

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em Geologia

*MODELAMENTO GEOLÓGICO DO PERFIL DE INTEMPERISMO E
CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA, QUÍMICA E PETROGRÁFICA DOS LITOTIPOS
PRIMÁRIOS DA PORÇÃO NOROESTE DA MINA DE BOA VISTA, CATALÃO-GO*

Vinicius Rocha

Prof. Dr. George Luiz Luvizotto

Rio Claro (SP)

2015

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

VINICIUS ROCHA

MODELAMENTO GEOLÓGICO DO PERFIL DE
INTEMPERISMO E CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA,
QUÍMICA E PETROGRÁFICA DOS LITOTIPOS PRIMÁRIOS
DA PORÇÃO NOROESTE DA MINA DE BOA VISTA,
CATALÃO-GO.

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto
de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de
Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista
Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau
de Geólogo.

Rio Claro - SP

2015

621.3678 Rocha, Vinicius

R672m Modelamento geológico do perfil de intemperismo e
caracterização mineralógica, química e petrográfica dos
litotipos primários da porção noroeste da mina de Boa Vista,
Catalão-GO / Vinicius Rocha. - Rio Claro, 2015
110 f. : il., figs., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Geologia) - Universidade
Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: George Luiz Luvizotto

1. Sensoriamento remoto. 2. Nióbio. 3. Pirocloro. 4.
Minerais de terras raras (ETR). 5. Espectrômetro de energia
dispersiva (EDS). I. Título.

VINICIUS ROCHA

MODELAMENTO GEOLÓGICO DO PERFIL DE
INTEMPERISMO E CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA,
QUÍMICA E PETROGRÁFICA DOS LITOTIPOS PRIMÁRIOS
DA PORÇÃO NOROESTE DA MINA DE BOA VISTA,
CATALÃO-GO.

Trabalho de Formatura apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para
obtenção do grau de Geólogo.

Comissão Examinadora

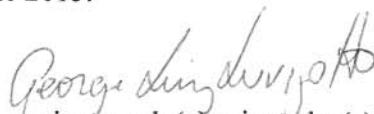
Prof. Dr. George Luiz Luvizotto (orientador)

Ílio Rodarte Faria Júnior

João Gabriel Motta

Rio Claro, 22 de Dezembro de 2015.


Assinatura do(a) aluno(a)


assinatura do(a) orientador(a)

Dedico este trabalho de formatura a minha família:

João Batista Rocha

Teovania Rocha

Felipe Rocha (in memoriam)

Guilherme Rocha

Agradecimentos

Agradeço ao orientador, professor e amigo Prof. Dr. George Luiz Luvizotto que esteve sempre acessível, positivo, cheio de alternativas e disposto a tornar possível minha conclusão de curso em meio das incertezas que rondaram esse trabalho.

À empresa Anglo American e a todo seu corpo técnico (Matheus Palmeiri, Sérgio Eduardo Silva, Gisele Ramos, Laercio Bertossi, Daniel Marinzek, Carlos Peters, Cibeli Tunusi e Bruno Milanezi) pela oportunidade de estágio, liberação dos dados e apoio.

Ao Prof. Dr. Affonso Brod por todo conhecimento e ensinamentos ao longo dos programas de estágio realizados em Catalão.

Agradeço a todos os amigos, ex-moradores e moradores da saudosa República Mansão.

Aos meus companheiros de estágio e grandes amigos, Felipe Seguin e João Eduardo Fochi Ramires, pelos ensinamentos e momentos compartilhados.

À turma de Geologia Unesp 2010.

À Helena, minha namorada, pelo apoio e companheirismo incondicional.

E, especialmente, ao João, Teovania e Guilherme por representarem meus pilares desde sempre.

Aos que, por esquecimento, mas não por menor importância não citei, meu muito obrigado.

“Rivers knows this: there is no hurry. We shall get there someday.”

A.A. Milne

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso tem como objeto de estudo a porção noroeste da mina Boa Vista, operada pela empresa Anglo American Nióbio Brasil Ltda. e situada no complexo alcalino de Catalão II, o qual se encontra inserido no contexto geológico da Província Alcalina do Alto Paranaíba, uma importante província metalogenética do território brasileiro responsável por um conjunto variado de mineralizações, como: nióbio, fosfato, terra raras, titânio, vermiculita e barita. A mina Boa Vista tem seu minério constituído dos produtos de alteração intempérica sobre um *stockwork* de diques de pirocloro-nelsonito colocados em metassedimentos regionais. Nesse contexto, o presente trabalho buscou contribuir para o entendimento da evolução, geometria e comportamento dos teores de Nb_2O_5 no perfil de intemperismo da porção noroeste da mina através do modelamento em três dimensões (3D) do perfil de alteração. Além disso, buscou-se a delimitação da superfície de contato entre perfil intempérico e rocha (PI/RF), o modelamento dos envelopes mineralizados com teores de Nb_2O_5 acima de 0,5% - teor de corte estabelecido pela empresa mineradora e a caracterização petrográfica, química e mineralógica da rocha sã. Para tal, fez-se uso do software *Leapfrog* para o modelamento a partir dos dados fornecidos pela empresa mineradora e, também, foram feitas descrições de testemunhos de sondagem, descrições petrográficas e caracterização química semi-quantitativa com uso do Espectrômetro de Energia Dispersiva (EDS). Os objetivos propostos pelo trabalho foram atingidos com êxito, nos quais o pacote de material oxidado se mostrou contínuo e com profundidade máxima de 40 metros, bem como a superfície limítrofe entre rocha oxidada/rocha sã se mostrou contínua e a partir disso foi feito um mapa de isoespessura da mesma. Constatou-se a presença de minerais de elemento terras raras (ETR), como monazita – $(\text{Ce}, \text{La}, \text{Th})(\text{PO}_4)$ – e bastnasita – $(\text{Ce}, \text{La})\text{CO}_3\text{F}$ – tanto em lâmina quanto em testemunhos de sondagem. O mineral de minério, pirocloro mostrou-se em diferentes formas e texturas associadas ao crescimento mineral e a posteriores alterações. O recurso calculado utilizando-se do sólido que engloba teores maiores ou iguais a 0,5% de Nb_2O_5 foi estimada em 19.190,7 t de “minério” a 0,5% de Nb_2O_5 . O recurso calculado utilizando-se todo o sólido correspondente à rocha oxidada foi estimada em 766.080 toneladas de “minério” a 0,266% de Nb_2O_5 .

PALAVRAS-CHAVE: Catalão II. Modelamento Geológico. Perfil de intemperismo. Nióbio.

ABSTRACT

This project had as object of study the northwest portion of Boa Vista mine operated by Anglo American Niobium Brazil Ltda., and it is located at the alkaline complex of Catalão II which is inserted in the geological context of the Alkaline Province Alto Paranaíba. This province is a major metallogenic province of Brazilian geological framework being responsible for a wide range of commodities, such as niobium, phosphate, rare earth, titanium, vermiculite and barite. The Boa Vista ore consists of weathering products on a stockwork of pyrochlore-nelsonite dykes injected in metasediments. In this context, this project sought to contribute to the understanding of the evolution, geometry and behavior of Nb_2O_5 content in the weathering profile of the northwest portion of the mine through modeling in three dimensions (3D). In addition, it sought the delimitation of the contact surface between soil and rock, the modeling of the mineralized envelopes with Nb_2O_5 content above 0.5%, and petrographic, chemical and mineralogical characterization of the unweathered bedrock. To this propose modeling of the area was made with *Leapfrog* software and descriptions of drill core, petrographic descriptions and semi-quantitative chemical characterization were made. The objectives proposed by the study were successfully achieved, in which the oxidized material package proved to be continuous, with maximum depth of 40 meters, and the boundary surface between oxidized rock and bedrock showed continuous and a isopach map was produced. It was found the presence of rare earth element minerals (ETR) such as monazite - (Ce, La, Th) (PO₄) - and bastnasite - (Ce, La) CO₃F. The mineral ore, pyrochlore, showed up in different shapes and textures associated with mineral growth and magmatic differentiation. The resources calculated by the solid content comprising greater or equal values than 0.5% of Nb_2O_5 was estimated at 19190.7 t "ore" 0.5% Nb_2O_5 . The Nb resources whitin the whole soil cover was estimated at 766 080 tons of "ore" to 0.266% Nb_2O_5 .

KEYWORDS: Catalão II. Geological Modelling, weathering, Niobium, Boa Vista mine, Niobium.

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Localização das províncias alcalinas às margens da Bacia do Paraná. Em vermelho a APIP, onde as intrusões mais a norte representam os Complexos de Catalão I e Catalão II. Modificado de Gibson et al. 1995.	19
Figura 1.2 - Composição de imagem LANDSAT de satélite mostrando a localização da mina Boa Vista e do Complexos Alcalinos Catalão I e Catalão II. Zoom a direita mostrando o complexo de Catalão II. Modificado de: Palmieri, 2011.....	20
Figura 1.3 - Localização da área de estudo. A) Contorno do Estado de Goiás no mapa do Brasil. B) Localização do Município de Catalão-GO.....	23
Figura 2.1 - Mapa geológico da região de catalão, destacando com a localização do complexo	25
Figura 3.1 – Procedimento de execução de sondagem e amostragem de testemunhos. A) Abertura da praça para instalação da sonda. B) Sonda em operação C) Testemunhos dispostos em caixas com devida marcação métricas para descrição geológica.	27
Figura 3.2 – Descrição geológica, caracterização tecnológica e registro fotográfico. A) Registro fotográfico da caixa de testemunhos com respectivas informações relevante para armazenamento em banco de dados interno da empresa B) Descrição geológica C) Medição da susceptibilidade magnética com o Susceptibilímetro Magnético - KT-10.	28
Figura 3.3 - Programa DH Logger ilustrando como o log do furo é montando e as informações da descrição e caracterização tecnológica são inseridas.....	29
Figura 3.4- Figura mostrando diferentes passos do processo de calculo de densidade da amostra. A) medição longitudinal (04 medidas) da amostra. (B) medição do diâmetro (06 medidas). Em (C) medição da massa. Em (D) Material utilizado: paquímetro digital, balança digital, pesos padrão e planilha de registro e planilha de registro em papel (back up).	30
Figura 3.5- Esquema demonstrativo do procedimento do calculo de densidade (PALMIERI,2011).....	30
Figura 4.1 - Bloco diagrama mostrando o Sistema Nelsonítico ao sul (sistema de mineralizações de nióbio), onde pode-se ver a câmara magmática (laranja) sob teto de rochas encaixantes (amarelo) e os veios e diques de rochas magmáticas penetrando nas rochas encaixantes (vermelho); e Sistema Foscorítico ao norte (sistema de mineralizações de fosfato). Palmieri, 2009	36
Figura 4.2 - Imagem ilustrativa do material de divulgação da empresa Anglo American sobre o Nióbio	39
Figura 5.1 - Amostra de testemunho de sondagem de um filito. O contato abrupto entre o dique de picrito (à direita) de coloração verde com fenocristais de olivina arredondados e xenólitos da rocha encaixante. Observa-se também que um dique de carbonatito de espessura milimétrica anterior ao dique picritico é cortado pelo mesmo. À esquerda encontra-se a rocha encaixante do complexo o Filito/Fenito.	44

Figura 5.2 - Amostra de testemunho de sondagem de filito. Descrição: rocha de coloração verde escuro, macica, afanítica e não magnética. Apresenta glóbulos de carbonato e fenocristais de olivina que não ultrapassam 1cm.	44
Figura 5.3 – Brecha de conduto com clastos da rocha encaixante fenitizados.....	45
Figura 5.4 – Mg- Carbonatito apresentando monazita (porções amareladas) e sulfetos já oxidados. Rocha de coloração esbranquiçada, fanerítica fina, estrutura maciça. A mineralogia da rocha é composta por: matriz de carbonato, com magnetita, monazita, calcopirita e pirita.	46
Figura 5.5 – Ca-Carbonatito com magnetita flogopita e ilmenita espalhada pela rocha e sulfetos oxidados. Rocha de coloração esbranquiçada, fanerítica fina a média, estrutura maciça. Rocha pouca magnética e textura inequigranular. matriz de ca-carbonato, com presença de flogopita 10%, magnetita 5%, ilmenita 5%, calcopirita 3%. Cristais de ilmenita centimétricos, prismáticos e eudrais.....	47
Figura 5.6- Mg- Carbonatito apresentando mozanita (porções amareladas) e sulfetos já oxidados. Rocha de coloração esbranquiçada, fanerítica fina, com estrutura maciça, não magnética. Ocorre a presença de sulfetos disseminados na matriz de carbonato, como pirita e calcopirita.	47
Figura 5.7 – Dique de Ca-carbonatito com ceistras alongados de pirrotita (magnéticos) indicando resfriamento rápido. Os cristais concentram-se perpendiculares a parede dos diques indicando três fluxos distintos.	48
Figura 5.8 – Ca-Carbonatito com magnetita flogopita e ilmenita espalhada pela rocha. Rocha de coloração esbranquiçada, fanerítica média, com estrutura maciça e magnética nas porções com magnetita. A mineralogia da rocha é composta pela matriz carbonatica, com presença de magnetita flogopita.	48
Figura 5.9 – Contato abrupto entre dique de Ca-Carbonatito e a Fenito com intensa flogopitização. A rocha ígnea possui cristais centimétricos de apatita e flogopita.	49
Figura 5.10 – Amostra com cristais de apatita centimétricos, flogopita e magnetita também ocorrem acociados a eles, a matriz trata-se de um Ca-Carbonatito.....	49
Figura 5.11 – Apatita Nelsonito com presença de calcopirita. Rocha de coloração escura, fanerítica fina, com estrutura maciça e fortemente magnética. Os minerais constituintes da rocha são: Magnetita 40%, flogopita 15%, apatita 10%, pirocloro 10%, ilmenita 10%, carbonatos 14%, calcopirita 1%.	50
Figura 5.12 - Bolsões de Apatita nelsonito em meio a carbonatito. Apresenta apatita, magnenita e pirocloro	51
Figura 5.13- Apatita nelsonito em amostra fortemente magnética, fina a média e fanerítica. Apresenta apatite, magnetite, pirocloro, flogopita, calcopirita e carbonato.	51
Figura 5.14 - Rocha de coloração escura, fanerítica fina a média, com estrutura maciça e fortemente magnética. Os minerais constituintes da rocha são: magnetita, apatita, flogopita, calcita, pirocloro , calcopirita.	52

Figura 5.15 – Nelsonito rico em pirocloro. Os minerais constituintes da rocha são: magnetita, pirocloro, calcita e ilmenita.	52
Figura 5.16 – Amostra de testemunho de sondagem de um filito. Descrição: rocha afanítica, de coloração verde, com estrutura maciça, ocorre bandas verde mais clara e escura, e não tem magnetismo. Presença de vários veios milimétricos de carbonatito, nos quais o contato entre apresenta uma mudança mineralógica caracterizando processo de fenitização.	54
Figura 5.17 - Amostra de testemunho de sondagem de um filito. Descrição: rocha de coloração verde clara, bandado, afanítica e não magnética. Veios de espessura milimétricos de carbonatito cortam transversalmente o filito, e seus contatos estão fenitizados com uma coloração mais escura.	54
Figura 5.18 - Amostra de testemunho de sondagem de um filito. Descrição: rocha de coloração verde, bandada, afanítica, com estrutura maciça e não magnética. Um veio de carbonatito com espessura milimétrica corta a seção, sendo seus contatos flogopitizados (metassomatismo alcalino o qual gera flogopita).	55
Figura 5.19 - Rocha de coloração escura, afanítica, de estrutura maciça e não magnética. Diques de carbonatito, em diferentes orientações e tamanhos.	56
Figura 5.20 - Cristais de pirocloro apresentando um zoneamento interno envoltos por matriz apatítica e cristais magnetita. Foto em microscópio de luz transmitida da lâmina VC-01 com aumento de 5x.	59
Figura 5.21 - Cristais de pirocloro em processo de alteração envoltos por matriz apatítica. Foto em microscópio de luz transmitida da lâmina VC-01 com aumento de 5x.	59
Figura 5.22 - Matriz calcítica com cristais de diversos tamanhos, sulfetos, pirocloro e fenocristais de flogopita. Foto em microscópio de luz transmitida da lâmina VC-03 com aumento de 5x.	60
Figura 5.23 - Fenocristais de Mg-Olivina envolto por cristais de flogopita e sulfetos.	60
Figura 5.24 - Lâmina VC-01 com destaque aos campos estudados	61
Figura 5.25- Campo VC-1_1 mostrando o zoneamento interno do cristal de pirocloro, em lâmina e em imagem captada no MEV(BEC). O método EDS foi aplicado nos pontos 1,2 e 3.	62
Figura 5.26 – Espectro EDS dos pontos 1 e 3 (superior) e 2 (no qual nota-se os picos de Ba, Sr e Fe).	63
Figura 5.27 – Campo VC1_2, aglomerado de minerais portadores de ETR envoltos em matriz silificada.	64
Figura 5.28 – Campo VC1_2.1, aglomerado de minerais contendo Bst (bastanasita), Ba(barita), Mz(monazita), Cal(calcita), Sulf(sulfetos) e Prv(Perovskita).	65
Figura 5.29 - Lâmina VC-2 com destaque ao campos estudados.	66

Figura 5.30 – Campo VC2_3, cristais de magnetita(Mag), apatita(Ap), flogopita(Phl), pirocloro(Pcl), barita(Ba) e Ankerita(Fe-Carb).....	66
Figura 5.31 - Espectro EDS obtido para Pirocloro.....	68
Figura 5.32 - Espectro EDS obtido para F-Apatita	68
Figura 5.33 - Espectro EDS obtido para Flogopita	68
Figura 5.34 – Espectro EDS obtido para Ankerita	69
Figura 5.35- Espectro EDS obtida para Barita	69
Figura 5.36 - Lâmina VC-3 com destaque ao campo estudado.....	70
Figura 5.37 – Campo VC-3_1 em imagem BEC mostrando campo estudado com EDS mostrando pirocloro(pcl), Calcopirita(sulf), flogopita(phl) e barita(ba) e matriz de carbonato.	71
Figura 5.38 – Lâmina VC-4 com destaque ao campos estudados	72
Figura 5.39 – Cristais de flogopita zonado. Atenta-se para a diferença entre as bordas do fenocristal de flogopita e seu centro. Flogopita(001,002,003), Diopsídio (006,007,008) e dois minerais distintos não reconhecidos através do método EDS (004 rico em Cr e 005 em Ti) .	73
Figura 5.40 – Espectro EDS do Ponto 004.....	74
Figura 5.41- Espectro EDS do Ponto 005.....	74
Figura 5.42 – Fenocristais de Olivina com os pontos (001 a 004) onde foram feitas as análises EDS, indicando que a olivina em questão é magnesiânica.	75
Figura 5.43 - Espectro EDS caracterizando os fenocristais como Mg-Olivina.....	76
Figura 5.44 – Fenocristais de diopside sofrendo alteração/substituição por carbonato e sílica	77
Figura 5.45 – Espectro EDS do mineral diopsídio	77
Figura 5.46 - Superfície de contato entre a rocha fresca e o manto intempérico na porção noroeste da Mina Boa Vista.....	79
Figura 5.47 – Seção N-S ilustrando o processo de delimitação da Superfície perfil intempérico – Rocha Fresca	79
Figura 5.48 – Mapa de elevação da superfície de contato PI/RF, mostrando maior elevação nas porções sudoeste e leste da área em função da cava da mina Boa Vista, onde parte do material oxidado já foi lavrado.....	80
Figura 5.50 - Operação computacional para extrair a área da superfície feita em plataforma Leapfrog.....	81

Figura 5.50 – Modelo geológico diferenciado com os campos de aloterita, rocha oxidada e rocha fresca. Foi aplicado modo de transparência a rocha fresca para facilitar a visualização.	82
Figura 5.52- Seção SN mostrando os contatos respeitando os limites litológicos dos furos de sondagem.....	83
Figura 5.53 – Interpolant de teores mostrando nas cores quentes os teores acima de 0,5% de Nb ₂ O ₅	84
Figura 5.54 – Nuvens apenas com os teores acima de 0,5% de Nb ₂ O ₅	84
Figura 5.55 – Figura mostrando seção longitudinal com o furos de sondagem com os teores ativados o que possibilitou a interpolação das nuvens.	85
Figura 5.56 – Nuvem de teores acima da superfície PI/RF.	85
Figura 5.57 - Seção SN com os teores de Nb ₂ O ₅	86
Figura 5.58 – Variograma gerado pelo software a partir da interpolação dos teores de Nb ₂ O ₅	86
Figura 5.59 – Figura mostrando o volume do sólido extraído do software.....	88
Figura 5.60 – A média dos teores de Nb ₂ O ₅ na rocha oxidada é 0,266%.	89
Figura 5.61 – Modelo de blocos de dimensão 5m x 5m x 5m, os blocos representados em cores quentes possuem teor de Nb ₂ O ₅ acima de 0,5%.	90
Figura 5.62 – Modelo de blocos apenas com os teores acima de 0,5% de Nb ₂ O ₅ ativados.	91

SUMÁRIO

1	Introdução	18
1.1	Objetivos	22
1.2	Justificativa	22
1.3	Localização da área.....	22
2	Síntese da Geologia Regional.....	23
2.1	Síntese da Geologia Local	24
3	Métodos de trabalho	25
3.1	Primeira fase	25
3.1.1	Fundamentação Teórica.....	26
3.1.2	Preparação	26
3.1.3	Acompanhamento de sondagem.....	26
3.1.4	Descrição geológica, caracterização tecnológica e amostragem dos furos de sonda.	28
3.1.5	Atividades de campo	33
3.2	Segunda fase	33
3.2.1	Organização e análise do banco de dados	33
3.2.2	Modelamento tridimensional.....	34
3.2.3	Amostragem	34
3.2.4	Atividades Laboratoriais.....	34
4	Fundamentação Teórica.....	35
4.1	Caracterização Geológica	35
4.1.1	Ação do intemperismo.....	36
4.1.2	Rocha fresca	38
4.2	Nióbio	39
4.2.1	História do níobio	39
4.2.2	Beneficiamento	40

4.3	Avaliação de um depósito mineral.....	40
4.3.1	Amostragem de depósitos minerais.....	40
4.3.2	Recursos e Reservas Minerais	41
5	Resultados.....	42
5.1	Caracterização petrográfica, química e mineralógica dos litotipos presentes na área de estudo.....	42
5.1.1	Descrição e caracterização mineralógica.....	43
5.1.1.1	Picrito	43
5.1.1.2	Carbonatito	44
5.1.1.3	Nelsonito	50
5.1.1.4	Filito/Fenito	52
5.1.1.5	Anfibolito	55
5.1.1.6	Silexito	56
5.1.2	Descrições petrográficas.....	57
5.2	Análises com EDS (Espectrômetro de Energia Dispersiva) em MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura)	60
5.2.1	Lâmina VC-01	61
5.2.1.1	Campo VC-1_1	62
5.2.1.2	Campo VC-1_2	64
5.2.2	Lâmina VC-02	65
5.2.3	Lâmina VC-03	70
5.2.4	Lâmina VC-04	72
5.2.4.1	Campo VC-4_1	73
5.2.4.2	Campo VC-4_2	75
5.2.4.3	Campo VC-4_3	76
5.3	Modelamento geológico	78
5.3.1	Modelagem da Superfície de contato Superfície Perfil Intempérico/Rocha Fresca (PI/RF)	78
5.3.2	Modelamento tridimensional do perfil de alteração	81

5.3.3	Envelope mineralizado de teores (<i>interpolant</i>)	83
5.3.4	Volume a partir do <i>interpolant</i>	87
5.3.5	Modelo de blocos	89
5.4	Confecção de material didático.....	91
6	Conclusões.....	91
7	Referências Bibliográficas.....	93
APÊNDICE A		97

1 Introdução

O presente trabalho refere-se ao Trabalho de Conclusão de Curso realizado pelo aluno Vinicius Rocha do curso de Geologia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP. O trabalho consiste no “*MODELAMENTO GEOLÓGICO DO PERFIL DE INTEMPERISMO E CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA, QUÍMICA E PETROGRÁFICA DOS LITOTIPOS PRIMÁRIOS DA PORÇÃO NOROESTE DA MINA DE BOA VISTA, CATALÃO-GO*”, e foi desenvolvido junto à empresa Anglo American Nióbio Brasil Ltda.

Na região sudeste do estado de Goiás e noroeste de Minas Gerais encontra-se a Província Alcalina do Alto Paranaíba (APIP, GIBSON et al., 1995), uma importante província metalogenética do território brasileiro. Essa província é relativamente estreita, composta por rochas magmáticas intrudidas em metassedimentos da Faixa Brasília, e limita-se a sudeste pela Bacia do Paraná e a nordeste pelo cráton do São Francisco (Figura 1.1). São reconhecidos na APIP sete Complexos Alcalino-Carbonatitos: dois no Estado de Goiás e cinco no Estado de Minas Gerais. Em Goiás, estes complexos são denominados de Catalão I e Catalão II e no Estado de Minas Gerais de Serra Negra, Salitre I, Salitre II, Salitre III e Araxá por Barbosa et al. (1970). Esses complexos apresentam um conjunto variado de mineralizações, por exemplo: nióbio, fosfato, terra raras, titânio, vermiculita e barita (GOMES, et al. 1990).

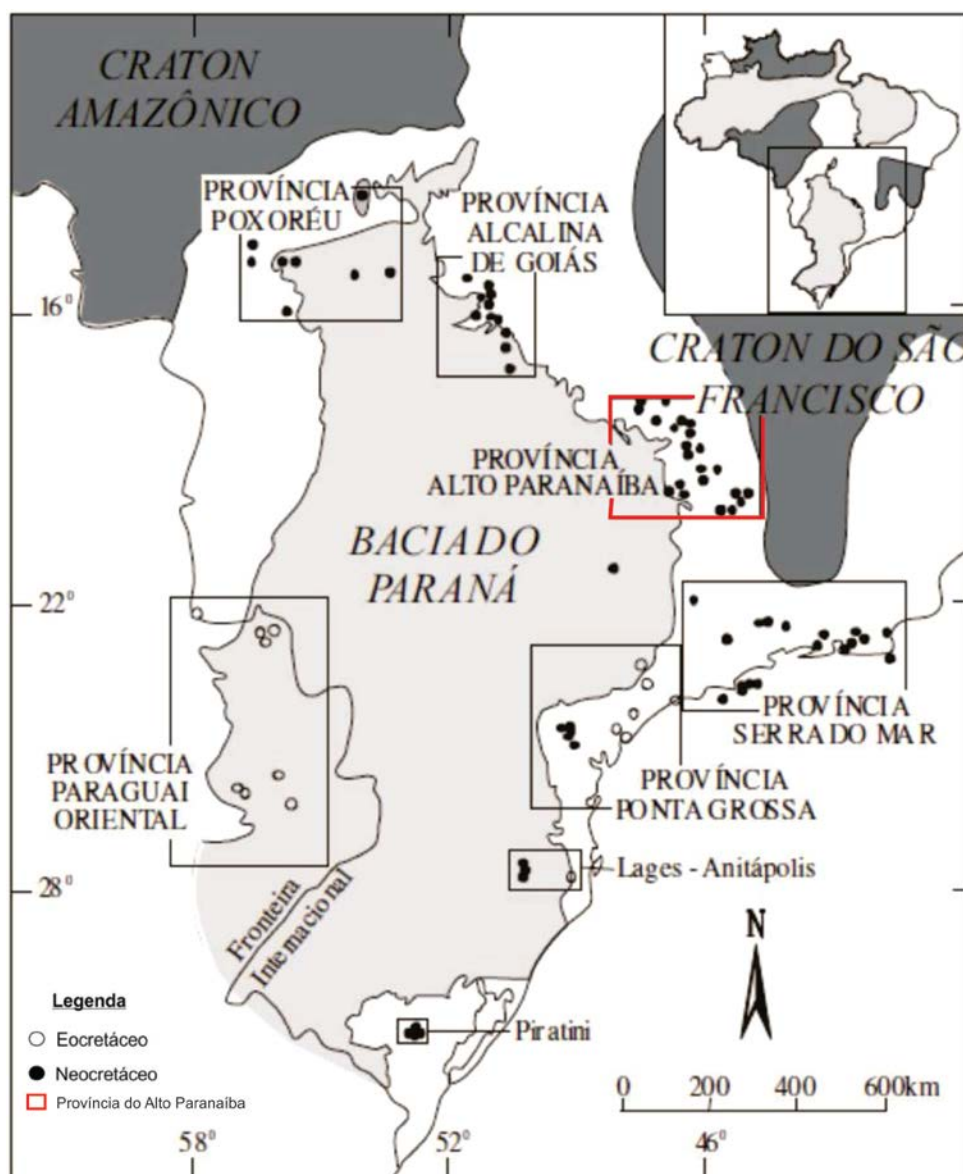


Figura 1.1 - Localização das províncias alcalinas às margens da Bacia do Paraná. Em vermelho a AP/IP, onde as intrusões mais a norte representam os Complexos de Catalão I e Catalão II. Modificado de Gibson et al. 1995.

Catalão I e Catalão II, na porção sudoeste do estado de Goiás, são os complexos carbonatíticos mais setentrionais conhecidos na província. A área de estudo é parte pertencente à porção sul do complexo de Catalão II, o qual encontra-se inserido em metassedimentares do Grupo Araxá, formando uma estrutura dômica (Figura 1.2) de aproximadamente 18 km², com maior alongamento na direção NE-SW (MACHADO JUNIOR, 1992a). Machado Junior (1992b) obteve uma idade Rb-Sr de 83.4 ± 0.9 Ma para o complexo de Catalão II.

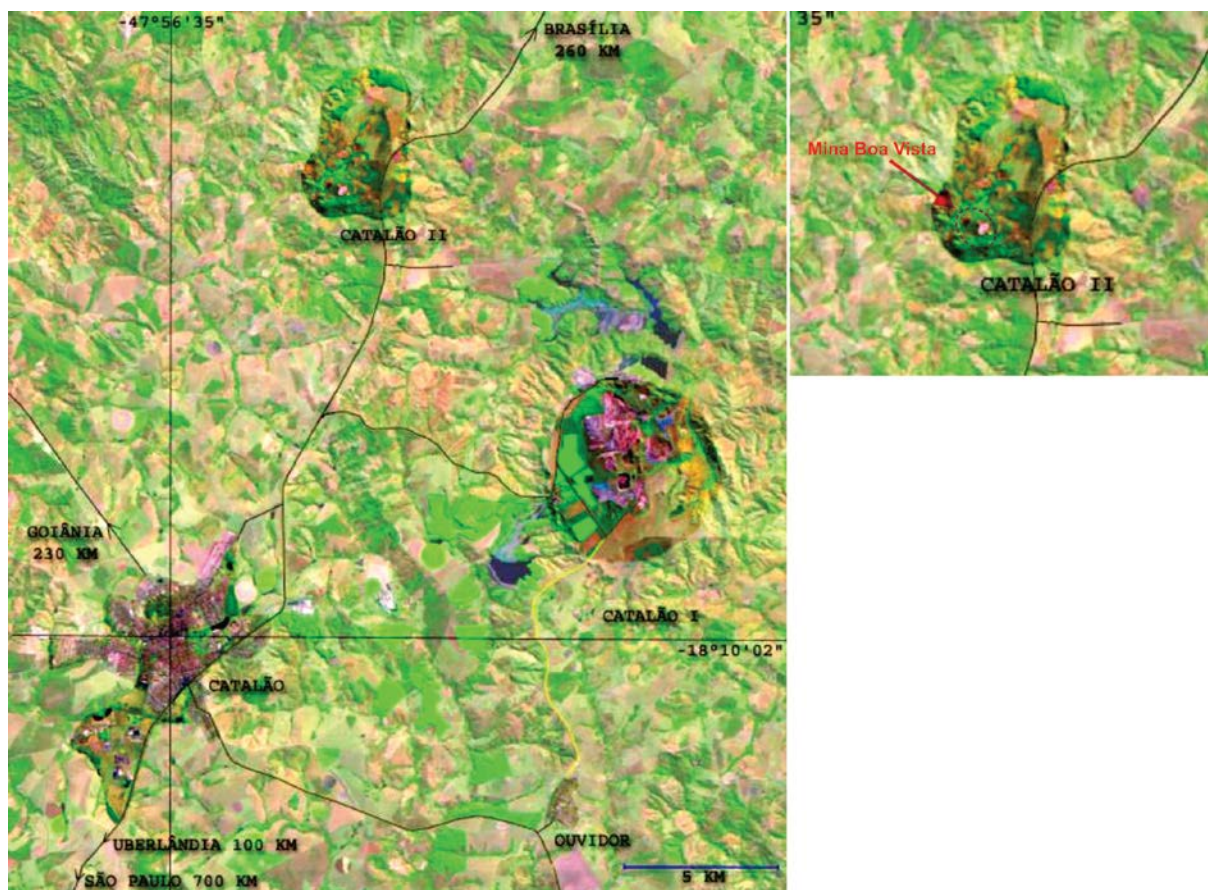


Figura 1.2 - Composição de imagem LANDSAT de satélite mostrando a localização da mina Boa Vista e do Complexos Alcalinos Catalão I e Catalão II. Zoom a direita mostrando o complexo de Catalão II. Modificado de: Palmieri, 2011

Rochas carbonatíticas são definidas como rochas ígneas compostas por mais de 50% de carbonatos, as quais podem ser plutônicas ou vulcânicas (LE MAITRE, 2002). Quando os carbonatitos ocorrem associados com rochas silicáticas alcalinas, formam os complexos alcalino-carbonatíticos. Essas rochas não são frequentes, com 527 ocorrências registradas no mundo (WOOLLEY, KJARSGAARD, 2008). As rochas alcalinas associadas a carbonatitos brasileiros ocorrem em corpos maciços (*plugs* magmáticos com *stocks* - enxames de diques - ou diatremas nas extremidades dos corpos). Usualmente geram estruturas dômicas a circulares (GOMES, et al. 1990).

Os magmas carbonatíticos podem ser primários: de origem mantélica (litosférico continental) e tendem a ascender rapidamente, em função da grande quantidade de voláteis dissolvidos e à sua baixa densidade; e também secundários: são mais abundantes, sendo produto da diferenciação de um magma primitivo alcalino. Esses magmas são iônicos e não apresentam

polimerização, logo apresentam baixa viscosidade justificando os padrões de diatrema e *stocks*. (TREIMAN, 1989).

O Clima é fator de dominante influência no processo intempérico. Locais situados em latitudes tropicais possuem a combinação de alta pluviosidade e alta temperatura média que favorecem os processos de intemperismo (TEIXEIRA, 2000). A geomorfologia local também atua favorável aos processos pedogenéticos. Os metassedimentos encaixantes das intrusões de Catalão II são mais resistentes ao intemperismo frente às rochas alcalinas do complexo e tendem a sobressair no relevo, o que gera um anel topográfico circuncidando o domo, favorecendo os padrões de drenagem centrípeta - drenagens que condicionam o fluxo de águas meteóricas para dentro do domo (MARIANO, MARCHETTO, 1991).

A evolução do perfil de intemperismo é condicionante fundamental para viabilizar jazidas associadas a complexos alcalinos. A suscetibilidade das rochas dessa natureza ao intemperismo resulta na formação de espessos horizontes de solo, os quais podem atingir profundidade de até 200m (GOMES, et al. 1990). Essa cobertura espessa favorece a concentração econômica do fosfato e nióbio tradicionalmente explorados na região. Em muitos casos, depósitos minerais só se tornam economicamente viáveis através do enriquecimento intempérico, o qual concentra e homogeneiza os teores.

Depósitos com mantos intempéricos profundos derivados de carbonatitos em regiões tropicais foram descritos no mundo todo, como na Austrália, África e no Brasil. A ação supergênica nos carbonatos leva ao desenvolvimento de complexos perfis de alteração com zoneamento vertical. Os depósitos formam-se nas porções residuais do perfil, onde o carbonato foi levado por dissolução e os minerais com maior resistência ao intemperismo se concentram – minerais de minério (OLIVEIRA, et al. 1998).

A mina de nióbio da Boa Vista está localizada na cidade de Catalão (Figura 1.3), no estado de Goiás, e atualmente representa aproximadamente 8% da produção de nióbio no mundo. A empresa responsável pela exploração desse insumo mineral é a Anglo American Nióbio Brasil.

O nióbio (Nb) é um metal de transição, sendo os principais minerais portadores o pirocloro e columbita. O metal também ocorre como elemento traço em outros minerais, como por exemplo, o rutilo. Possui alta resistência à corrosão e temperaturas elevadas. Pequenas

quantidades desse metal são adicionadas a ligas de aço para aumentar a resistência à dilatações, fraturas e torções. O Brasil detém as maiores reservas de nióbio no mundo e também é o maior produtor com 98% da produção total mundial (DNPM, 2015). As reservas passíveis de lavra no Brasil estão nos estados do Amazonas, Minas Gerais, Goiás, Rondônia e Paraíba, sendo as reservas localizadas nos estados de Minas Gerais e Goiás as principais.

1.1 Objetivos

O objetivo do presente trabalho consiste no modelamento em três dimensões (3D) do perfil de alteração na porção noroeste da Mina de Boa Vista, buscando identificar e caracterizar a geometria espacial do pacote oxidado, bem como a delimitação da superfície de contato entre solo e rocha em ambiente 3D. Objetiva-se também, o modelamento dos envelopes mineralizados com teores de Nb_2O_5 acima de 0,5% - teor de corte estabelecido pela empresa mineradora. Nesse sentido, é indispensável conhecer a rocha fonte. Logo, inclui-se nos objetivos a caracterização petrográfica, química e mineralógica da rocha sã.

1.2 Justificativa

O espesso perfil de alteração no complexo de Catalão II proporcionou quase 40 anos de lavra, o que torna fundamental a compreensão do comportamento evolutivo do intemperismo no perfil, bem como a ação do enriquecimento supergênico e as dimensões dos horizontes formados.

O estudo do perfil de alteração possibilita o entendimento do corpo mineralizado no noroeste da mina de Boa Vista. O planejamento do avanço da lavra na área poderá ser otimizado através da caracterização geológica e sua relação com a rocha fresca. Dessa forma, o modelamento do perfil intempérico e a delimitação do limite rocha alterada/rocha sã poderão ser extrapolados para as demais porções da Mina contribuindo com o planejamento em curto e longo prazo.

1.3 Localização da área

A área de estudo localiza-se região Centro-Oeste do território Brasileiro, na porção sudeste do estado de Goiás, no município de Catalão (Figura 1.3).

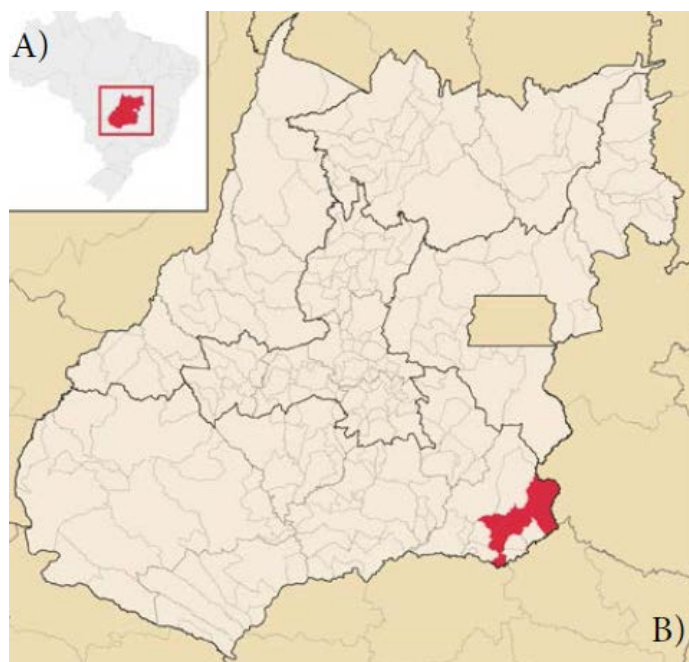


Figura 1.3 - Localização da área de estudo. A) Contorno do Estado de Goiás no mapa do Brasil. B) Localização do Município de Catalão-GO.

Encontra-se aproximadamente a 100 quilômetros da divisa com o Estado de Minas Gerais, inserido na bacia hidrográfica do Rio Paranaíba. O município de Catalão é margeado pela rodovia BR-050, a qual interliga as cidades de São Paulo e Brasília. A área de trabalho pertence à folha SE.23-Y-A-I, cerca de 20 km a NNE do município de Catalão, o qual situa-se à latitude 18° 9' 57" sul e à longitude 47° 56' 47" oeste e à altitude de 835 metros.

2 Síntese da Geologia

A área de estudo está inserida no complexo alcalino de Catalão II, o qual pertence a APIP (GIBSON et al., 1995) que corresponde a uma série de intrusões alcalinas em metassedimentos neoproterozóicos da Faixa Brasília, geograficamente localizados entre a borda NE da Bacia do Paraná e a borda SW do Cráton do São Francisco (Figura 1.1).

Atribui-se aos Complexos Alcalinos de Catalão idade Neocretácea - complexos de Catalão II (83.4 ± 0.9 Ma, Rb-Sr, Machado Junior, 1992) e Catalão I (85 ± 6.9 Ma, K-Ar, Sonoki & Garda, 1988). Interpreta-se a intensa atividade magmática na APIP como resultado da instalação da pluma mantélica de Trindade sob a litosfera continental do Brasil Central a 90Ma. Como consequência, a fusão parcial mantélica gera volumosas massas magmáticas ultrapotássicas (GIBSON et al., 1995; THOMPSON et al., 1998; BROD et al. 2004; GASPAR et al 2000, PALMIERI, 2011).

Esses magmas de caráter alcalino pertencem a três séries petrogenéticas distintas: bebedourítica, foscorítica e carbonatítica, os quais se relacionam com as encaixantes e entre si por meio da combinação de cristalização fracionada, imiscibilidade de líquidos e degaseificação/metassomatismo (BROD, 1999; CORDEIRO et al., 2010; CORDEIRO et al., 2011a; CORDEIRO et al., 2011b; GRASSO, 2010; BARBOSA, 2009; RIBEIRO, 2008; PALMIERI, 2011).

2.1 Síntese da Geologia Local

Tanto Catalão I quanto Catalão II estão inseridos em rochas encaixantes pré-cambrianas que, de modo geral, são rochas pertencentes ao Grupo Araxá, mica-xistos e filitos, com lentes de quartzitos e anfibolitos. O comportamento regional da foliação possui direção NW-SE mergulhando para os quadrantes oeste. (BARBOSA et al., 1970).

A mina da Boa Vista situa-se na porção sul do Complexo de Catalão II (Figura 1.2) em estrutura de teto da câmara magmática. A mineralização é composta por diversos diques de rochas nelsoníticas alojados na rocha encaixante regional (Figura 2.1), que representa porção não erodida da cúpula da intrusão alcalina (“roof-pendant”). Esses diques de modo geral estão orientados na direção EW. As rochas alcalinas desenvolvem espessos horizontes de rocha alterada, que através do enriquecimento supergênico apresentam os maiores teores de forma residual (PALMIERI, 2011).

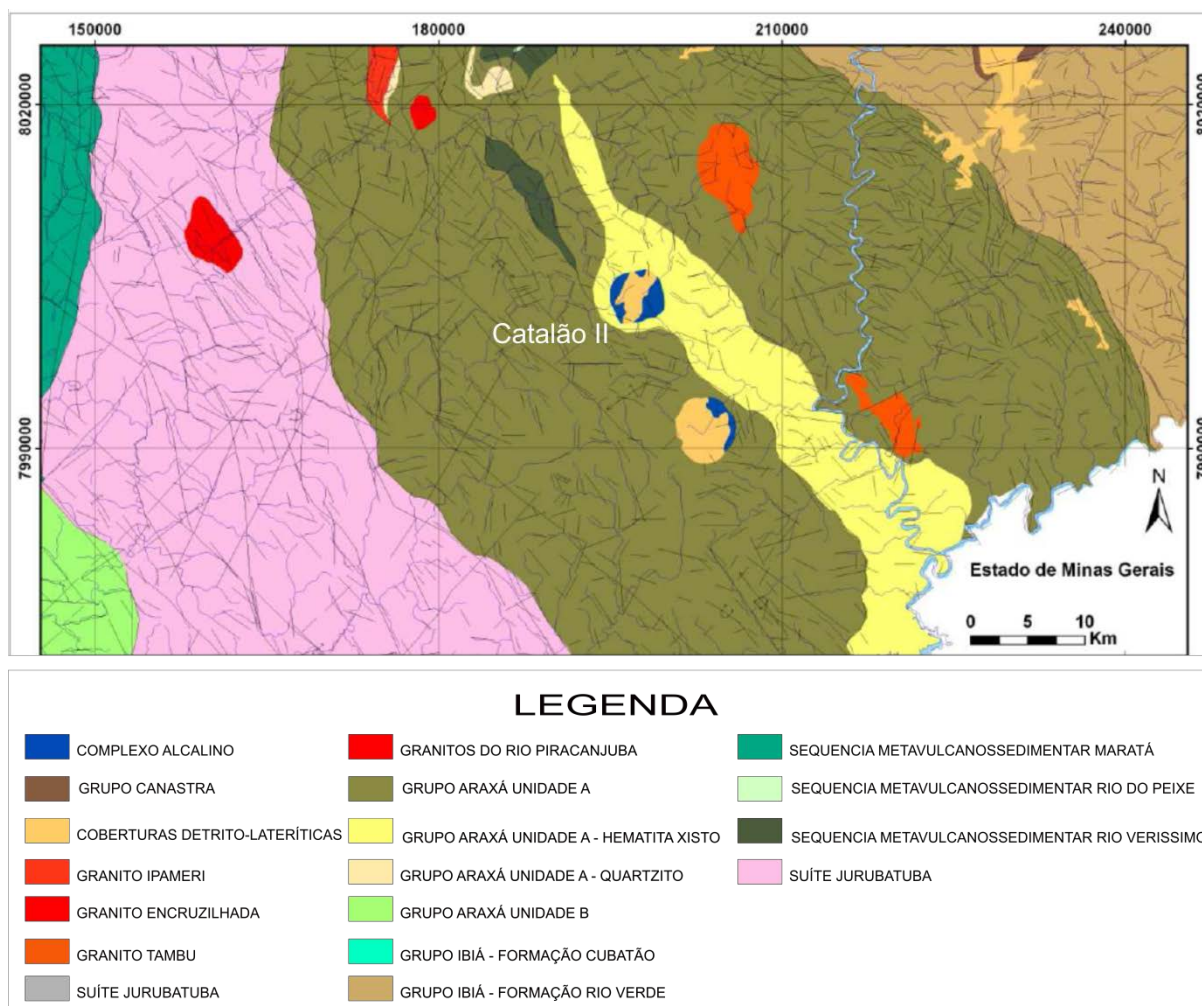


Figura 2.1 - Mapa geológico da região de catalão, destacando com a localização do complexo alcalino de Catalão II. Adaptado de Oliveira et al. (2004).

3 Métodos de trabalho

A fim de atingir os objetivos propostos, o presente trabalho foi desenvolvido em duas fases de trabalho. A primeira fase foi realizada durante o ano de 2013 em programa de estágio na Mina Boa Vista, e a segunda realizada no transcorrer do ano de 2015.

3.1 Primeira fase

Essa fase foi realizada ao longo do ano de 2013 e constituiu-se em atividades de campo durante programa de estágio e na fundamentação teórica realizada previa e concomitantemente ao estágio.

3.1.1 Fundamentação Teórica

Realizou-se uma ampla revisão das principais referências bibliográficas referentes à área de estudo, análise de dados geofísicos e relatórios fornecidos pela empresa, análise dos mapas topográficos, geológicos e de imagens aéreas da área.

3.1.2 Preparação

A etapa preparatória caracterizou-se no desenvolvimento de técnicas visando à adaptação e aquisição de conhecimentos preliminares dos procedimentos de segurança junto à equipe técnica de sondagem e de mina da divisão de Geologia da empresa mineradora. Além disso, essa etapa foi fundamental para o embasamento teórico e familiarização com a geologia da mina.

3.1.3 Acompanhamento de sondagem

Os furos realizados na porção noroeste da Mina Boa Vista foram fundamentais para a realização desse trabalho. Utilizou-se de sondagem rotativa com coroa diamantada com recuperação do testemunho (DD). No perfil intempérico a coroa usada é a carboneto de tungstênio com diâmetro de 63,5 mm, já em rocha fresca utiliza-se a diamantada com 47,6 mm de diâmetro.

Para instalação e operação da sonda em segurança foram aberto acessos e praças (Figura 3.1A). A operação iniciou-se através do barrilete acoplado à coroa diamantada perfurando o solo. O barrilete tem seu interior vazado o que preserva o testemunho que foi lavado e colocado em caixas de madeira para posterior descrição. Duas descrições geológicas distintas foram realizadas: uma chamada de *shortlog* feita na própria praça de sondagem (Figura 3.1) e outra realizada no galpão de geologia da empresa mineradora onde caracterizações tecnológicas, registros fotográficos e amostragem foram realizados.

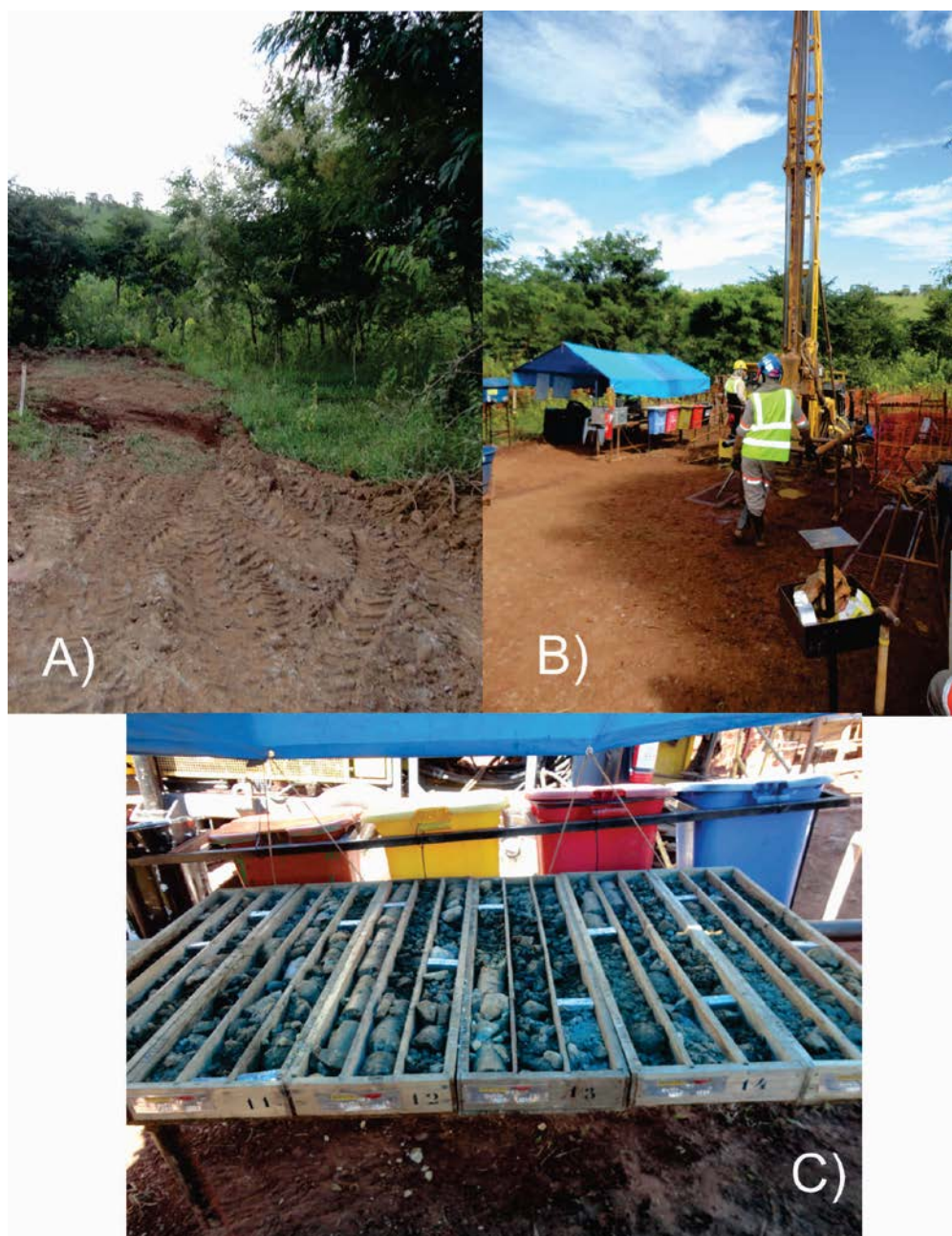


Figura 3.1 – Procedimento de execução de sondagem e amostragem de testemunhos. A) Abertura da praça para instalação da sonda. B) Sonda em operação C) Testemunhos dispostos em caixas com devida marcação métricas para descrição geológica.

O *shortlog* tem como foco a descrição litológica a fim de possibilitar ao geólogo de planejamento e recursos o acompanhamento do furo com resultados imediatos, aprimorando assim as seguintes locações e avanços da sondagem.

3.1.4 Descrição geológica, caracterização tecnológica e amostragem dos furos de sonda.

A etapa de descrição é sistematizada pela empresa, na qual os testemunhos são conferidos, identificados e dispostos em bancadas para descrição geológica, caracterização tecnológica e amostragem.

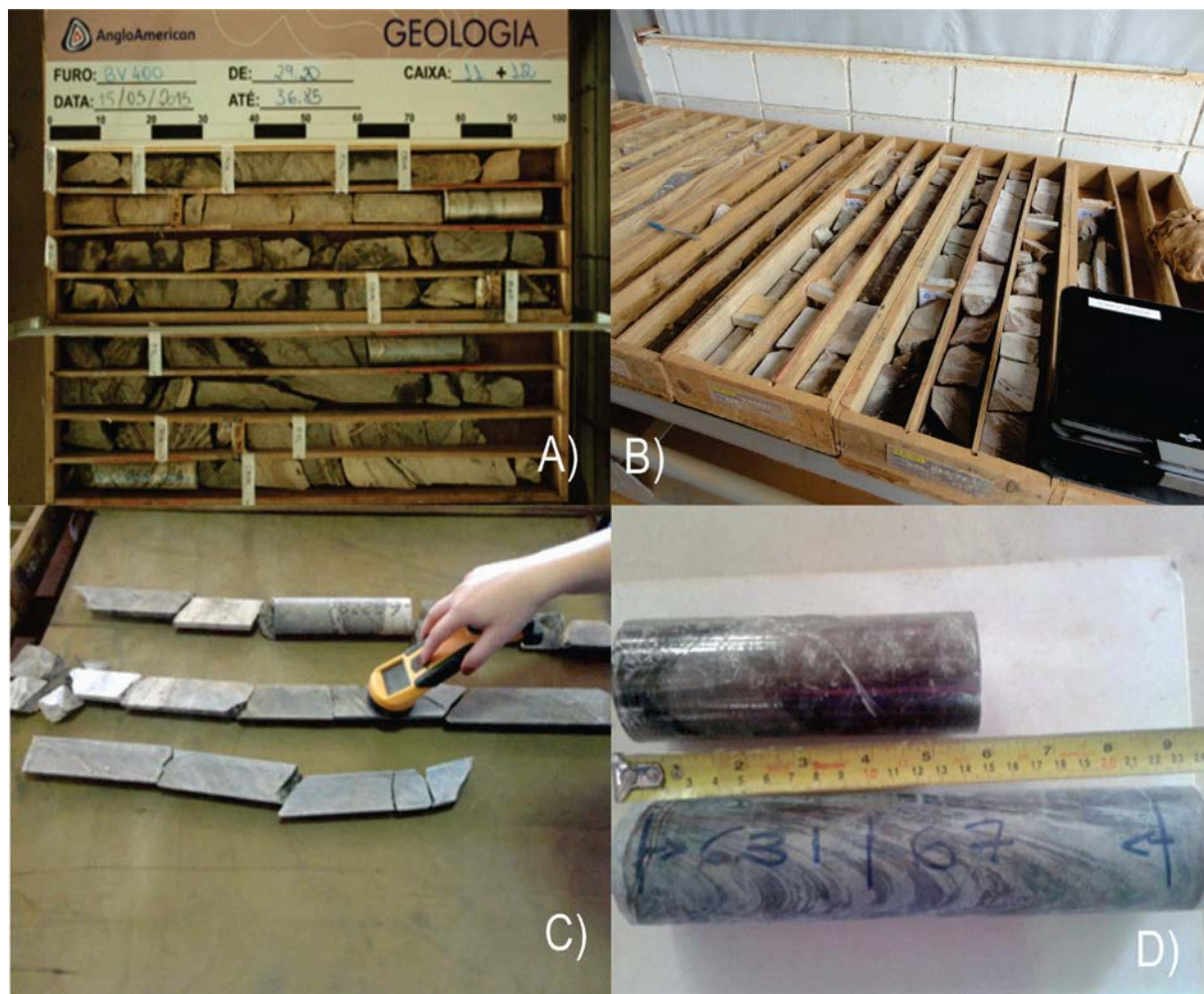


Figura 3.2 – Descrição geológica, caracterização tecnológica e registro fotográfico. A) Registro fotográfico da caixa de testemunhos com respectivas informações relevante para armazenamento em banco de dados interno da empresa B) Descrição geológica C) Medição da susceptibilidade magnética com o Susceptibilímetro Magnético - KT-10.

A descrição geológica é feita diretamente nos programas: 1) *GDMS* (*Geological Database Management System*), 2) *Fusion Client* e 3) *DH Logger*. O *GDMS* é o banco de dados no qual todas as informações necessárias para a descrição geológica estão contidas - como planilhas e furos de sondagem. O *Fusion Client* faz a ponte entre *GDMS* e o *DH Logger*, permitindo que o profissional que realiza a descrição geológica manipule os dados. O *DH Logger* é a ferramenta de descrição na qual o *log* do furo é confeccionado com as respectivas litologias e informações geológicas (Figura 3.3).

Drill Hole from: (0.00) to: (901.15)

Project: BV **Boa Vista** Hole No: BV448

Collar Details Samples

Mag Sus (0) UDEF_Geology (0)

	De	Até	SCANNER	LEITURA_1	LEITURA_2
IS 0					
20.90	46.00	49.70	.27		
RA 20.90	49.70	52.20	.22		
47.20	52.20	54.70	.12		
FEN 47.20	54.70	57.20	3.88		
50.70	57.20	59.70	4.32		
CB 50.70	59.70	62.20	.81		
56.20					

Figura 3.3 - Programa DH Logger ilustrando como o log do furo é montando e as informações da descrição e caracterização tecnológica são inseridas.

Considerando a grande heterogeneidade do depósito a descrição geológica foi feita por predominância litológica, sendo a menor unidade de descrição 10 cm.

A caracterização tecnológica consiste na medição da susceptibilidade magnética (SM) e no ensaio de densidade. A primeira é a medição da capacidade de o material magnetizar-se sob um estímulo magnético, o que possui fundamental relação com o depósito em questão visto a grande quantidade de magnetita associada ao minério. Leituras de SM foram feitas a cada 2,5 m (Figura 3.2C). Em relação à densidade, usam-se amostras de 20 cm (Figura 3.2D) do material fornecem dados importantes para o cálculo de recursos e reservas do depósito.

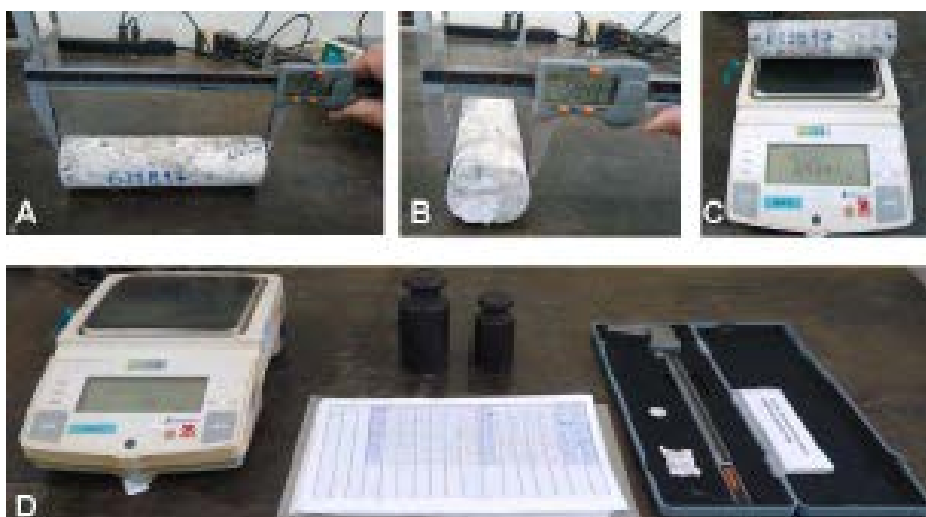


Figura 3.4- Figura mostrando diferentes passos do processo de calculo de densidade da amostra. A) medição longitudinal (04 medidas) da amostra. (B) medição do diâmetro (06 medidas). Em (C) medição da massa. Em (D) Material utilizado: paquímetro digital, balança digital, pesos padrão e planilha de registro e planilha de registro em papel (back up).

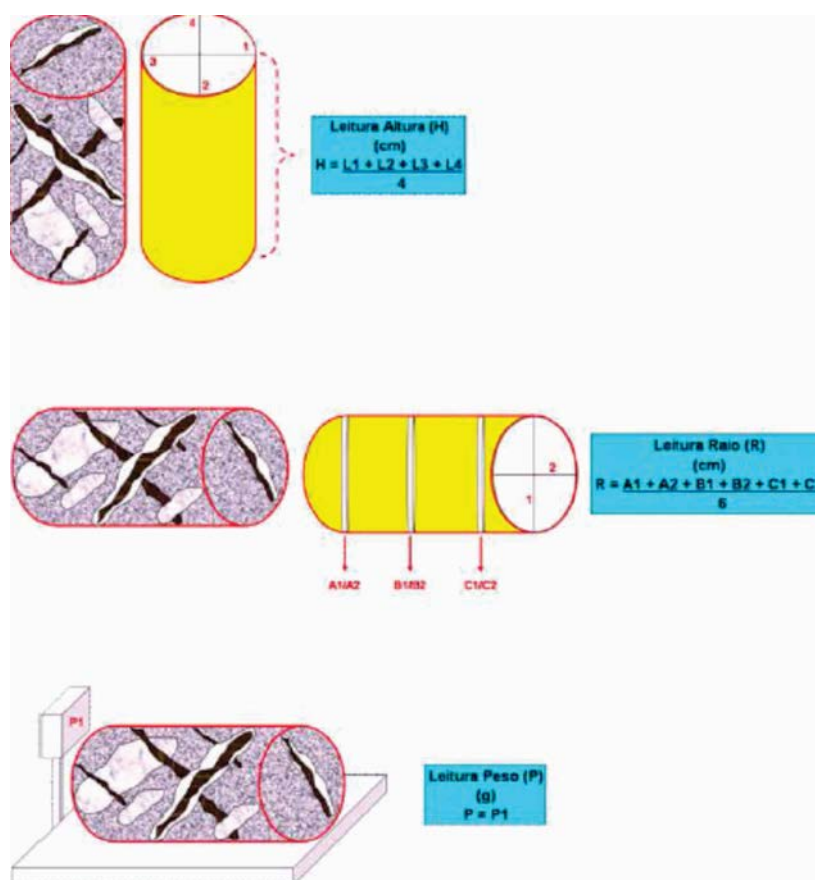


Figura 3.5- Esquema demonstrativo do procedimento do calculo de densidade (PALMIERI,2011).

Os ensaios de densidade são realizados em seções mineralizadas e estéril para posterior uso no cálculo da reserva. Fez-se uso da equação Densidade = Volume x Peso (para a determinação do volume utiliza-se a equação de corpos cilíndricos):

$$V = \pi . r^2 . h$$

$$\pi = 3,14$$

$$h = altura(cm)$$

$$r = raio(cm^2)$$

As medidas de altura (h) foram obtidas pela média de quatro medidas longitudinais da amostra e o raio pela média de seis medidas do diâmetro da amostra (Figura 3.5). Todas as dimensões utilizadas no cálculo de volume foram obtidas com o uso de paquímetro digital de precisão – *DIGIMESS*. A massa da amostra foi obtida através de balança digital de precisão – modelo *Explore da OHAUS*. (Figura 3.4).

Posteriormente, as amostras já serradas foram preparadas e analisadas nos laboratórios internos da empresa mineradora seguindo os procedimentos da empresa (WINTERBURN, 2004):

- a) Coleta-se metade do testemunho de sondagem em intervalos pré-definidos (intervalos de 2,5m);
- b) Secagem de 100% da amostra em estufa a temperatura de até 105 °C;
- c) Inserção de amostra branca (composta unicamente por quartzo para controle de qualidade das demais análises). Essa amostra é tratada igualmente as originais e é responsável pela determinação da eficiência e limpeza dos equipamentos. Uma amostra branca é inserida a cada 20 amostras originais, representando 5% do número total de amostras;
- d) Britagem primária de 100% da amostra em ¼ de polegada;
- e) Quarteamento primário (quarteador rotativo) até obtenção de 6-8 kg de material;

- f) Coleta de duplicatas de quarteamento a cada 20 amostras (5% do total) para controle de qualidade;
- g) Britagem secundária de 100% da amostra quarteada em 2 mm;
- h) Quarteamento secundário (quarteador rotativo) até obtenção de 500g de material;
- i) Coleta de duplicatas de quarteamento secundário a cada 20 amostras (5% do total) para controle de qualidade;
- j) Pulverização das amostras até obtenção de pelo menos 95% em 105 microns;
- k) Inserção de amostras padrão (Material de Referência Certificado) a cada 20 amostras originais (5% das amostras) para controle de qualidade;
- l) Análise da pastilha fundida com metaborato de lítio, por fluorescência de raios-X;
- m) Checagem dos resultados analíticos e do controle de qualidade;
- n) Inserção das informações no banco de dados.

Amostras brancas e duplicatas são exigências de códigos internacionais para garantir e demonstrar a qualidade e precisão na preparação e análise das amostras. A amostra branca serve para garantir a ausência de contaminação no processo de preparação, já as duplicatas visam averiguar a qualidade do processo de quarteamento a fim de garantir que o mesmo material encontra-se em todas as alíquotas.

Ao final, os resultados finalizados foram inseridos no *GDMS (Geological Database Management System)*. As análises químicas associadas aos logs de sondagem foram importados no software de modelagem geológica e auxiliaram na correlação de teores e litotipos.

3.1.5 Atividades de campo

As atividades de campo realizaram-se na Mina Boa Vista, Catalão - GO. Essas consistiram em:

1. Descrição de furos de sondagem partindo da rocha fresca até a superfície;
2. Amostragem de testemunhos de rocha fresca e rocha alterada;
3. Descrição de afloramentos na porção noroeste da mina, expostos pelas atividades de lavra, com o objetivo de conhecer os principais horizontes;
4. Confeção de *logs* de sondagens para posterior utilização nas atividades de mapeamento, construção do perfil de alteração e modelamento geológico;
5. Registro fotográfico dos testemunhos mais representativos para ilustração e comparações.
6. Nessa etapa foram descritos 3400m de testemunhos de sondagem, representados em 36 furos distintos. A amostragem, preparação e análise química foram realizadas nos laboratórios da empresa Anglo American Nióbio Brasil Ltda. e seguiram os procedimentos padrão da mesma.
7. As descrições geológicas junto aos resultados laboratoriais foram inseridas no sistema de armazenamento de dados internos da empresa, GDMS (*Geological Database Management System*).

3.2 Segunda fase

Essa fase do trabalho foi realizada durante o ano de 2015 a qual consiste em cinco etapas distintas: (1) Organização e análise do banco de dados, (2) Modelamento tridimensional, (3) Amostragem, (4) Atividades laboratoriais, (5) Integração dos dados e confecção do Relatório Final. A descrição pormenorizada das atividades executadas e das técnicas utilizadas será discutida nos capítulos de apresentação de resultados do relatório final dessa monografia.

3.2.1 Organização e análise do banco de dados

Essa fase de trabalho consistiu em filtrar e organizar os dados adquiridos nas atividades de campo da primeira etapa. Esses dados foram acessados através do sistema de armazenamento de dados GDMS e importados no software de modelagem geológica *Leapfrog Geo*. A licença utilizada foi estudantil concedida pela empresa *ARANZ Geo* responsável pelo software. O

GDMS possibilita superposição dos *logs* da descrição geológica dos furos de sondagem com as análises químicas (%Nb₂O₅).

3.2.2 Modelamento tridimensional

Com o uso do software *Leapfrog* foram feitas seções de orientação norte-sul (o corpo mineralizado encontra-se E-W) a partir dos furos descritos previamente a fim de compreender o comportamento dos teores no do perfil de alteração. Utilizando do mesmo software foi delimitada e mensurada a superfície limítrofe entre perfil intempérico e rocha.

3.2.3 Amostragem

Coleta de amostras sistematicamente fotografadas e catalogadas de maneira representativa dos distintos litotipos em frente de lavra para fins de caracterização mineralógica e análises químicas subsequentes.

3.2.4 Atividades Laboratoriais

Essa etapa de trabalho constituiu-se na caracterização petrográfica e mineralógica dos minerais primários e secundários dos diferentes litotipos encontrados na área de estudo a partir das amostras coletadas. Para tal foram realizadas as seguintes atividades:

- a) Confecção de lâminas petrográficas: As lâminas foram confeccionadas nos laboratórios internos do Departamento de Petrologia e Metalogenia (DPM), do Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) da Unesp de Rio Claro, a partir de amostras de rocha são coletadas em campo e também de testemunhos de sondagem a fim de caracterizar o protolito mineralizado;
- b) Descrição de lâminas petrográficas: as descrições das lâminas foram realizadas no laboratório de microscopia do DPM;
- c) Análises químicas (Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X): O procedimento de análise química foi realizado no laboratório interno da empresa Anglo American Nióbio Brasil Ltda., o qual visa à determinação dos teores de Nb₂O₅;
- d) Análise de lâminas com Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV): Nessa etapa foi utilizado o MEV da marca JEOL modelo JSM 6010 LA do DPM da Unesp de Rio Claro. O equipamento é equipado com detector do tipo EDS, que foi utilizado para

identificação de minerais acessórios, bem como para análise semi-quantitativa do pirocloro. As condições de operação variaram dependendo do material analisado. Mas, em geral, utilizou-se aceleração de 20 kV. Para imageamento, utilizou-se o detector de elétrons retroespalhados (BSE) em modo composicional. As lâminas analisadas foram previamente metalizadas com carbono para garantir condutividade ao material.;

- e) Integração dos dados e confecção do Relatório Final.

4 Fundamentação Teórica

4.1 Caracterização Geológica

A jazida de nióbio de Catalão II tem na mineralização primária em rocha sã o pirocloro como mineral de minério, porém a lavra é realizada nos depósitos supergênicos existentes no manto de intemperismo. A mineralização primária é tipicamente um *stockwork* de veios de espessura centimétrica a decimétrica de pirocloro-nelsonito alojados em rochas metassedimentares fenitizadas (metassomatismo provocado por rochas alcalinas), que representam um *roof-pondant* (porção do teto da cúpula magmática preservada no interior da intrusão). Essa estrutura (Figura 4.1) faz com que as rochas magmáticas cristalizem-se sob esse teto e apenas frações magmáticas derivadas mais fluidas consigam penetrar em planos de descontinuidade – fraturas, plano de falhas ou foliação das rochas metassedimentares encaixantes (PALMIERI, 2011.).

A mineralização de nióbio pode ser entendida como a evolução de um magma silicático alcalino, que por processos de imiscibilidade de líquidos, se diferencia em dois líquidos distintos: (a) um líquido silicático empobrecido em CO₂, rico em Si, Al, Ti, Zr, Hf, Nb, Ta, Th, que vai formar piroxenitos, dunitos e até sienitos, e (b) um outro líquido mais fluido, rico em Na, K, Ca, Mg, Fe, CO₂, ± ETR, formador de carbonatitos.

O líquido carbonatítico, por sua vez, pode continuar a se diferenciar, tendo como resultado: (b') líquido carbonatítico mais puro, e (b'') um líquido foscorítico, onde são encontradas as principais mineralizações de interesse, no caso o pirocloro e apatita. A evolução do líquido foscorítico, através da cristalização prioritária de olivina, pode gerar um líquido rico em magnetita e/ou apatita, denominado nelsonito, a principal rocha portadora de pirocloro.

A mineralização secundária se dá com a conversão do pirocloro em Ba-pirocloro durante o intemperismo, mas sem alterações expressivas no seu teor de Nb_2O_5 . O mineral neoformado, Ba-pirocloro, é resistado frente ao processo intempérico e concentra-se residualmente no solo formando os espessos horizontes mineralizados de rocha oxidada (BROD, 2001).

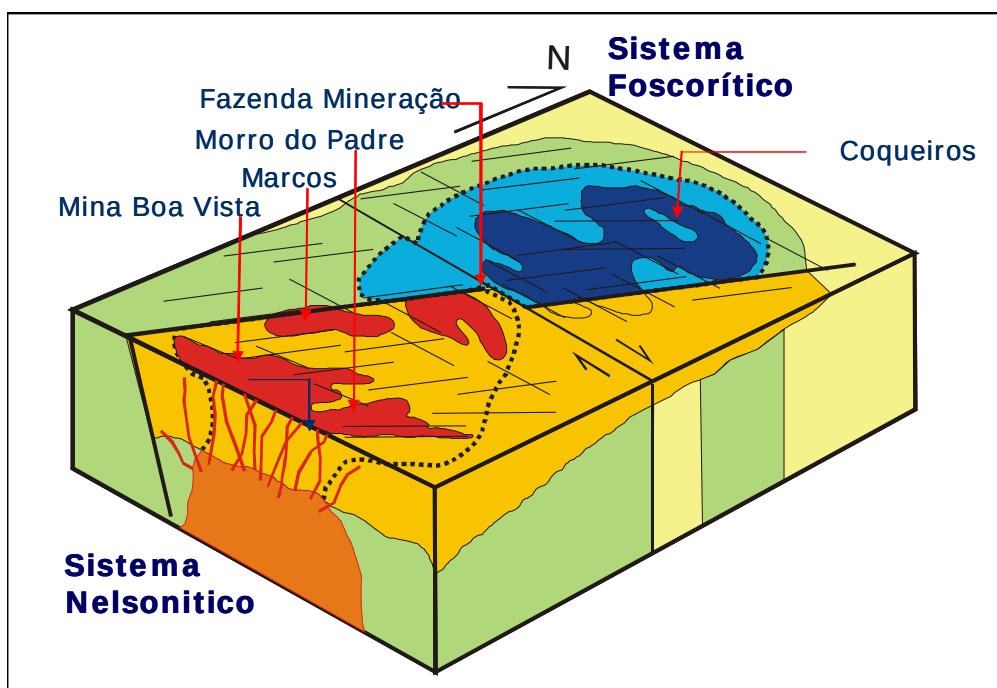


Figura 4.1 - Bloco diagrama mostrando o Sistema Nelsonítico ao sul (sistema de mineralizações de nióbio), onde pode-se ver a câmara magmática (laranja) sob teto de rochas encaixantes (amarelo) e os veios e diques de rochas magmáticas penetrando nas rochas encaixantes (vermelho); e Sistema Foscorítico ao norte (sistema de mineralizações de fosfato). Palmieri, 2009

4.1.1 Ação do intemperismo

Pacotes espessos são formados através da ação do intemperismo tropical de rochas expostas aos seus agentes manifestando-se através de perfis lateríticos. Os perfis são estruturados em horizontes típicos (crosta, horizonte argiloso, saprolito e rocha-mãe) resultantes da diferenciação textural, estrutural, mineralógica, química (domínio de Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 e H_2O , predominantemente) e isotópica durante a formação do perfil ao longo do tempo geológico (desde o Proterozóico) em vários eventos distintos. Também são importantes processos formadores de depósitos minerais (Al, Fe, caulim, Ni, Mn, Au, Pt, Nb, Ti, P e outros), além de constituírem importantes registros paleoambientais (COSTA 2007).

Os perfis lateríticos ocorrem em diversas regiões do planeta, que embora formados desde o Proterozóico, concentram-se primordialmente no Cenozóico, nas atuais zonas intertropicais.

Os perfis podem ser truncados pela erosão, transportados, deformados por tectônica, alterados por metamorfismo, diagênese e pedogênese, imprimindo-lhes mudanças mineralógicas, químicas e texturais.

As rochas silicáticas, carbonatíticas e fosfáticas dos complexos alcalinos são alteradas com relativa facilidade durante o intemperismo químico, tendo em vista seu grande conteúdo de carbonatos e outros minerais suscetíveis ao intemperismo, como silicatos ferromagnesianos (olivina, piroxênio, flogopita) e perovskita (BROD, 2001).

Por outro lado, segundo Brod 2001, as principais jazidas contidas nestes complexos são constituídas de minerais relativamente resistentes ao intemperismo, como a apatita, ou de produtos intempéricos estáveis, como o pirocloro, anatásio e vermiculita, que permanecem no solo residual. Deve-se salientar que o intemperismo também pode atuar no sentido de destruir as concentrações econômicas, especialmente no caso do minério de fosfato.

Embora a apatita seja um mineral relativamente resistente à alteração intempérica, se a intensidade dos processos for extremas, o que normalmente ocorre nas porções mais superiores do perfil, o cálcio será lixiviado da estrutura da apatita e o fósforo utilizado na cristalização de fosfatos aluminosos secundários (goiazita e gorceixita) que não possuem aproveitamento econômico (BROD, 2001).

Os aspectos relevantes do intemperismo na economicidade dos depósitos podem ser sumariar como segue:

- a) O processo de concentração residual no perfil de solo resulta em um aumento nos teores de fosfato (apatita), nióbio (pirocloro), titânio (anatásio) e vermiculita, relativamente à rocha fresca;
- b) Contaminantes importantes, como o Mg nas jazidas de fosfato, são parcialmente eliminados (lixiviados) durante o processo de intemperismo, embora outros, como o ferro e o manganês, possam ser relativamente concentrados;
- c) Os depósitos contidos no perfil de intemperismo são mais homogêneos do que as mineralizações primárias da rocha fresca;

d) A lavra do manto de intemperismo é mais simples e barata do que a lavra da rocha fresca, por ser o material mais friável;

e) Intemperismo de intensidade muito alta, especialmente na região mais superficial do perfil de alteração, provoca a destruição dos minerais de minério cristalização de fosfatos aluminosos secundários, gerando uma cobertura de poucos metros de estéril sobre os depósitos.

4.1.2 Rocha fresca

Ao longo de décadas de atividade mineral nos complexos alcalino-carbonatíticos do Alto Paranaíba, estabeleceram-se termos variados para descrever produtos do perfil intempérico, minérios e rochas dos complexos a fim de facilitar o trabalho no dia-a-dia. Estes termos muitas vezes são imprecisos e misturam conceitos referentes à composição, textura e economicidade, porém, consolidaram-se pela tradição e uso, migrando até para a literatura científica, causando confusão nas descrições e interpretações sobre os complexos. Muitas vezes utilizam-se terminologias distintas, de um complexo para outro ou de uma mina para outra, para designar minérios e rochas que são idênticos ou muito semelhantes. Outro exemplo é a utilização do termo “carbonatito” para designar genericamente a rocha fresca do substrato independentemente de sua composição. Em Catalão II, especificamente, esse fenômeno se dá com as rochas metapelíticas do Grupo Araxá, que ao passarem pelo processo de fenitização (transformações químicas, recristalização ou formação de novos minerais pelo processo de metassomatismo no caso específico de magmas alcalinos) são denominadas de fenito.

Essas diversas terminologias não eram consideradas problemática fundamental enquanto a lavra se desenvolveu exclusivamente na porção superior dos depósitos supergênicos (minério oxidado), mais homogênea e de mais alto teor. Entretanto, ao passo que a lavra ia evoluindo e migrando gradativamente porções mais profundas do manto de intemperismo – nas quais as heterogeneidades da rocha fresca exercem uma influência maior sobre a qualidade, quantidade e geometria do minério – criou-se a necessidade de compreensão e caracterização dos distintos litotipos do substrato.

4.2 Nióbio

O Nióbio é um metal de transição pertencente à família 5-B da tabela periódica, de coloração branca prateada a cinza azulada – em função de reações químicas com gases presentes no ar atmosférico. Suas principais propriedades estão na sua dureza e resistência ao calor, o que o coloca em papel de destaque na metalurgia.

O símbolo desse metal é Nb, possui número atômico 41, e configuração eletrônica $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^3$, massa atômica 92,90u, ponto de fusão 2477°C , ponto de ebulição 4744°C .



Nióbio (Nb)

O QUE É
Elemento químico metálico, de símbolo Nb. O nome deriva da deusa grega Niobe, filha de Tântalo

CARACTERÍSTICAS
É um dos metais que mais resistem à corrosão e é um elemento supercondutor

Ponto de fusão ou derretimento	2468°C
Ponto de evaporação	4744°C

APLICAÇÕES
É usado principalmente na produção de ligas de aço de alta resistência, com aplicações na construção civil, na indústria mecânica, aeroespacial, naval, automobilística e nuclear, entre outras

ONDE É ENCONTRADO
O Brasil detém as maiores reservas conhecidas de nióbio (98,43%), seguido pelo Canadá (1,11%) e Austrália (0,46%). No país, as jazidas conhecidas estão em Minas Gerais (75,08% - Araxá e Tapira), Amazonas (21,34% - São Gabriel da Cachoeira e Presidente Figueiredo) e em Goiás (3,58% - Catalão e Ovidor)

Figura 4.2 - Imagem ilustrativa do material de divulgação da empresa Anglo American sobre o Nióbio

4.2.1 História do nióbio

Inicialmente o nióbio era denominado de elemento 41 e foi descoberto na Inglaterra em 1801, por Charles Hatchett ao examinar uma amostra de rocha proveniente dos Estados Unidos para o Museu Britânico onde trabalhava o pesquisador. Ele deu o nome de "columbium" ao novo elemento em função do mineral columbita presente na rocha.

Heinrich Rose, um químico alemão, em 1844 acreditava ter descoberto um elemento inédito quando manipulava amostras de tantalita. Nomeou o elemento de "niobium" inspirado em Níobe - a filha do Rei Tântalo, da Mitologia Grega. Porém trava-se do mesmo elemento já descoberto por Charles Hatchett. Em 1950, foi adotado oficialmente pela União Internacional de Química Pura e Aplicada - IUPAC o nome oficial de nióbio para o elemento 41.

As primeiras reservas expressivas de Nióbio descobertas no mundo – Oka no Canadá e Araxá no Brasil - em 1950 alavancaram a aplicação industrial do elemento, que era apenas um subproduto da produção de tântalo.

Assim o metal ganhou importância no desenvolvimento de matérias industriais e de engenharia. O início da corrida espacial, o desenvolvimento da medicina e a criação do aço microligado serviram de propulsão para a produção de nióbio.

A entrada da empresa *Great Lakes Steel* no mercado, em 1958, introduzindo o aço microligado em uma série contendo aproximadamente 400g de nióbio por tonelada, garantindo a liga propriedades como a resistência mecânica e tenacidade de maneira simultânea, impactaram até os dias de hoje a produção de aço.

Outra descoberta relevante foi o conceito de microligas, as quais representam o uso mais importante do nióbio atualmente. Essas consistem na adição de pequenas quantidades de nióbio ao aço carbono comum, melhorando consideravelmente as propriedades da liga. Isso levou à utilização em grande escala trazendo grandes avanços econômicos e tecnológicos para a engenharia estrutural, para a exploração de óleo e gás e para a fabricação de automóveis.

4.2.2 Beneficiamento

O beneficiamento inclui britagem, moagem, separação magnética, espessamento, filtragem, lixiviação e secagem, resultando na produção de concentrado de pirocloro que, depois, é transformado em ferro-nióbio pelo processo aluminotérmico.

4.3 Avaliação de um depósito mineral

4.3.1 Amostragem de depósitos minerais

O início da avaliação de um depósito mineral se dá com a amostragem, a qual objetiva determinar a geometria do corpo mineralizado, teores e distribuição espacial.

“A importância da prática da amostragem sobressai-se, principalmente, quando entra em jogo a comercialização do todo e os casos de pesquisa ou controle operacional. Portanto, uma amostragem mal feita pode representar um prejuízo vultoso ou uma distorção de resultados de sérias consequências técnicas, muito embora o método analítico empregado possa oferecer grande precisão” (TRAJANO, 1963).

Na investigação tridimensionalmente do corpo mineralizado usa-se a sondagem como principal ferramenta, a qual pode ser a percussão, rotopercussão e rotativa, sendo a escolha do tipo de sondagem pertinente ao tipo de depósito mineral prospectado. Mas, na maioria dos empreendimentos mineiros e no alvo estudado no presente projeto, o método mais utilizado é a sondagem rotativa, pois permite obtenção do registro geológico – testemunho – a um custo acessível.

4.3.2 Recursos e Reservas Minerais

Segundo Yamamoto (2001), tem-se a terminologia Reserva Mineral corretamente aplicada quando por meio de medições físicas do teor do minério e da quantidade de concentração mineral foram feitas *in situ*, somado a viabilidade tecnológica de sua extração com lucros hoje e em um futuro próximo. Não possuindo a economicidade e viabilidade tecnológica, classifica-se como recursos minerais.

Tem-se como principal objetivo da classificação de reservas minerais a caracterização da quantidade de material, bem como o grau de certeza associado a esta quantidade (FROIDEVAUX, 1982).

Previamente ao cálculo da reserva mineral de um determinado depósito, um procedimento técnico deve ser seguindo: amostragem, composição das amostras dos furos de sonda, construção de seções geológicas, compreensão da complexidade do depósito, análise estatística e geoestatística. Além disso, a variabilidade natural do depósito em termos geológicos e geométricos – estruturas geológicas, a complexidade da mineralização e forma do corpo de minério – é fundamental para a classificação de reservas e recursos minerais de um dado depósito (DIATCHKOV, 1994).

Torna-se, então, fundamental em qualquer análise conhecer o tipo de variável que se está utilizando. Nesse trabalho, fez-se o uso de variáveis tanto quantitativas – teores e recuperação - quanto qualitativas – litotipos.

A partir do nível crescente de conhecimento do depósito os recursos são classificados como inferido, indicado e medido. O parâmetro econômico fundamental para definição prévia de viabilidade é o teor de corte que é aplicado no cálculo desses recursos. Para consolidação do recurso como reserva são considerados fatores econômicos como: de mineração (lavra), metalúrgicos, mercadológicos e logísticos, legais, ambientais, sociais e políticos. (YAMAMOTO, 2001).

Fazendo uso das variáveis de interesse, estimadas através dos métodos de pesquisa mineral, calculam-se dos recursos de um determinado depósito. Quando o depósito possui a densidade aparente estimada usa-se:

$$R = V.d.T$$

R = recurso em peso

V = volume

d = densidade aparente

T = teor em porcentagem

5 Resultados

Nessa seção serão discutidos e apresentados os resultados obtidos no decorrer desse trabalho.

5.1 Caracterização petrográfica, química e mineralógica dos litotipos presentes na área de estudo.

Ao longo da campanha descritiva dos furos de sondagem caracterizaram-se os diversos litotipos encontrados buscando compreender sua mineralogia, relações de contato e forma de ocorrência.

Em resumo, na mina Boa Vista em Catalão II, o substrato rochoso é bastante heterogêneo e composto de misturas variadas entre os seguintes litotipos:

- a) **Filitos/Fenitos:** Rochas encaixantes das rochas alcalinas, as quais passaram pelo processo de fenitização. Compostas por feldspato, quartzo, flogopita, carbonato e clorita;
- b) **Anfibolitos:** Rochas também encaixantes que tem como possível protólito intrusões básicas nos metapelitos do Grupo Araxá (Filitos/Fenitos). De composição variada de augita, biotita, apatita, magnetita e zircão, com anfibólio, feldspato potássico, titanita, calcita e minerais acessórios;
- c) **Nelsonito (mineralizado):** Rocha constituída essencialmente de apatita e magnetita, com flogopita, pirocloro e olivina subordinados. Carbonato (calcita e/ou dolomita) é comum, como material intersticial e como bolsões centimétricos. É a rocha hospedeira da mineralização primária nos depósitos de nióbio de Catalão;
- d) **Carbonatitos calcítico:** Rocha composta essencialmente de calcita, mas pode conter quantidades subordinadas de dolomita, apatita, magnetita e flogopita primária;
- e) **Carbonatitos dolomítico:** Rocha composta essencialmente por dolomita, com ou sem presença de calcita subordinada, e rara magnetita e flogopita. A dolomita geralmente contém um pouco de Fe e Mn em solução sólida. Barita pode estar presente;
- f) **Flogopita Picrito:** Considerado como o magma mais primitivo do complexo é encontrado intrudindo todas litotipos. Rocha composta por quantidades variáveis de olivina, diopsídio, apatita, magnetita, perovskita, magnetita e flogopita. Granadas de titânio (melanita) e titanita podem também ocorrer em menor proporção.

5.1.1 Descrição e caracterização mineralógica

5.1.1.1 Picrito

O picrito corre como diques de espessura variável, não ultrapassando cinco metros, com textura afanítica a subfanerítica. É composto principalmente por flogopita, magnetita dispersa, olivina, diopsídio, apatita, perovskita, carbonato intersticial e glóbulos de carbonato (figura 5.2). Pode ocorrer com textura brechóide (brechas de conduto) ou homogênea. Esse litotipo é caracterizado como magma primitivo do complexo (de composição ultramáfica), mas cronologicamente – em função eventos magmáticos posteriores – corta todos os litotipos (figura 5.1).



Figura 5.1 - Amostra de testemunho de sondagem de um filito. O contato abrupto entre o dique de picrito (à direita) de coloração verde com fenocristais de olivina arredondados e xenólitos da rocha encaixante. Observa-se também que um dique de carbonatito de espessura milimétrica anterior ao dique picritico é cortado pelo mesmo. À esquerda encontra-se a rocha encaixante do complexo o Filito/Fenito.



Figura 5.2 - Amostra de testemunho de sondagem de filito. Descrição: rocha de coloração verde escuro, macica, afanítica e não magnética. Apresenta glóbulos de carbonato e fenocristais de olivina que não ultrapassam 1cm.

5.1.1.2 Carbonatito

Os carbonatitos representam o segundo litotipo mais abundante na área apenas atrás dos fenitos e podem ser divididos em duas gerações:

- a) Branco acinzentado, relativamente puro, com granulação muito grossa a média, ocorre relacionado às rochas encaixantes do complexo. Apresentando xenólitos de fenito flogopitizados, de tamanhos variados. Cristais de magnetita e illmenita são

encontrados em diversos tamanhos em sua matriz. Sulfetos também ocorrem em menor escala;

- b) Rico em apatita (ocorrendo em cristais até centimétricos, Figura 5.10) e sulfetos. Esse carbonatito imiscível ocorre como bolsões de tamanhos centimétricos a métricos, aumentando em direção ao centro do dique. Apresenta granulação fina a muito grossa, com coloração bege a amarelado (quase esverdeada quando apresenta maiores concentrações de monazita), textura inequigranular fanerítica a porfirítica. Sua mineralogia é composta por dolomita, magnetita, flogopita e monazita. .

Em função dos diversos pulsos magmáticos do depósito, também é comum encontrar na área rochas denominadas brechas de conduto, que nada mais são do que brechas hidráulicas causadas pela passagem de um magma com pouca fluidez pelas fraturas da rocha encaixante (Figura 5.3), na qual os clastos aparecem flogopitizados em suas bordas.

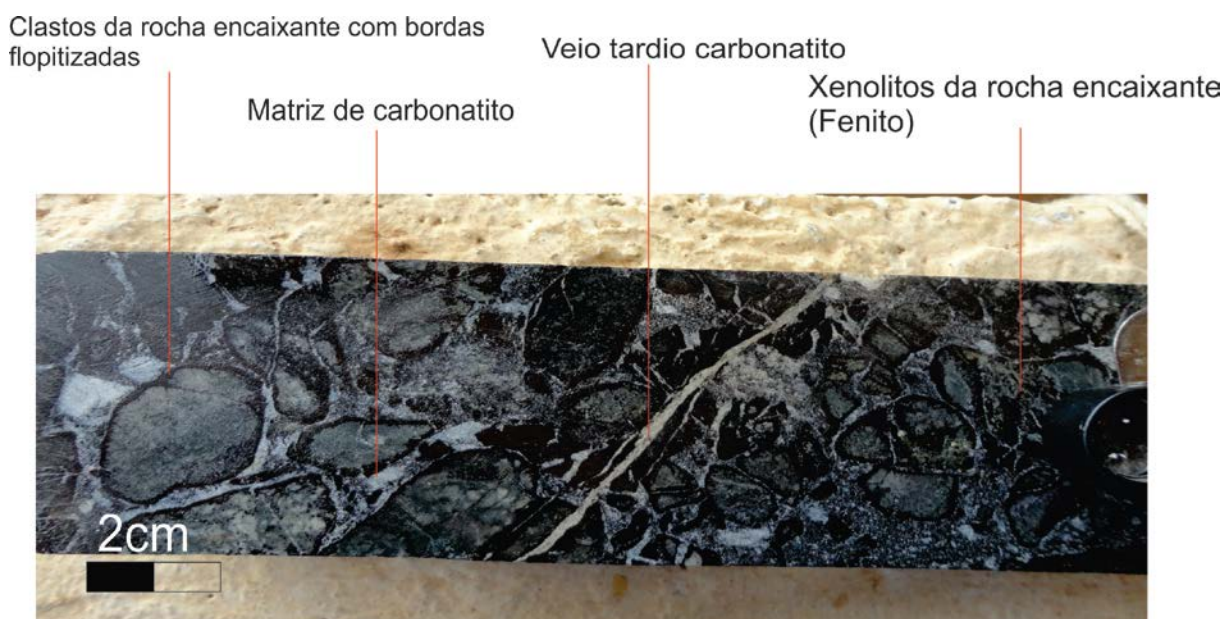


Figura 5.3 – Brecha de conduto com clastos da rocha encaixante fenitizados.



Figura 5.4 – Mg- Carbonatito apresentando monazita (porções amareladas) e sulfetos já oxidados. Rocha de coloração esbranquiçada, fanerítica fina, estrutura maciça. A mineralogia da rocha é composta por: matriz de carbonato, com magnetita, monazita, calcopirita e pirita.



Figura 5.5 – Ca-Carbonatito com magnetita flogopita e ilmenita espalhada pela rocha e sulfetos oxidados. Rocha de coloração esbranquiçada, fanerítica fina a média, estrutura maciça. Rocha pouca magnética e textura inequigranular. matriz de ca-carbonato, com presença de flogopita 10%, magnetita 5%, ilmenita 5%, calcopirita 3%. Cristais de ilmenita centimétricos, prismáticos e eudrais.

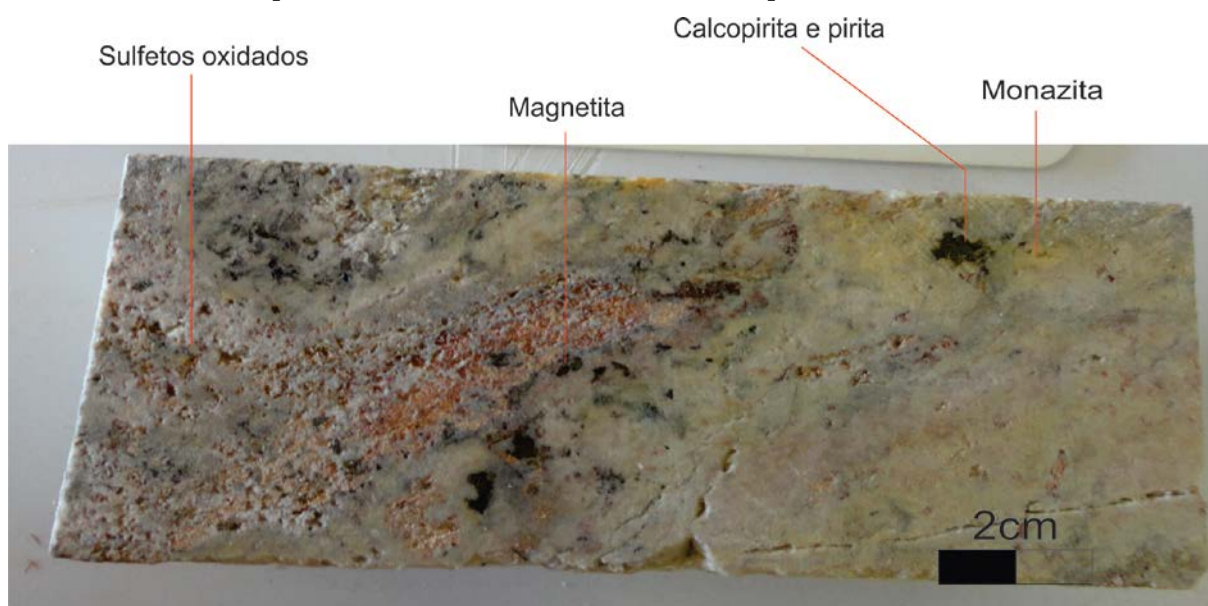


Figura 5.6- Mg- Carbonatito apresentando monazita (porções amareladas) e sulfetos já oxidados. Rocha de coloração esbranquiçada, fanerítica fina, com estrutura maciça, não magnética. Ocorre a presença de sulfetos disseminados na matriz de carbonato, como pirita e calcopirita.



Figura 5.7 – Dique de Ca-carbonatito com ceistras alongados de pirrotita (magnéticos) indicando resfriamento rápido. Os cristais concentram-se perpendiculares a parede dos diques indicando três fluxos distintos.

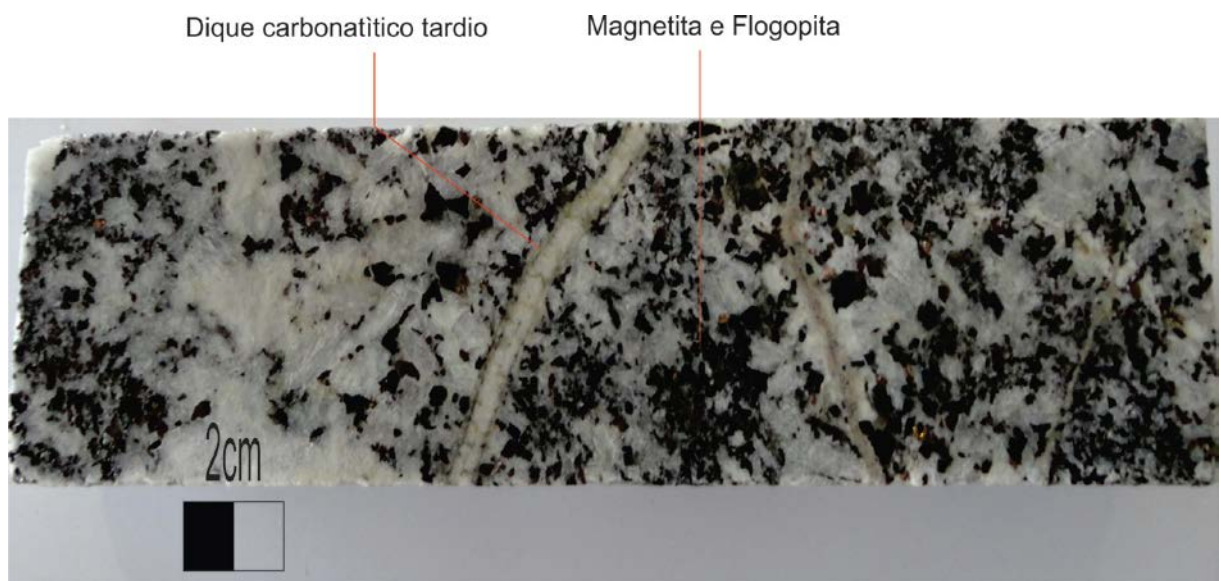


Figura 5.8 – Ca-Carbonatito com magnetita flogopita e ilmenita espalhada pela rocha. Rocha de coloração esbranquiçada, fanerítica média, com estrutura maciça e magnética nas porções com magnetita. A mineralogia da rocha é composta pela matriz carbonatica, com presença de magnetita flogopita.



Figura 5.9 – Contato abrupto entre dique de Ca-Carbonatito e a Fenito com intensa flogopitização. A rocha ígnea possui cristais centimétricos de apatita e flogopita.



Figura 5.10 – Amostra com cristais de apatita centimétricos, flogopita e magnetita também ocorrem associados a eles, a matriz trata-se de um Ca-Carbonatito

5.1.1.3 Nelsonito

O nelsonito é a rocha hospedeira da mineralização primária dos depósitos de nióbio de Catalão. Essa rocha é constituída essencialmente de apatita (Figura 5.11 e Figura 5.12) e magnetita, com flogopita podendo conter olivina em menores proporções. O mineral de minério pirocloro nem sempre está presente e a fração de carbonato (calcita e/ou dolomita) é comum, como material intersticial ou bolsões centimétricos (Figura 5.12 e Figura 5.15). Aparentemente os diques nelsoníticos aproveitam fraturas antigas para ascender e possuem direção preferencial E-W acompanhando fraturas regionais.

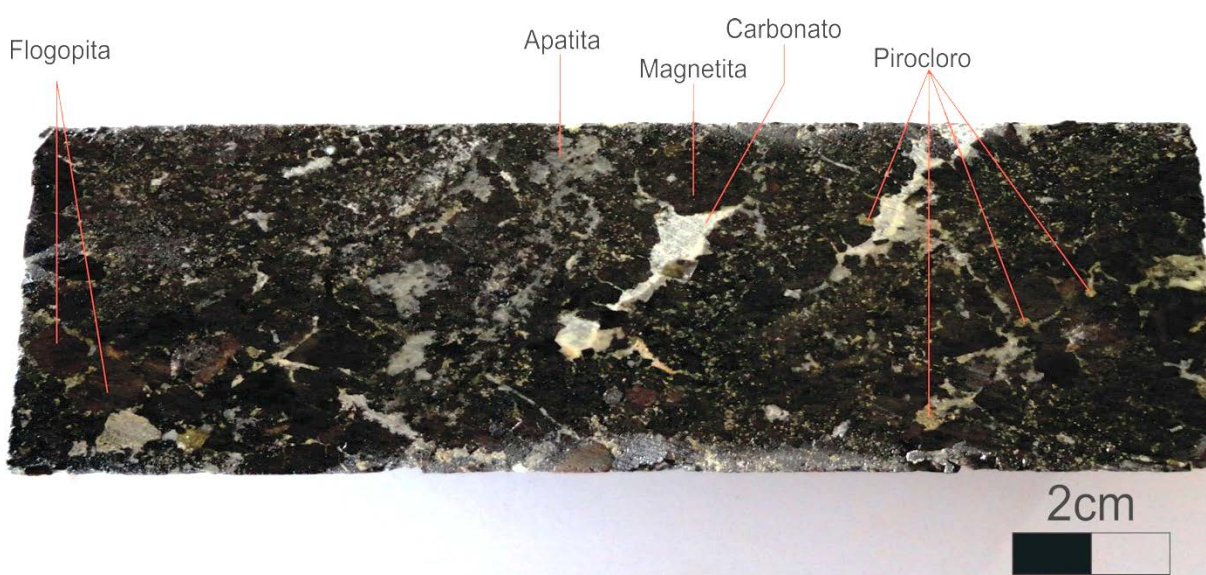


Figura 5.11 – Apatita Nelsonito com presença de calcopirita. Rocha de coloração escura, fanerítica fina, com estrutura maciça e fortemente magnética. Os minerais constituintes da rocha são: Magnetita 40%, flogopita 15%, apatita 10%, pirocloro 10%, ilmenita 10%, carbonatos 14%, calcopirita 1%.

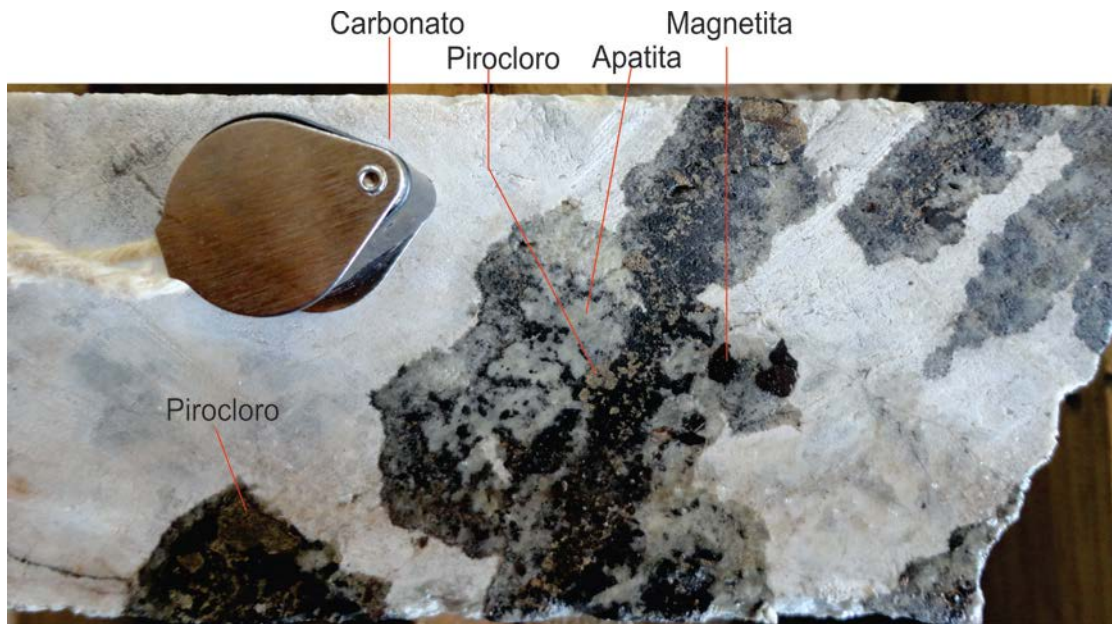


Figura 5.12 - Bolsões de Apatita nelsonito em meio a carbonatito. Apresenta apatita, magnenita e pirocloro



Figura 5.13- Apatita nelsonito em amostra fortemente magnética, fina a média e fanerítica. Apresenta apatite, magnetite, pirocloro, flogopita, calcopirita e carbonato.

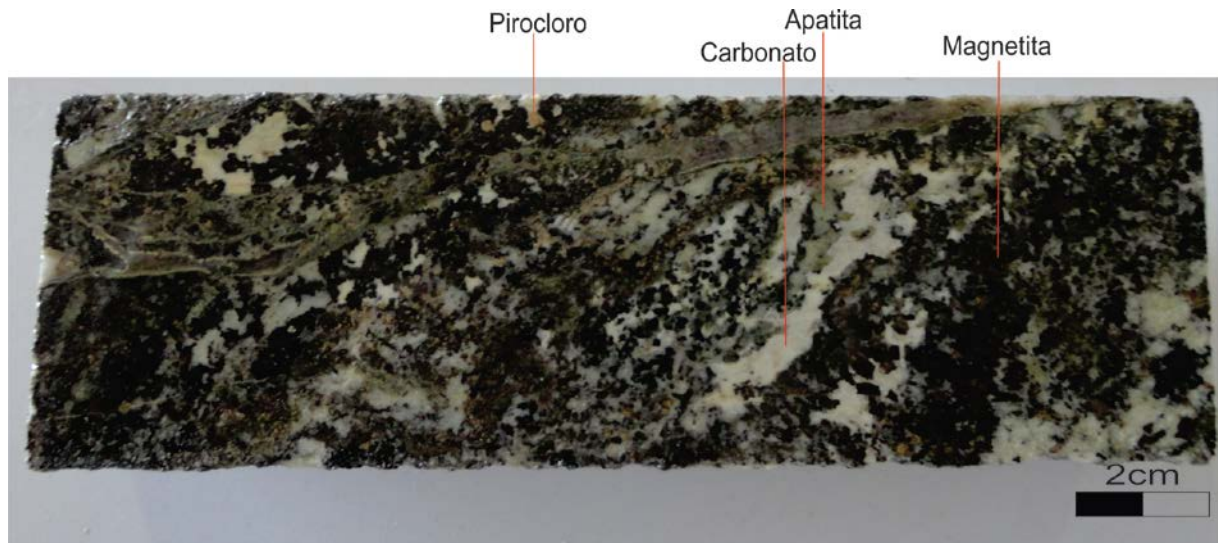


Figura 5.14 - Rocha de coloração escura, fanerítica fina a média, com estrutura maciça e fortemente magnética. Os minerais constituintes da rocha são: magnetita, apatita, flogopita, calcita, pirocloro, alcopirita.



Figura 5.15 – Nelsonito rico em pirocloro. Os minerais constituintes da rocha são: magnetita, pirocloro, calcita e ilmenita.

5.1.1.4 Filito/Fenito

O filito ou fenito corresponde às rochas metassedimentares encaixantes da intrusão alcalina do complexo de Catalão II, a qual através do metamorfismo de contato e percolação de fluídos passou pelo processo de fenitização. O termo “fenito” é genérico e utilizado

corriqueiramente para designar rochas que sofreram o processo metassomático provocado por intrusões alcalinas. Ocorrem como rochas encaixantes das intrusivas ou como xenólitos.

Essa rocha possui predominantemente colocação acinzentada, granulação fina, com textura inequigranular, afanítica a fanerítica, estrutura foliada cortada por veios em “stockworks” de diversas dimensões de carbonatito, nelsonito, pseudonelsonito e flogopita-picrito.

A foliação principal e o bandamento composicional da rocha acabam muitas vezes mascarados pelo processo metassomático.

Apresenta-se em coloração escura, cinza a esverdeada e quando alteradas geram material areno argiloso ou silicificado. Sua composição mineralógica abrange feldspato, quartzo, flogopita, carbonato e clorita.



Figura 5.16 – Amostra de testemunho de sondagem de um filito. Descrição: rocha afanítica, de coloração verde, com estrutura maciça, ocorre bandas verde mais clara e escura, e não tem magnetismo. Presença de vários veios milimétricos de carbonatito, nos quais o contato entre apresenta uma mudança mineralógica caracterizando processo de fenitização.



Figura 5.17 - Amostra de testemunho de sondagem de um filito. Descrição: rocha de coloração verde clara, bandado, afanítica e não magnética. Veios de espessura milimétrica de carbonatito cortam transversalmente o filito, e seus contatos estão fenitizados com uma coloração mais escura.



Figura 5.18 - Amostra de testemunho de sondagem de um filito. Descrição: rocha de coloração verde, bandada, afanítica, com estrutura maciça e não magnética. Um veio de carbonatito com espessura milimétrica corta a seção, sendo seus contados flogopitizados (metassomatismo alcalino o qual gera flogopita).

5.1.1.5 Anfibolito

O litotipo anfibolito faz parte do contexto das rochas encaixantes do complexo (Grupo Araxá) que tem como possível protolito intrusões básicas nos metapelitos (Filitos/Fenitos). O anfibolito é uma rocha de coloração verde escura composta principalmente por clinopiroxenios, podendo ter olivina e serpentina. Ocorre por vezes com fragmentos flogopitizados de fenito. Quando cortada por carbonatitos ocorre uma flogopitização nas bordas, o que é bastante característico desse litotipo. Apresenta composição básica, dominada por plagioclásio, hornblenda, actinolita, flogopita e minerais acessórios como epídoto, titanita, clorita e quartzo.



Figura 5.19 - Rocha de coloração escura, afanítica, de estrutura maciça e não magnética. Diques de carbonatito, em diferentes orientações e tamanhos.

5.1.1.6 Silexito

Em função dos processos formadores do perfil intempérico identifica-se remobilização e precipitação supergênica de sílica, originando os silexitos. A alta porosidade e permeabilidade desenvolvidas durante o intemperismo facilitam a percolação de líquidos carregados de sílica e sua precipitação como silexito. Essa silicificação também ocorre nos fenitos (xistos e filitos) que na interface da zona saturada em água, quebra a estrutura das micas (muscovita sericita) recristalizando sílica em forma de quartzo, formando-se níveis de xistos silicificados. Nota-se também que a silicificação tende a ocorrer sempre como várias lentes horizontalizadas em diferentes profundidades, sugerindo que a variação do nível freático também exerce um controle importante.

Torna-se possível a distinção do protolito em função das propriedades físicas e morfológicas da rocha. Em geral, apresenta fratura conchoidal, coloração avermelhada rica em cristais grossos de magnetita e ilmenita com associação com pirocloro, o qual apresenta-se desde grãos finos à fenocristais.

Esse litotipo apresenta teores econômicos ($>0,5\%$ de Nb_2O_5), tornando fundamental seu mapeamento e caracterização para o planejamento em longo prazo.

5.1.2 Descrições petrográficas

Para confecção das lâminas foram selecionadas sete amostras representativas de cada litotipo presentes no depósito (uma para cada litotipo e duas dessas de nelsonito - rocha hospedeira da mineralização) para melhor caracterizar e compreender sua mineralogia e relações texturais. As amostras coletadas e selecionadas foram as seguintes:

- a) VC-01: Apatita nelsonito com magnetita flogopita e pirocloro(mineral de minério de nióbio).
- b) VC-02: Magnetita nelsonito com fenocristais de flogopita, ilmenita e pirocloro (mineral de minério de nióbio).
- c) VC-03: Carbonatito calcítico com magnetita e flogopita.
- d) VC-04: Flogopita-Picrito com fenocristais de olivina.
- e) VC-05: Fenito/Filito
- f) VC-06: Silexito rocha com substituição quase que total em sílica (protolito com uma fase brechóide e outra um carbonatito silicificado).
- g) VC-07: Anfibolito

Dessas, em função dos os custos e também a presença dos minerais de minério e acessórios de maior singularidade química que as demais rochas, quatro lâminas foram selecionadas (VC-01, VC-02, VC-03 e VC-04) para polimento e posterior análise através do método de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). As descrições detalhadas das seções delgadas estão apresentadas no apêndice A.

Tabela 1- Composição modal visualmente estimada das lâminas descritas

	Magnetita	Apatita	Calcita	Pirocloro	Flogopita	Illmenita	Sulfetos	Olivina	Clorita	Peroviskita	Diopsídeo	Quartzo	Feldspato	Goethita	Actinolita	Plagioclásio	Actinolita
VC-01	30%	30%	20%	10%	5%	2%											
VC-02	40%	10%	15%	10%	15%	10%											
VC-03	15%		68%	2%	10%		5%										
VC-04	8%				60%		2%	10%	10%	5%	5%						
VC-05			5%		15%				20%			30%	30%				
VC-06 (Fase Maciça)												98%		2%			
VC-06 (Fase Bechóide)	20%	15%										45%		20%			
VC-07					28%				20%			2%			40%	10%	40%

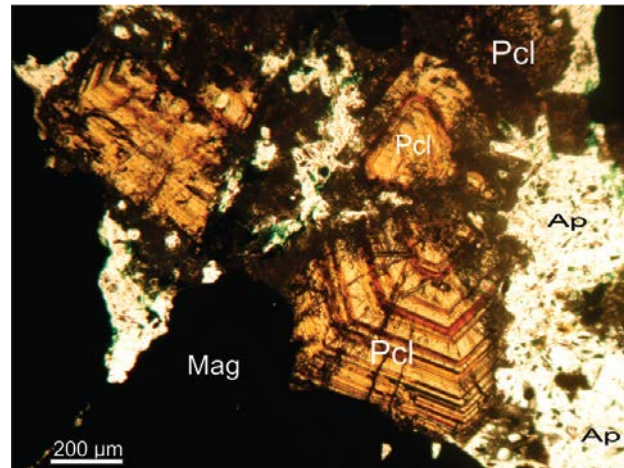


Figura 5.20 - Cristais de pirocloro apresentando um zoneamento interno envoltos por matriz apatítica e cristais magnetita. Foto em microscópio de luz transmitida da lâmina VC-01 com aumento de 5x.

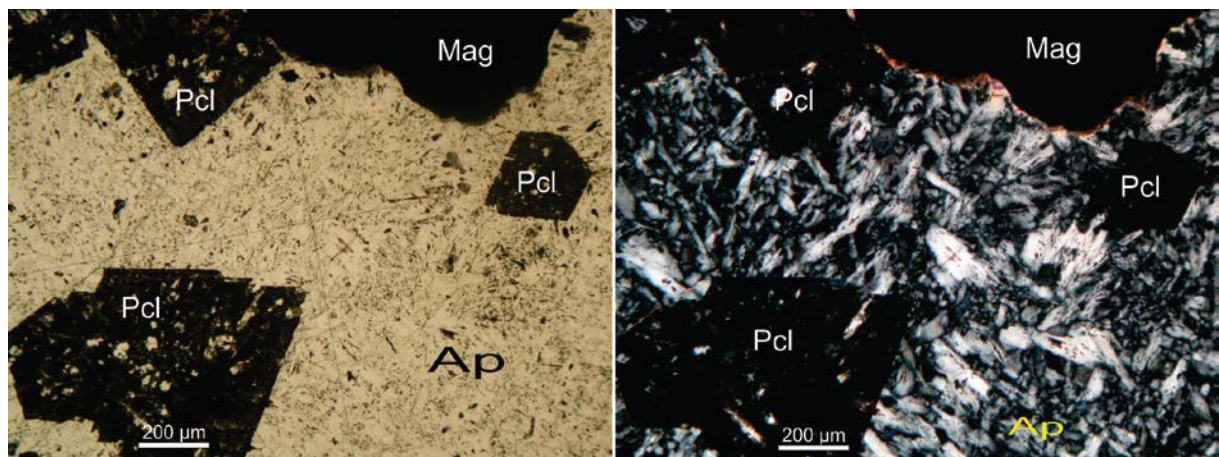


Figura 5.21 - Cristais de pirocloro em processo de alteração envoltos por matriz apatítica. Foto em microscópio de luz transmitida da lâmina VC-01 com aumento de 5x.

As figuras 5.20 e 5.21 são exemplos do mineral de minério em diferente textura e morfologia na mesma amostra (VC-01). Na figura 5.20 o cristal encontra-se em um processo de alteração com vesículas de dissolução preenchidas pela matriz apatítica. Ao passo que, na figura 5.21, o pirocloro, mesmo que se mantendo preservada a estrutura interna do cristal, nas bordas esse processo já é constatado.

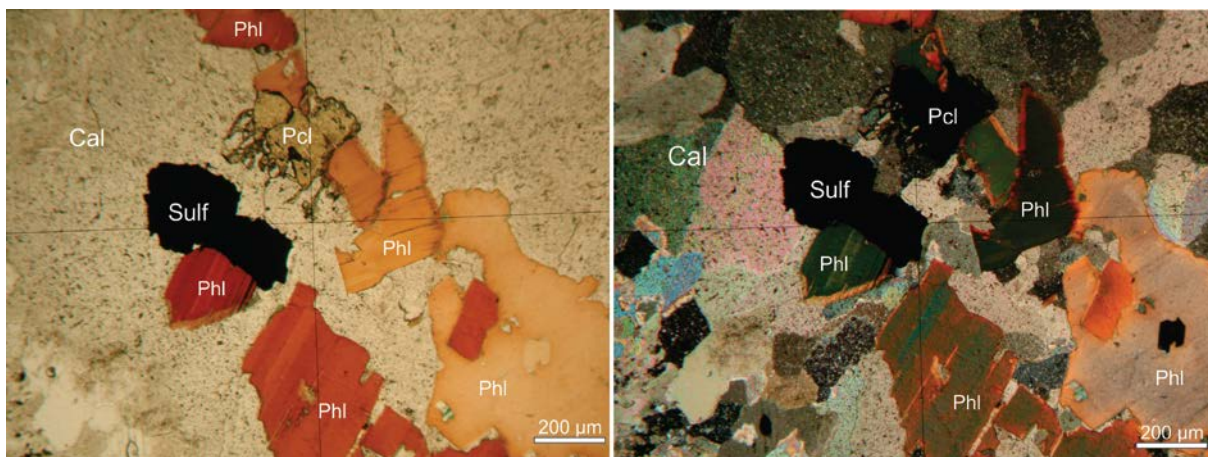


Figura 5.22 - Matriz calcítica com cristais de diversos tamanhos, sulfetos, pirocloro e fenocristais de flogopita. Foto em microscópio de luz transmitida da lâmina VC-03 com aumento de 5x.

A figura 5.23 exemplifica outra ocorrência do pirocloro com diferente textura, hábito e forma, o que pode estar ligado à rocha hospedeira tratar-se de um carbonatito.

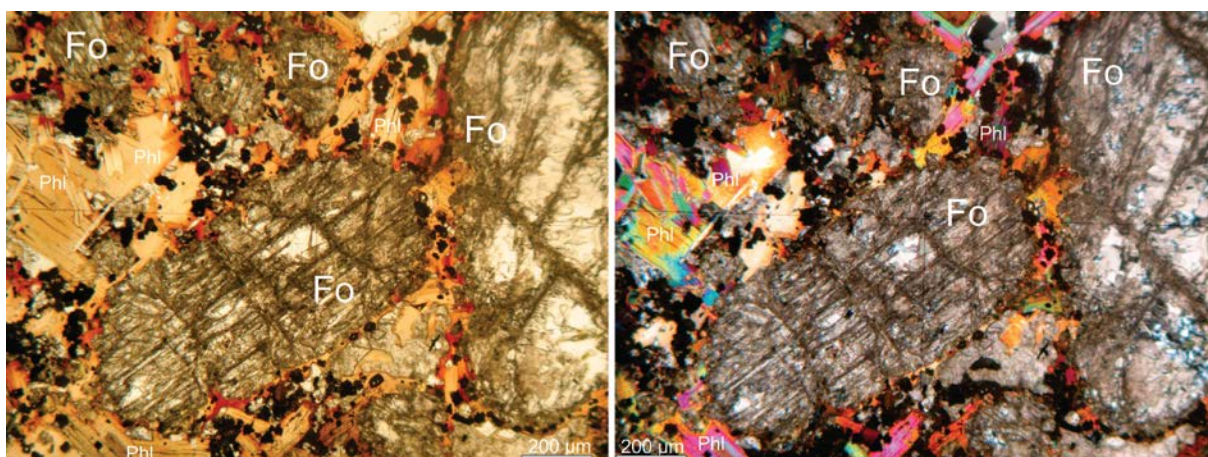


Figura 5.23 - Fenocristais de Mg-Olivina envolto por cristais de flogopita e sulfetos.

Na amostra VC-04 foram identificados fenocristais de olivina que em amostra de mão são visíveis (centimétricos) e em lâmina apresentam-se arredondados e parcialmente alterados e preenchidos por carbonato e/ou sílica.

5.2 Análises com EDS (Espectrômetro de Energia Dispersiva) em MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura)

O método de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) consiste em um feixe fino de elétrons que varre a amostra através de sua superfície. A interação desses elétrons com a

amostra gera diversos tipos de sinais que ao serem decodificados geram diferentes características. No presente trabalho utilizou-se, para imageamento, o detector de elétrons retroespalhados, no modo composicional (BEC). Imagens BEC refletem a composição química média dos minerais, sendo que quanto maior o número atômico, mais clara é a imagem. O Espectrômetro de Energia Dispersiva (EDS) está acoplado ao Microscópio e permite a análise química semi-quantitativa e qualitativa do campo de interesse.

A partir das análises petrográficas foram escolhidos distintos campos na lâmina em que os cristais possuíam características interessantes ou eram de difícil diagnóstico. Em função dos custos das análises foram selecionadas apenas quatro lâminas polidas (VC-1, VC-2, VC-3 e VC-4) que representassem o minério ou tivesse relação estreita com o mesmo.

A energia do feixe de elétrons utilizada foi mantida a 20 kV e a corrente elétrica sobre a amostra foi ajustada conforme a amostra, para otimizar a intensidade do sinal. A distância de trabalho utilizada foi 10 mm.

5.2.1 Lâmina VC-01

A lâmina polida VC-01 consistem em um nelsonito (rocha hospedeira do mineral de minério pirocloro) e nela foram feitas análises de dois campos distintos VC1_1 e VC1_2 (Figura 5.24).

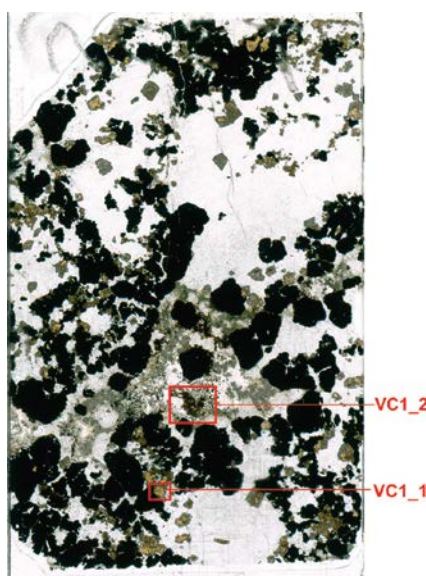


Figura 5.24 - Lâmina VC-01 com destaque aos campos estudados

5.2.1.1 Campo VC-1_1

O Campo VC-1_1 (Figura 5.25) mostra o zoneamento interno do cristal de pirocloro, em lâmina e em imagem BEC. O método EDS foi aplicado nos pontos 1,2 e 3 a fim de identificar as diferenças químicas entre as diferentes zonas internas do cristal.

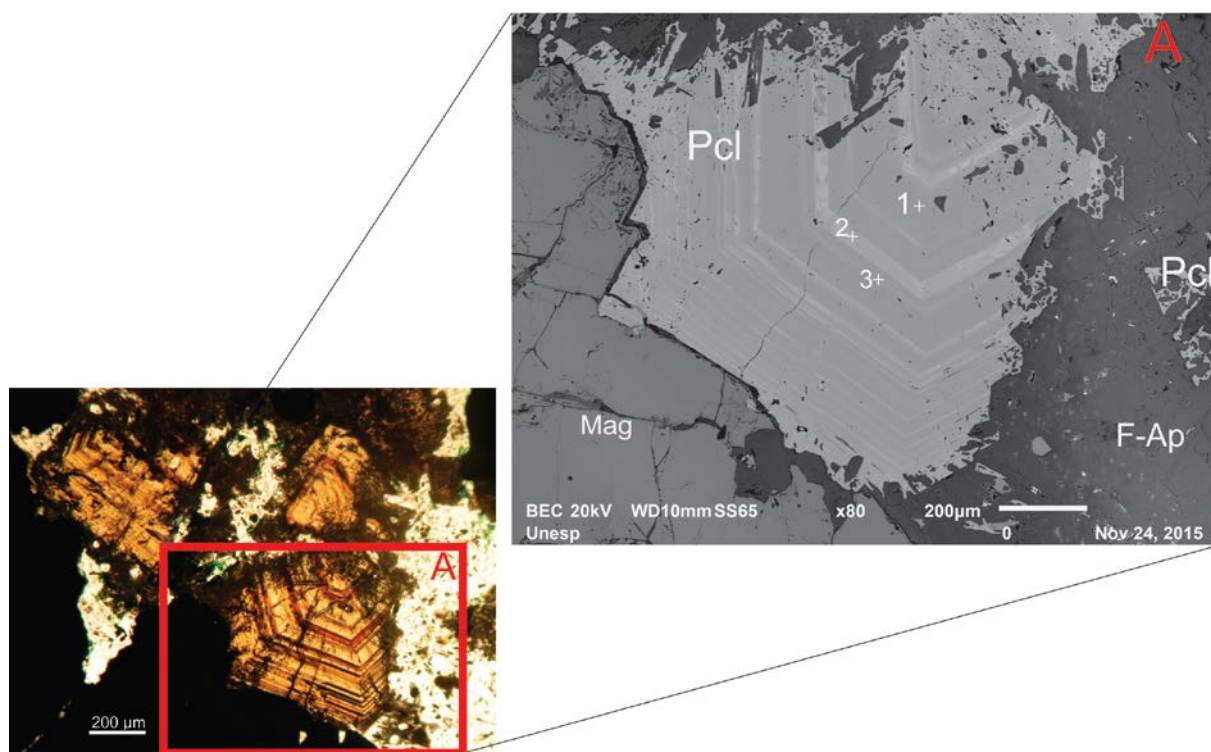


Figura 5.25- Campo VC-1_1 mostrando o zoneamento interno do cristal de pirocloro, em lâmina e em imagem captada no MEV(BEC). O método EDS foi aplicado nos pontos 1,2 e 3.

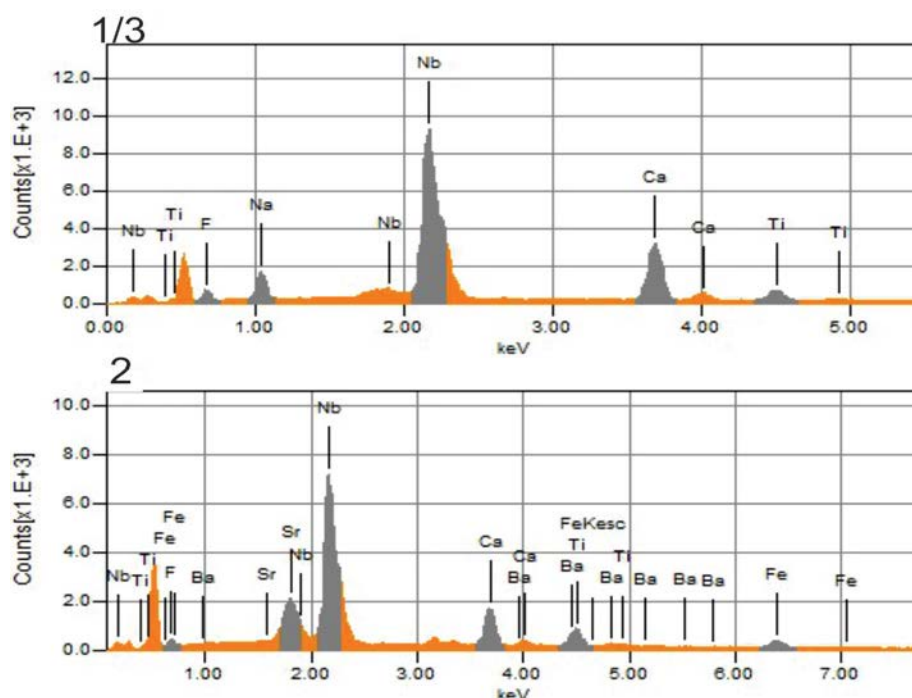


Figura 5.26 – Espectro EDS dos pontos 1 e 3 (superior) e 2 (no qual nota-se os picos de Ba, Sr e Fe).

Tabela 2- Tabela mostrando em porcentagem de massa os óxidos encontrados em cada zona do cristal. Nota-se a presença de BaO, Fe e Sr na parte zonada mais clara (ponto 3) em razão ao ponto 1 e 2.

wt%	1	3	2
F	35.97	36.46	4.23
Na ₂ O	9.89	10.06	
CaO	24.45	24.17	18.17
TiO ₂	5.71	5.61	8.66
Nb ₂ O ₅	23.98	23.69	29.61
FeO			6.80
SrO			7.54
BaO			2.93

Notou-se a presença de BaO, Fe e Sr na parte zonada mais clara (ponto 3) em razão ao ponto 1 e 2, e também um aumento de 25% na porcentagem em massa de Nb₂O₅ no ponto 3.

A zonação dos cristais de pirocloro pode ser um reflexo das mudanças na composição do fluído durante o crescimento do cristal, o qual usualmente apresenta certa variabilidade nos elementos que o compõe.

5.2.1.2 Campo VC-1_2

O campo VC-1_2 foi subdividido em dois sub-campos para caracterizar com maior precisão e detalhes os minerais que não eram possíveis de diferenciar com menor aumento.

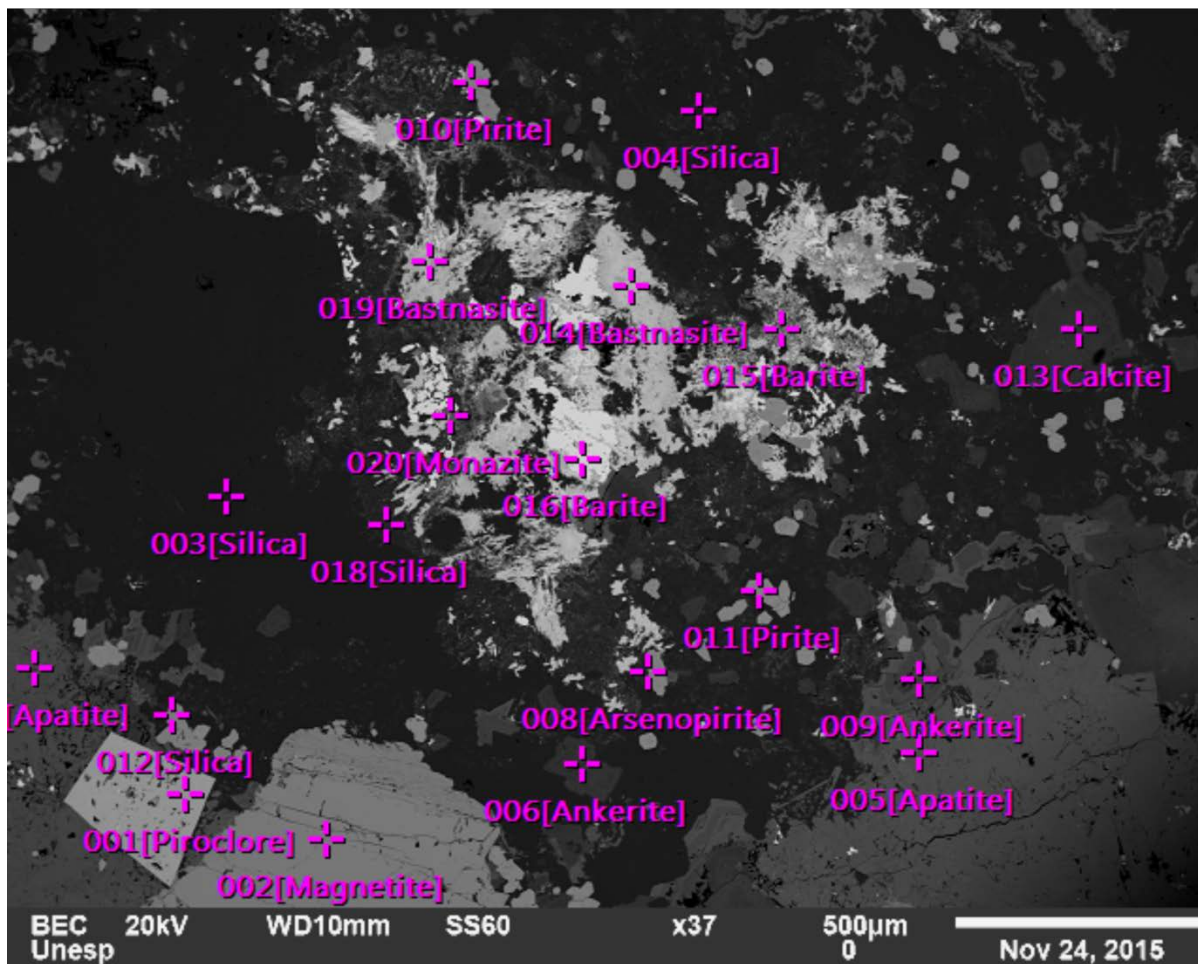


Figura 5.27 – Campo VC1_2, aglomerando de minerais portadores de ETR envolvidos em matriz silificada.

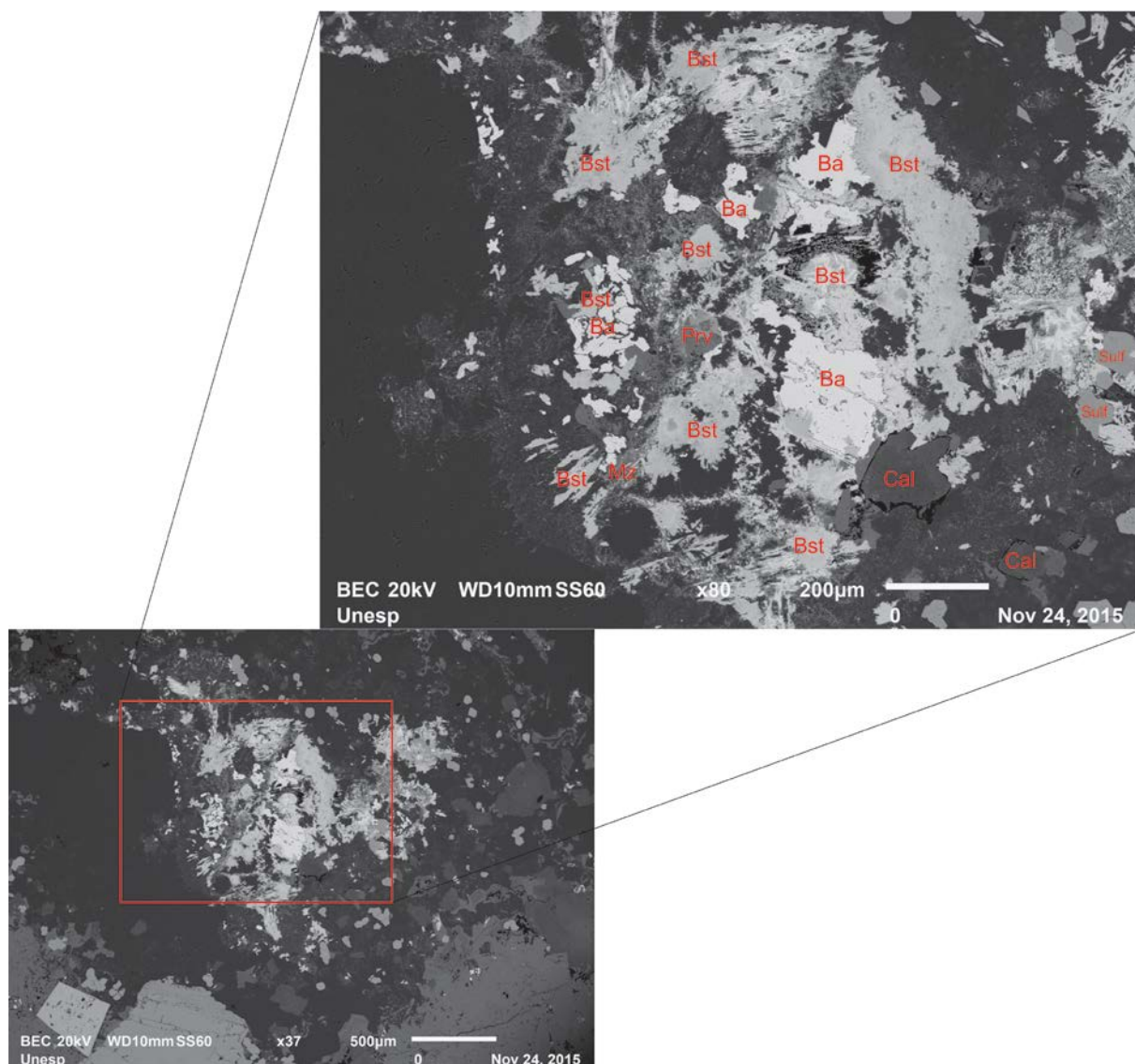


Figura 5.28 – Campo VC1_2.1, aglomerado de minerais contendo Bst (bastnasita), Ba(barita), Mz(monazita), Cal(calcita), Sulf(sulfetos) e Prv(Perovsquita).

Foi constatada a presença de bastnasita – $(\text{Ce, La})\text{CO}_3\text{F}$ – e monazita – $(\text{Ce, La, Th})(\text{PO}_4)$ –, os quais são minerais de ETR (elementos terras raras) que também foram encontrados, especialmente a monazita, em testemunhos de sondagem de Mg-Carbonatitos. O campo em questão apresenta esse aglomerado de minerais de ETR envolto em matriz já silicifica a qual era um carbonatito preteritamente.

5.2.2 Lâmina VC-02

A lâmina polida VC-02 consiste em um nelsonito e nela foram feitas análises de três campos distintos (Figura 5.29).

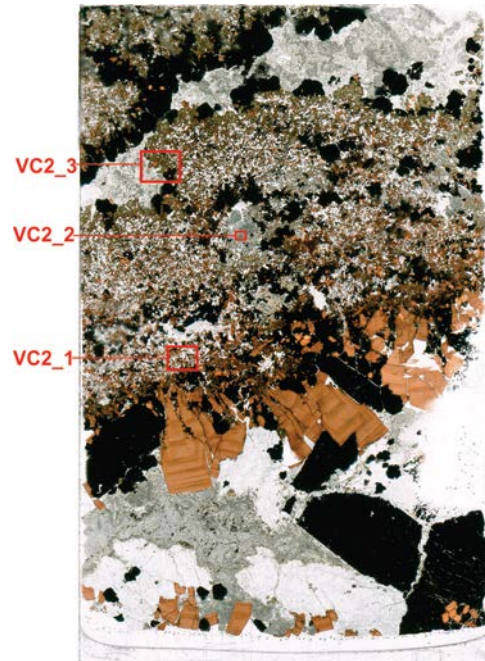


Figura 5.29 - Lâmina VC-2 com destaque ao campos estudados

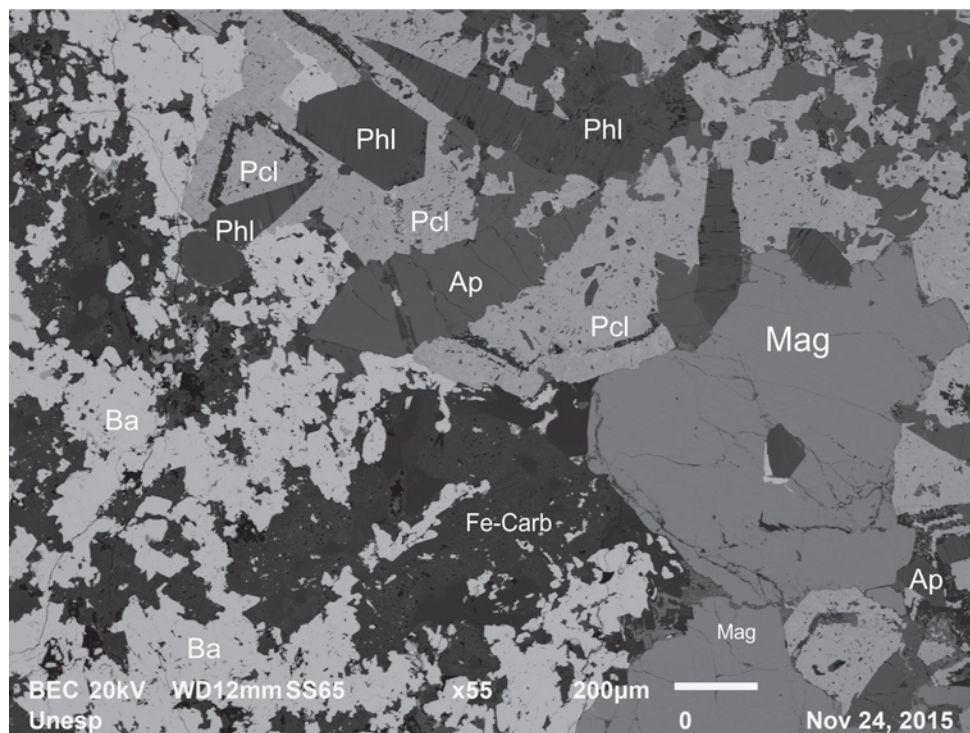


Figura 5.30 – Campo VC2_3, cristais de magnetita(Mag), apatita(Ap), flogopita(Phl), pirocloro(Pcl), barita(Ba) e Ankerita(Fe-Carb).

Tabela 3 - Tabela mostrando a porcentagem em massa os óxidos encontrados nos minerais presentes no campo analisado.

wt%	Pirocloro	F-Apatita	Flogopita	Ankerita	Barita
F	29.92	19.10			
Na ₂ O	9.47				
CaO	22.51			51.19	
TiO ₂	6.09				
Nb ₂ O ₅	28.54				
CaO	6.09	57.37			
FeO			19.44	14.24	
SrO		2.10			
BaO	0.84				50.96
Ag ₂ O	1.53				
CeO ₂	1.10				
P ₂ O ₅		21.44			
SiO ₂			41.54		
MgO			31.65	34.57	
K ₂ O			7.37		
SO ₄					49.04

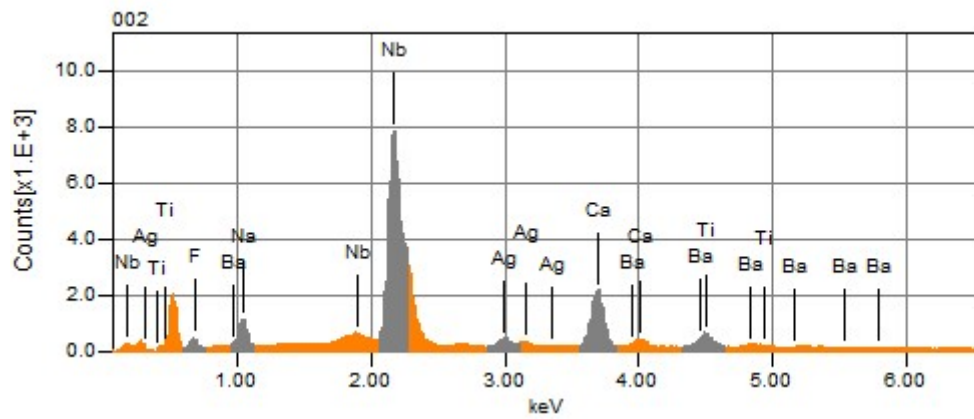


Figura 5.31 - Espectro EDS obtido para Pirocloro

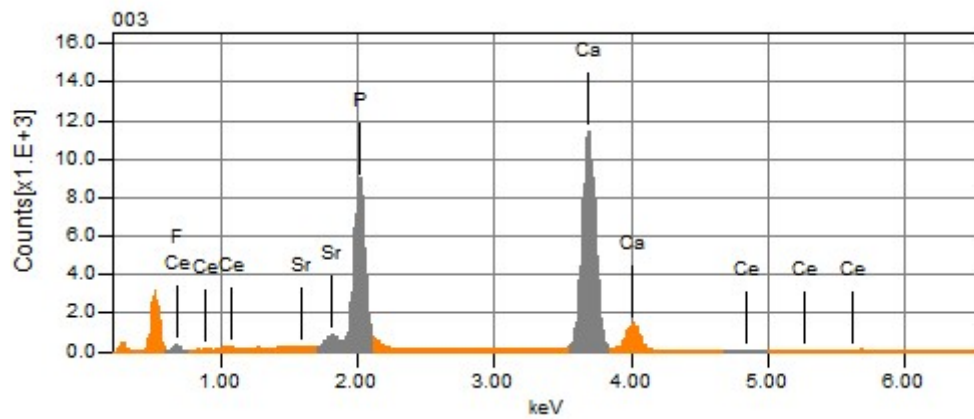


Figura 5.32 - Espectro EDS obtido para F-Apatita

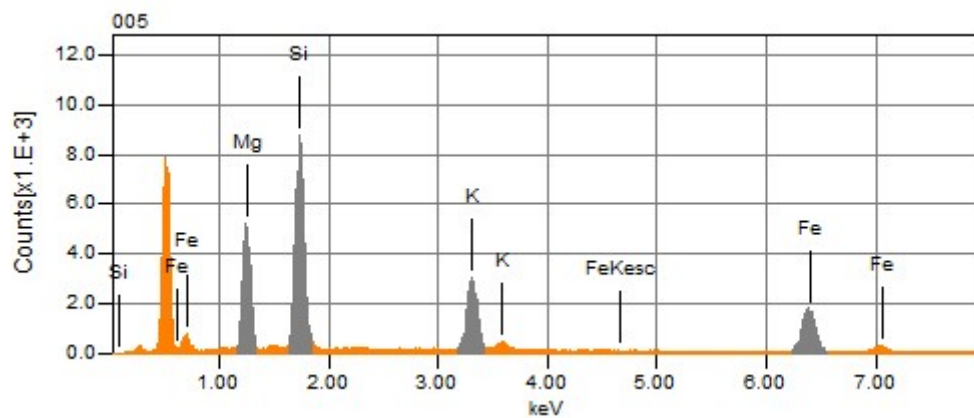


Figura 5.33 - Espectro EDS obtido para Flogopita

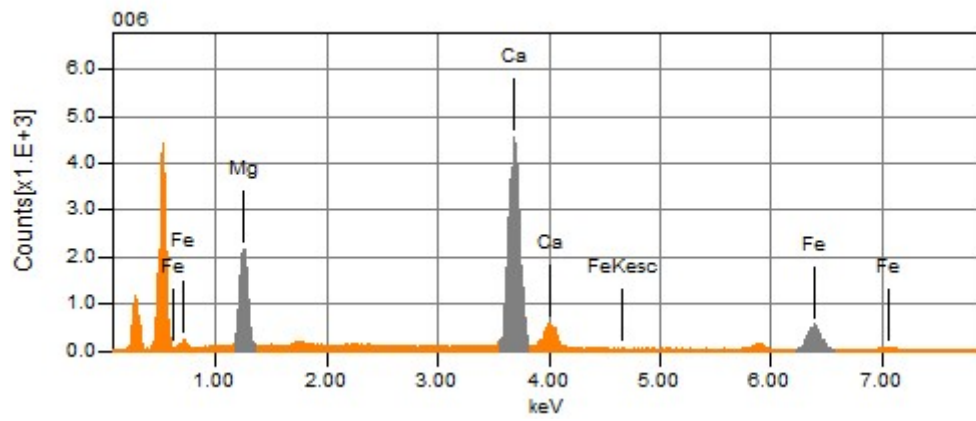


Figura 5.34 – Espectro EDS obtido para Ankerita

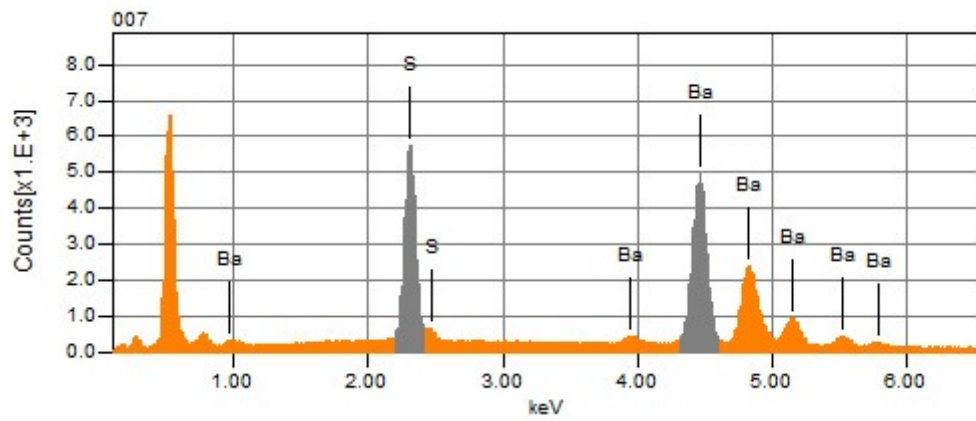


Figura 5.35- Espectro EDS obtida para Barita

5.2.3 Lâmina VC-03

A lâmina polida VC-03 consiste em um carbonatito e nela apenas um campo foi analisado (Figura 5.36).

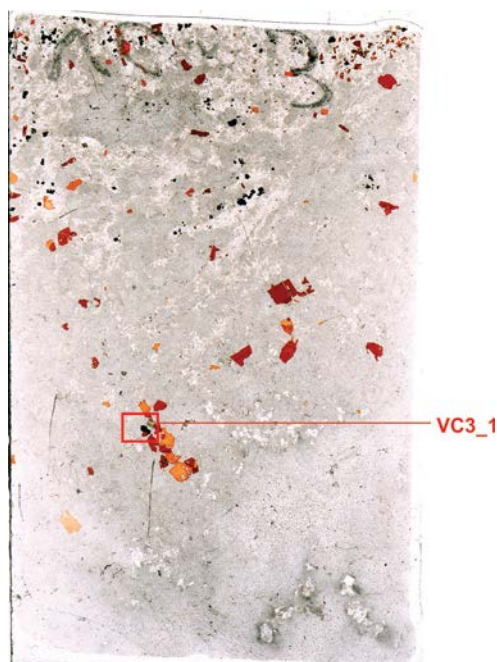


Figura 5.36 - Lâmina VC-3 com destaque ao campo estudado

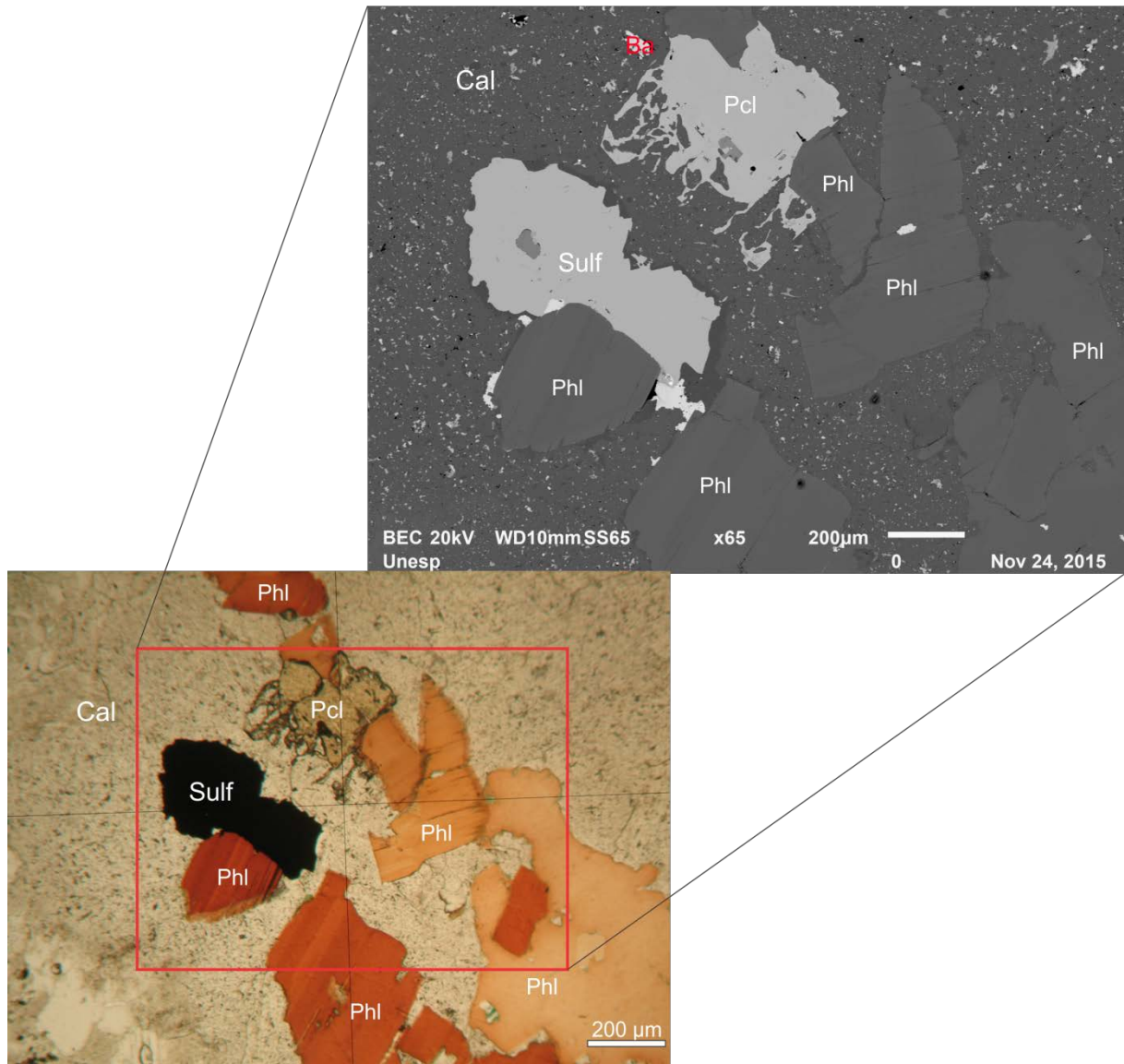


Figura 5.37 – Campo VC-3_1 em imagem BEC mostrando campo estudado com EDS mostrando pirocloro(pcl), Calcopirita(sulf), flogopita(phl) e barita(ba) e matriz de carbonato.

O campo estudado evidencia a presença de fenocristais de flogopita, com pirocloro e sulfetos associados.

Tabela 4 - Tabela mostrando a porcentagem em massa os óxidos encontrados nos minerais presentes no campo analisado.

wt%	Pirocloro	Flogopita	Calcopirita	Barita
F	34.19			
Na ₂ O	9.84			
CaO	24.85			
TiO ₂	5.63			
Nb ₂ O ₅	25.49			
FeO		16.98	26.57	
BaO				51.13
SiO ₂		42.34		
MgO		33.20		
K ₂ O		7.49		
SO ₄			47.21	48.87
CuO			26.22	

5.2.4 Lâmina VC-04

A lâmina polida VC-04 consiste em um picrito e nela foram feitas análises de três campos distintos (Figura 5.38).

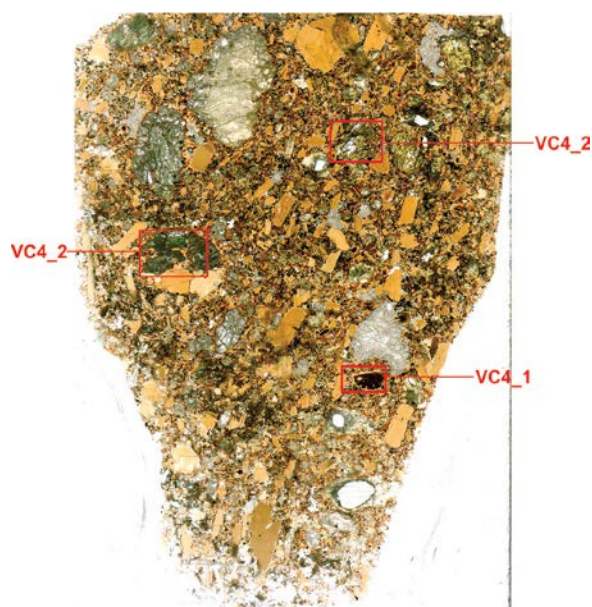


Figura 5.38 – Lâmina VC-4 com destaque ao campos estudados

5.2.4.1 Campo VC-4_1

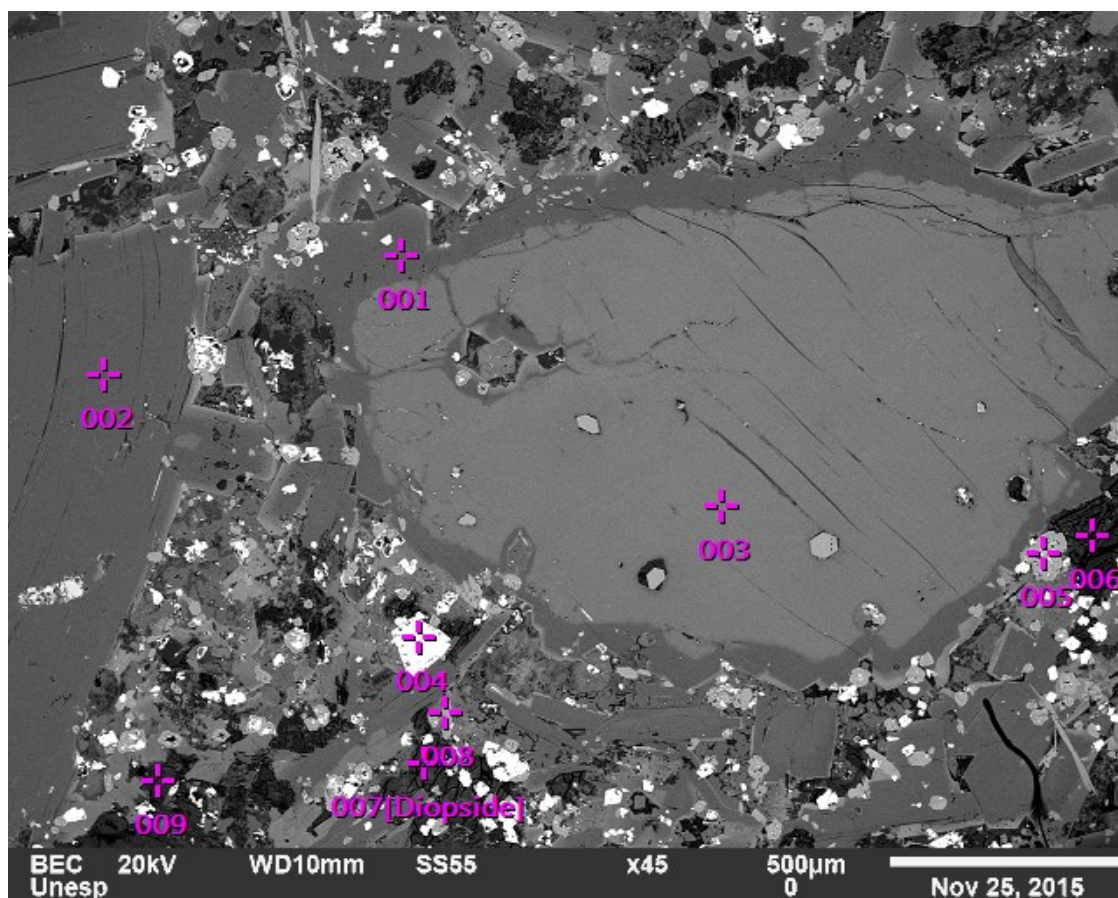


Figura 5.39 – Cristais de flogopita zonado. Atenta-se para a diferença entre as bordas do fenocristal de flogopita e seu centro. Flogopita(001,002,003), Diopsídio (006,007,008) e dois minerais distintos não reconhecidos através do método EDS (004 rico em Cr e 005 em Ti)

Tabela 5 - Tabela mostrando a porcentagem em massa os óxidos encontrados nos minerais presentes na borda do fenocristais de flogopita em relação ao seu centro.

wt%	001(Flogopita)	003(tetraferri-flogopita)
TiO ₂	3.54	4.25
FeO	7.40	15.38
SiO ₂	42.21	42.16
MgO	32.71	23.57
K ₂ O	7.58	7.37
Al ₂ O ₃	6.57	7.27

Notou-se o aumento de duas vezes na porcentagem em massa de ferro e um decréscimo em magnésio. O que possivelmente está ligado a inserção de Fe³⁺ na estrutura mineral que dá início a série da tetra-ferriflogopita [K(Mg,Fe)(FeSi₃O₁₀)(OH)].

Nos pontos 004 e 005 encontram-se dois cristais distintos e não diagnosticados, os quais a composição e espectro EDS são apresentado a seguir:

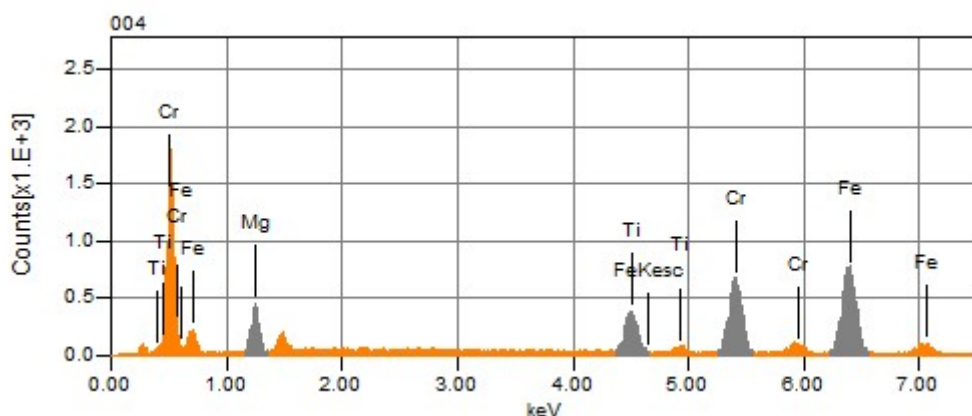


Figura 5.40 – Espectro EDS do Ponto 004

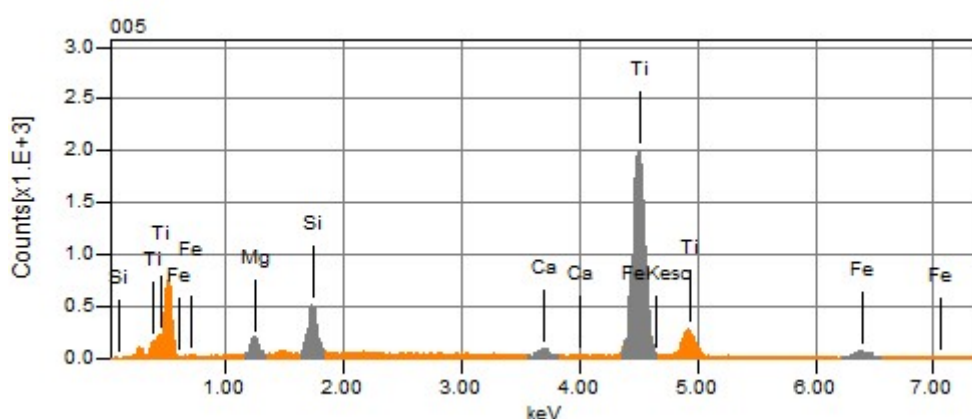


Figura 5.41- Espectro EDS do Ponto 005

Tabela 6 – Tabela de porcentagem em massa de óxidos dos pontos 004 e 005, nos quais altos teores de Ti, Cr e Fe foram encontrados.

wt%	004	005
CaO		1.48
TiO ₂	12.61*	74.29
FeO	50.81	3.77
SiO ₂		13.22
MgO	21.78	7.23
Cr ₂ O ₃	14.80	

5.2.4.2 Campo VC-4_2

O Campo VC-4_2 mostrando fenocristais de Mg-olivina envolto em matriz composta por flogopita, carbonato e sulfetos. O processo de alteração substitui os cristais por carbonato e sílica em menor proporção.

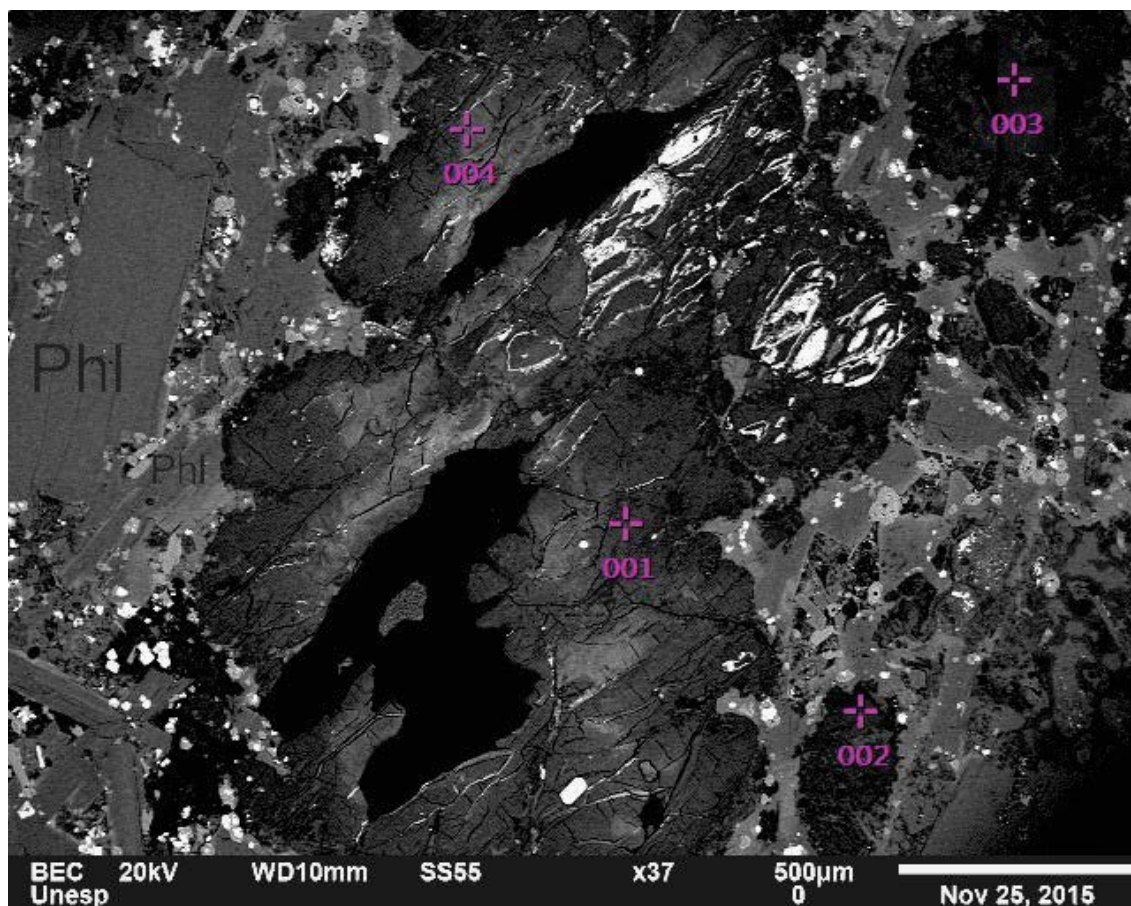


Figura 5.42 – Fenocristais de Olivina com os pontos (001 a 004) onde foram feitas as análises EDS, indicando que a olivina em questão é magnesiânica.

Tabela 7 - Tabela de porcentagem em massa de óxidos dos pontos analisados.

wt%	001	002	003	004
FeO	6.28	10.33	4.76	4.51
SiO ₂	68.65	57.09	75.96	59.04
MgO	25.07	32.58	19.28	36.45

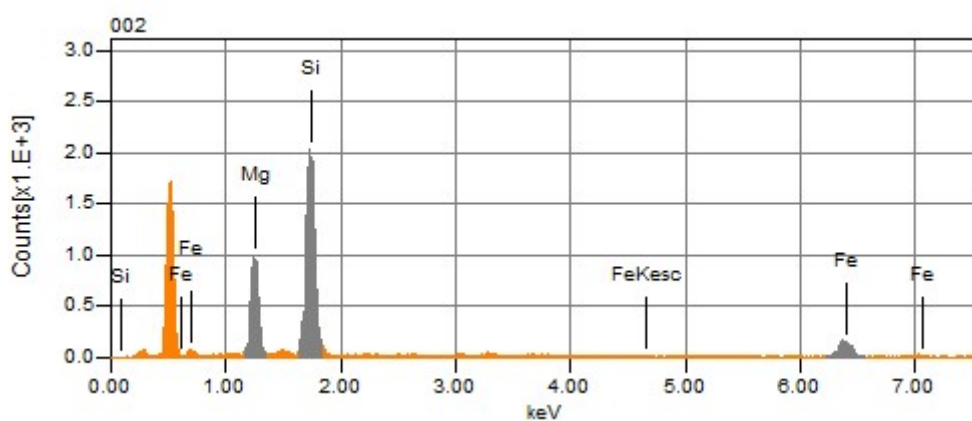


Figura 5.43 - Espectro EDS caracterizando os fenocristais como Mg-Olivina.

5.2.4.3 Campo VC-4_3

No Campo VC-4_3 encontra-se fenocristais de diopsidio sofrendo alteração/substituição por carbonato e sílica. A figura 5.44 mostra o fenocristal e depois o detalhe captado em imagem BEC da alteração dentro do cristal, basicamente com carbonato e sílica.

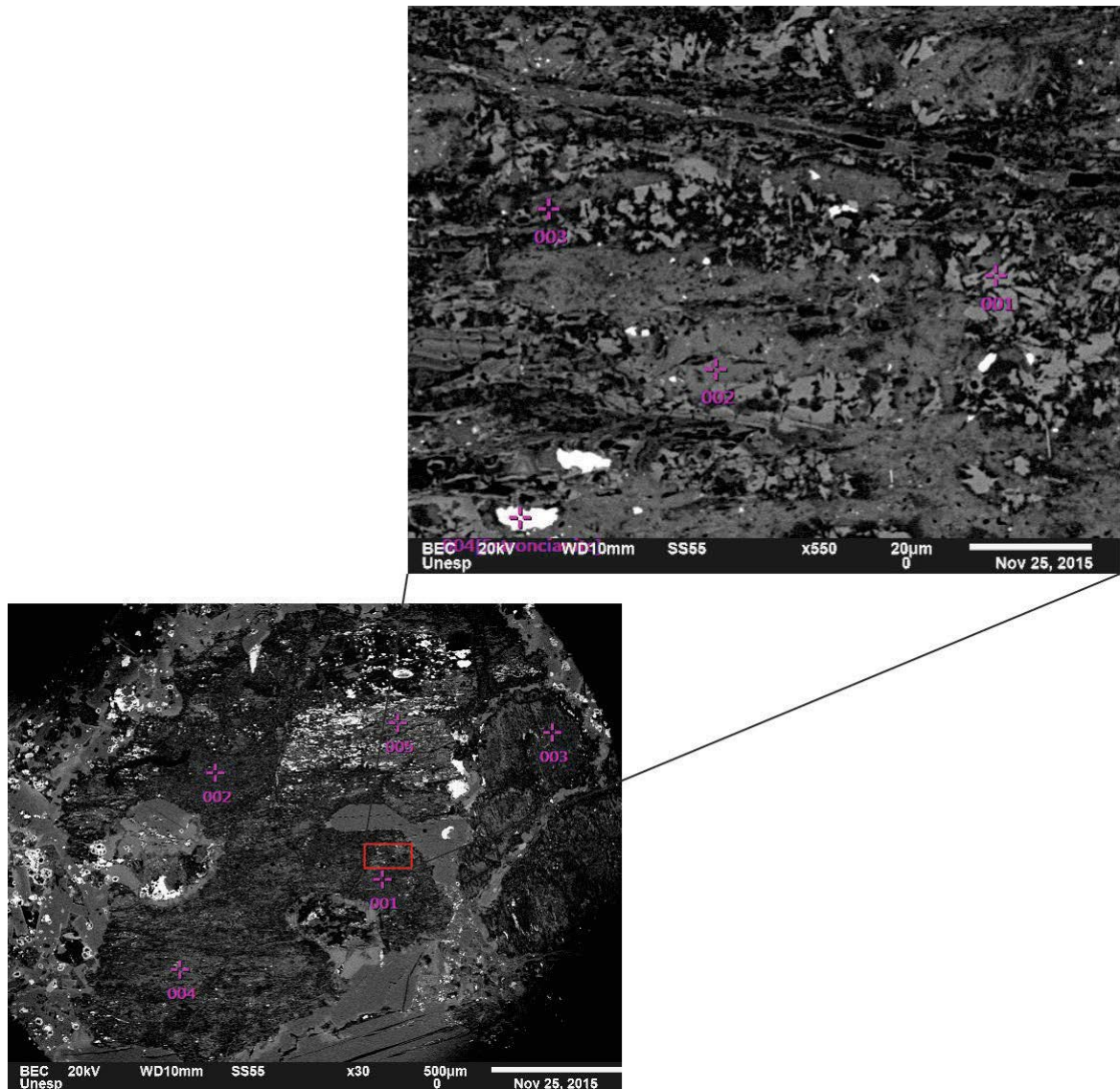


Figura 5.44 – Fenocristais de diopsídio sofrendo alteração/substituição por carbonato e sílica

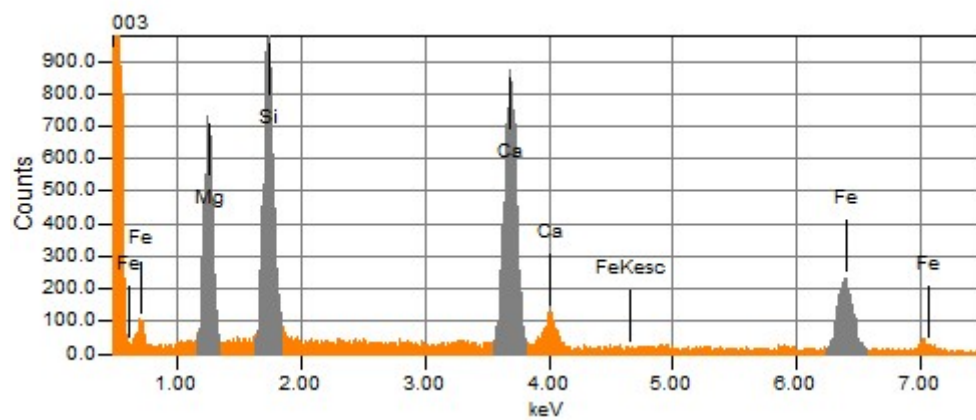


Figura 5.45 – Espectro EDS do mineral diopsídio

5.3 Modelamento geológico

5.3.1 Modelagem da Superfície de contato Superfície Perfil Intempérico/Rocha Fresca (PI/RF)

A figura 5.46 mostra a superfície de contato entre a rocha fresca e o manto intempérico na porção noroeste da Mina Boa Vista, obtido em modelo tridimensional. A malha de sondagem é irregular, porém conta com 86 furos de sondagem (36 foram descritos pelo autor do presente trabalho, já os demais pelos geólogos da empresa mineradora) proporcionando uma modelagem precisa da superfície de contato entre solo e rocha no alvo. Torna-se fundamental o conhecimento dessa superfície para a empresa mineradora para seu planejamento de lavra e operacional. A planta de beneficiamento, atualmente, é capaz apenas de processar minério oxidado, tanto por aspectos químicos quanto físicos, tornando assim a delimitação dessa superfície necessária para o curto e longo prazo da mina.

Mesmo a malha de sondagem não sendo totalmente regular, os furos, de modo geral, foram locados em seções N-S mergulhando para sul, uma vez que o corpo mineralizado possui uma geometria preferencial E-W. Assim, a superfície foi traçada a partir de seções N-S com os parâmetros Rocha Fresca/Rocha Oxidada (Figura 5.48).

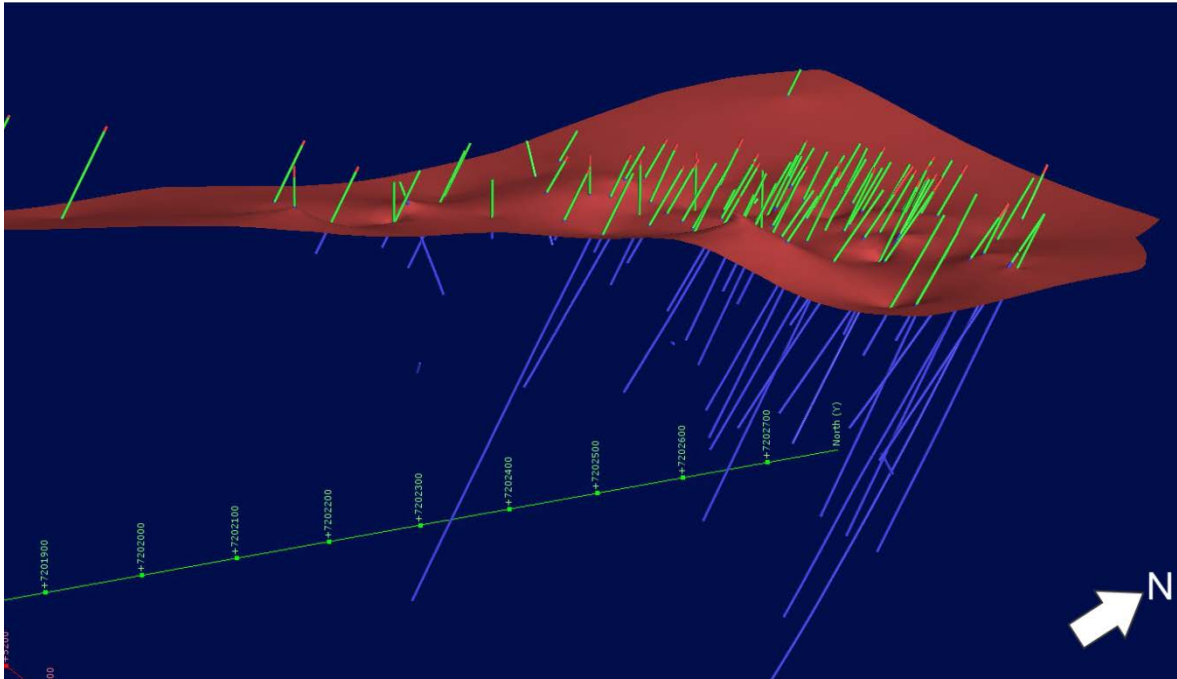


Figura 5.46 - Superfície de contato entre a rocha fresca e o manto intempérico na porção noroeste da Mina Boa Vista.

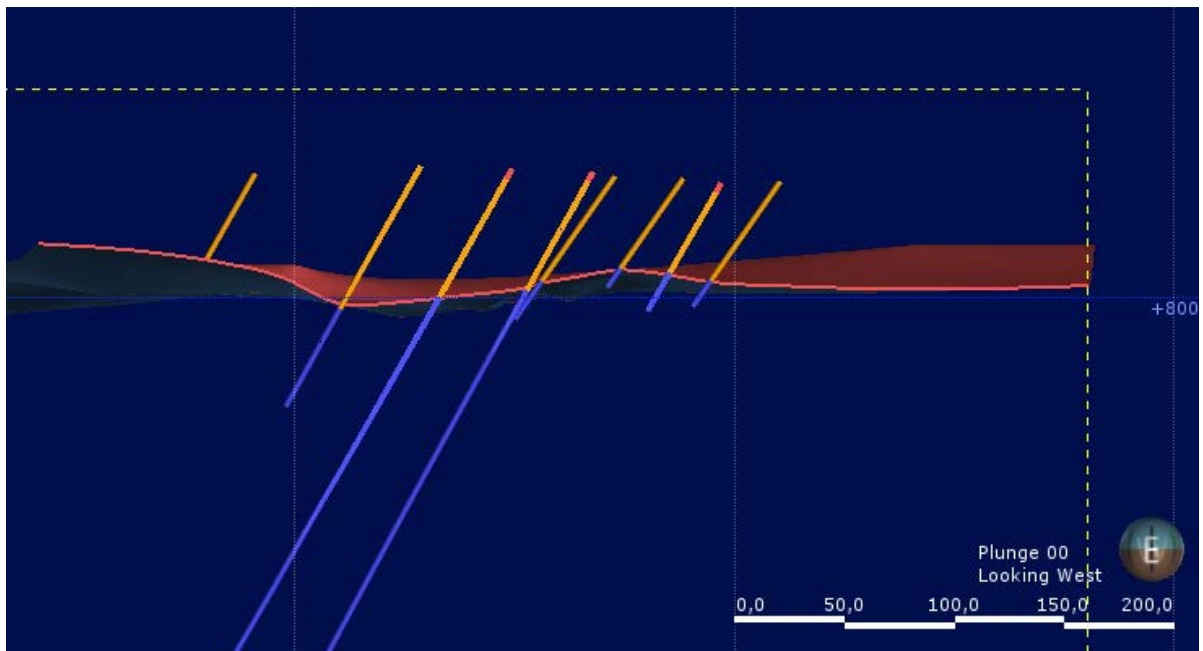


Figura 5.47 – Seção N-S ilustrando o processo de delimitação da Superfície perfil intempérico – Rocha Fresca

A partir dessa superfície foi confeccionado um mapa de elevação, no qual as cores quentes representam as maiores elevações e conseqüentemente uma menor espessura da zona oxidada. O mapa de elevação da superfície de contato PI/RF (Figura 5.48) mostra maior elevação nas

porções sudeste e leste da área em função da cava da mina Boa Vista, onde parte do material oxidado já foi lavrado.

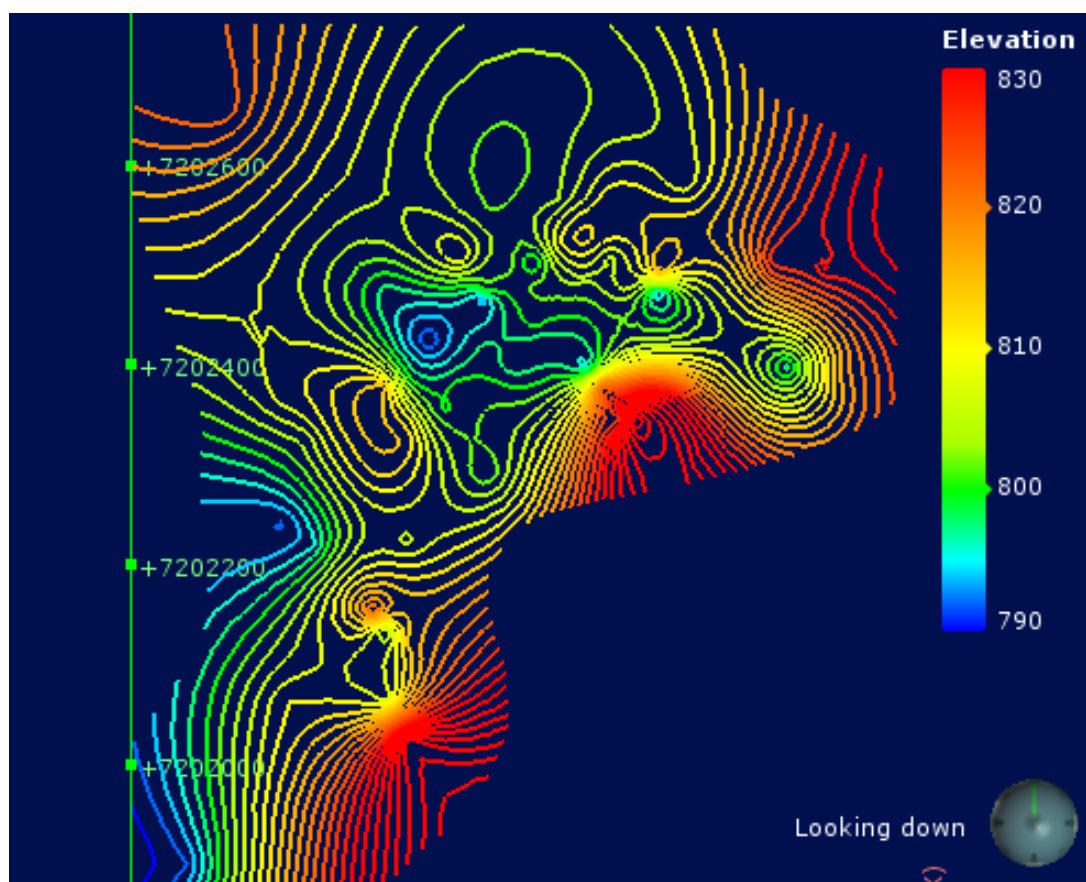


Figura 5.48 – Mapa de elevação da superfície de contato PI/RF, mostrando maior elevação nas porções sudoeste e leste da área em função da cava da mina Boa Vista, onde parte do material oxidado já foi lavrado.

A área da superfície PI/RF totalizou 464.640 m² com profundidade média de 43 metros.

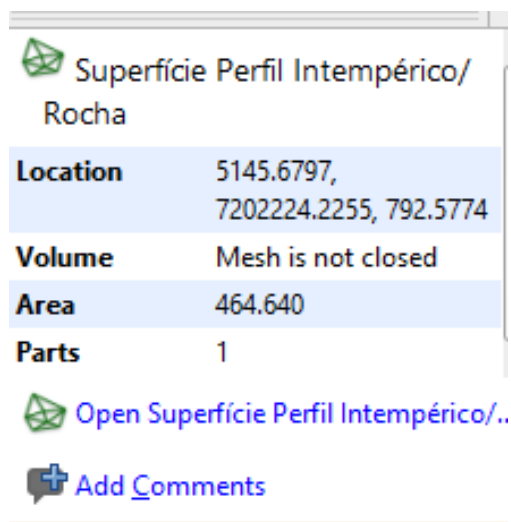


Figura 5.49 - Operação computacional para extrair a área da superfície feita em plataforma Leapfrog

5.3.2 Modelamento tridimensional do perfil de alteração

A partir dos furos de sondagem com a legenda ativada nos códigos *Litho* de aloterita (vermelho), rocha oxidada (laranja) e rocha fresca (azul) obteve-se o modelo tridimensional para área exposto na figura 5.50.

Esses domínios são adotados pela empresa mineradora e podem ser sintetizados como segue:

(a) aloterita - cobertura avermelhada de material estéril, rica em limonita e magnetita martitizada sem conservação da estrutura em processo final de evolução do perfil, pode ser fazer correlação a laterita/duricrosta; (b) rocha oxidada – corresponde a rocha alterada friável podendo existir ou não estrutura primária preservada, minerais secundários são encontrados em diferentes profundidade junto ao resistatos, em especial o ba-pirocloro (mineral de minério em perfil); (c) rocha fresca – rocha são representanda pelo emaranhados de diques de pirocloro-nelsonito, com diques secundários de carbonatitos, picritos injetados na encaixante regional.

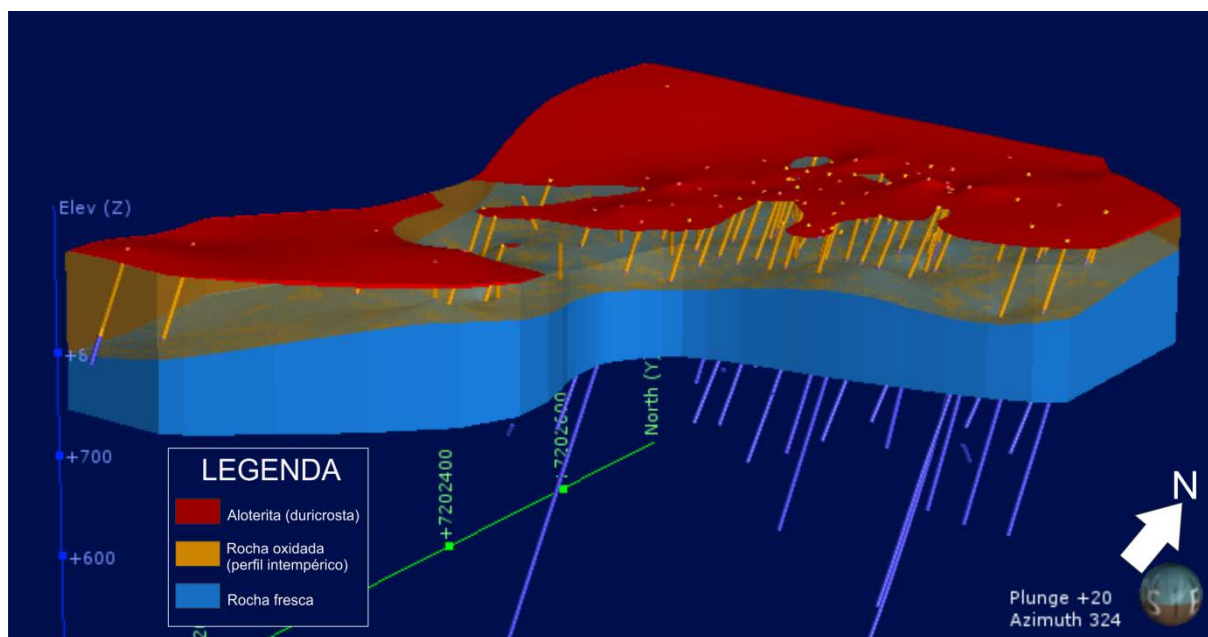


Figura 5.50 – Modelo geológico diferenciado com os campos de aloterita, rocha oxidada e rocha fresca. Foi aplicado modo de transparência a rocha fresca para facilitar a visualização.

Constatou-se que a aloterita, na região estudada, trata-se uma camada delgada, não contínua e de espessura que não ultrapassa 5m. A rocha oxidada atinge profundidades de 10 a 40 metros na área estudada e mantém-se contínua. Já a rocha fresca não foi diferenciada e modelada em litotipos distintos em função da complexidade, do tempo de produção e não ser disponibilizada essa informação por parte da companhia.

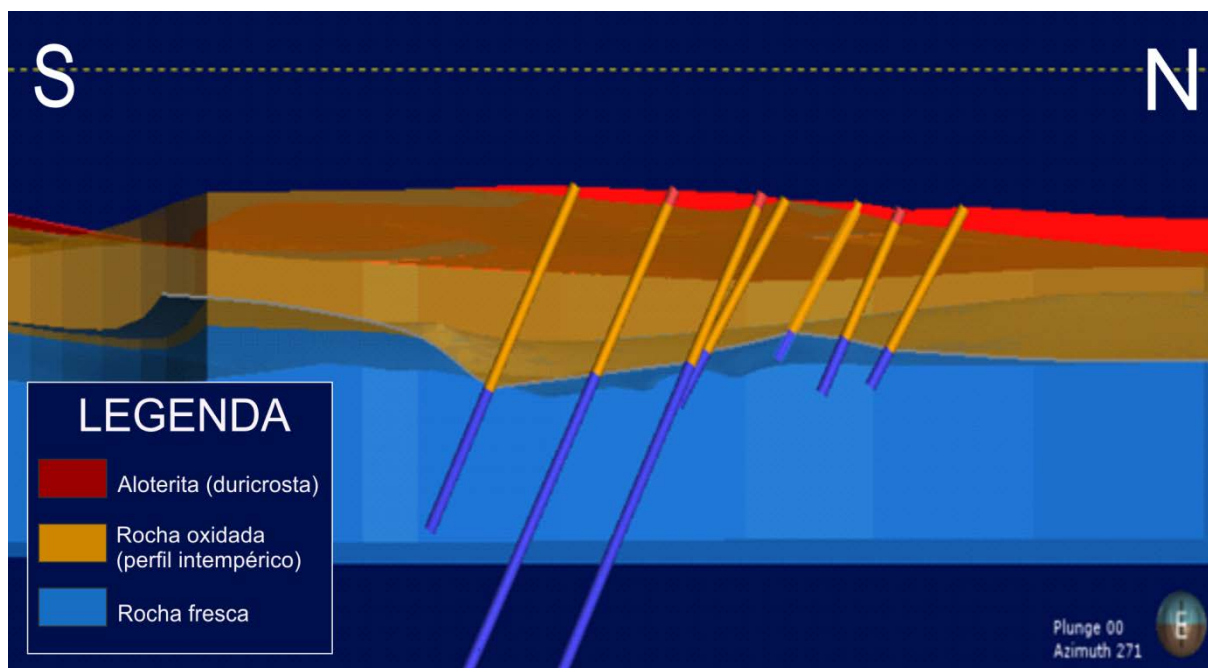


Figura 5.51- Seção SN mostrando os contatos respeitando os limites litológicos dos furos de sondagem

5.3.3 Envelope mineralizado de teores (*interpolant*)

Os teores foram interpolados em diversas nuvens de intervalos de 0,1% de Nb_2O_5 . As nuvens foram geradas a partir das amostras quantificadas em intervalos de 2,5 metros. A interpolação foi feita apenas para amostras contidas na rocha oxidada em função do seu comportamento homogêneo de teores. Diferentemente da rocha fresca e da aloterita (estéril), utilizou-se como *boundary* a rocha oxidada.

Existem duas tendências sobrepostas nos teores, uma ENE e outra mais EW, possivelmente influenciadas pela tendência global do minério na Mina Boa Vista o que mostra que os teores que são controlados pelos diques de nelsonito e, em menor proporção, diques de carbonatito em rocha fresca refletem no perfil de intemperismo.

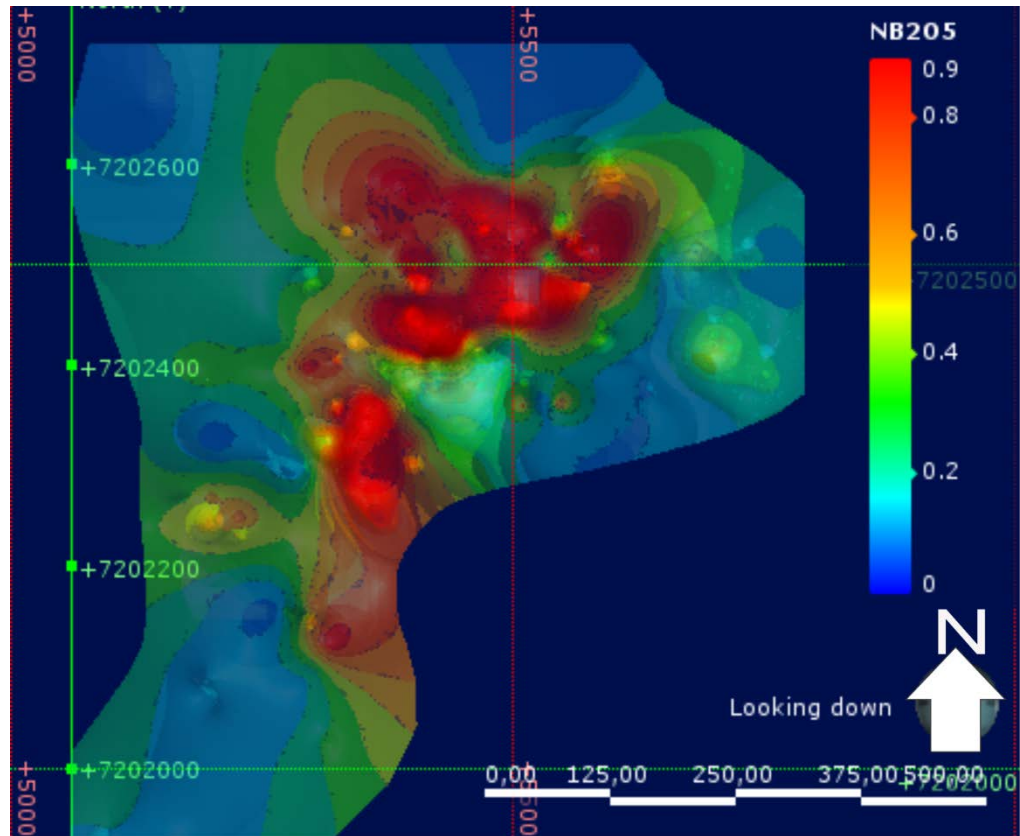


Figura 5.52 – Interpolant de teores mostrando nas cores quentes os teores acima de 0,5% de Nb_2O_5 .

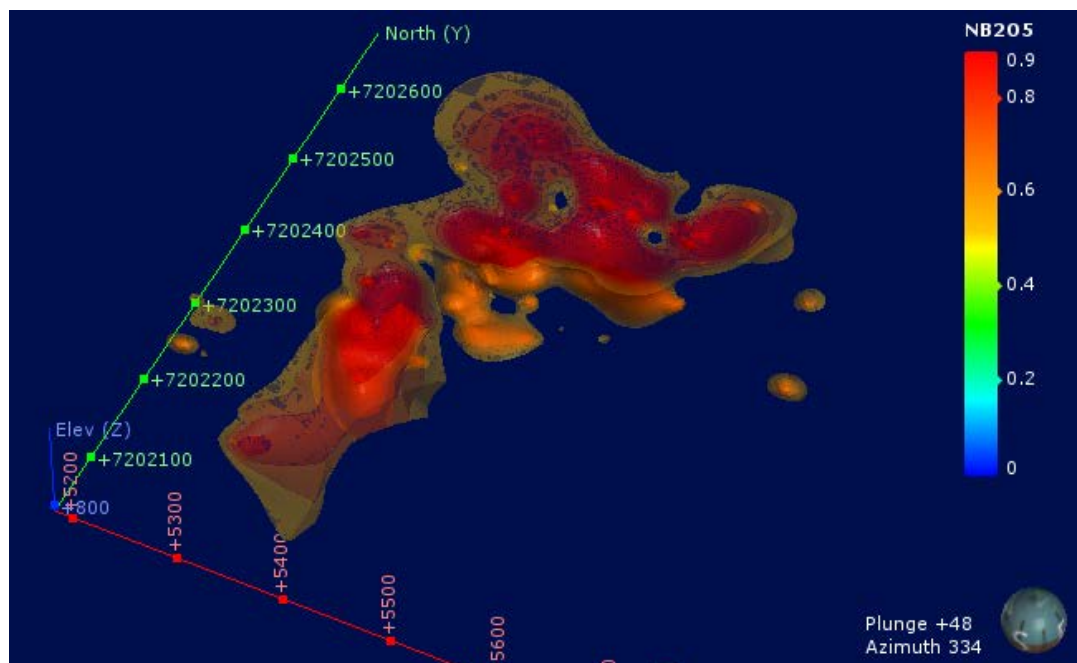


Figura 5.53 – Nuvens apenas com os teores acima de 0,5% de Nb_2O_5 .

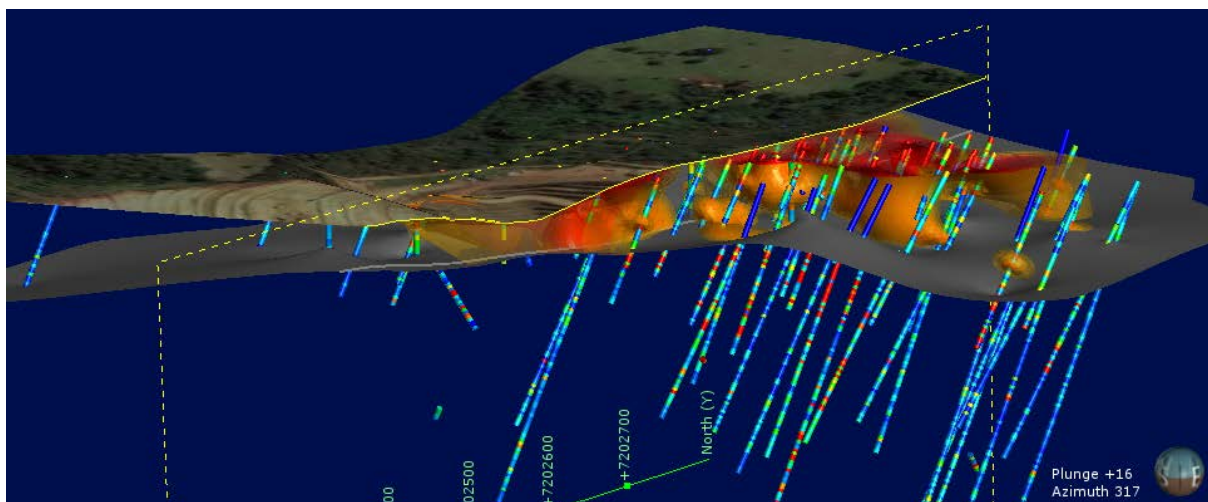


Figura 5.54 – Figura mostrando seção longitudinal com o furos de sondagem com os teores ativados o que possibilitou a interpolação das nuvens.

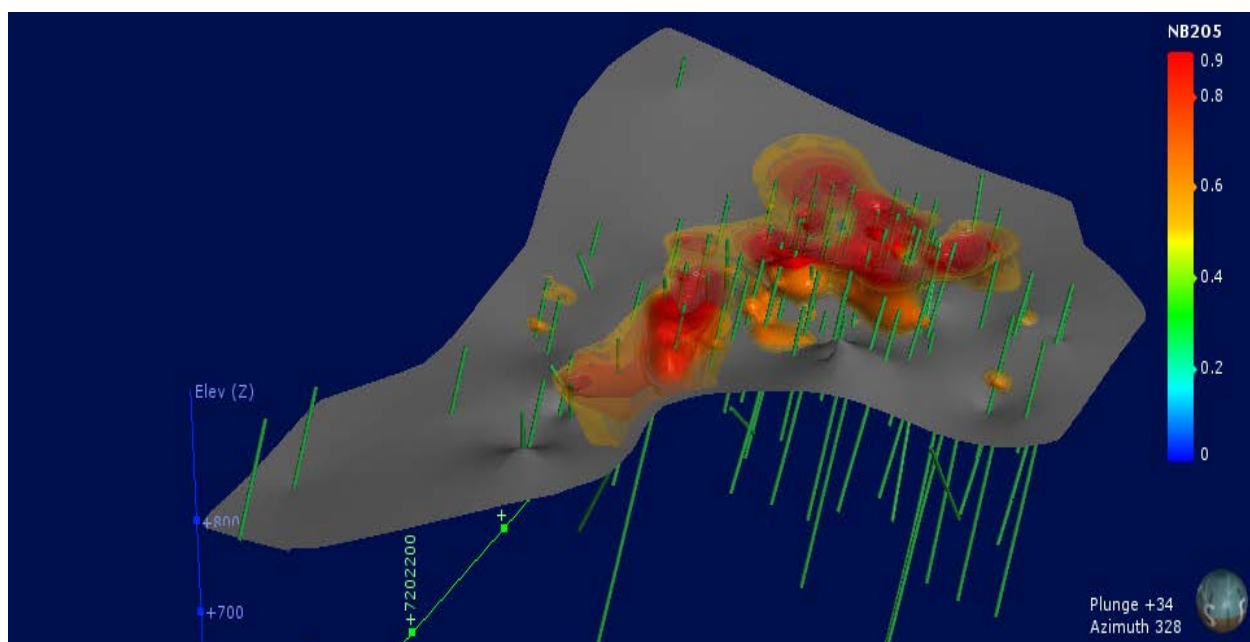


Figura 5.55 – Nuvem de teores acima da superfície PI/RF.

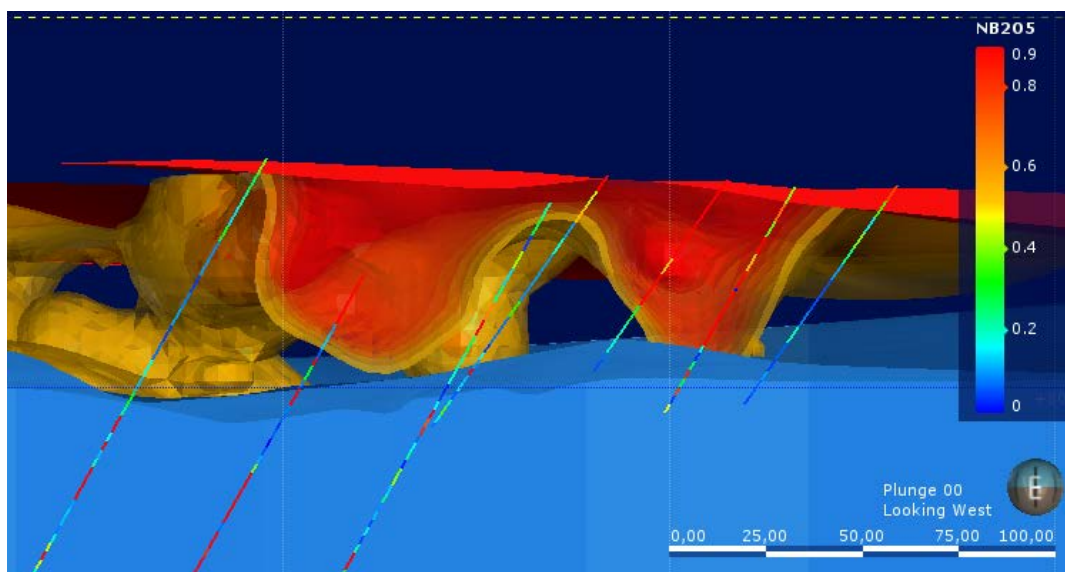


Figura 5.56 - Seção SN com os teores de Nb_2O_5 .

Nota-se na figura (Figura 5.56 - Seção SN com os teores de Nb_2O_5 . Figura 5.56) a presença de teores acima do *cut-off* (0,5% Nb_2O_5) no domínio da rocha fresca, o que torna fundamental estudos posteriores em rocha para compreender e entender a geometria do corpo mineralizados e seus teores aprimorando, assim, o planejamento de lavra.

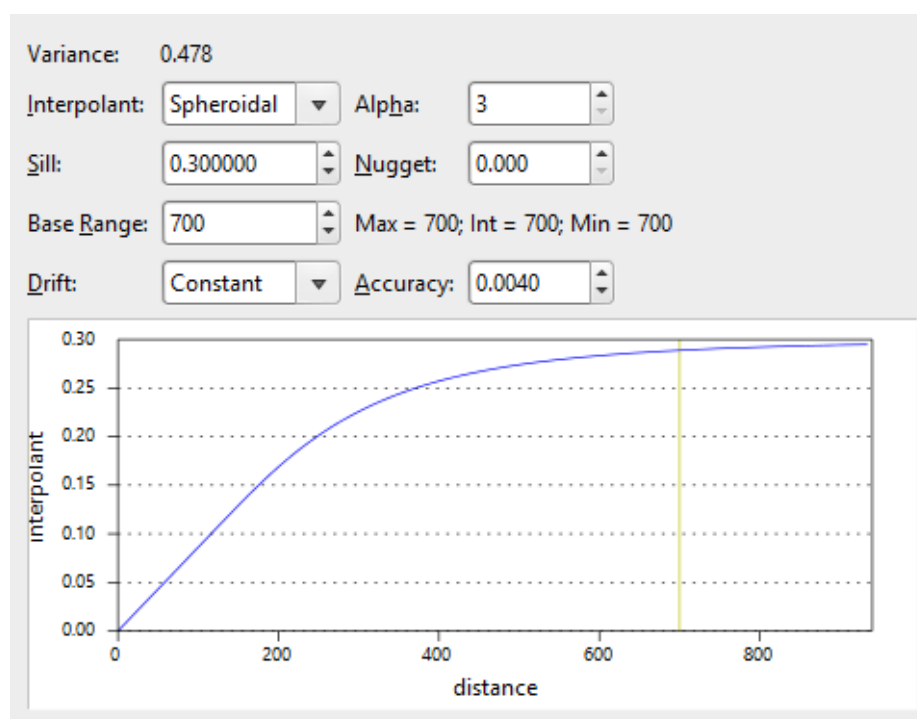


Figura 5.57 – Variograma gerado pelo software a partir da interpolação dos teores de Nb_2O_5 .

Fazendo-se a leitura do variograma (Figura 5.57) gerado pelo *software* a partir da interpolação dos teores, tem-se:

Tabela 8 –Elementos estruturas do variograma

Efeito pepita (C_0 , Nugget) = 0
Alcance (Range) = 700
Soleira (Sill) = 0,30

Com o efeito pepita apresentando valor nulo, tem-se a variável como bem estruturada. Assim, o grau de aleatoriedade da variável é pequeno, pois a componente é aleatória é pequena ($E=C_0/C$) (GUERRA 1988):

$E < 0,15$ a componente aleatória é pequena

$0,15 < E < 0,30$ a componente aleatória é significativa

$E > 0,30$ a componente aleatória é muito significativa

O valor do range de 700m significa a distância onde as variáveis perdem sua relação espacial. O efeito pepita demonstrado no variograma para variável Nb_2O_5 pode ser considerado nulo, demonstrando que o grau de aleatoriedade dessa variável é baixo. A variável Nb_2O_5 pode ser considerada como tendo uma estruturação espacial considerável, pois o campo estruturado do variograma é igual à variância total dos dados.

5.3.4 Volume a partir do *interpolant*

O volume foi obtido através da extração do sólido do *interpolant* de teores acima de 0,5% transformando-o em um *mesh*, possibilitando a individualização das nuvens de teor como um único corpo. Figura 5.58

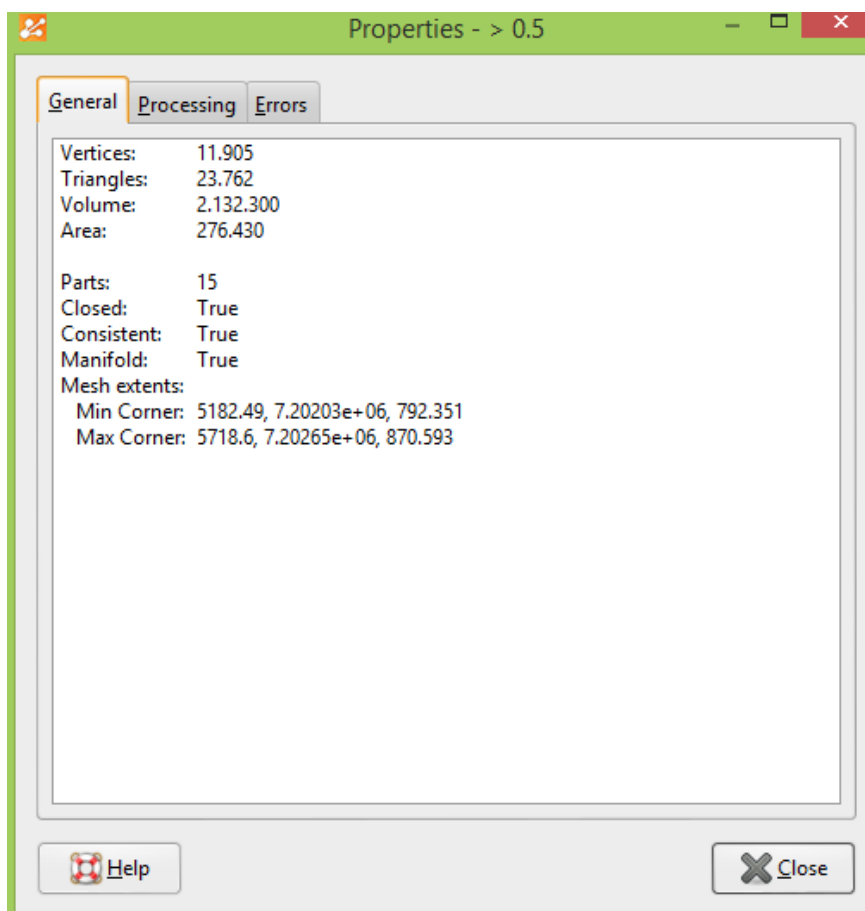


Figura 5.58 – Figura mostrando o volume do sólido extraído do software

Utilizou-se da seguinte equação para se estipular o recurso indicado em peso:

$$R = V \cdot d \cdot T$$

R = recurso em peso

V = volume

d = densidade aparente

T = concentração do minério

Volume = 2.132.300 m³

Densidade = 1,8 g/cm³

Teor = 0,5% (*cut-off*)

R=19190,7 toneladas a 0,5% de Nb₂O₅.

Category	Count	Mean	Std. Dev.	Lower Quartile	Median	Upper Quartile
Aloterita	0					
Rocha Fresca	0					
Zona Oxidada	134445	0.266	0.25937	0.116952	0.187391	0.327118
*Outside GM	0					

Figura 5.59 – A média dos teores de Nb_2O_5 na rocha oxidada é 0,266%.

Utilizando-se a média (0,266%) e o volume total de rocha oxidada tem-se:

$$R = V \cdot d \cdot T$$

R = recurso em peso

V = volume

d = densidade aparente

T = concentração do minério

Volume = 160.000.000 m³

Densidade = 1,8 g/cm³

Teor = 0,266 %

R=766.080 toneladas a 0,266% de Nb_2O_5 .

5.3.5 Modelo de blocos

O modelo de blocos foi gerado para posterior estimativa dos teores médios e recurso, o qual consiste na divisão da região em blocos tridimensionais aos quais podem ser atribuídas variáveis de diversas naturezas – teor, densidade e litologia. O tamanho desses blocos é variável e depende do tipo de jazida e dos métodos de lavra a serem utilizados (YAMAMOTO, 2001). No presente trabalho foram utilizados blocos de dimensões 5m x 5m

x 5m e limitados à rocha oxidada (*boundary*). A dimensão dos blocos, como dito, está relacionada ao tipo de lavra utilizada pela empresa mineradora.

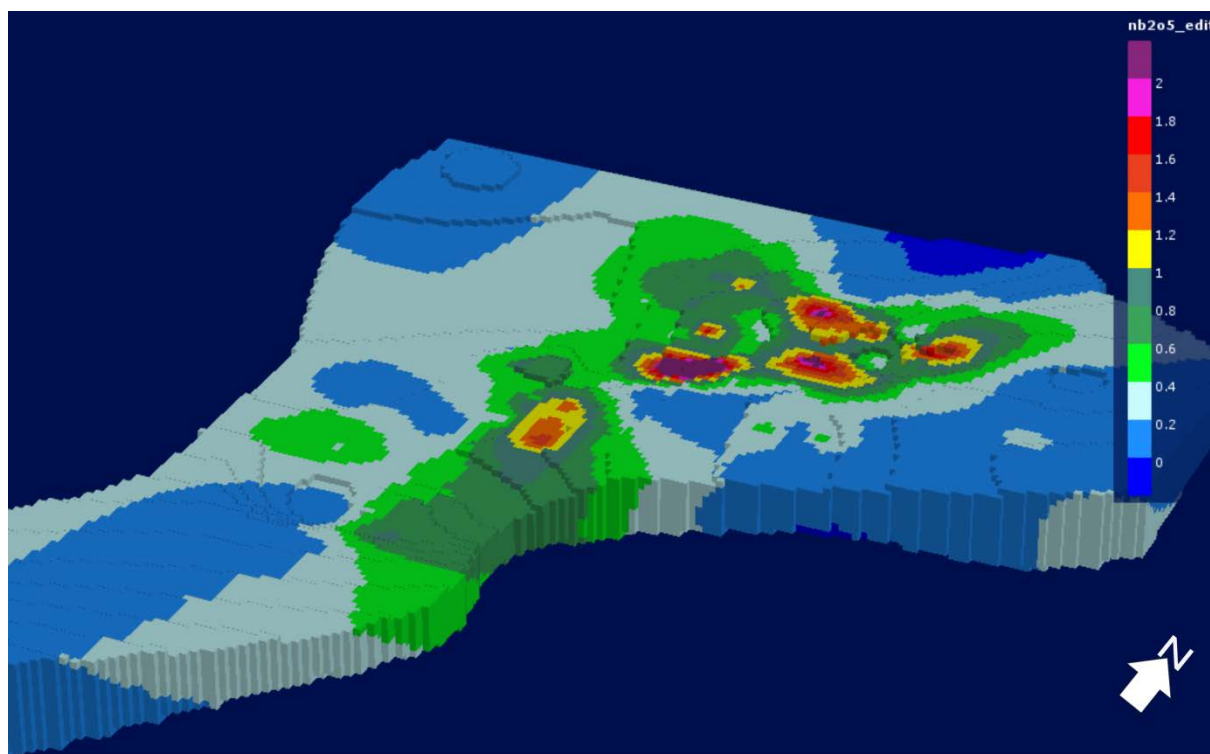


Figura 5.60 – Modelo de blocos de dimensão 5m x 5m x 5m, os blocos representados em cores quentes possuem teor de Nb_2O_5 acima de 0,5%.

O domínio de rocha oxidado foi usado como região limítrofe para os blocos (Figura 5.60), o qual foi dividido em 1.280.000 blocos equidimensionais com um teor médio de Nb_2O_5 atribuído a cada um desses. Partindo-se desse modelo, uma estimativa mais precisa pode ser realizada, utilizando-se da densidade média de cada bloco multiplicada pelo seu teor médio e pelo seu volume (5x5x5) a fim de obter o recurso em peso do bloco como uma única unidade. Sequencialmente, soma-se o recurso de cada bloco a fim de se obter o recurso total.

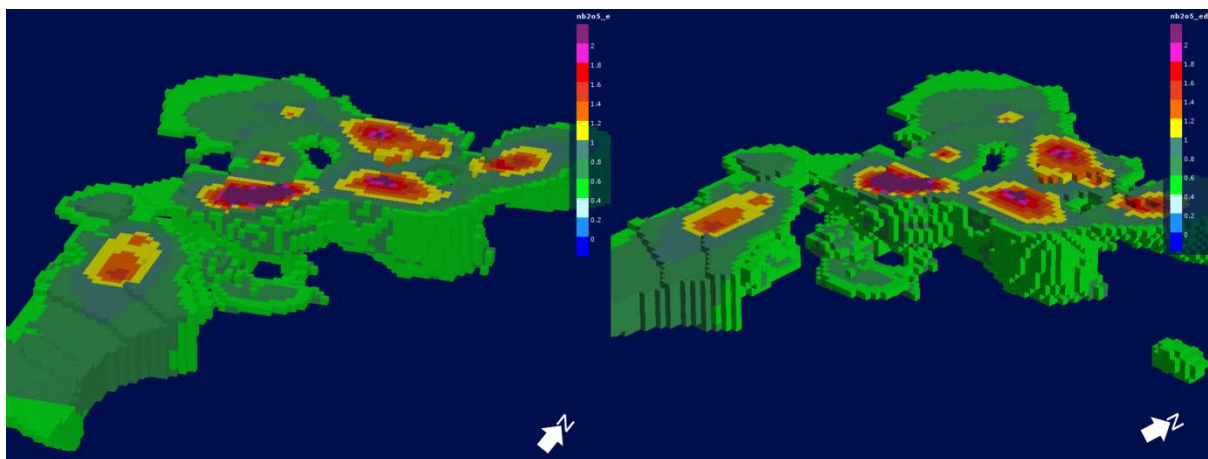


Figura 5.61 – Modelo de blocos apenas com os teores acima de 0,5% de Nb_2O_5 ativados.

A figura Figura 5.61 mostra apenas os blocos que apresentaram teor acima do *cutoff* (0,5% de Nb_2O_5). Esses totalizaram 208.656 blocos com dimensões de 5m x 5m x 5m, o que representa um volume considerável de minério em material oxidado.

Não foi possível fazer estimativa do recurso a partir do modelo de blocos por conta da falta de tempo hábil e disponibilidade de licenças ativas dos softwares capazes de desempenhar tal função. Porém esse modelo de blocos, juntos aos demais dados levantados nesse trabalho, encontra-se em posse da empresa mineradora para execução de trabalhos futuros.

5.4 Confecção de material didático

Ressalta-se também que a partir do material coletado em campo (uma amostra de mão representando cada litotipo constituinte do depósito) foi confeccionada uma Suíte do depósito nióbio de Catalão II, sendo esse era o único depósito alcalino brasileiro que não constava na coleção didática da disciplina de Geologia Econômica ministrada pelo Prof. Dr. Washington Barbosa Leite Junior. O material consiste, além das amostras e suas descrições, descrições petrográficas, nas principais bibliografias e em uma breve introdução sobre geologia e as características da mineralização de Catalão II.

6 Conclusões

Os objetivos propostos no presente trabalho foram alcançados, os quais consistiram no modelamento em três dimensões (3D) do perfil de alteração na porção noroeste da Mina de Boa Vista, que buscou identificar e caracterizar a geometria espacial do pacote oxidado, bem como a delimitação da superfície de contato entre solo e rocha em ambiente 3D. Além disso,

foi feito a modelagem dos envelopes de teores de Nb_2O_5 . A caracterização petrográfica, que era parte integrante dos objetivos desse trabalho, química e mineralógica dos litotipos primários também foi concluída com êxito.

Os dados petrográficos de testemunhos de sondagem e lâmina delgada, bem como as análises químicas mineral do pirocloro permitiram identificar diferenças texturais na ocorrência do mineral de minério.

As diferenças em textura, forma de ocorrência e a composição dos cristais de pirocloro sugere que a cristalização desses cristais não ocorreu em equilíbrio com a rocha hospedeira, tampouco sua cristalização ocorreu concomitante e na mesma fase. Possivelmente, essas diferenças estão ligadas a mistura de líquidos distintos provenientes de porções distintas do depósito (câmaras magmáticas diferentes interconectadas por dutos de alimentação).

Constatou-se a presença de minerais de elemento terras raras (ETR), como monazita - $(\text{Ce}, \text{La}, \text{Th})(\text{PO}_4)$ - e bastnasita - $(\text{Ce}, \text{La})\text{CO}_3\text{F}$ - tanto em lâmina quanto em testemunhos de sondagem. Esses foram encontrados tanto em Mg-carbonatito quanto em nelsonito. Em rocha fresca, caracterizado em furo de sondagem, o Mg-carbonatito apresenta-se mais susceptível a alteração (apresenta-se desagregado e poroso) e associados a monazita. Já em análise EDS em nelsonito no campo VC2_1.1, notou-se a presença de bastnasita - $(\text{Ce}, \text{La})\text{CO}_3\text{F}$ - e mozanita - $(\text{Ce}, \text{La}, \text{Th})(\text{PO}_4)$ – minerais de ETR.

O software *Leapfrog* é um software neozelandês relativamente novo no mercado da mineração, porém vem sendo cada vez mais utilizado pelas empresas em função, entre outros aspectos, da sua agilidade de processamento. Todavia, apesar do software ser satisfatório para a manipulação dos dados utilizados no presente trabalho, deve-se ressaltar que o manuseio desse tipo de ferramenta é feito por profissionais com conhecimento e experiência ampla em geologia, engenharia de minas e geoestatística.

O pacote de material oxidado se mostrou contínuo e com profundidade máxima de 40 metros, bem como a superfície limítrofe entre perfil intempérico/rocha sã se mostrou contínua e a partir dessa foi feita um mapa de isoespessura da mesma. A rocha oxidada atinge profundidades de 10 a 40 metros na área estudada e mantém-se continua por toda área.

O recurso calculado utilizando-se do sólido extraído do *interpolant* que engloba apenas teores maiores ou iguais a 0,5% de Nb₂O₅ foi estimada em 19.190,7 t de “minério” a 0,5% de Nb₂O₅.

O recurso calculado utilizando-se todo o sólido correspondente a rocha fresca foi estimada em 766.080 toneladas de “minério” a 0,266% de Nb₂O₅.

Nota-se que os diques de nelsonito que em rocha fresca possuem tendência Leste-Oeste e controlam os teores Nb₂O₅, também exercem influência nas tendências no perfil de alteração.

O modelo de blocos, com região limítrofe a rocha fresca, apresentou-se em 1.280.000 blocos de 5m x 5m x 5m, e o modelo de blocos com apenas os blocos disponíveis apenas aqueles com teor acima do *cut-off* (0,5% de Nb₂O₅) totalizaram 208.656 blocos com as mesmas dimensões do modelo total. Esse volume representa um volume considerável de minério em material oxidado demandando estudos futuros mais detalhados na área.

Além disso, analisando-se os furos de sondagem com o teores ativados constata-se uma alta densidade de amostras de alto teor na rocha fresca em profundidades não muito distantes da superfície PI/RF e concordantes com as nuvens de teor no pacote oxidado, o que torna fundamental estudos posteriores em rocha para caracterizar a geometria do corpo mineralizado na área de estudo.

7 Referências Bibliográficas

BARBOSA, O., BRAUN, O.P.G., DYER, R.C., CUNHA, C.A.B., 1970. Geologia da região do Triângulo Mineiro. Boletim DFPM/DNPM, 136: 140p.

BELL K. 1989. Carbonatites. Unwin Hyman. Londres

BROD, J.A., 1999. Petrology and geochemistry of the Tapira alkaline complex, Minas Gerais State, Brazil. Ph. D. Thesis, University of Durham, Durham, UK, 486 pp.

BROD, J.A., GASPAR, J.C., DE ARAÚJO, D.P., GIBSON, S.A., THOMPSON, R.N., JUNQUEIRA-BROD, T.C., 2001. Phlogopite and tetra-ferriphlogopite from Brazilian carbonatite complexes: petrogenetic constraints and implications for mineral-chemistry systematics. Journal of Asian Earth Sciences, 19(3): 265-296.

BROD, J.A., GIBSON, S.A., THOMPSON, R.N., JUNQUEIRA-BROD, T.C., SEER, H.J., MORAES, L.C., BOAVENTURA, G.R., 2000. The kamafugite-carbonatite association in the Alto Paranaíba igneous province, southeastern Brazil. Revista Brasileira de Geociências, 30: 408-412.

BROD, J.A., RIBEIRO, C.C., GASPAR, J.C., JUNQUEIRA-BROD, T.C., BARBOSA, E.S.R., RIFFEL, B.F., SILVA, J.F., CHABAN, N., FERRARI, A.J.D., 2004. Excursão 1. Geologia e mineralizações dos complexos alcalino-carbonatíticos da Província Ígnea do Alto Paranaíba, Congresso Brasileiro de Geologia, XLII, Araxá, MG, pp. 1-29.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). Sumário Mineral 2014. Brasília: DNPM, 2014. <Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br>>.

GIBSON, S.A., THOMPSON, R.N., LEONARDOS, O.H., DICKIN, A.P., MITCHELL, J.G., 1995. The Late Cretaceous Impact of the Trindade Mantle Plume - Evidence from Large-Volume, Mafic, Potassic Magmatism in SE Brazil. *Journal of Petrology*, 36(1): 189-229.

GOMES CB, RUBERTI E & MORBIDELLI L. 1989. Carbonatite complexes from Brazil: A review. *J South Amer Earth Sci* 3: 51-63.

LE MAITRE RW (2002) *Igneous rocks: a classification and glossary of terms*. Cambridge University Press, pp 236

MACHADO JUNIOR, D. L. Geologia do complexo alcalino-carbonatítico de Catalão II (GO). Anais do 37o Congresso Brasileiro de Geologia. Extended Abstracts. SBG, São Paulo, 1992a. p. 94-95.

MACHADO JUNIOR, D. L. Idades Rb/Sr do complexo alcalino-carbonatítico de Catalão II (GO). Anais do 37o Congresso Brasileiro de Geologia. Extended Abstracts. SBG, São Paulo, 1992b. p. 91-93.

MORBIDELLI L., GOMES C.B., BECCALUVA L., BROTZU P., CONTE A.M., RUBERTI E., TRAVERSA G., 1995b. Mineralogical, petrological and geochemical aspects of alkaline and alkaline-carbonatite associations from Brazil. *Earth-Sci.* 39: 135-168.

OLIVEIRA, S.M.B., IMBERNON, R.A.L., 1998. Weathering alteration and related REE concentration in the Catalão I carbonatite complex, central Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 11(4): 379-388.

OLIVEIRA, SONIA MARIA BARROS DE; IMBERNON, R. A. L. Weathering alteration and related REE concentration in the Catalão I carbonatite complex, central Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 11, n. 4, p. 379-388, 1998.

PALMIERI, M., 2011. Modelo Geológico e Avaliação de Recursos Minerais do Depósito de Nióbio Morro do Padre, Complexo alcalino-carbonatítico Catalão II, GO, Universidade de Brasília, Brasília.

RAMIRES, J. E. F., 2015. Geological and structural pit mapping in a detail scale, structural control, and magnetic scanning of the fresh rock in the Boa Vista Niobium Mine at Catalão, Goiás, Brazil. BSc monography, Instituto de Geociências, UNESP, Rio Claro, Brazil.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M. de; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (Orgs.) *Decifrando a Terra*. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 223p

THOMPSON, RN, GIBSON SA, MITCHELL JG, DICKIN AP, LEONARDOS, OL, BROD, J.A, GREENWOOD, JC, 1998. Migrating Cretaceous-Eocene magmatism in the Serra do Mar alkaline province, SE Brazil: Melts from the deflected Trindade mantle plume? *Journal of Petrology*, 39(8): 1493-1526.

WOOLLEY A.R., KJARSGAARD B.A. (2008). Carbonatite occurrences of the world: map and database. Geological Survey of Canada

Websites:

<http://www.cbmm.com.br/br/p/66/historia-do-niobio.aspx>

<http://www.cdcc.sc.usp.br/elementos/niobio.html>

<http://www.chemicool.com/elements/niobium.html>

APÊNDICE A

DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA

Amostra/Lâmina: VC-01

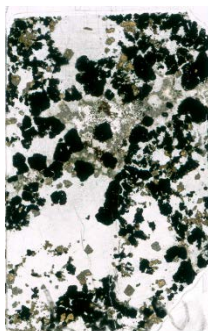


Figura 1 – Lâminas VC-01

ROCHA: Nelsonito

DESCRIÇÃO MESOSCÓPICA:

Rocha de coloração escura, inequigranular, granulação média a grossa, com estrutura maciça e fortemente magnética. Apresenta textura “sal e pimenta” – cristais de magnetita dispersos em matriz de apatita.



Figura 2 – Amostra VC-01

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Estrutura/Textura: Inequigranular, afanítica a fanerítica, com matriz de apatita formando uma malha bem fina entre os cristais de pirocloro e magnetita.

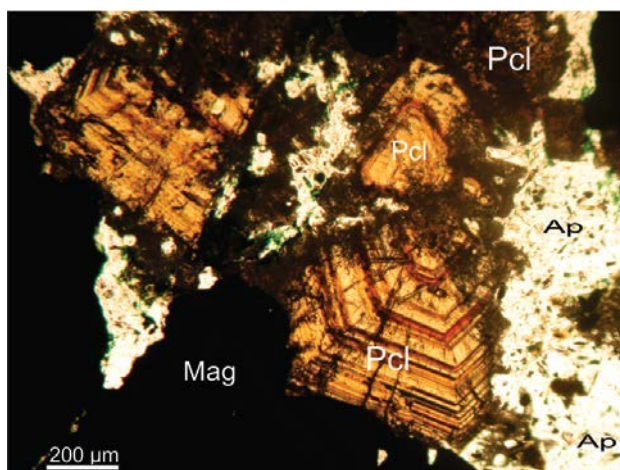


Figura 3 – Cristais de pirocloro apresentando um zoneamento interno envoltos por matriz apatítica e cristais magnetita. Foto em microscópio de luz transmitida da lâmina VC-01 com aumento de 5x.

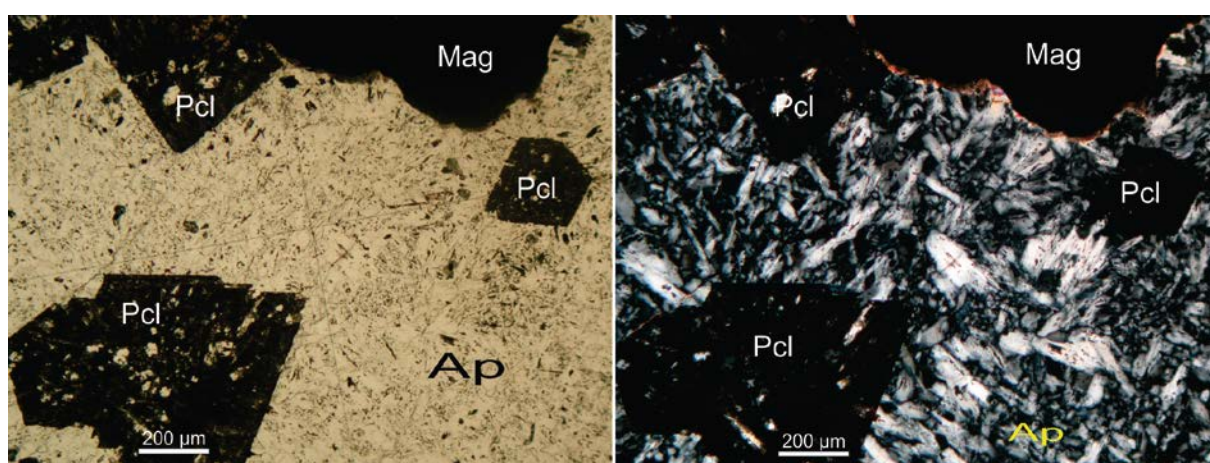


Figura 4 - Cristais de pirocloro em processo de alteração envoltos por matriz apatítica. Foto em microscópio de luz transmitida da lâmina VC-01 com aumento de 5x.

Composição modal visualmente estimada:

Tabela 1- Composição modal mineralógica da lâmina VC-01

Magnetita	30%	Calcita	20%
Apatita	30%	Pirocloro	5%
Flogopita	5%	Illmenita	2%

Descrição e Relações mineralógicas e texturais:

Apatita: cristais aneuclrais representa uma matriz de granulação muito fina e birrefringência cinza claro a branco.

Calcita: cristais disseminados na matriz, preenchendo espaços entre cristais de magnetita ou concentrado em bolsões, com pleocoísmo alto, de granulação muito fina a fina e transparente.

Flogopita: cristais euedrais a subedrais de granulação que varia muito fina a grossa e coloração marrom claro a vermelho escuro.

Magnetita: euedrais a subedrais, de granulação muito fina a média e coloração cinza claro.

Pirocloro: apresenta cristais euedrais a subedrais, alguloso representando uma seção basal, de granulação muito fina a fina, e coloração marrom escuro.

Amostra/Lâmina: VC-02

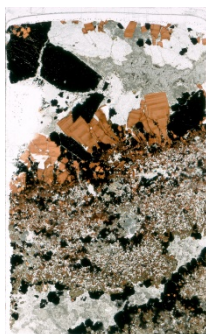


Figura 5- Lâmina VC-02

ROCHA: Nelsonito

DESCRIÇÃO MESOSCÓPICA:

Rocha de coloração escura, fanerítica a porfirítica (fenocristais de flogopita e ilmenita), com estrutura maciça e fortemente magnética. com textura inequigranular, ocorrendo desde a forma de agregados muito finos a cristais de granulação muito grossa.

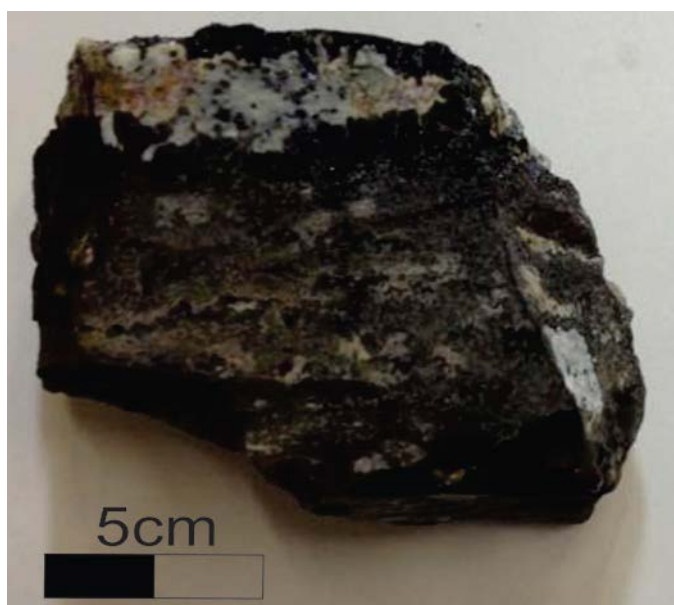


Figura 6 – Amostra VC-02

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Estrutura/Textura: Textura inequigranular a porfirítica, ocorrendo em forma de aglomerados muito finos a cristais de granulação grossa. Carbonatos compõem a matriz muito fina.

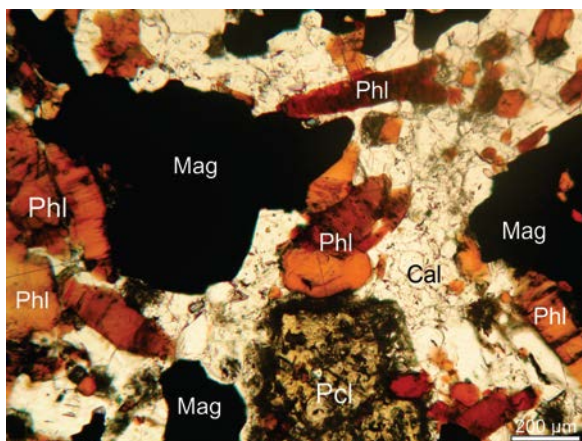


Figura 7 - Cristais de flogopita (phl), magnetita(mag) e pirocloro(pcl) em matriz calcítica.

Composição modal visualmente estimada:

Tabela 2 - Composição modal mineralógica da lâmina VC-02

Carbonato	15%	Magnetita	40%
Flogopita	15%	Pirocloro	10%
Apatita	10%	Ilmenita	10%

Descrição e Relações mineralógicas e texturais:

Calcita: compõe a matriz das amostras e forma cristais eudrais a anedrais, de granulação muito fina a grossa, apresentando clivagem romboédrica em grão maiores.

Flogopita: apresenta cristais eudrais a subedrais, de granulação muito fina a grossa, coloração de marrom clara a vermelha escura, geralmente associada à magnetita ou disseminada na amostra.

Pirocloro: ocorre em cristais eudrais a subedrais, de granulação muito fina a média, coloração amarela escura a marrom clara, ocorrendo disseminado na amostra ou em concentrações pontuais, associado à magnetita e flogopita.

Magnetita: apresenta cristais eudrais a anedrais, de granulação muito fina a grossa, coloração cinza claro, ocorrendo disseminada na amostra ou em concentrações pontuais, estando quase sempre associada à flogopita e ao pirocloro.

Amostra/Lâmina: VC-3



Figura 8 - Lâmina VC-03

ROCHA: Carbonatito

DESCRIÇÃO MESOSCÓPICA:

Este litotipo é composto por fenocristais de flogopita em matriz muito fina composta por flogopita, magnetita e carbonato.



Figura 9 – Amostra VC-03

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Estrutura/Textura: Inequigranular, afanítica a porfirítica (fenocristais de flogopita).

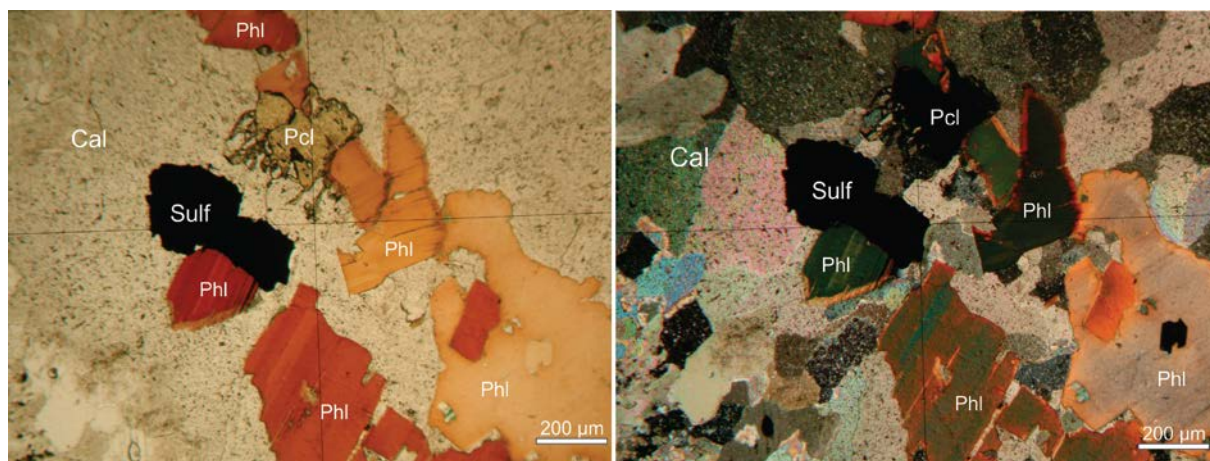


Figura 10 – Matriz calcítica com cristais de diversos tamanhos apresentando sulfeto e fenocristais de flogopita.

Composição modal visualmente estimada:

Tabela 3 - Composição modal mineralógica da lâmina VC-03

Carbonato	68%	Magnetita	15%
Flogopita	10%	Pirocloro	5%
Sulfetos	2%		

Descrição e Relações mineralógicas e texturais:

Calcita: cristais eudrais a anedrais, textura inequigranular, fanerítica com clivagem romboédrica visível e incolor. Também ocorre com granulação a fina em agregados e bolsões.

Flogopita: ocorre como cristais eudrais a subedrais, de granulação muito fina a fina, coloração alaranjado a avermelhado.

Magnetita: cristais subedrais a anedrais, de granulação muito fina, dispersos pela lâmina.

Amostra/Lâmina: VC-4

Figura 11 – Lâmina VC-04

ROCHA: Flogopita picrito

DESCRIÇÃO MESOSCÓPICA:

Rocha de cor verde, granulação fina a média, textura inequigranular afanítica a porfirítica, textura venular. Fenocristais de flogopita e olivina com a presença de glóbulos de calcita, matriz intragranular fina composta por flogopita, magnetita e perovskita.



Figura 12 – Amostra VC-4

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Estrutura/Textura: Rocha inequigranular, fanerítica a porfirítica, de coloração verde escura. A rocha contém fenocristais de flogopita e olivina com matriz fina composta por flogopita, magnetita e peroviskita.

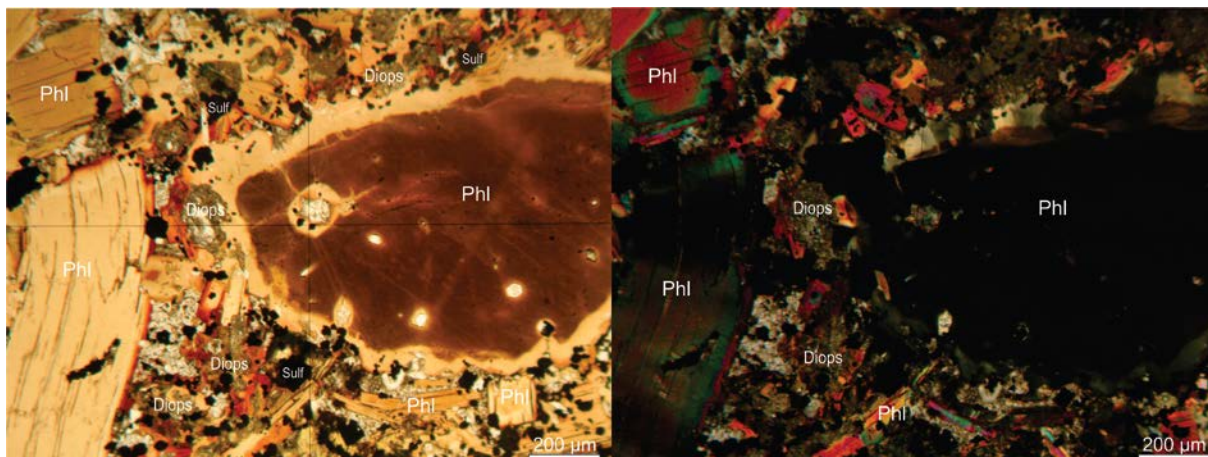


Figura 13 – Fenocristais de flogopitas zonados envoltos em matriz de flogopita, carbonato, diopsidio e sulfetos.

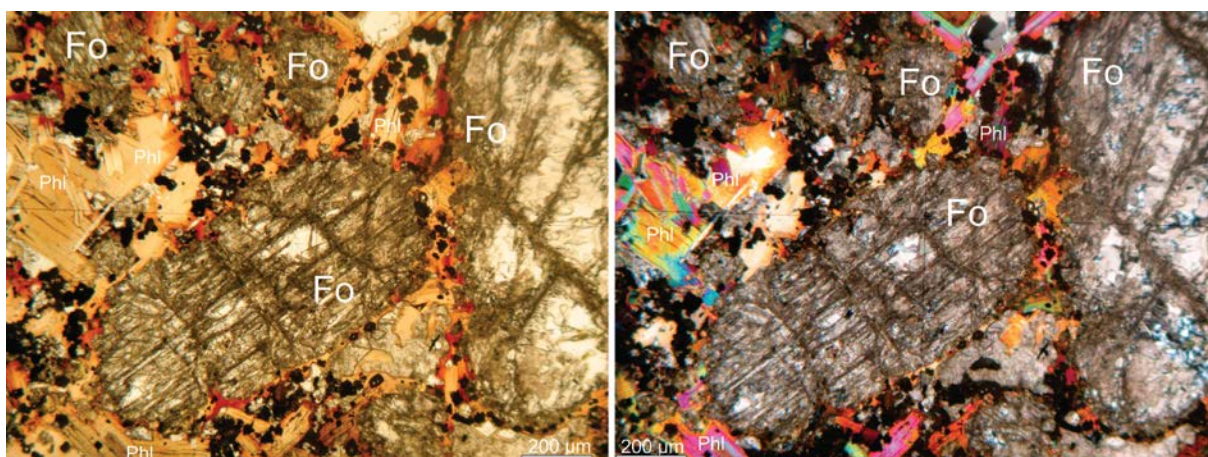


Figura 14 – Fenocristais de Mg-Olivina envolto por cristais de flogopita e sulfetos.

Composição modal visualmente estimada:

Tabela 4 - Composição modal mineralógica da lâmina VC-04

Olivina	10%	Magnetita	10%
Diopsídeo	5%	Peroviskita	5%
Flogopita	60%	Clorita	10%

Descrição e Relações mineralógicas e texturais:

Olivina: cristais eudrais à subedrais, amarelo claro a cinza claro, granulação grossa, envoltos por uma matriz fina de flogopita, ocorrendo como fenocristais.

Flogopita: magmáticas e metassomáticas, as magmáticas apresentam cristais eudrais a subedrais, na forma de fenocristais, porém com granulação fina quando compondo a matriz e coloração amarela clara a avermelhada.

Diopsídio: cristais prismáticos, fraturado e alterados com substituição carbonática, granulação grossa, ocorrendo como fenocristais.

Perovskita: cristais eudrais a subedrais, de granulação fina, coloração marrom, ocorrendo associada à magnetita e flogopita.

Clorita: ocorre associada aos cristais de flogopita.

Magnetita: cristais eudrais de granulação fina a média.

Amostra/Lâmina: VC-5



Figura 15 – Lâminas VC-05

ROCHA: Filito/Fenito

DESCRIÇÃO MESOSCÓPICA:

Rocha de cor cinza, granulação fina, com textura inequigranular, afanítica com estrutura foliada reliquiar.



Figura 16 – Amostra VC-05

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Estrutura/Textura: Textura é inequigranular com a matriz composta por feldspato, quartzo, flogopita e/ou clorita. Apresenta bandamento composicional com bandas compostas por quartzo e feldspato, e bandas compostas por flogopita e/ou clorita.

Composição modal visualmente estimada:

Tabela 5 - Composição modal mineralógica da lâmina VC-05

Carbonato	5%	Feldspato	30%
Flogopita	15%	Quartzo	30%
Clorita	20%	Opacos	traço

Descrição e Relações mineralógicas e texturais:

Feldspato: cristais anedrais a subedrais, de granulação muito fina a média, coloração cinza clara a cinza escura, ocorrem por toda a rocha.

Quartzo: anedrais, de granulação muito fina a média, coloração cinza clara, ocorrem por toda a rocha.

Flogopita: cristais anedrais a euedrais, de granulação muito fina a muito grossa, coloração marrom clara a marrom escura, representando o principal mineral cristalizado durante o processo de fenitização e geralmente ocorre associada à clorita que representa um produto de alteração supergena da flogopita.

Clorita: como demonstrado são anedrais a subedrais, de granulação muito fina a média, coloração verde clara a escura.

Carbonato: cristais anedrais a subedrais, de granulação fina a média, ocorrendo cristais disseminados nas lâminas preenchendo interstícios dos grãos de feldspato, quartzo e flogopita.

Minerais opacos: ocorrem na forma de traço, disseminados ao longo da rocha.

Amostra/Lâmina: VC-6



Figura 17 – Lâmina VC-06

ROCHA: Silexito/Silcrete

DESCRIÇÃO MESOSCÓPICA:

Macroscopicamente a amostra apresenta duas fases distintas, uma com textura afanítica, faturamento conchoidal e estrutura compacta; e a outra com textura brechóide com matriz escura e clastos claros de composição semelhante a semelhante à primeira fase. Este litotipo ocorre usualmente lentes e corpos tabulares sub-horizontais. Possivelmente seu protolito é o dolimita carbonatito (Mg-carbonatito) em contato com uma brecha de conduto. Cerca 90% da rocha é composta por sílica recristalizada substituindo o carbonato no processo supergênico.



Figura 18 – Amostra VC-06

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Estrutura/Textura: Textura afanítica, apresentando substituição total do carbonato por sílica com goethita preservando os antigos contatos entre os grãos.

Na porção brechóide apresenta matriz afanítica com clastos de diversas composições, porém ambos silicificados.

Composição modal visualmente estimada:

Tabela 6 - Composição modal mineralógica da fase maciça da lâmina VC-06

Fase Maciça	
Quartzo	98%
Goethita	2%

Tabela 7 - Composição modal mineralógica da fase brechóide da lâmina VC-06

Fase Brechóide			
Quartzo	45%	Magnetita	20%
Apatita	15%	Barita	Traço
Hollandita	Traço	Goethita	20%

Descrição e Relações mineralógicas e texturais:

Quartzo: apresenta-se substituindo (silicificando) o carbonato anterior, cimentando a rocha.

Apatita: cristais prismáticos euedrais arredondados de coloração branca a cinza, também ocorre preenchendo cavidades e cimentando a rocha.

Magnetita: ocorre em granulações média a grossa, disseminada pela lâmina.

Goethita: apresenta-se em filmes nas bordas dos grãos de quartzo e apatita preenchendo cavidades e como cimento.

Barita: encontra-se em cristais eudricos muito alterados, porém abundantes em todas as lâminas.

Amostra/Lâmina: VC-7**Figura 19 – Lâmina VC-7**

ROCHA: Anfibolito

DESCRIÇÃO MESOSCÓPICA:

Rocha de coloração escura, afanítica, de estrutura maciça e não magnética.



Figura 20- Amostra VC-7

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Estrutura/Textura: Textura afanítica,

Composição modal visualmente estimada:

Tabela 8 - Composição modal mineralógica da fase maciça da lâmina VC-08

Actinolita	40%	Plagioclásio	10%
Flogopita	28%	Quartzo	2%
Clorita	20%	Opacos	traço

Descrição e Relações mineralógicas e texturais:

Actinolita: cristais anedrais a subedrais, hábito aciculares a prismático, coloração verde clara a marrom, em matriz e associada ao plagioclásio e a flogopita.

Flogopita: cristais euedrais a subedrais, de granulação muito fina a grossa, coloração marrom clara a vermelha, ocorre disseminada na amostra ou associada à actinolita. A flogopita é produto messomático (femitização).

Plagioclásio: ocorre na forma de cristais anedrais a euedrais, de coloração acinzentada, presente na matriz muito fina e em cristais de granulação média.

Clorita: apresenta cristais anedrais, de coloração verde clara a escura, na forma de cristais prismáticos disseminados ao longo da rocha.

Quartzo: anedrais, apresentam-se acinzentadas e ocorrem disseminados pela lâmina.

Minerais opacos: ocorrem na forma de traço, disseminados ao longo da rocha.