras 28 B, C e D, na porção sul predomina a distribuição dos menores teores de CaO, SiO₂ e Al₂O₃, que tendem a teores inferiores a 0.5 wt. %, na zona norte da lente de magnesita predominam teores superiores a 1 wt. % dos elementos deletérios.

Figura 28 – Modelos numéricos representando a distribuição de MgO, CaO, SiO₂ e Al₂O₃, ao longo da lente principal.



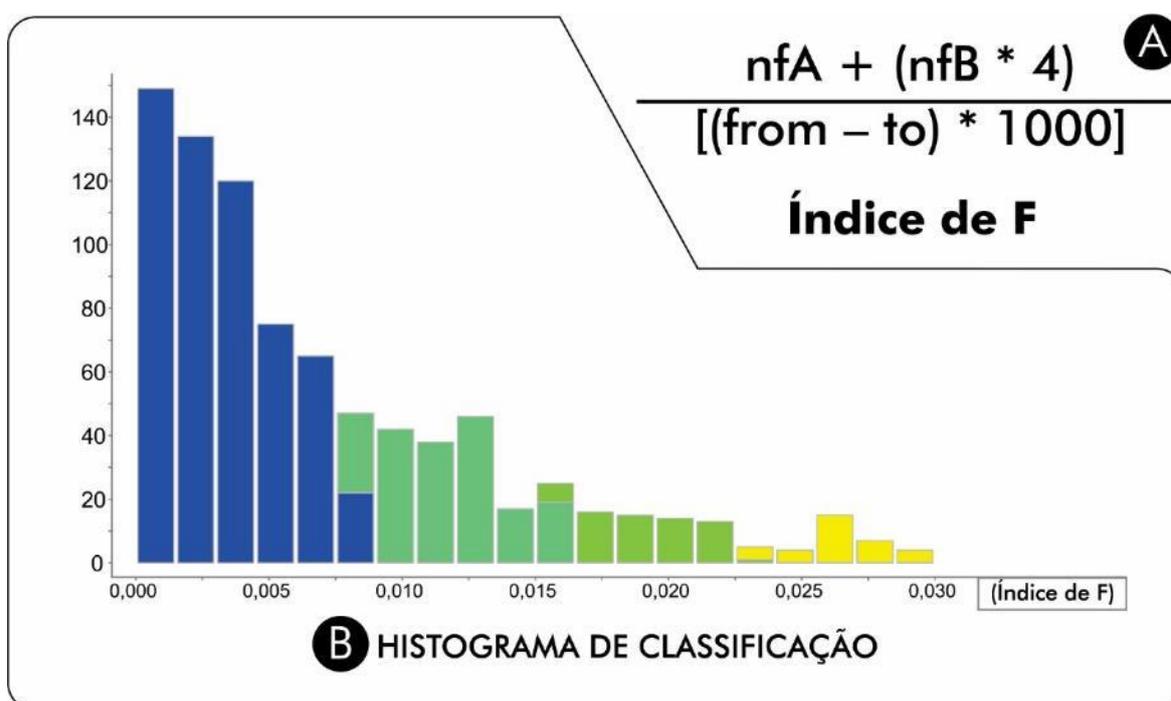
Fonte: Elaborado pelos autores.

4.7 – Grau de Fraturamento

Dentro do minério, foram contabilizadas as fraturas vistas a olho nu sendo preenchidas por talco e clorita. A contagem foi feita a partir do início do minério interceptado, sendo orientada pelo intervalo da manobra, que é de 3 em 3 metros. Alguns intervalos de minério descritos encerram antes do fim da manobra que os contém. Estes são contabilizados junto com a penúltima manobra dentro desse intervalo de mesma litologia. O mesmo mecanismo é utilizado quando a litologia descrita inicia um pouco antes da próxima manobra.

Os valores de fraturas B foram multiplicados por 4 e somados ao número de fraturas A, de um intervalo descrito. O comprimento desse intervalo em mm, divide o valor do somatório das fraturas, gerando um valor decimal (FIGURA 29A). Esse valor resulta na porcentagem da manobra que interceptou fraturas preenchidas. Esse cálculo produz o Índice de Fraturamento.

Figura 29 – Índice de Fraturamento.



Fonte: Elaborada pelos autores.

O histograma que representa a distribuição no Índice F pelo número de amostras, possibilitou a identificação de grupos com percentual de fraturamento próximos (FIGURA 29 B). Esses intervalos definem os campos de grau de fraturamento. Os campos são definidos como pouco, moderado, muito e intensamente fraturado, limitados respectivamente pelos índices 0,008, 0,016 e 0,023.

Esse fraturamento, preenchido por minerais portadores de elementos deletérios, contribui com o percentual desses elementos analisados quimicamente. A comparação direta entre os dois bancos de dados, porém, foi inviabilizada pela falta de compatibilidade do intervalo de amostragem.

A amostragem para análise química foi feita a cada três metros, a partir dos intervalos que eram descritos de forma imprecisa, como minério, pela equipe de sondagem. Com o advento da técnica de diferenciação do que é dolomítico e magnesítico, aplicada em campo, foi estabelecido uma descrição refinada dos intervalos de minério.

A referência da frequência da amostragem, também diverge. Esta, era feita por nós sempre buscando se equiparar ao intervalo de manobra. Enquanto que a equipe que coletou os dados para a análise química, amostrava a cada 3 metros a partir do início do intervalo de minério.

Essas duas diferenças básicas, geraram essa incompatibilidade de boa parte dos intervalos amostrados. No entanto, existem dados que são congruentes. Nos furos que iniciam no minério, as primeiras amostras para análise química e as suas manobras iniciais, apresentam valores idênticos. Nesse caso, se conhece a composição de percentual dos elementos maiores do intervalo com índice de fraturamento definido.

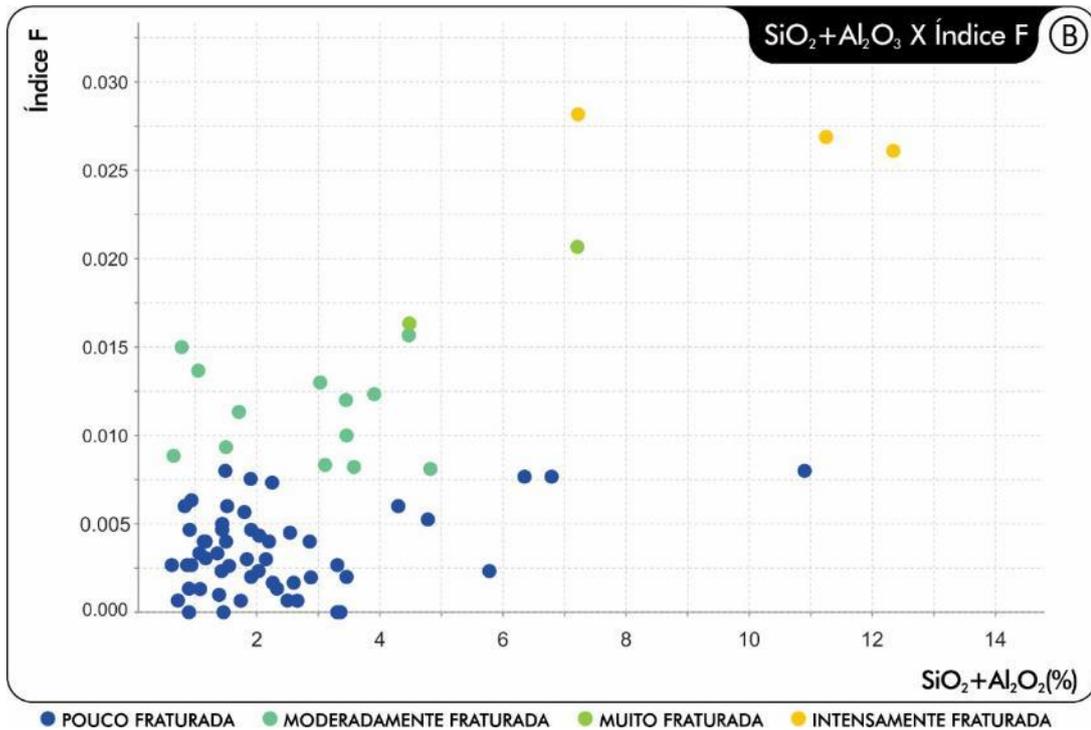
Intervalos com essa mesma característica, permitem relacionar precisamente as duas variáveis. Uma filtragem dos dados do fraturamento medido em um intervalo idênticos com a amostragem química. Essa atividade resultou no banco de dados que foram usados na interpolação numérica, dentro do modelo tridimensional.

A união entre a tabela com índice de fraturamento filtrada e a tabela de dados químicos, fornece o agrupamento de dados necessários para o entendimento da relação do percentual de fraturamento com a distribuição dos elementos deletérios na mina de Magnesita do Torto. A relação entre o Índice F e o somatórios do percentual dos elementos deletérios associados ao fraturamento é expressa no Figura 30.

Nesta figura, pode se observar que algumas amostras que estão classificadas como pouco fraturadas, apresentam percentual de contaminantes acima do esperado. Esse comportamento, pode estar associado a um micro fraturamento do minério, que não foi contabilizado a olho nu.

Essa nova tabela, agrupada os dados que serão interpolados para gerar o modelo numérico. O único sólido com dados suficientes para essa interpolação representa a lente principal do minério. As interpolações dos dados químicos mais representativas foram feitas utilizando os valores de CaO e SiO₂.

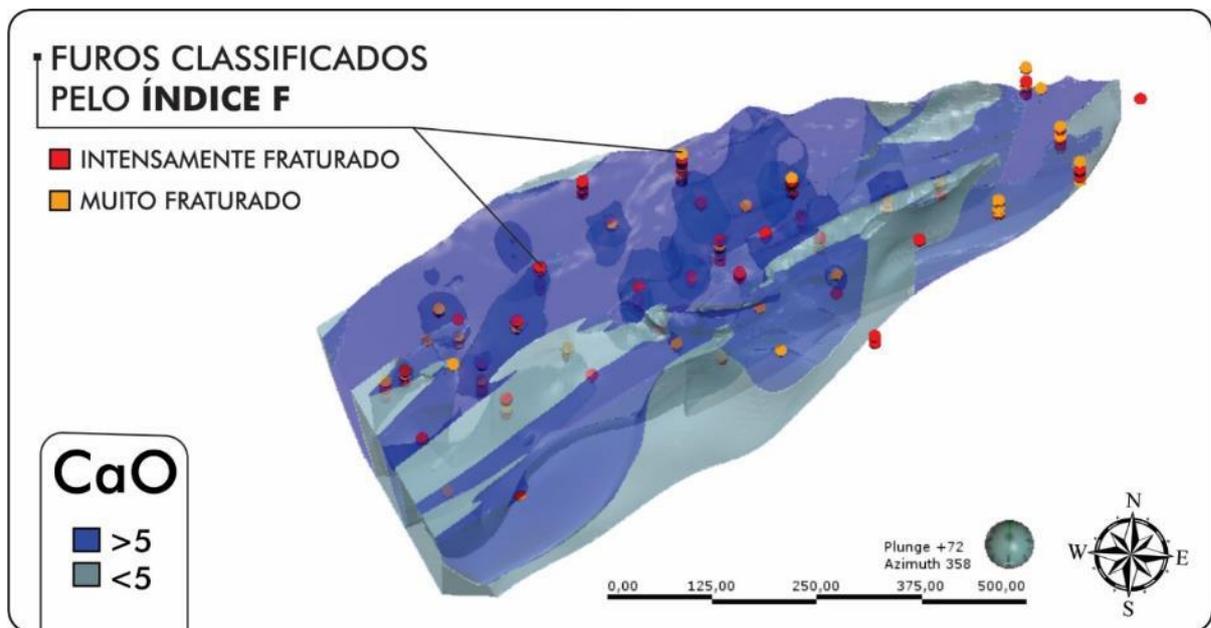
Figura 30 – Relação entre o índice de fraturamento e o somatório dos elementos deletérios.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Para comparar o dado químico com algum volume gerado, a utilização dos furos plotados exibindo a classificação que se deseja comparar. A transparência do volume numérico e os furos plotados, é possível estabelecer uma comparação entre os dois (FIGURA 31).

Figura 31 – Zoneamento do CaO associado aos intervalos de alto fraturamento.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Na figura acima, o resultado da interpolação dos dados químicos de CaO, resultou em um volume exibiu uma zonação marcante. O hemisfério norte da lente, é dominada por esse

elemento. Os intervalos de fraturamento com índice F acima de 0,016, foram plotados no volume gerado.

A partir dessa relação observa-se que a maior quantidade de intervalos de alto fraturamento, estão associadas as zonas de alto cálcio. Poucos furos com intervalos muito ou intensamente fraturados estão fora da zona de alto cálcio. Os intervalos com teor de CaO menor que 5% compreendem as zonas onde os furos com intervalos muito ou intensamente fraturados, quase não ocorrem.

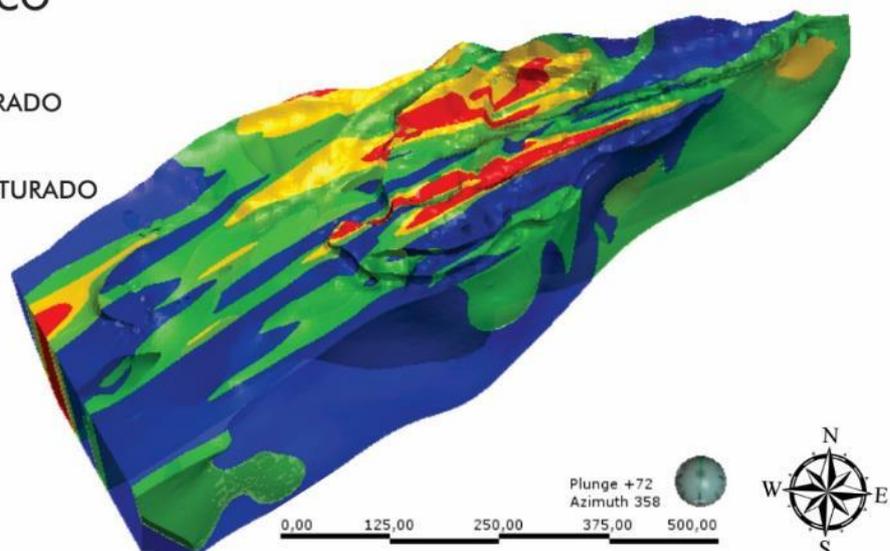
O Índice F também foi utilizado na geração de um modelo numérico. O sólido resultante foi classificado por aqueles valores estabelecidos a partir do histograma da Figura 29. Essa classificação é feita através da transformação desses valores em iso-superfícies, que subdividem o sólido gerado. Essa subdivisão definiu os domínios de fraturamento da lente de minério. (FIGURA 32).

O modelo exhibe uma distribuição de cores que representa a variação da intensidade maior do fraturamento. Em uma zona que se estende de lente para o oeste, no hemisfério norte da lente, ocorre o maior grau de fraturamento do modelo.

Figura 32 – Domínios do grau de fraturamento na lente principal.

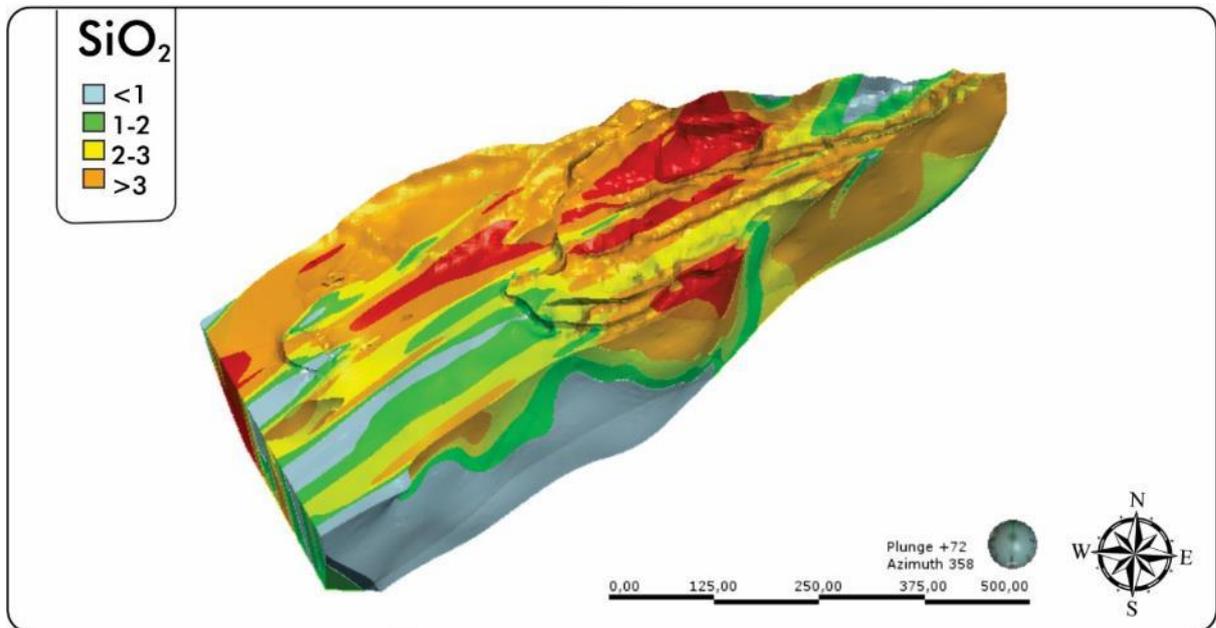
MODELO NUMÉRICO DO ÍNDICE F

- INTENSAMENTE FRATURADO
- MUITO FRATURADO
- MODERADAMENTE FRATURADO
- POUCO FRATURADO



Fonte: Elaborado pelos autores.

O modelo numérico (FIGURA 33) construído a partir dos dados químicos de SiO₂, produziu um volume com uma zonação semelhante ao modelo numérico do índice de fraturamento. Essa semelhança é claramente relacionada ao preenchimento das fraturas dominado por talco. A SW da lente ocorre a zona com menor percentual de sílica.

Figura 33 – Zoneamento do SiO₂.

Fonte: Elaborado pelos autores.

CAPÍTULO 05 – DISCUSSÃO

A partir da interpretação do banco de dados construído durante o desenvolvimento deste trabalho, foi levantado alguns pontos a serem discutidos, relacionados a metodologia de separação dos carbonatos com HCl, caracterização do minério, a geoquímica da lente de magnesita principal e sobre a distribuição dos elementos deletérios.

5.1 - Separação dos carbonatos com HCL

Na primeira etapa de campo, as litologias descritas nos furos definiram os logs para cada litologia. A descrição mais dificultada estava na diferenciação do mármore magnesítico do mármore dolomítico. Essa separação foi testada com várias concentrações de ácido clorídrico (HCl). O HCl a 25% foi eficaz na distinção entre as duas rochas.

Os intervalos descritos como mármore magnesítico foram analisados como tendo o percentual de MgO maior que 22%, o que é compatível com classificação de carbonatos de Pettijohn (1975).

Uma determinação de cada classe de minério (e.g. M90, M88, entre outras), pode ser viabilizada pelo estudo da reatividade de cada amostra em relação a variação da concentração desse ácido.

A redescrição desses furos de sonda forneceu um conhecimento litológico refinado do depósito. A separação entre os dois mármore através do HCl à 25%, permitiu precisar as zonas com maior presença de mármore estéril intercalado ao minério.

5.2 – Caracterização do minério

O minério apresenta uma variação de branco para tons de cinza. Essa coloração é relacionada o nível de impureza. É admissível que essa impureza esteja associada à matéria orgânica, que estava diluída na salmoura que precipitou o evaporito. Como essa solução estava associada a sedimentos finos, é difícil crer que a deposição desses carbonatos foi pura, logo a rocha precipitou com mais cinzenta.

Os grãos finos e cinzentos, compõem a variedade mais abundantes desse mármore. No entanto, ocorrem em algumas zonas, níveis variados de recristalização.

Esse mecanismo acrescentou cristais neoformados de Magnesita, aumentando a granulação do mármore e deixando a rocha com coloração mais branca. Os novos cristais podem estar disseminados nessas partes ou preenchendo de fraturas.

Quanto mais branco é o mármore magnesítico, mais puro ele é.

5.3 – Geoquímica da lente principal

Grande parte dos intervalos de magnesita já tinham sido amostrados para análise química. No entanto, alguns apresentaram química de estéril.

Alguns intervalos de outras litologias, podem ter sido amostrados juntamente com o minério magnésítico. Isto, prejudicou uma análise precisa, já que alguns intervalos descritos como minério, apresentaram química de estéril.

O refino da descrição litológica possibilitou uma amostragem mais precisa. A solicitação de análises de intervalos não amostrado, foi repassada em relatório a empresa.

O resultado dessa reanálise expandiu a metragem de minério interceptado pela sondagem. Este, foi acrescentado ao banco de dados pré-existente. Essa contribuição tem seu valor refletido no aumento do volume de minério magnésítico.

O banco de dados final, foi tratado e inserido no modelo tridimensional. A modelagem numérica dos dados químicos propiciou a geração de sólidos categorizados pelo teor de cada elemento químico.

Os teores de MgO e de CaO, tem uma relação inversa, pois quanto mais puro é o minério, menos cálcio ele vai conter. Os teores de SiO₂ e Al₂O₃ são diretamente proporcionais, pois ocorrem relacionados aos veios. Esses três elementos químicos controlam a classificação do minério magnésítico.

5.4 – Distribuição dos deletérios e grau de fraturamento

A contribuição do talco, já chamava a atenção desde a descrição dos testemunhos da sondagem. A esse filossilicato foi atribuído boa parte do aporte de SiO₂, contaminante do depósito.

Os veios preenchidos por esse mineral silico-magnésiano, associado a clorita e outros filossilicatos, acompanham o variado grau de fraturamento que afeta as lentes de carbonatos. A contabilização de fraturas foi restrita aos intervalos de mármore magnésítico.

O índice de fraturamento resultou dessa contagem. Este, pode ser utilizado para traçar os minerais portadores dos deletérios sílica e alumínio. As fraturas de aproximadamente 1mm, são do tipo A, e medindo próximo de 4mm, são do tipo B.

Dentro do modelo 3D, a interpolação RBF (radial base function), para o índice de fraturamento, foi restrita aos mármore magnésianos, em função da quantidade de dados.

Para relacionar os dados e traçar a distribuição desses elementos, foram utilizados tanto os modelos numéricos gerados, quanto os furos categorizados pelos dados de análise química.

A correlação visual dos teores SiO_2 e CaO com a zonação do modelo 3D do Índice de Fraturamento, indicou na maioria dos casos, uma relação direta entre o grau de fraturamento e o percentual de contaminante.

Ocorrem zonas onde foram descritas poucas fraturas A ou B, mas o percentual de SiO_2 está acima do limite de contaminação. Duas possibilidades apontam a resposta para essa anomalia. A primeira estaria relacionada a mistura de mármore magnésítico com lentes de xistos com minerais silicáticos. A segunda estaria refletindo a presença micrométrica de filossilicatos, não contabilizados a olho nu.

As faixas de maior concentração de Cálcio nos mármore magnésíticos estão em uma zona que se estende do leste ao oeste, no hemisfério norte da principal lente. Esta, é a região mais intensamente fraturada. Os altos teores de CaO e de SiO_2 estão quase totalmente restritos a ela.

É possível que a variação de CaO e MgO seja relacionada às características sedimentares da lente. O hemisfério norte, dominado por CaO , seria a porção basal da deposição, tendo em vista que o CaO tem solubilidade menor do que o MgO .

Essa variação diagenética da lente de mármore, condicionou à porção mais calcítica uma maior propensão ao fraturamento. Essa característica definiu o marcador estrutural para a ocorrência dos minerais portadores de SiO_2 e Al_2O_3 .

CAPÍTULO 06 – CONCLUSÕES

O ácido clorídrico (HCl) a 25% reage com o mármore dolomítico, diferenciado do mármore magnesítico, que inerte a reação.

Os intervalos descritos como magnesíticos plotam no campo da magnesita no diagrama de carbonatos de Pettijohn (1975).

422.83 metros de mármore magnesítico foram redescritos em 54 intervalos, que antes eram logados como sendo dolomíticos.

O minério é constituído por de grãos finos de magnesita de coloração cinza e quando recristalizado exhibe uma cor branca.

O aumento de granulometria está associado a recristalização de magnesita com coloração branca.

A amostragem deve ser restrita aos intervalos de minério. A falta de critério geológico para a amostragem pode corromper um minério de alto teor.

Os teores de MgO e de CaO, tem relação inversa.

Os teores de SiO₂ e Al₂O₃ são diretamente proporcionais.

Esses três elementos químicos controlam a classificação do minério magnesítico.

O teor de MgO diminui, quando o teor de CaO ou SiO₂ aumentam.

O teor de Al₂O₃ não é um contaminante relevante, pois o teor máximo medido é inferior ao limite aceito pela planta de beneficiamento.

Os teores de Al₂O₃ representam a ocorrência de clorita.

O talco é o maior portador de SiO₂ e maior contaminante do minério.

Talco e clorita estão contidos em fraturas nos mármore.

A contabilização das fraturas dentro dos intervalos de minério foi representada em percentual o volume.

O hemisfério norte da lente principal, com teor de CaO maior que 5%, é a base da lente sedimentada. Essa porção apresenta dureza menor, pela contribuição do CaO. Esta zona se estende de leste para oeste do hemisfério norte da lente.

O maior percentual de fraturamento está condicionado por essa zona de minério com maiores teores de CaO.

Esta zona onde os veios de talco são mais abundantes, concentram a quase totalidades dos elementos deletérios da Mina do Torto.

A zonas de alto CaO, favoreceram a ocorrência dos veios com os minerais portadores de elementos deletérios.

REFERÊNCIAS

- ALKMIM, F. F., BRITO NEVES, B. B. & ALVES, J. A. C. 1993. Arcabouço tectônico do Cráton do São Francisco — uma revisão. In: DOMINGUEZ, M. L. & MISI, A. O Cráton do São Francisco: trabalhos apresentados na reunião preparatória do II Simpósio sobre o Cráton do São Francisco. SBG-SGM-CNPq, Salvador, Brasil, 45– 62.
- ALMEIDA, F.F.M., HASUI, Y., BRITO NEVES, B.B., FUCK, R.A. 1977. Províncias estruturais brasileiras. Atas VIII Simp. Geol. Nordeste: 363-391.
- ALMEIDA et al. 1981 - Estruturais Brasileiras. In: SBG, Simp. de Geol. do Nordeste, 8, Campina Grande – PB, Atas, 363-391.
- ARTHAUD et al., 2007 - Evolução neoproterozóica do grupo Ceará (Domínio Ceará Central, BE Brasil): da sedimentação à colisão continental brasileira. Tese de doutorado. Universidade de Brasília – UNB.
- BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M., 2003. Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: texto, mapas e SIG. Brasília: CPRM, 2003. 674 p.
- BRITO NEVES, B. B., CORDANI, U. 1991. Tectonic evolution of South America during the Late Proterozoic. *Precambrian Research*, 53: 23-40.
- BRITO NEVES, B. B., SANTOS, E. J., VAN SCHMUS, W. R. 2000. Tectonic History of the Borborema Province, Northeast Brazil. In: Cordani, U. G., Thomaz Filho, A., Campos, D. A. (eds.) *Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro, 31ST IGC, 151-182.
- BRITO NEVES, B.B. 2002. Main stages of the development of the sedimentary basin of South America and their relationships with the tectonics of supercontinents. *Gondwana Res.*, 5(1):175-196.

CABY, R. & ANDREOPOULOS-RENAUD, U. 1983. Age à 1800 Ma du magmatisme subalcalin associe aux métasédiments monocycliques dans la chaîne Pan-Africaine du Nord du Sahara Central. / *African Earth Sc.* 1(3/4):93-97.

CAVALCANTE, J.C., 1999. Limites e evolução do sistema Jaguaribeano, Província Borborema, Nordeste do Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, (Dissertação) Mestrado 169 p. il.

COWAN, E. et al. 2003 - Practical implicit geological modelling. In: AUSTRALIAN INSTITUTE OF MINING AND METALLURGY BENDIGO, VICTORIA. Fifth International Mining Geology Conference. [S.l.], p. 17–19. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20 e 27.

DANTAS, E.L.; VAN SCHMUS, W.R.; HACKSPACHER, P.C.; FETTER, A.H.; BRITO NEVES, B.B.; CORDANI, U.; NUTMAN, A.P.; WILLIAMS, I.S., 2004. The 3.4-3.5 Ga São José do Campestre massif, NE Brazil: remnants of the oldest crust in South America. *Precambrian Research*, 130:113-137 p.

FETTER A.H., VAN SCHMUS W.R., SANTOS T.J.S., NOGUEIRA NETO J.A., ARTHAUD M.H. 2000. U-Pb and Sm-Nd geochronological constraints on the crustal evolution and basement architecture of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the existence of the Paleoproterozoic Supercontinent “Atlantica”. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(1):102-106.

FETTER A.H., et al. Evidence for Neoproterozoic Continental Arc Magmatism in the Santa Quitéria Batholith of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: Implications for the Assembly of West Gondwana. *Gondwana Research*, Osaka, v. 6, n.2, p. 265-273, 2003.

GANADE DE ARAUJO, C. E. et al., 2014 - Tracing Neoproterozoic subduction in the Borborema Province (NE-Brazil): Clues from U-Pb geochronology and Sr-Nd-Hf-O isotopes on granitoids and migmatites. *Lithos* 202-203, 167–189.

HOFFMAN, P.F. 1991. Did the breakout of Laurentia turn Gondwanaland inside-out? *Science*, 252:1409-1442

HARDY, R L, 1971. Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces, *Journal of Geophysical Research*, 176:1905-1915.

IPECE, 2017 – Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará - Perfil Básico Municipal de Jucás, 2017 - Disponível em:
http://www.ipece.ce.gov.br/perfil_basico_municipal/2017/Jucas.pdf

JARDIM DE SA, E.F. 1994. A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e o seu significado geodinâmico na Cadeia Brasileira/PanAfricana. Brasília. 804 p. (Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da Universidade de Brasília).

LEGRAND, J.M.; LIEGEOIS, J.P.; DEUTSCH, S. 1991. Datação U/Pb e Rb/Sr das rochas precambrianas da região de Caicó. Reavaliação da definição de um embasamento arqueano. In: SIMP. GEOL. NORDESTE, 14. Recife, 1991. Atas... Recife, SBG, p. 276-279

MAGINI, C.; SANTOS, T. S.; BRITO NEVES, B. B.; HACKSPACHER, P. C. VAN SCHMUS, W. R.; DANTAS, E. J.; FETTER, A. H. 1999. Statherian taphrogenesis in the Borborema Province, NE Brazil. In: Simpósio Sudamericano de Geologia Isotópica, 2/South American Symposium on Isotope Geology, 2., Córdoba, 1999. Actas. Córdoba, SEGEMAR, p. 327-330

NEVES, S.P. 2003. 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* 22:1031. doi:10.1029/2001TC001352.

NEVES, S. P. 2015. Constraints from zircon geochronology on the tectonic evolution of the Borborema Province (NE Brasil): Widespread intracontinental Neoproterozoic reworking of a Paleoproterozoic accretionary orogen. *Journal of South American Earth Sciences*, (58), 150-164.

PARENTE, C.V. & ARTHAUD, M.H., 1995 - O sistema Orós-Jaguaribe no Ceará, NE do Brasil. *Rev Bras. Geoc.*, 297-306.

PARENTE, C.V., GUILLOU, J.J., ARTHAUD, M.H. 1998. Geologia e paleogeografia dos depósitos de magnesita de idade proterozóica (2Ga) da região de Alencar (Ceará). In: SBG, Simpósio de Geologia Nordeste, 16, Recife, Anais, 2:428-432.

PARENTE, C.V., FILHO, W.F.S., ALMEIDA, A.R., 2004. Bacias do Estágio de Transição o do Domínio Setentrional da Província Borborema. In: *Geologia Do Continente Sul Americano. Evolução da Obra de Fernando F. M. Almeida, Cap, vol. XXIX. Editora Beca, São Paulo, Brasil, 524-536, p.*

PETTIJOHN, F.J. (1975) *Sedimentary Rocks*. Harper and Row, New York.

SÁ, J.M. 1991. Evolution geodynamique de la ceinture protérozoïque d'Orós, Nord-Est du Brésil. Thèse de doctorat de l'Université de Nancy 1, 117p (Inéd.).

SANTOS, E. J. & BRITO NEVES, B.B. 1984. Província Borborema. In: *O Precambriano do Brasil F.F.M. de Almeida & Y. Hasui (eds.), Ed. Blucher, Brasil, p 123-186*

SANTOS, E.J. - 1996 - Ensaio preliminar sobre terrenos e tectônica acrescentaria na Província Borborema. *Anais XXXIX Congr. Bras. Geol.*, 7:47-60, Salvador, BA

SANTOS, T. J. S. 1999. Evolução tectônica e geocronológica do extremo Noroeste da Província Borborema. Universidade estadual paulista, rio claro. tese de doutorado.

SANTOS, T.J.S.; NOGUEIRA NETO, J.A.; FETTER, A.H.; HACKSPACHER, P.C. 2001. Petrografia e Litogeoquímica das Rochas do Embasamento Cristalino da Região De Granja – Ce. *Revista de Geologia*, 2001, Vol. 14: 33-48

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

SILVA L.C., ARMSTRONG R., NOCE C.M., PIMENTEL M.M., PEDROSASOARES A.C., LEITE C., VIEIRA V.S., PAES V.C. 2002. Reavaliação U-Pb SHRIMP em terrenos pré-cambrianos brasileiros. Parte II: Orógeno Araçuaí, Cinturão Mineiro e Cráton São Francisco Meridional. *Rev. Bras. Geoc.*, 32: 513-528.

SIQUEIRA, A. C. A.; MAGINI, C. . Geoquímica das lateritas do Domínio Médio Coreau - Noroeste do estado do Ceará. In: XXIV Simpósio de Geologia do Nordeste, 2011, Aracaju - SE. *Geologia sem fronteiras - XXIV Simpósio de Geologia do Nordeste. Aracaju - SE: Gráfica J. Andrade, 2011. v. 1. p. 157-157.*

TROMPETTE R. 1994. *Geology of western Gondwana, Pan-african/Brasiliano Aggregation of South America and Africa.* A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 350 p.

VAN SCHMUS et al., 1995 - VAN SCHMUS, W.R.; BRITO NEVES, B.B.; HACKSPACHER, P.; BABINSKI, M.; FETTER, A. & DANTAS, E. 1995a. Neoproterozoic and late mesoproterozoic sedimentary and volcanic sequences in the Borborema province, NE Brazil. In: XVI Simp. Geol. Nordeste. Work- Shop Província Borborema. Recife. Atas... N° 14, 2:391-393.

VAN SCHMUS, W.R.; BRITO NEVES, B.B.; HACKSPACHER, P. & BABINSKI, M. 1995b. U/Pb and Sm/Nd geochronologic studies of the Eastern Borborema Provinces, Northeastern Brazil: initial conclusions. *J. South Amer. Earth Sc.*, 8 (3/4):267-288.

VAN SCHMUS, W.R., KOZUCH, M., BRITO NEVES, B.B., 2011 - Precambrian history of the Zona Transversal of the Borborema Province, NE Brazil: Insights from Sm-Nd and U-Pb geochronology. *J. of South A.E.Sciences.* V.31.pp. 227-252.

VASCONSELOS, A.M., GOMES, F.E.M., PAIVA, I.O. - 1993 - *Geologia da região centro-sul do Ceará - Folha Iguatu.* Atas XV Simp. Geol. Nordeste, 248-250, Natal, RN.

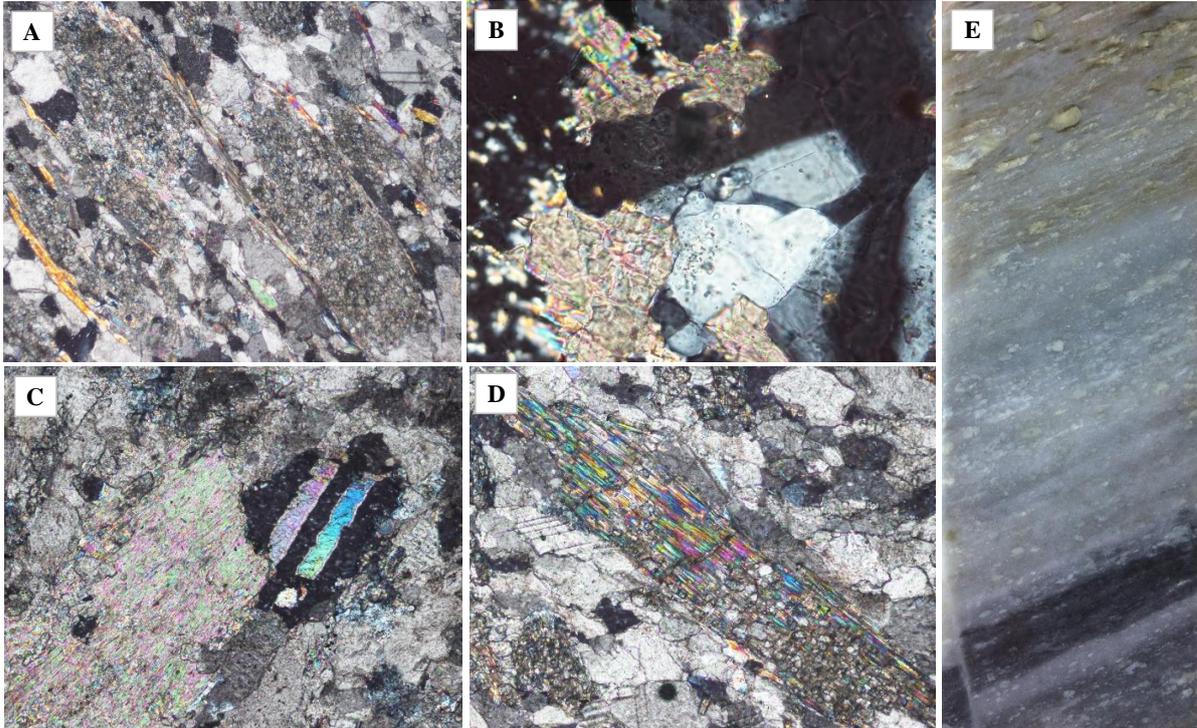
VAUCHEZ. A; NEVES, S.; CABY, R.; CORSINI, M.; EGYDIO-SILVA, M.; ARTHAUD, M. & AMARO, V. 1995. The Borborema shear zone system, NE Brazil. *J. South Amer. Earth Sc.*, 8 (3/4):247-266.

ANEXOS

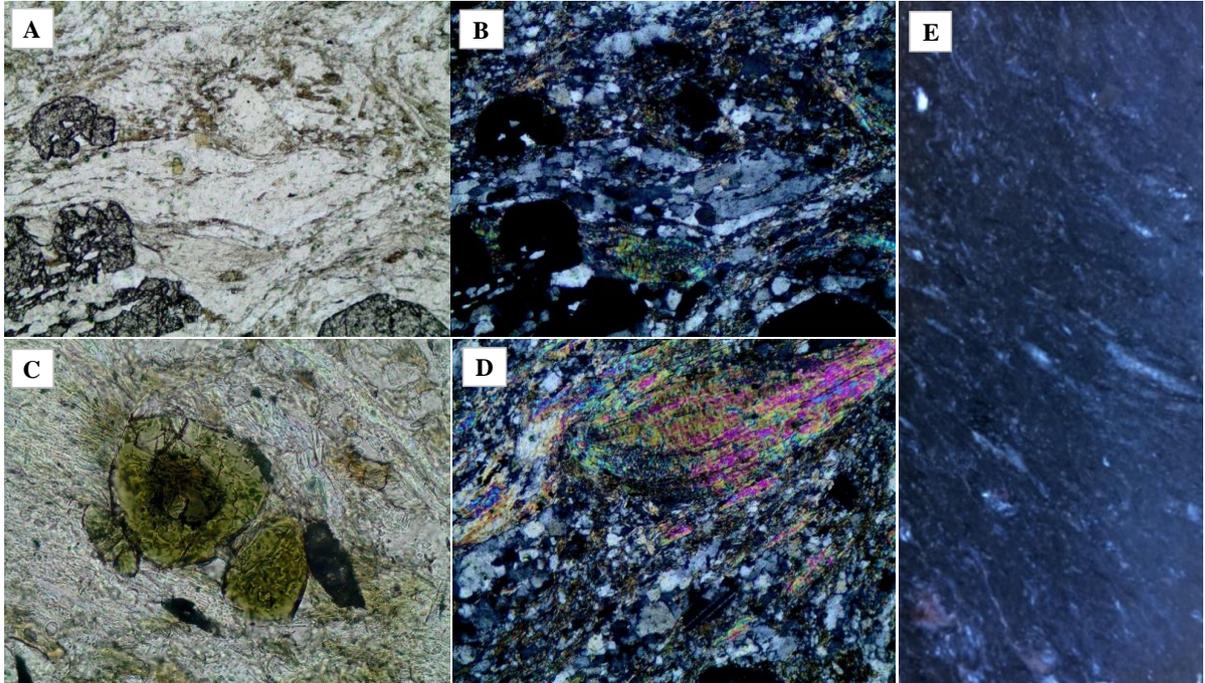
ANEXO 01

FICHA DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA	
Localização: Mina do Torto - Jucás/CE	
Nº da lâmina: 07	Amostra: FS04BP029.0
Descrição macroscópica: Mármore magnésítico de grão fino com alguns cristais recristalizados, cor cinza claro com ocorrência de pequenos bolsões de talco com cerca de 5mm.	
Descrição microscópica: Rocha composta predominantemente por cristais recristalizados de Magnesita com desenvolvimento de Talco nas microfraturas e por vezes em forma de bolsões com cerca de 0,2 mm de espessura.	
Minerais Essenciais: <i>Magnesita:</i> Cristais romboédricos incolores de relevo moderado, os grãos encontram-se fraturados e recristalizados.	
Minerais Acessórios: <i>Talco:</i> Mineral incolor de relevo baixo a moderado, destaca-se pela alta cor de interferência, desenvolve-se em bolsões com cerca de 0,2 mm e preenchendo microfraturas entre os grãos de magnesita.	
Fotomicrografias: NII / NX	
<p>a) Talco preenchendo microfraturas entre grãos de magnesita com aumento de 5X e NX; b) Talco seguindo as frutras entre os grãos de magnesita com aumento de 5x e NX; c) Bolsão de talco com cristal romboédrico de magnesita extinto com aumento de 5x e NX; d) Cristais de magnesita com recristalização marginal com aumento de 5x e NII; 5X; e) Foto macroscópica da lâmina 07.</p>	
Classificação: Mármore Magnésítico de Grão Fino	
Log: MAG	

ANEXO 02

FICHA DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA	
Localização: Mina do Torto - Jucás/CE	
Nº da lâmina: 26 Amostra: FS18AP073.6	
Descrição macroscópica: Mármore com granulação fina de coloração variando de branco a cinza, composto predominantemente por dolomita, por vezes apresenta bandamentos com fixas de alteração constituída por talco e filossilicatos.	
Descrição microscópica: Rocha composta predominantemente por cristais de dolomita, com alterações de talco e tremolita, com desenvolvimento de muscovitas, quartzo e ocorrência de k-feldspato.	
Minerais Essenciais: <i>Dolomita:</i> Grão anedrico incolor com relevo médio e sem pleocroísmo, apresentação maclas polissintéticas.	
Minerais Acessórios: <i>Talco:</i> Mineral incolor de relevo baixo a moderado, destaca-se pela alta cor de interferência e diferencia-se da muscovita pela menor birrefringência. <i>Tremolita:</i> Mineral incolor com relevo baixo, com extinção paralela, ocorre como cristais prismáticos e agregados associados a dolomita. <i>Muscovita:</i> Mineral incolor com relevo baixo, cor de interferência de segunda ordem quando em NX, ocorre acompanhando foliação tectônica. <i>Quartzo:</i> Grãos anedrais incolores, com baixo relevo, com extinção ondulante. <i>K-feldspato:</i> Cristal anedrico, incolor de relevo baixo, cor de interferência de primeira ordem e quando extinto apresenta macla carlsbad.	
Fotomicrografias: NII / NX	
	
a) Pseudomorfo de tremolita substituindo massa de dolomita, com desenvolvimento de muscovitas exibindo cores de interferência de segunda ordem, com aumento de 5x e NX; b) Cristal de K-feldspato em extinção apresentando macla carlsbad, engolfado por quartzo e dolomita com aumento de 50x e NX; c) Talco apresentando cor de interferência de terceira ordem e cristais de dolomita com aumento de 5x e NX; d) Tremolita alterando para dolomita com aumento de 10x e NX; e) Foto macroscópica da lâmina 26.	
Classificação: Mármore Dolomítico	
Log: MD	

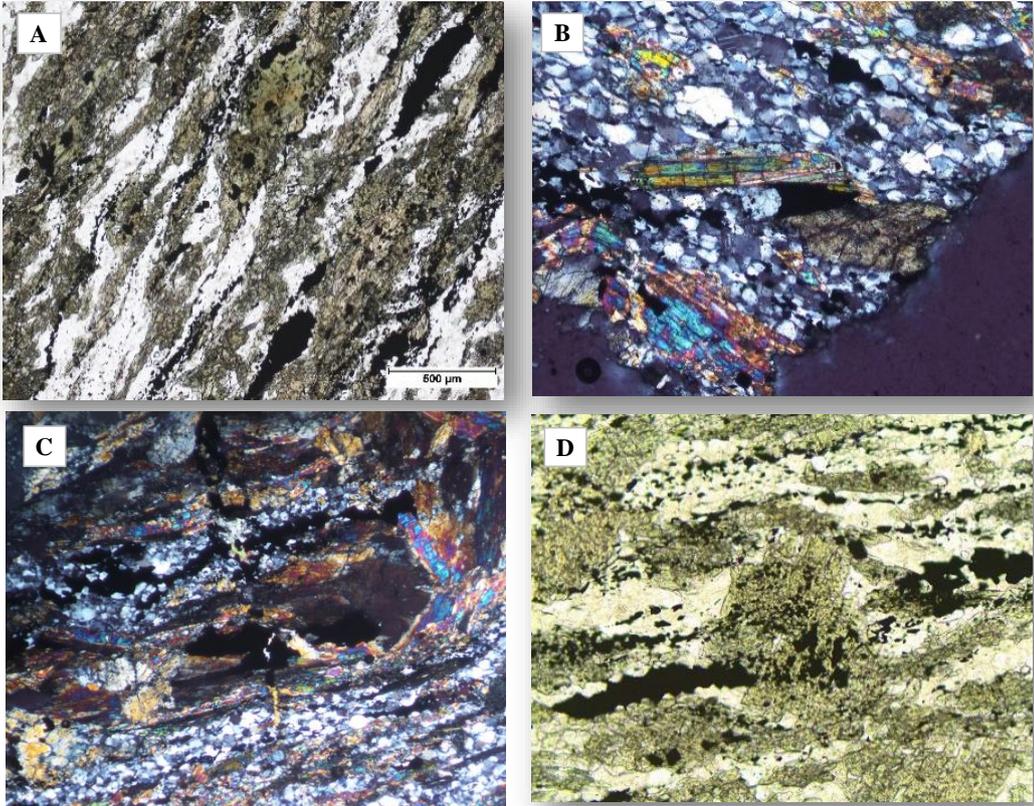
ANEXO 03

FICHA DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA	
Localização: Mina do Torto - Jucás/CE	
Nº da lâmina: 12 Amostra: FSP1P035.9	
Descrição macroscópica: Rocha de granulação fina, com cristais de granada fraturadas e deformadas, bandas composicionais mais rica em quartzo e níveis de filossilicatos seguindo foliação tectônica.	
Descrição microscópica: Rocha de textura granolepidoblástica com predominância de quartzo, seguido por biotita e muscovita e minerais acessórios como granada, turmalina, plagioclásio, talco e opacos. Textura deformacional caracterizada pela nítida foliação anastomozada dos filossilicatos, disposição das granadas e estiramento dos quartzos com diferentes intensidades de recristalização.	
Minerais Essenciais: Quartzo: Grãos anedrais incolores, com baixo relevo, extinção ondulante com inclusões, por vezes recristalizado e deformado com desenvolvimento de filossilicatos nas sombras de pressão. Biotita: Ocorre em lamelas intergranulares de coloração marrom com extinção reta. Muscovita: Mineral incolor com relevo baixo, ocorre em lamelas com foliação anoastomosada e alta cor de interferência quando em NX.	
Minerais Acessórios: Granada: Grão incolor com relevo alto e isotrópico, ocorre em grãos fraturados bordejados por muscovitas e finas camadas de recristalização de quartzo. Turmalina: Cristal verde com alto relevo e extinção reta, zoneado e fraturado, ocorre com hábito prismático com sessão basal triangular. Plagioclásio: Grão incolor sem pleocroísmo, com hábito tabular e baixo relevo apresentando geminação albita. Talco: Mineral incolor de relevo baixo a moderado, destaca-se pela alta cor de interferência e diferencia-se da muscovita pela menor birrefringência, desenvolvido nas bordas das muscovitas. Opacos: Pirita: Mineral que quando em luz refletida observa-se um tom dourado metálico, ocorre associado as fraturas.	
Fotomicrografias: NII / NX	
	
a) Granada-Biotita-Muscovita-Quartzo Xisto com aumento de 5x e NII; b) Granada-Biotita-Muscovita-Quartzo Xisto com aumento de 5x e NX; c) Turmalina verde fraturada em sessão basal bordejada por muscovita e talco em com aumento de 5x e NII; d) Cristal de Plagioclásio apresentando geminação e "mica fish" com aumento de 5x e NX, muscovita exibindo sua alta cor de interferência; e) Foto macroscópica da lâmina 12.	
Classificação: Granada-Biotita-Muscovita-Quartzo Xisto	Log: XIS

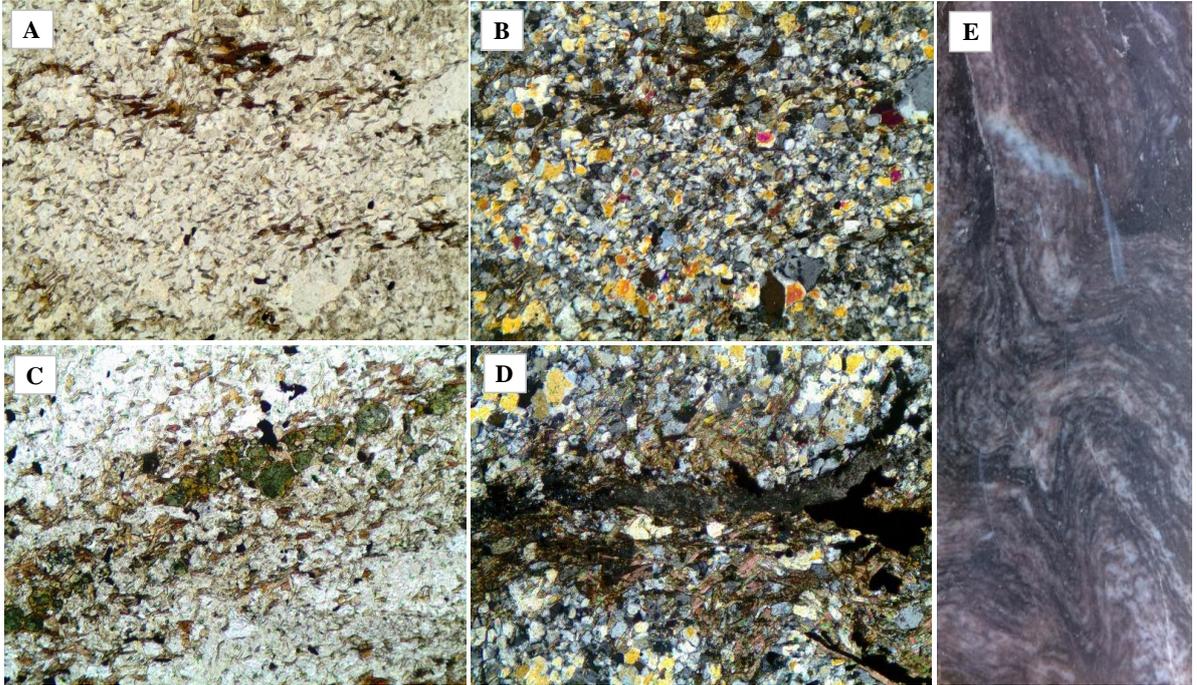
ANEXO 04

FICHA DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA	
Localização: Mina do Torto - Jucás/CE	
Nº da lâmina: 11 Amostra: FS10AP064.4	
Descrição macroscópica: Rocha com granulação fina, coloração escura com faixas verdes e marrons compostas por filossilicatos seguindo foliação tectônica, bandas de quartzo recristalizado e sulfetos que ocorrem em veios ou disseminados.	
Descrição microscópica: Rocha de textura lepidogranoblástica com predominância de biotita e actinolita com zonas silicificadas compostas de quartzo recristalizado e minerais opacos como pirita e calcopirita. Textura deformacional caracterizada pela nítida orientação das lamelas de biotita, estiramento e deformação dos quartzos com diferentes intensidades de recristalização.	
Minerais Essenciais: Actinolita: Cristais alongados de cor verde pálido a escuro com relevo moderado, com hábito prismático por vezes fibroso, apresenta preocroísmo em tons verde escuro e cor de interferência alta quando visualizado em NX. Biotita: Mineral de coloração marrom com hábito lamelar, relevo moderado e extinção reta, a trama desse mineral marca foliação tectônica. Quartzo: Grãos anedrais incolores, com baixo relevo, extinção ondulante com inclusões, por vezes recristalizado e deformado com desenvolvimento de filossilicatos nas sombras de pressão.	
Minerais Acessórios: Plagioclásio: Grão incolor sem pleocroísmo, com hábito tabular e baixo relevo, com alteração sericitica.	
Opacos: Pirita: Mineral que quando em luz refletida observa-se um tom dourado metálico com textura framboidal, ocorre disseminado e associado as fraturas. Calcopirita: Mineral que quando em luz refletida observa-se um tom alaranjado metálico, ocorrendo associado a pirita.	
Fotomicrografias: NII / NX	
a) Lamelas de biotita, actinolita e opacos disseminados com aumento de 5x e NII; b) Plagioclásio com alteração sericitica e lamelas de actinolita com aumento de 5x e NII; c) Opacos disseminados e preenchedo fraturas entre lamelas de biotita e actinolita apresentando cores de interferência de 2ª ordem com aumento de 10x e NX; d) Pirita e calcopirita sob luz refletida com aumento de 10x; e) Foto macroscópica da lâmina 11.	
Classificação: Biotita-Actinolita Xisto com Pirita	Log: MSP

ANEXO 05

FICHA DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA	
Localização: Mina do Torto - Jucás/CE	
N° da lâmina: M05 Amostra: Cava da Mina do Torto	
Descrição macroscópica: Rocha de granulação fina, coloração marrom-esverdeada variando para tons mais escuros e presença marcante de sulfetos nos microbandamentos com recristalização de quartzo.	
Descrição microscópica: Rocha de textura granonematoblástica com predominância cerca de 45% de actinolita, 35% quartzo e 15% de opacos, minerais acessórios como plagioclásio e pirita, calcopirita e titanomagnetita como opacos. Textura deformacional caracterizada pela nítida trama de actinolita seguindo uma orientação preferencial com a intercalação de finas bandas compostas por cristais de quartzo.	
Minerais Essenciais: <i>Actinolita:</i> Cristais alongados de cor verde pálido a escuro com relevo moderado, com hábito prismático por vezes fibroso, apresenta preocroísmo em tons verde escuro e cor de interferência alta quando visualizado em NX. <i>Quartzo:</i> Grãos anedrais incolores com baixo relevo, extinção ondulante com inclusões, ocorre formando finas bandas quartzosas limitadas por cristais de actinolita.	
Minerais Acessórios: <i>Plagioclásio:</i> Grão incolor sem pleocroísmo, com hábito tabular e baixo relevo apresentando geminação albita. Opacos: <i>Pirita:</i> Sulfeto ocorrendo nas fraturas, quando em luz refletida observa-se um tom dourado metálico. <i>Calcopirita:</i> Sulfeto ocorrendo nas fraturas, quando em luz refletida observa-se um tom alaranjado metálico.	
Fotomicrografias: NII / NX	
	
a) Microbandamentos compostos por actinolita, quartzo e opacos, com aumento de 5x e NII; b) Actinolita em sessão basal apresentando cor de interferência de segunda ordem, desenvolvidas entre grãos de quartzo e opacos com aumento de 10x e NX; c) Fraturamento obliquo ao bandamento preenchido por opacos, com predomínio de pirita e calcopirita associada, com aumento de 5x e NX; d) Actinolita rotacionada, bordejada por grãos de quartzo recristalizados e opacos intecalados nas microbandas, com aumento de 10x e NII.	
Classificação: Actinolita-Quartzo Xisto com Pirita	
Log: MSP	

ANEXO 06

FICHA DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA	
Localização: Mina do Torto - Jucás/CE	
Nº da lâmina: 10	Amostra: FS110P052.4
Descrição macroscópica: Rocha de granulação fina, com estrutura de deformação, definida por bandas composicionais mais silicosas rica em quartzo e níveis de filossilicatos seguindo foliação tectônica.	
Descrição microscópica: Rocha de textura granolepidoblástica com predominância de quartzo, biotita e opacos, com ocorrência de turmalina e fraturas preenchidas por carbonato. Textura deformacional caracterizada pela nítida foliação tectônica definida pela trama de biotitas e estiramento dos quartzos com diferentes intensidades de recristalização.	
Minerais Essenciais: Quartzo: Grãos anedrais incolores, com baixo relevo, com extinção ondulante, por vezes ocorre em grãos maiores expressando bandamentos mais silicosos acompanhando a foliação tectônica. Biotita: Trama de lamelas intergranulares de coloração marrom com extinção reta, marcando foliação tectônica separando os níveis de quartzo.	
Minerais Acessórios: Turmalina: Cristal verde com alto relevo e extinção reta, zoneado e fraturado, ocorre com hábito prismático com sessão basal triangular. Dolomita: Grão incolor com relevo médio e sem pleocroísmo, ocorre preenchendo as fraturas com habito criptocristalino por vezes ocorre em grãos mais desenvolvidos.	
Opacos: Pirita: Mineral que quando em luz refletida observa-se um tom dourado metálico, ocorre associado as fraturas.	
Fotomicrográfias: NII / NX	
 <p>The figure consists of five photomicrographs labeled A through E, and one macroscopic photograph. A: Photomicrograph showing quartz, biotite, and opac minerals in NII at 5x magnification. B: Photomicrograph showing quartz, biotite, and opac minerals in NX at 5x magnification. C: Photomicrograph showing fractured green tourmaline crystals and dispersed opac minerals accompanying a biotite fabric in NII at 5x magnification. D: Photomicrograph showing a carbonate-filled vein and opac minerals with biotite lamellae in NX at 5x magnification. E: Macroscopic photograph of the rock sample.</p>	
a) Cristais de quartzo, biotita e opacos em NII com aumento de 5x; b) Cristais de quartzo, biotita e opacos em NX com aumento de 5x; c) Cristais verdes de turmalina fraturados e dispersos acompanhando trama de biotitas desenvolvidas na foliação tectônica e veio preenchido por carbonato em NII e aumento de 5x; d) Veio preenchido por carbonato e opacos com lamelas de biotita acompanhando foliação tectônica em NX e aumento de 5x; e) Foto macroscópica da lâmina 10.	
Classificação: Quartzito Micáceo	Log: MSS

ANEXO 07

AMOSTRAS DOS CARBONATOS DA FAIXA OROS					
Code	Type	Location	Coord X	Coord Y	Description
OB-01	Calcítico	Pio IX	446257	9282440	Grey dolomitic marble with preserved compositional bedding
OB-02	Calcítico	Pio IX	402549	9271510	White to grey dolomitic marble with preserved composition bedding
OB-03	Calcítico	Jucas	333953	9232445	White to grey calcitic marble with preserved composition bedding
OB-04	Calcítico	Mina do Torto	332874	9232610	White calcitic marble - recrystallized?
OB-05	Calcítico	Pio IX	333307	9234169	Recrystallized white calcitic marble
OB-06	Magnésítico	Pitombeiras			Coarse-grained magnesite - grey to white
OB-07	Magnésítico	Mina Cabeça de Nego			Fine-grained white magnesite. Locally with talk filling fractures.
OB-08	Magnésítico	Malhada Vermelha			Red coarse-grained magnesite
OB-09	Dolomítico	Malhada Vermelha			Red fine-grained magnesite
OB-10	Magnésítico	Mina Riacho Fundo			Grey coarse-grained nodular magnesite
OB-11	Magnésítico	Pitombeiras			Coarse-grained white and grey magnesite
OB-12	Dolomítico	Mina do Torto	FS53-25.2m		Fine to coarse-grained dolomitic sandstone
OB-13	Magnésítico	Mina do Torto	FS08-64.1m		Fine-grained magnesite-m90
OB-14	Magnésítico	Mina do Torto	FS08-62.0		Fine-grained magnesite-m86
OB-15	Magnésítico	Mina do Torto	FS01B-36.1m		Fine-grained magnesite-m90
OB-16	Dolomítico	Mina do Torto	FSMT88-24.2		Fine-grained dolomitic marble
OB-17	Magnésítico	Mina do Torto	FS16-98.8m		Medium to fine-grained magnesite
OB-18	Dolomítico	Mina do Torto	FS37-53.9		Fine-grained dolomitic marble
OB-20	Magnésítico	Mina do Torto	Afloramento		Fine-grained white magnesite

Fonte: Elaborado pelos autores.



SGS GEOSOL LABORATÓRIOS LTDA.

CERTIFICADO DE ANÁLISES
GQ1801320

Análise	Al2O3	Be	CaO	Cr2O3	Fe2O3	K2O	MgO	MnO	Na2O
	ICP95A % 0,01	ICP95A PPM 10	ICP95A % 0,01						
BRANCO_PREP	0,14	14	0,08	<0,01	0,99	<0,01	0,03	0,01	0,03
OB-01	0,93	105	46,4	<0,01	0,47	0,34	4,52	0,02	0,09
OB-02	0,60	47	53,99	<0,01	0,29	0,14	1,61	<0,01	0,08
OB-03	0,77	78	52,60	<0,01	0,37	0,25	1,54	<0,01	0,08
OB-04	0,28	44	51,21	<0,01	0,20	0,08	7,84	<0,01	0,03
OB-05	0,08	67	50,71	<0,01	0,13	0,01	2,84	0,02	0,01
OB-06	0,39	14	2,05	<0,01	0,65	<0,01	>30	0,04	0,03
OB-07	0,39	20	9,89	<0,01	1,81	0,03	>30	0,11	0,26
OB-08	0,62	19	8,46	<0,01	1,18	0,08	>30	0,14	0,30
OB-09	0,65	58	32,50	0,01	1,97	0,04	19,76	0,75	0,18
OB-10	3,54	23	0,79	<0,01	2,22	0,03	>30	0,07	0,13
OB-11	1,47	<10	0,89	<0,01	1,07	0,02	>30	0,07	0,07
OB-12	1,25	<10	25,85	<0,01	0,65	0,05	21,35	0,08	0,13
OB-13	0,99	<10	0,76	<0,01	0,99	0,06	>30	0,06	0,05
OB-14	0,56	<10	0,89	<0,01	1,19	0,03	>30	0,07	0,03
OB-15	0,22	<10	0,49	<0,01	1,79	0,04	>30	0,07	0,04
OB-16	0,61	<10	30,21	<0,01	1,02	0,06	21,67	0,22	0,02
OB-17	0,05	<10	0,53	<0,01	1,46	0,02	>30	0,07	0,02
OB-18	0,60	<10	30,53	<0,01	1,00	0,05	22,17	0,15	0,05
OB-19	6,54	110	22,97	<0,01	1,32	2,09	18,28	0,07	0,17
* DUP OB-19	6,28	120	22,23	<0,01	1,30	2,04	17,92	0,07	0,18
OB-20	0,17	<10	0,50	<0,01	1,89	0,05	>30	0,08	0,01
* REP OB-20	0,17	<10	0,46	<0,01	1,96	0,02	>30	0,08	0,02
* STD TUL-3	12,06	465	2,82	0,02	3,99	2,25	1,89	0,07	2,60

Análise	P2O5	SiO2	Sr	TiO2	Zn	Zr	V	LOI	Ce
	ICP95A % 0,01	ICP95A % 0,01	ICP95A PPM 10	ICP95A % 0,01	ICP95A PPM 5	ICP95A PPM 10	ICP95A PPM 5	PHY01E % -45,00	IMS95A PPM 0,1
BRANCO_PREP	0,03	>90	<10	<0,01	25	<10	<5	-0,15	0,9
OB-01	0,07	7,99	125	0,05	<5	16	8	40,94	10,6
OB-02	0,13	2,81	1270	0,04	<5	10	19	42,4	5,8
OB-03	0,09	3,69	495	0,06	<5	19	78	41,58	13,1
OB-04	0,15	1,10	254	0,01	<5	<10	<5	43,84	3,1
OB-05	0,14	0,63	168	<0,01	<5	<10	<5	43,74	2,0
OB-06	0,08	3,02	16	0,02	18	<10	<5	49,02	2,7
OB-07	0,05	5,33	153	0,03	14	11	6	46,21	4,3
OB-08	0,09	2,59	160	0,06	28	11	<5	48,31	1,8
OB-09	0,11	1,31	380	0,05	5	12	25	44,68	32,3
OB-10	0,08	13,85	27	0,16	13	51	82	38,14	11,7
OB-11	0,07	10,67	16	0,09	6	40	21	42,91	5,8
OB-12	0,10	10,92	92	0,06	21	29	<5	38,91	7,9
OB-13	<0,01	3,78	14	0,04	30	14	<5	48,84	4,3
OB-14	0,02	4,44	11	0,02	34	12	<5	48,26	3,9
OB-15	0,07	1,38	<10	<0,01	16	<10	<5	50,67	2,2
OB-16	0,03	3,19	57	0,03	<5	<10	<5	44,82	6,6
OB-17	0,02	3,84	<10	<0,01	23	13	<5	49,05	3,6
OB-18	0,03	6,38	117	0,02	<5	19	<5	42,16	8,8
OB-19	0,13	35,58	63	0,27	<5	128	16	16,95	32,1

Os ensaios foram realizados na SGS GEOSOL Laboratórios Ltda. - Rodovia MG 010, Km 24,5 - Bairro Angicos - Vespasiano - MG - Brasil - CEP: 313.200-000
 Telefone +55 31 3045-0261 Fax +55 31 3045-0223 www.sgsgeosol.com.br
 Certificados ISO 9001:2008 e ISO 14001:2004 (ABS 32982 e ABS 39911)

Os resultados expressos neste Certificado se referem somente ao material recebido. Proibida a reprodução parcial deste documento.



SGS GEOSOL LABORATÓRIOS LTDA.

CERTIFICADO DE ANÁLISES

GQ1801320

	P2O5	SiO2	Sr	TiO2	Zn	Zr	V	LOI	Ce
	ICP95A %	ICP95A %	ICP95A PPM	ICP95A %	ICP95A PPM	ICP95A PPM	ICP95A PPM	PHY01E %	IMS95A PPM
	0,01	0,01	10	0,01	5	10	5	-45,00	0,1
* DUP OB-19	0,14	35,13	61	0,27	<5	141	10	16,75	31,1
OB-20	0,02	0,99	<10	0,01	<5	<10	<5	51,11	2,1
* REP OB-20	0,02	0,89	<10	0,01	<5	14	<5		
* STD TILL-3	0,12	71,24	312	0,50	63	220	74		
* REP OB-20									2,4
* STD TILL-3									43,9
* STD GRE-05									116,2
* REP OB-09								44,70	
* STD SG_078								9,67	
* STD SG_078								9,32	
Análises	Co	Cs	Cu	Dy	Er	Eu	Ga	Gd	Hf
Método	IMS95A								
Unidade	PPM								
Limite Detecção	0,5	0,05	5	0,05	0,05	0,05	0,1	0,05	0,05
BRANCO_PREP	<0,5	<0,05	<5	<0,05	<0,05	<0,05	0,3	<0,05	0,10
OB-01	1,2	0,12	14	0,94	0,62	0,17	0,7	0,94	0,40
OB-02	1,2	0,42	14	0,38	0,18	<0,05	0,6	0,50	0,27
OB-03	1,7	0,85	16	0,93	0,44	0,05	1,0	1,17	0,47
OB-04	0,8	0,29	14	0,17	0,11	<0,05	0,4	0,15	0,08
OB-05	0,7	<0,05	11	0,10	<0,05	<0,05	0,2	0,06	<0,05
OB-06	1,0	<0,05	<5	0,29	0,12	0,05	1,0	0,32	0,22
OB-07	2,4	<0,05	<5	0,62	0,37	0,27	0,7	0,73	0,19
OB-08	1,4	<0,05	<5	0,23	0,14	0,06	0,7	0,24	0,27
OB-09	24,4	<0,05	29	3,24	1,85	0,77	2,0	3,68	0,22
OB-10	11,6	<0,05	<5	1,10	0,65	0,17	4,3	1,19	1,18
OB-11	4,2	<0,05	<5	0,81	0,51	0,10	2,0	0,63	0,85
OB-12	2,0	<0,05	7	0,40	0,19	0,13	1,9	0,52	0,71
OB-13	2,1	0,09	<5	0,89	0,54	0,16	0,8	0,93	0,16
OB-14	2,3	<0,05	<5	0,62	0,36	0,10	0,8	0,60	0,18
OB-15	6,6	<0,05	<5	0,32	0,10	<0,05	0,3	0,39	<0,05
OB-16	1,4	0,07	9	0,31	0,22	0,07	0,9	0,36	0,31
OB-17	4,8	<0,05	<5	0,32	0,20	0,05	<0,1	0,36	<0,05
OB-18	1,9	0,09	7	0,46	0,26	0,15	0,8	0,61	0,26
OB-19	6,5	1,44	6	2,27	1,26	0,94	8,4	2,63	3,46
* DUP OB-19	6,6	1,40	6	2,35	1,35	0,91	8,4	2,43	3,66
OB-20	17,2	<0,05	<5	0,86	0,59	0,06	0,3	0,65	0,09
* REP OB-20	16,6	<0,05	<5	0,80	0,54	0,06	0,3	0,76	0,13
* STD TILL-3	14,5	1,80	25	2,63	1,46	0,94	14,2	3,36	N.A.
* STD GRE-05	5,5	15,80	11	19,13	147,66	3,12	97,3	75,72	332,63

Os ensaios foram realizados na SGS GEOSOL Laboratórios Ltda. - Rodovia MG 010, Km 24,5 - Bairro Angicos - Vespertino - MG - Brasil - CEP: 33.200-000
 Telefone +55 31 3045-0261 Fax +55 31 3045-0223 www.sgsgeosol.com.br
 Certificados ISO 9001:2008 e ISO 14001:2004 (ABS 32982 e ABS 39911)

Os resultados expressos neste Certificado se referem somente ao material recebido. Proibida a reprodução parcial deste documento.



SGS GEOSOL LABORATÓRIOS LTDA.

CERTIFICADO DE ANÁLISES

GQ1801320

Análise	Ho	La	Lu	Mo	Nb	Nd	Ni	Pr	Rb
	IMS95A								
	PPM								
Limite Detecção	0,05	0,1	0,05	2	0,05	0,1	5	0,05	0,2
BRANCO_PREP	<0,05	1,2	<0,05	<2	0,32	0,7	5	0,06	<0,2
08-01	0,15	6,7	0,06	<2	0,73	4,9	7	1,26	6,8
08-02	<0,05	4,5	<0,05	<2	0,64	2,3	9	0,61	5,2
08-03	0,14	10,9	<0,05	<2	1,61	4,9	18	1,33	14,8
08-04	<0,05	2,7	<0,05	<2	0,91	1,1	7	0,28	6,7
08-05	<0,05	2,6	<0,05	<2	0,11	0,7	8	0,16	0,7
08-06	<0,05	2,3	<0,05	<2	0,42	1,8	17	0,36	<0,2
08-07	0,11	4,7	0,07	<2	0,30	2,6	7	0,52	<0,2
08-08	<0,05	1,1	<0,05	<2	0,32	1,4	11	0,23	<0,2
08-09	0,39	15,0	0,19	<2	0,39	13,3	27	2,91	<0,2
08-10	0,21	10,5	0,07	<2	2,06	5,8	13	1,40	<0,2
08-11	0,15	16,5	0,06	<2	1,35	2,5	10	0,61	<0,2
08-12	0,06	5,4	<0,05	<2	1,10	3,3	7	0,84	<0,2
08-13	0,16	4,8	0,08	<2	0,38	2,9	8	0,55	<0,2
08-14	0,13	5,4	0,05	<2	0,28	2,2	5	0,53	<0,2
08-15	<0,05	7,6	<0,05	<2	<0,05	1,0	9	0,17	<0,2
08-16	0,05	13,8	<0,05	<2	0,60	2,3	7	0,65	0,6
08-17	<0,05	14,0	<0,05	<2	0,29	1,4	6	0,35	<0,2
08-18	0,07	7,2	<0,05	<2	0,37	3,8	6	0,94	0,3
08-19	0,48	18,7	0,20	<2	5,43	14,6	16	3,80	59,1
* DMP 08-19	0,39	16,7	0,18	<2	5,06	15,0	15	3,80	55,9
08-20	0,17	3,8	0,09	<2	0,07	1,4	11	0,26	<0,2
* REP 08-20	0,16	4,1	0,07	<2	0,09	1,8	12	0,36	<0,2
* STD TLU-3	0,53	23,3	0,21	<2	7,20	17,7	19	5,07	59,6
* STD GRE-05	45,03	28,8	19,34	<2	>1000	69,5	185	17,99	435,6
Análise	Sr	Sn	Ta	Tb	Tl	Ti	Tm	U	W
	IMS95A								
	PPM								
Limite Detecção	0,1	0,3	0,05	0,05	0,1	0,5	0,05	0,05	0,1
BRANCO_PREP	<0,1	0,5	<0,05	<0,05	<0,1	<0,5	<0,05	<0,05	<0,1
08-01	0,7	<0,3	0,06	0,12	0,5	<0,5	0,06	0,49	<0,1
08-02	0,4	0,4	0,46	<0,05	0,3	<0,5	<0,05	0,96	2,9
08-03	0,6	0,6	1,06	0,14	1,1	<0,5	<0,05	1,41	5,4
08-04	0,2	<0,3	<0,05	<0,05	<0,1	<0,5	<0,05	0,45	<0,1
08-05	<0,1	<0,3	0,05	<0,05	<0,1	<0,5	<0,05	0,07	<0,1
08-06	0,3	<0,3	<0,05	<0,05	<0,1	<0,5	<0,05	0,50	9,6
08-07	0,5	<0,3	<0,05	0,07	0,2	<0,5	<0,05	3,86	5,7
08-08	0,3	<0,3	<0,05	<0,05	<0,1	<0,5	<0,05	0,58	<0,1
08-09	3,0	<0,3	<0,05	0,51	1,9	<0,5	0,22	0,77	<0,1
08-10	1,2	0,6	0,10	0,14	1,6	<0,5	0,07	0,53	6,6
08-11	0,4	1,1	0,08	0,11	0,5	<0,5	<0,05	1,75	<0,1
08-12	0,5	<0,3	<0,05	<0,05	0,6	<0,5	<0,05	0,96	<0,1
08-13	0,7	0,5	<0,05	0,11	0,2	<0,5	0,05	0,55	1,4
08-14	0,5	<0,3	<0,05	0,06	0,1	<0,5	0,05	0,43	<0,1
08-15	0,2	<0,3	<0,05	<0,05	<0,1	<0,5	<0,05	0,22	<0,1
08-16	0,3	<0,3	<0,05	<0,05	0,2	<0,5	<0,05	0,62	<0,1
08-17	0,3	<0,3	<0,05	<0,05	<0,1	<0,5	<0,05	0,10	<0,1
08-18	0,6	0,6	<0,05	0,06	0,2	<0,5	<0,05	0,50	<0,1

Os ensaios foram realizados na SGS GEOSOL Laboratórios Ltda. - Rodovia MG 010, Km 24,5 - Bairro Angicos - Vespasiano - MG - Brasil - CEP: 33.200-000
 Telefone +55 31 3045-0261 Fax +55 31 3045-0223 www.sgsgeosol.com.br
 Certificados ISO 9001:2008 e ISO 14001:2004 (ABS 32982 e ABS 39911)

Os resultados expressos neste Certificado se referem somente ao material recebido. Proibida a reprodução parcial deste documento.



SGS GEOSOL LABORATÓRIOS LTDA.

CERTIFICADO DE ANÁLISES
GQ1801320

	Sm	Sn	Ta	Tb	Th	Tl	Tm	U	W
	IMS95A PPM 0,1	IMS95A PPM 0,3	IMS95A PPM 0,05	IMS95A PPM 0,05	IMS95A PPM 0,1	IMS95A PPM 0,5	IMS95A PPM 0,05	IMS95A PPM 0,05	IMS95A PPM 0,1
OB-19	2,7	1,0	0,36	0,39	5,2	<0,5	0,19	1,35	<0,1
* DMP OB-19	3,0	1,0	0,32	0,37	4,6	<0,5	0,19	1,47	<0,1
OB-20	0,4	<0,3	<0,05	0,08	<0,1	<0,5	0,08	0,09	<0,1
* REP OB-20	0,3	<0,3	<0,05	0,12	<0,1	<0,5	0,09	0,11	1,0
* STD TILL-3	3,6	4,1	0,43	0,43	4,4	<0,5	0,23	1,83	<0,1
* STD GRE-05	46,9	305,1	187,30	24,50	323,7	<0,5	22,89	41,09	8,1
Análises	Y	Yb							
Método	IMS95A	IMS95A							
Unidade	PPM	PPM							
Limite Detecção	0,05	0,1							
BRANCO_PREP	0,16	<0,1							
OB-01	7,85	0,5							
OB-02	2,51	0,2							
OB-03	6,14	0,2							
OB-04	0,94	<0,1							
OB-05	0,42	<0,1							
OB-06	2,06	0,2							
OB-07	4,93	0,4							
OB-08	1,83	0,1							
OB-09	22,06	1,4							
OB-10	6,72	0,5							
OB-11	5,98	0,4							
OB-12	2,22	0,2							
OB-13	7,32	0,5							
OB-14	5,79	0,4							
OB-15	2,52	<0,1							
OB-16	2,91	0,1							
OB-17	3,10	0,3							
OB-18	3,19	0,2							
OB-19	12,38	1,4							
* DMP OB-19	12,13	1,3							
OB-20	8,22	0,5							
* REP OB-20	8,57	0,6							
* STD TILL-3	N.A.	1,5							
* STD GRE-05	1010,55	149,3							

Os ensaios foram realizados na SGS GEOSOL Laboratórios Ltda. - Rodovia MG 010, Km 24,5 - Bairro Angicos - Vespasiano - MG - Brasil - CEP: 33.200-000
 Telefone +55 31 3045-0261 Fax +55 31 3045-0223 www.sgsgeosol.com.br
 Certificados ISO 9001:2008 e ISO 14001:2004 (ABS 32982 e ABS 39911)

Os resultados expressos neste Certificado se referem somente ao material recebido. Proibida a reprodução parcial deste documento.