



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EXPLORAÇÃO PETROLÍFERA E MINERAL**



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Caracterização e tratamento térmico das fluorapatitas gemológicas de
Sumé-Paraíba**

FABRÍCIO FERNANDES VIEIRA

Orientadora: Profa. Dra. Elissandra N. Moura-Lima (UFCEG)

Segundo orientador: Prof. Dr. Lauro César Montefalco de Lira Santos (UFCEG)

**CAMPINA GRANDE - PB
JUNHO - 2017**

FABRÍCIO FERNANDES VIEIRA
fabriciofv@terra.com.br

**Caracterização e tratamento térmico das fluorapatitas gemológicas de
Sumé-Paraíba**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral da Universidade Federal de Campina Grande, orientada pela Profa. Dra. Elissandra N. Moura-Lima e pelo Prof. Dr. Lauro César Montefalco de Lira Santos, em preenchimento parcial para obter o grau de Mestre em Exploração Petrolífera e Mineral.

Orientadora: Profa. Dra. Elissandra N. Moura-Lima (UFCG)

Segundo orientador: Prof. Dr. Lauro César Montefalco de Lira Santos (UFCG)

CAMPINA GRANDE - PB
JULHO- 2017

Fabrcio Fernandes Vieira

Caracterizao e tratamento trmico das fluorapatitas gemolgicas de Sum-
Paraiba

Dissertao de mestrado submetida ao Programa de Pds-Graduao em Explorao Petrolfera e Mineral da Universidade Federal de Campina Grande, orientada pela Prof^a. Dra. Elissandra N. Moura-Lima e pelo Prof. Dr. Lauro Czar Montefalco de Lira Santos, como requisito necessrio a obtenao do grau de Mestre em Explorao Petrolfera e Mineral.

Aprovada em: ____ / ____ / ____

Presidente: Dra. Elissandra N. Moura-Lima (UFCG)

Dr. Dwight Rodrigues Soares (IFPB)

Dr. Lauro Czar Montefalco de Lira Santos (UFCG)

CAMPINA GRANDE - PB
Junho - 2017

Dedico esse mestrado aos meus pais, Francisco e Maria do Carmo, pelo apoio, encorajamento e por acompanhar nossas vidas de forma singela e carinhosa.

Essa vitória eu dedico, com todo meu amor, a vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo apoio e torcida. Viva os BATUTAS.

Agradeço aos meus orientadores, Elissandra e Lauro, pela paciência, confiança e dedicação;

Agradeço ao Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), ao aprendizado, oportunidade e apoio com os laboratórios. Francisco Hollanda pela amizade, e a todos os envolvidos no Projeto Entidades Associadas.

Agradeço ao Jurgen por ter aberto as portas do LAPEGE/CETEM; Carol e Luisa, as gemas mais preciosas que topei nessa etapa, gratidão pela contribuição e parceria, carinho imenso por vocês.

Agradeço ao professor da UFOP Ricardo Sholtz, pelo ensinamento e a parceria nas pesquisas; ao professor Klaus por me receber no laboratório de física da UFMG.

Agradeço ao amigo Davi Ventura por apresentar a área de ocorrência das apatitas e fornecer amostras para os ensaios.

Agradeço ao Lunático e a Vegetal por estarem presentes desde o início dessa jornada compartilhando o aconchego do lar comigo.

Agradeço o Mestre Henrique Soares pelo apoio dado nos momentos mais difíceis da dissertação.

Agradeço a José Ferreira Tavares por apresentar a geologia da Paraíba e por ser o companheiro de campo.

Agradeço às amigadas aqui conquistadas principalmente Cayo, Matheus, Vitor, Leandro, Titica, Pedrinho e Henrickson; Valeu pelas resenhas, ferração e jogos do GALO.

Agradeço a UFCG e ATECEL, seus professores e funcionários por todo apoio institucional.

Por fim, minha gratidão ao ensino público, gratuito e de qualidade e a todos que fazem de sua rotina um instrumento para fortalecê-lo ainda mais.

*“Minha vida é andar por este país
Pra ver se um dia descanso feliz
Guardando as recordações
Das terras onde passei
Andando pelos sertões
E dos amigos que lá deixei”*

Luiz Gonzaga

RESUMO

VIEIRA, Fabrício Fernandes. Caracterização e tratamento térmico das fluorapatitas gemológicas de Sumé-Paraíba. Campina Grande, 2017, 61f. Dissertação (Mestrado em Exploração Petrolífera e Mineral) – Programa de Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral, Unidade Acadêmica de Engenharia de Minas e Geologia, Universidade de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

As apatitas da região de Sumé, cidade localizada no Cariri paraibano, estão inseridas nos skarnitos da Província Borborema, mais precisamente no Complexo Sumé do terreno geotectônico Alto Moxotó, correlacionado à orogênese Brasileira. As apatitas da região já foram alvo de pesquisas para exploração do minério fosfato e atualmente é estudada para fins gemológicos. Após tratamento térmico, a apatita apresenta cor azul neon, que tem grande aceitação no mercado e, conseqüentemente, valor agregado. O objetivo deste trabalho é caracterizar a apatita verde bruta e a apatita azul tratada, através de análises laboratoriais físicas e/ou químicas. As análises físicas apresentaram índice de refração e densidade compatível com a literatura que são 1,635 a 1,641 e 3,16 e 3,23g/cm³ respectivamente. Para o tratamento térmico da apatita verde natural, a faixa de temperatura de 700°C é a que resulta na cor azul artificial mais intensa. Os resultados das análises químicas de fluorescência e microfluorescência mostraram que se trata de uma fluorapatita, apresentando concentrações de Neodímio e Praseodímio e alta anomalia de Tório. As análises de UV-Visível constataram as bandas dos terras raras Neodímio e Praseodímio. Os espectros de Infravermelho evidenciaram nas amostras tratadas a perda de água e os carbonatos de substituição. A mudança de cor após tratamento térmico das apatitas verdes naturais para as apatitas azuis artificiais é creditada à substituição do íon (PO₄)³⁻, pelo íon Mn⁵⁺. As apatitas azuis tratadas apresentam coloração violeta quando estão submetidas à radiação UV, enquanto as apatitas verdes naturais não alteram sua cor.

Palavras-chaves: Apatita, Província Borborema, tratamento térmico, caracterização mineral, gema.

ABSTRACT

VIEIRA, Fabrício Fernandes. *Characterization and heat treatment of the gemological fluorapatites of Sumé-Paraíba Campina Grande*, 2017, 61f. Dissertação (Mestrado em Exploração Petrolífera e Mineral) – Programa de Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral, Unidade Acadêmica de Engenharia de Minas e Geologia, Universidade de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

Apatite crystals of the Sumé region, occur in the Cariri region, inserted in skarns of the Sumé Complex, of the Alto Moxotó Terrane, Borborema Province, which is correlated to the Brasiliano orogeny. Such minerals, has already been focus of exploitation research, being currently studied for gemological purposes. After the heat treatment, the apatite show blue neon color, which has great acceptance in the market and, consequently, economic value. The objective of this work is to characterize the crude green apatite and the treated blue apatite, through physical and / or chemical laboratory analyzes. The physical analyses presented refractive index and density compatible with the literature data that are 1,635 to 1,641 and 3,16, besides 3,23 g/cm³, respectively. For the heat treatment of natural green apatite, the temperature range of 700°C resulted in the most intense artificial blue color. The results of the chemical analyses of fluorescence and microfluorescence showed that it corresponds to a fluorapatite, presenting considerable concentrations of Neodymium and Praseodymium and high thorium anomaly. UV-Visible analyses showed the rare earth bands neodymium and praseodymium. Infrared spectra revealed in loss of water and carbonate replacement in the treated samples. Color changing after heat treatment of the natural green apatites to the artificial blue ones is credited to the substitution of the ion (PO₄)³⁻ by the ion Mn⁵⁺. Treated blue apatites showed violet coloration when subjected to UV radiation, while natural green apatites do not alter their color.

Keywords: Apatite, Borborema Province, Heat Treatment, Mineral Characterization, Gems

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Mapa de localização geográfica da área de estudo.	12
Figura 2.1 - Localização geotectônica da Província Borborema na Plataforma Sulamericana..	15
Figura 2.2 - Contexto tectônico regional da Província Borborema de acordo com Santos et al., 2014.	16
Figura 3.1 - Sistema de cristalização hexagonal da apatita.	20
Figura 4.1 - Mapa de localização das ocorrências visitadas.	25
Figura 4.2 - Comportamento da luz ao incidir em dois meios com índice de refração diferentes.	29
Figura 4.3 - Principais acessórios do espectrômetro por transformada de Fourier de absorção no infravermelho.	33
Figura 5.1 - Aspectos de campo de ortognaises bandados do Complexo Floresta.	36
Figura 5.2 - Ocorrência de rochas em blocos da suíte Olho D'Águado Cunha.	37
Figura 5.3 - Afloramento com a ocorrência de apatita.	37
Figura 5.4 - Amostras brutas de apatita apresentando hábito bem definido e até 8cm de comprimento no eixo maior C.	38
Figura 5.5 - A imagem A mostra grãos de apatita selecionados para tratamento térmico, a imagem B mostra a coloração resultante de tratamento térmico.	39
Figura 5.6 - Tratamento térmico em diversas temperatura.	40
Figura 5.7 - Resultados da análise por microfluorescência de raio-X na amostra Azul 1.	42
Figura 5.8 - Resultados da análise por microfluorescência de raio-X na amostra Azul 2.	43
Figura 5.9 - Resultados da análise por microfluorescência de raio-X na amostra Azul 3.	44
Figura 5.10 - Resultados da análise por microfluorescência de raio-X na amostra Azul 4.	45
Figura 5.11 - Resultados da análise por microfluorescência de raio-X na amostra Verde 1.	46
Figura 5.12 - Resultados da análise por microfluorescência de raio-X na amostra Verde 2.	47
Figura 5.13 - Resultados da análise por microfluorescência de raio-X na amostra Verde 3.	48
Figura 5.14 - Resultados da análise por microfluorescência de raio-X na amostra Verde 4.	49
Figura 5.15 - Resultados da análise por microfluorescência de raio-X na amostra Verde 5.	50
Figura 5.16 - Espectro de absorção óptica das amostras (a) apatita verde natural e (b) apatita azul tratada termicamente.	51
Figura 5.17 - Espectro de Infravermelho das apatitas Azul e Verde.	53
Figura 5.18 - Espectro Raman – Apatita Azul e Verde.	54
Figura 5.19 - Espectros EPR das apatitas.	54
Figura 5.20 - (A) Amostras selecionadas para tratamento térmico, (B) amostras após o tratamento térmico, (C) fluorescência violácea nas amostras tratadas.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Características mineralógicas da Apatita.	21
Tabela 5.1 - Resultados da análise semi-quantitativa por fluorescência de raio-X.	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.2	Justificativa e Objetivos.....	11
1.3	Localização da área de estudo	12
2	CONTEXTO GEOLÓGICO	14
2.1	Província Borborema.....	14
3	APATITA	20
4	METODOLOGIA	24
4.1	Etapa pré-campo.....	24
4.2	Etapa de campo	24
4.3	Etapa de Laboratório.....	26
4.3.1	Análises Química.....	27
4.3.2	Ensaio de densidade	28
4.3.3	Índice de refração	29
4.3.4	UV visível	30
4.3.5	Infravermelho.....	31
4.3.6	Raman	33
4.3.7	EPR	34
4.3.8	Luz Ultravioleta	34
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
5.1	Geologia Local	36
5.2	Tratamento térmico	38
5.3	Fluorescência e microfluorescência de raio x	40
5.4	UV Visível e Infravermelho próximo (UV/VIS-NIR).....	51
5.5	Infravermelho	52
5.6	Raman.....	53
5.7	EPR.....	54
5.8	Luz Ultravioleta	55
6	CONCLUSÕES	57
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

O presente trabalho, intitulado “Caracterização e tratamento térmico das fluorapatitas gemológicas de Sumé-Paraíba”, correspondente à dissertação de mestrado de Fabrício Fernandes Vieira, do Programa de Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral (PPGEPM) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Conta com a orientação da professora Dra. Elissandra Nascimento Moura-Lima e do professor Dr. Lauro César Montefalco de Lira Santos. Esta pesquisa está inserida no "Projeto de caracterização de minerais industriais e gemas do Nordeste", do programa Entidades Associadas do Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação, através de parceria entre a UFCG e o Centro de Tecnologia Mineral (CETEM).

1.2 Justificativa e Objetivos

Com grande variedade de minerais gemológicos no território nacional, o Brasil é uma das províncias gemológicas mais importantes do planeta, com produção em todas as unidades federativas, sendo que, algumas se destacam pela exclusividade de suas ocorrências. O Piauí é único produtor de opalas brancas, descobertas na década de 1970. A Paraíba, terra das “turmalinas paraíba”, pedras azuis e verdes de rara beleza, encontradas pela primeira vez em 1989. Em Ouro Preto, MG, encontram-se as jazidas de topázio imperial rosa. A Bahia destaca-se pela produção de esmeraldas, safiras e águas-marinhas, além de diamantes. O Rio Grande do Sul, pelas ametistas, ágatas, citrinos, cristais de rocha e outras (LIMAVERDE, 1980).

A Província Borborema, possui vasta ocorrência de minerais gemológicos, especialmente na região denominada Província Pegmatítica da Borborema, que compreende parte dos estados de Paraíba e Rio Grande do Norte.

O estado da Paraíba apresenta ocorrências de variadas gemas dentre elas turmalinas, água marinhas, berilos, apatitas, quartzo rosa e berilo. Dentre as gemas atualmente exploradas na Paraíba, têm-se as apatitas da região de Sumé, que geralmente apresentam coloração esverdeada, tendo sido

exploradas como mineral industrial e atualmente são estudadas para fins gemológicos. Tais apatitas têm sido submetidas a tratamentos térmicos pioneiros que lhes conferem uma coloração azul *neon* muito semelhante ao azul da turmalina paraíba, despertando o interesse do mercado e agregando valor ao mineral. Estudos detalhados acerca das ocorrências de apatitas na Paraíba e sobre tratamentos de cor em apatitas gemológicas são ainda muito restritos.

O presente estudo tem por objetivos analisar e caracterizar mineralógica, química e espectroscopicamente as apatitas da região de Sumé – PB e investigar o processo de tratamento térmico aplicado ao mineral e sua influência na mudança de cor da apatita.

1.3 Localização da área de estudo

A área de ocorrência das apatitas estudadas abrange as imediações do município de Sumé, região do Cariri Ocidental estado da Paraíba (Figura 1.1),

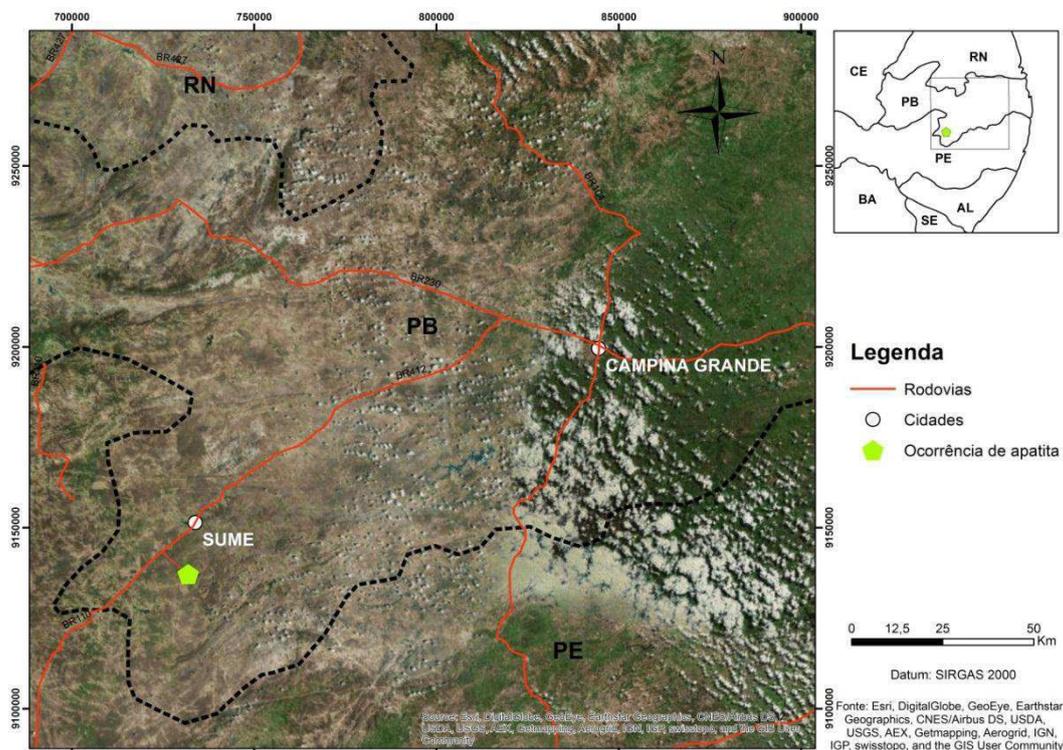


Figura 1.1 - Mapa de localização geográfica da área de estudo.

Fonte: Autor (2017).

nas adjacências do distrito de Lagoa dos Peões. As coordenadas aproximadas do centro dessa região são: latitude $07^{\circ}48'02''S$ e longitude $36^{\circ}53'49''W$. O

acesso à região, partindo de Campina Grande, é feito pela BR-230, seguindo-se até o entroncamento com a BR-412, no ponto conhecido como “Praça do meio do mundo”. Na BR-412 desloca-se por 119 km sentido sudoeste até o entroncamento com a rodovia PB-224. Às margens desta rodovia, estão as principais ocorrências de apatitas até então exploradas.

2 CONTEXTO GEOLÓGICO

2.1 Província Borborema

A área de estudo localiza-se na porção central da Província Borborema. Esta foi definida como uma importante entidade geotectônica consolidada durante o ciclo Brasileiro no Neoproterozoico (800-600Ma), localizada no nordeste do Brasil (ALMEIDA, BRITO NEVES e FUCK, 1981).

A Província Borborema compreende uma área de aproximadamente 400.000km², sendo limitada a oeste pela Bacia do Parnaíba, a norte-nordeste e leste por bacias fanerozóicas costeiras, e a sul e noroeste pelos crátons São Francisco e São Luiz, respectivamente (BRITO NEVES, SANTOS e SCHMUS, 2000) (Figura 2.1).

Estruturalmente a Província Borborema pode ser caracterizada por uma complexa rede de estruturas, combinando foliações de baixo e alto ângulo, que são observadas tanto em sequências de rochas supracrustais e relacionadas ao embasamento gnáissico-migmatítico (CABY, ARTHAUD e ARCHANJO, 1995). Algumas dessas estruturas correspondem a importantes suturas de caráter continental com continuidade nas faixas Pan-Africanas (JARDIM DE SÁ, 1994, SANTOS, BRITO NEVES, *et al.*, 2000).

A distribuição regional dos principais lineamentos da Província, sobretudo Patos e Pernambuco, que possuem direção E-W, permitiu a subdivisão da província em três domínios principais: Setentrional, Transversal e Meridional (BRITO NEVES, SANTOS e SCHMUS, 2000, VAN SCHMUS, BRITO NEVES, *et al.*, 1995, SANTOS e MEDEIROS, 1999).

Após vários estudos Santos, *et al.* (2012) foi consolidada uma nova configuração à Província Borborema com 5 subprovíncias: Médio Coreauí, Cearense, Rio Grande do Norte, Zona Transversal e Externa ou Meridional (Figura 2.2).

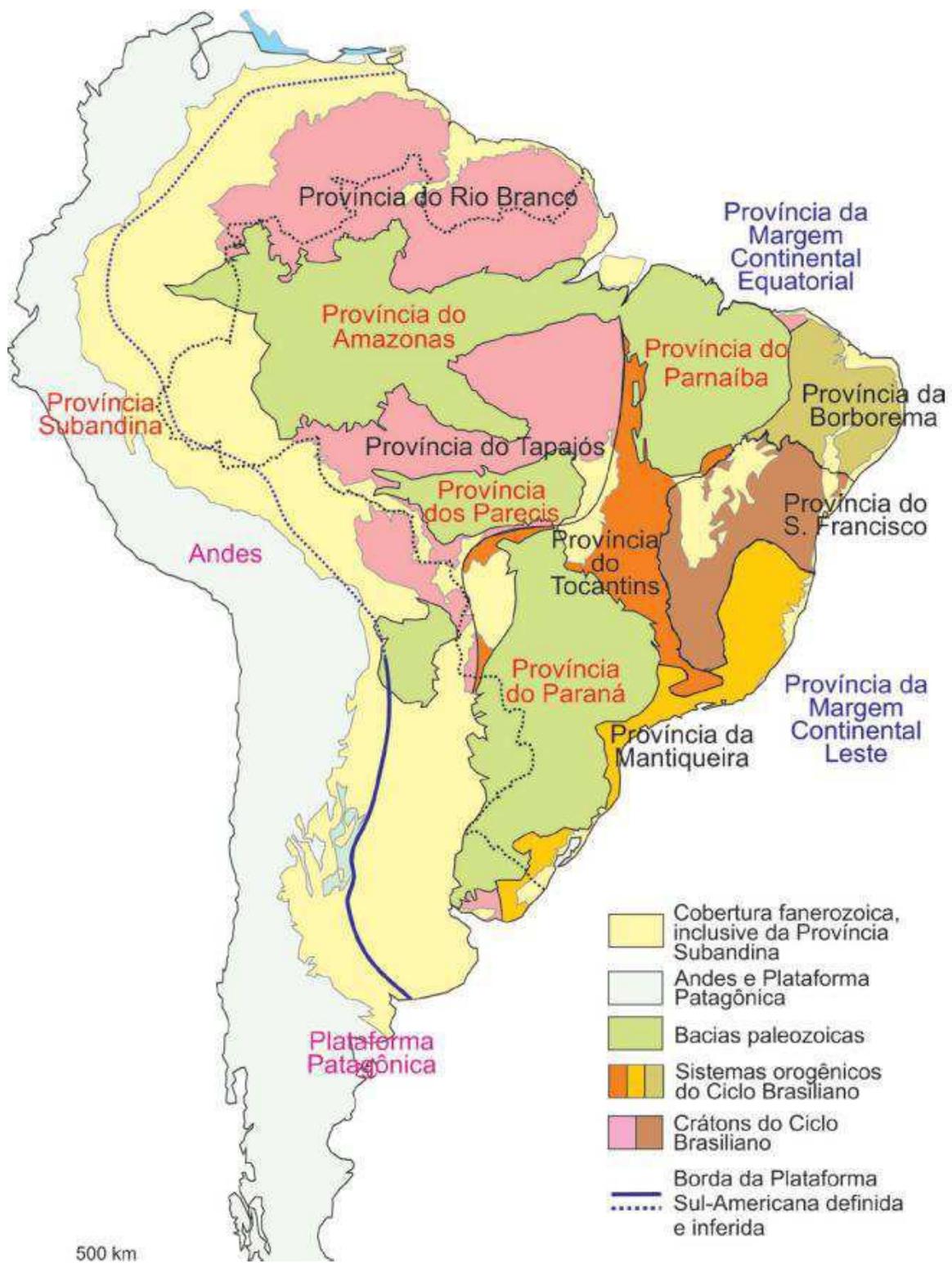


Figura 2.1 - Localização geotectônica da Província Borborema na Plataforma Sulamericana.
 Fonte: (CPRM, 2003).

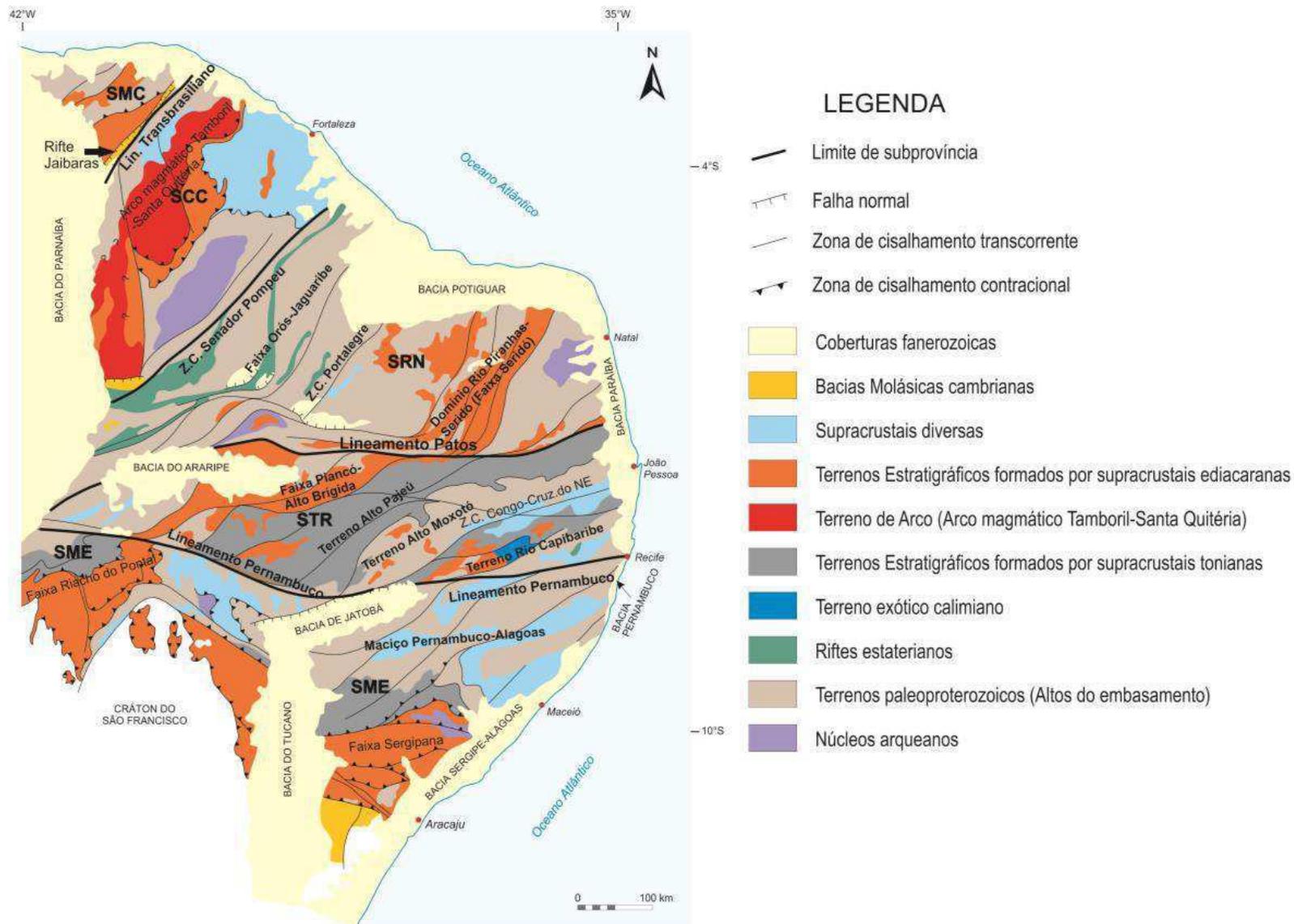


Figura 2.2 - Contexto tectônico regional da Província Borborema de acordo com Santos et al., 2014.

Devido à sua complexidade tectônica, é corrente o uso de subdomínios geotectônicos, os quais são agrupados em termos de terrenos tectono-estratigráficos. Tal denominação é utilizada por diversos autores, incluindo Santos (1996), Brito Neves, Santos e Schmus (2000), os quais levaram em consideração a diversidade de feições estruturais, litológicas e geocronológicas de cada porção da província.

Regionalmente, os locais de exploração das apatitas encontram-se inseridos no contexto geotectônico do Terreno Alto Moxotó (TAM), da Província Borborema, cuja evolução está associada aos eventos de acreção do embasamento da Província Borborema. O TAM constitui um compartimento tectônico que abrange o centro sul de Pernambuco e vai até o litoral da Paraíba, sendo orientada preferencialmente unidade na direção SW-NE na Zona Transversal.

Diferentemente dos outros terrenos inseridos na Subprovíncia Transversal, o TAM apresenta rochas antigas, de idades arqueanas e paleoproterozoicas, e às vezes rochas neoproterozoicas. Isso evidencia a atuação limitada da deformação na orogênese Brasileira nesse terreno (SANTOS, *et al.*, 2012).

As sequências litoestratigráficas do TAM são divididas da base para o topo da seguinte maneira: Complexo Floresta, Suíte Malhada Vermelha, Complexo Sertânia, Complexo Sumé, Suíte Camalaú e unidades metaplutônicas adicionais de ocorrência local, tais como a Suíte Olho d'Água do Cunha (SANTOS e MEDEIROS, 1999, BRITO NEVES, SANTOS e SCHMUS, 2000).

O Complexo Floresta é dominado por metamorfismo de fácies anfibolito alto e granulito, expondo rochas metaplutônicas básica-ultrabásicas a intermediárias, de composição variando de dioritos a tonalitos-granodioríticos, podendo apresentar anortositos, piroxenitos metamorizados e também rochas metassedimentares do tipo granada-biotita gnaisses com grafita e quartzitos com sillimanita (SANTOS, NUTMAN e BRITO NEVES, 2004)

A Suíte Malhada Vermelha, considerada Orosiriana, é constituída de gabro-anortosíticos toleíticos, sendo recentemente definida como o registro de

subducção tardia dentro do Terreno. Segundo (SANTOS, 1995), a suíte ocorre de intrusivas rochas metagraníticas do Complexo Floresta.

Por outro lado, o Complexo Sertânia corresponde a uma sequência metassedimentar com metamorfismo de alto grau. Destacam-se metapelitos com níveis carbonáticos, cálcio-silicáticos, quartzíticos e raros metabasitos, possuindo porções migmatíticas espalhadas ao longo do terreno. De acordo com (SANTOS, NUTMAN e BRITO NEVES, 2004), por meio de datações geocronológicas U-Pb em zircão por SHRIMP, o Complexo Sertânia possui idade Paleoproterozoica (em torno de 2,0 Ga), o que sugere representar fontes relacionadas ao Complexo Floresta, representando assim a principal unidade supracrustal do TAM.

O Complexo Sumé é composto de gnaisses de alto grau metamórfico, abrangendo ortognaisses, paragnaisses e migmatitos, com intercalações de metabasitos, metagabros, metassienitos, calcários cristalinos, skarns, raras formações ferríferas, granulitos, metapiroxenitos e prováveis retroeclogitos (MEDEIROS e TORRES, 2000). O skarn, a rocha hospedeira das apatitas em estudo, está associado às rochas metamáfica-ultramáficas e mármores e são comumente mineralizados em apatita, o que possibilita relacionar os skarns a complexos carbonatíticos-feníticos (SANTOS, SOUZA NETO, *et al.*, 2008, MEDEIROS e TORRES, 2000).

A suíte granítica Camalaú é composta por dezenas de stocks deformados e intrusões tabulares (sheets, sills e diques), incluindo granitóidestonalíticos e trondjemíticos (MEDEIROS e TORRES, 2000).

A Suíte Olho D'Água do Cunha é constituída de metaquartzo-sienitos e metapiroxenitos com skarns relacionados, ocorrendo de forma intrusiva no Complexo Floresta. Os membros félsicos são foliados, evidência da tectônica que afetou a região. Essas rochas apresentam textura granoblástica com granulação média a grossa. Os minerais máficos desta fácies são a hornblenda e o diopsídio, que se apresentam estirados.

As rochas da Suíte Olho D'Água do Cunha são cortadas por diques e veios pegmatíticos com turmalina e/ou diques aparentemente de composição diorítica, uma tectônica rúptil também é observada nessas rochas, formando

pequenas fraturas sem orientação, que permite a infiltração de água e facilita a alteração da rocha (NASCIMENTO, 2013).

Os metapiroxenitos sempre afloram associados com os metaquartzosienitos, acontecendo muitas vezes ambas as rochas no mesmo afloramento. Estes são responsáveis por uma coloração verde escura no solo e afloram principalmente com uma grande quantidade de blocos ou como afloramentos rasteiros. Possuem granulação fina a média, ocorrendo também fácies gabróides, que exibem uma quantidade maior de plagioclásio. Sua coloração esverdeada amarelada e a presença ocasional de epidoto sugerem a existência de processos de skarnitização, ou seja, a ocorrência de processos metassomáticos nesta unidade.

Apesar da intensa deformação e certa migmatização, acredita-se que originalmente a associação do (SANTOS, NUTMAN e BRITO NEVES, 2004) complexo Sumé representa um complexo de imiscibilidade de líquidos, similar ao que foi descrito por Ferreira e Sial (1992) no batólito granítico de Triunfo Santos (2010), localizado no estado de Pernambuco.

3 APATITA

Apatita, no sentido estrito da palavra, não se refere a um mineral único. As apatitas formam uma importante série mineral, cuja estrutura básica é hexagonal e fórmula química simplificada $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{X}$, onde X pode ser, por exemplo, o íon F^- (fluorapatita), OH^- (hidroxiapatita), ou Cl^- (cloroapatita) (ELLIOTT, 2013).

A apatita possui um sistema de cristalização hexagonal com habito prismático ou tabular, Figura 3.1. As demais características estão listadas na Tabela 3.1 (MINDAT, 2017, GENDAT, 2017).

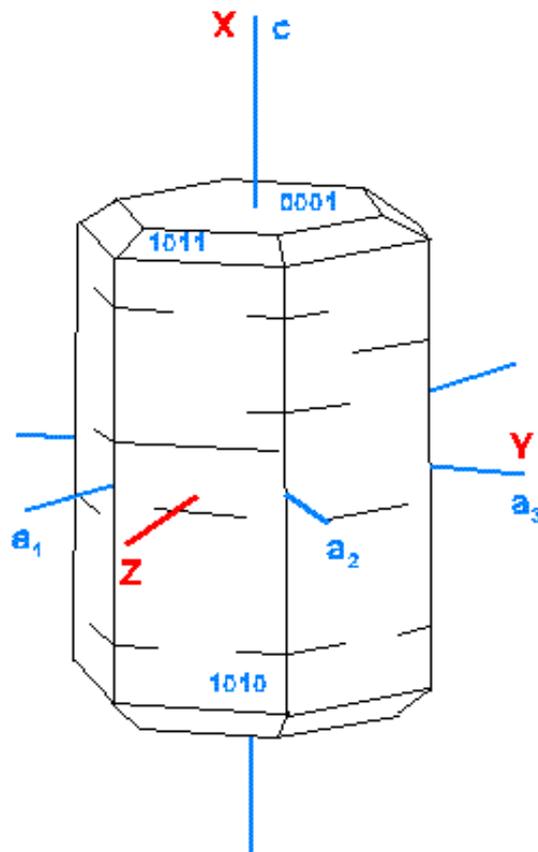


Figura 3.1 - Sistema de cristalização hexagonal da apatita.

Fonte: (MINDAT, 2017)

Tabela 3.1 - Características mineralógicas da Apatita.

Classe mineral	Fosfato
Espécie mineral	Apatita
Sistema de cristalização	Hexagonal; hábito tabular ou prismático
Fórmula química	$\text{Ca}_5 (\text{PO}_4)^3 (\text{F}, \text{OH}, \text{Cl})$
Nomes utilizados no mercado	Apatita olho-de-gato, pedra-asparago e apatita
Cores	Azul, verde, amarela, roxa, incolor, rosa, marron e violeta
Transparência	Transparente a translúcida
Brilho	Vítreo
Índice de refração	1,628 - 1,651
Fenômenos ópticos	Acatassolamento
Caráter óptico	Uniaxial negativo
Birrefringência	de 0,002 a 0,008
Dispersão	0,013
Pleocrísimo	Os exemplares azuis - forte, azul e de amarelo ao incolor outras cores - de muito fraco a fraco
Fluorescência	Exemplar amarelo - rosa arroxeadado (mais forte sob UVL) exemplar azul - de azul a azul claro (UVL e UVC) exemplar verde - amarelo esverdeado (mais forte sob UVL) exemplar violeta - amarelo esverdeado (UVL), roxo claro (UVC)
Densidade relativa	3,1 a 3,2
Fatura	Conchoidal a irregular
Clivagem	Imperfeita
Dureza	5

Fonte: Autor (2017).

A apatita é o fosfato mais abundante, representando o mineral mais importante de sua classe. Ela corresponde ao principal mineral minério dos depósitos fosfáticos explorados no mundo, servindo à indústria alimentar, fabricação de detergentes, ração animal, ácidos fosfórico, inseticidas e à agricultura. Estas ocorrências minerais podem ser de origem magmática, tais como complexos alcalino-carbonatíticos (Rússia, Uganda, Brasil e África do Sul), sedimentar (fosforitos marinhos, tais como do norte da África e EUA) ou de acumulação orgânica (guano; exemplos: norte e nordeste do Brasil) (TOLEDO e PEREIRA, 2001).

O mineral de ossos e dentes é uma forma impura de hidroxiapatita, ela também é utilizada como biomaterial, por exemplo, para substituição e

aumento ósseo, e para revestimento de próteses metálicas para melhorar a sua biocompatibilidade (ELLIOTT, WILSON e DOWKER, 2002).

As apatitas sintéticas são utilizadas como fósforos em tubos de luz fluorescente. As hidroxiapatitasmicrocristalinas são também utilizados para separação cromatográfica de proteínas. As apatitas têm potencial para utilização como lasers e apatitas microcristalinas para catalisadores (desidrogenação e desidratação de alcoois) e descontaminação de solos com íons de metais pesados (ELLIOTT, WILSON e DOWKER, 2002). A apatita também é explorada como mineral gemológico em função de seu brilho vítreo e variedade de cores.

Segundo o “Boletim referencial de preços de diamantes e gemas de cor” publicado pelo Instituto Brasileiro de Gemas e Metais preciosos em conjunto com o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), o valor da apatita rosa extra pode chegar à US\$ 100,00 e também a apatita amarela pode chegara US\$ 15,00. A fluorapatita da região de Sumé pode chegar à US\$ 50,00 o quilate.

A estrutura cristalina da apatita permite várias substituições iônicas. Muitos substituintes podem ser encontrados, em todos os sítios cristaliquímicos, em apatita de todos os ambientes geológicos e mesmo dos materiais apatíticos orgânicos e sintéticos. A ocupação do sítio aniônico monovalente dá as denominações principais atualmente aceitas oficialmente para as espécies dentro do grupo da apatita: fluorapatita, hidroxiapatita e clorapatita. Entre os substituintes do cálcio, podem ser destacados os elementos terras raras e elementos com interesse ambiental, como o cádmio, que pode ser incorporado aos fertilizantes, resultando em problemas de contaminação. Existem duas posições distintas para o cálcio e seus substituintes na estrutura da apatita, vários estudos mais recentes exploram este aspecto, mostrando influências de todo um conjunto de fatores que interagem com as características de cada elemento na preferência de ocupação do sítio Ca1 ou Ca2. Dentre os ânions substituintes do fosfato, destaca-se o carbonato, o qual, a entrada provoca alterações estruturais e demanda compensação de cargas, como substituições nos sítios catiônico e

aniônico monovalente para manutenção da neutralidade da estrutura, ou mesmo criação de vacâncias estruturais (TOLEDO e PEREIRA, 2001).

As apatitas da região de Sumé são conhecidas desde a década de 1940, quando a atividade garimpeira se iniciou na área. Na década seguinte, os primeiros trabalhos de avaliação destes depósitos, sob a responsabilidade do DNPM/DFPM, foram conduzidos por Melo Jr. (1952), que efetuou sondagens, poços, trincheiras e galerias, determinando uma reserva inferida de 162.800t de minério, com teor de 38% de P_2O_5 (MEDEIROS e TORRES, 2000). Ocorrem sob a forma de lentes e bolsões mineralizados em skarns, sendo o mineral de minério a fluorapatita (MEDEIROS e TORRES, 2000). As apatitas desta região, de coloração verde, tradicionalmente exploradas para uso como minério, quando tratadas termicamente assumem coloração azul 'neon', tornando-se mais aceitas no mercado gemológico.

4 METODOLOGIA

4.1 Etapa pré-campo

A pesquisa compreendeu ampla revisão bibliográfica dos trabalhos desenvolvidos na área de estudo, buscando-se o entendimento da situação geológica das ocorrências de apatitas e informações sobre a caracterização desse mineral.

Para o planejamento de campo, além das consultas bibliográficas, foram realizadas interpretações de imagens de satélites disponíveis para a área no programa Google Earth, fotografias aéreas do acervo da Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia (UAMG) e imagens SRTM adquiridas gratuitamente no site da Embrapa. As imagens foram processadas em um Sistema de Informação Georreferenciadas (SIG), utilizando o ARCGIS, versão 10.2.2. As imagens geradas pela fotointerpretação foram digitalizadas e georreferenciadas e as imagens de satélite e radar serviram de base para a produção dos mapas.

Por meio de integração de informações geológicas existentes, tais como mapas geológicos do Serviço Geológico do Brasil - CPRM, dados de hidrografia, logística e divisão política do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, dentre outros, foi iniciada a montagem do banco de dados do projeto. Foram gerados mapas de estradas e acessos, drenagens e lineamentos, com os mapas gerados, foram feitas as interpretações visuais e análises estruturais.

4.2 Etapa de campo

Entre março de 2015 e agosto de 2016 foram visitadas 13 ocorrências de minerais gemológicos nos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte: (1) turmalinas vermelhas e fumês da Serra de Bom Jesus - PB, (2) granadas grossulária de Água Fria em Santa Luzia - PB, (3) cordierita no Alto dos Muros em Nova Palmeira - PB, (4) turmalinas elbaíta em São José da Batalha - PB, (5) turmalinas e a diversidade mineral do Alto do Cabeço em Parelhas - RN, (6) espessartina no Alto Mirador em Carnaúba dos Dantas - RN, (7) turmalinas no Alto da Serra Branca em Pedra Lavrada - PB, (8) berilo no Alto do Patrimônio - PB, (9) vesuvianita em Umbuzeiro Doce - PB, (10) berilo no Alto dos Amâncios-

RN, (11) opala em Taperoá - PB, (12) apatita em Sumé - PB e (13) berilo na região de Condado - PB (Figura 4.1).

Através da pesquisa bibliográfica, constatou-se que não existiam trabalhos de caracterização gemológica para as apatitas de Sumé, opala Taperoá e berilo da região de Condado. Dentre esses minerais, a apatita que ocorre na região de Sumé se destacou pela coloração azul neon que adquire quando submetida a tratamentos térmicos, sendo assim escolhida como alvo desta pesquisa.

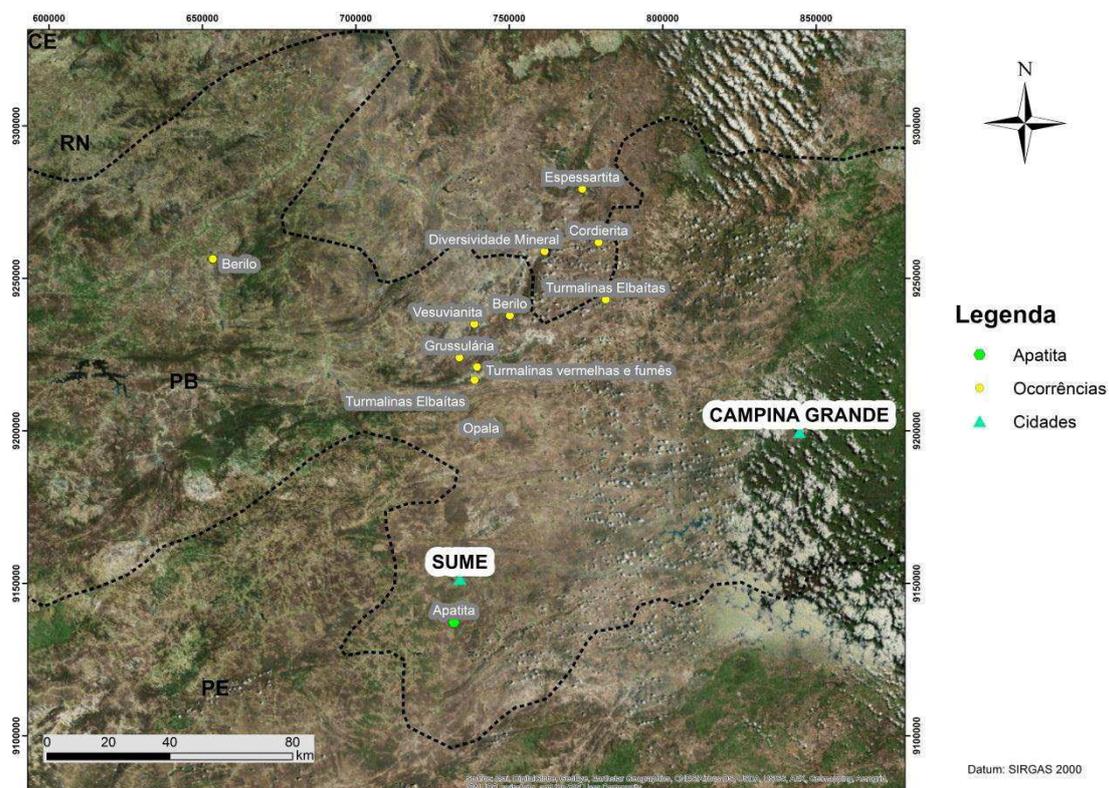


Figura 4.1 - Mapa de localização das ocorrências visitadas.

Fonte: Autor (2017).

A primeira visita a campo foi realizada no primeiro semestre de 2015 em parceria com o Sr. David Geraldo Ventura, quem apresentou os afloramentos e passou informações sobre a exploração daqueles locais.

Em setembro de 2015 foi realizado um trabalho de campo com o professor Dr. Ricardo Scholz (UFOP) para levantamento geológico e coleta de amostras.

Na segunda etapa de campo foi realizado caminharmento na superfície do terreno com descrição de pontos de observações das feições geológicas e geomorfológicas. Tais pontos receberão uma codificação alfanumérica.

Nos pontos estudados foram feitas medidas das feições geológicas planares e lineares, nos sistemas americano, “geológico” (e.g. N60°W/20°NE), e trama (e.g. 040/35), com objetivos de futuras interpretações geológicas.

Os mesmos foram armazenados no aparelho GPS, em rota na extensão .gtm e posteriormente transformados em arquivos shape, para utilização no programa ArcGis, com objetivo de gerar os mapas utilizados na dissertação.

4.3 Etapa de Laboratório

As apatitas investigadas neste trabalho foram coletadas diretamente em cava aberta para pesquisa mineral na localidade Lagoa dos Piões. Após a retirada do capeamento com máquina retroescavadeira, os bolsões mineralizados foram explorados com pás, picaretas e ferramentas manuais. Fragmentos e cristais de apatitas de tamanhos variados foram ensacados, amarrados e retirados da cava.

As amostras coletadas passaram por seleção manual onde os cristais “limpos” foram separados e o restante, fragmentos e cristais fraturados, depositados como rejeito. Durante o trabalho de coleta de amostras para o desenvolvimento dessa dissertação, que foi simultâneo à pesquisa mineral realizada na área, foram coletados aproximadamente 100Kg de material bruto.

As amostras com menor quantidade de inclusões, dada a maior aceitação como mineral gema, foram separadas para tratamento térmico. Os grãos selecionados, possuindo em média 0,5cm, foram colocados em recipiente de cerâmica e introduzidos no forno mufla, do Laboratório de Análises de Minerais da UFCG, ainda frio.

O tratamento térmico consistiu de aquecimento das amostras até a temperatura de 700°C, que, uma vez alcançada, foi mantida constante por 15 minutos. Após o desligamento do forno, para evitar choque térmico e consequente quebra dos grãos, as amostras foram retiradas quando este

alcançou temperaturas abaixo de 100°C. Os ensaios de caracterização foram realizados nas amostras naturais e nas amostras tratadas à 700°C.

Para a caracterização mineralógica e gemológica foram selecionadas 36 amostras, sendo 18 de cor verde e 18 de cor azul, polindo-se uma face plana em cada uma delas para auxiliar nas análises.

Os ensaios gemológicos, que consistem de técnicas não destrutivas, foram realizados no Laboratório de Pesquisas Gemológicas do CETEM. Todas as pedras foram inicialmente observadas em microscópio vertical de campo escuro Schneider, modelo Stemi 2000C, com óptica Zeiss.

4.3.1 Análises Química

Para a determinação da composição química, análises foram realizadas no equipamento de fluorescência de raios-x (WDS-2), modelo AXIOS (Panalytical), da Coordenação de Análises Químicas do CETEM, e na microfluorescência de raios-x Orbis Micro X-ray Fluorescence (Micro-XRF) Analyzer, do Laboratório de Pesquisas Gemológicas do CETEM.

Ambos os equipamentos fornecem resultados semiquantitativos, sendo que para realização de análises na fluorescência de raios-x foi necessária a preparação de pastilhas prensadas com 5 gramas de cada amostra. A microfluorescência de raios-x não exige preparação das amostras e foi realizada na face polida do mineral.

A espectroscopia de fluorescência de raios-X é um método de emissão atômica, similar à espectroscopia de emissão óptica (OES), ICP e análise por ativação com nêutrons (espectroscopia gama). Tais métodos medem o comprimento de onda e intensidade do raio-X emitidos pelos átomos energizados na amostra. A irradiação primária a partir de um tubo de raios-X, faz com que a emissão de raios-X fluorescentes com energias discretas característicos dos elementos presentes na amostra.

A tecnologia utilizada para a separação (dispersão), identificação e medição da intensidade do espectro de fluorescência de raios-X de uma amostra dá origem a dois tipos principais de espectrômetro: comprimento de onda (WDXRF) e sistemas de dispersão de energia (EDXRF). Esta técnica vem

sendo utilizada principalmente para amostras sólidas, permitindo a determinação simultânea ou sequencial da concentração de vários elementos, sem a necessidade de destruição da amostra, ou seja, de modo instrumental, sem nenhum pré-tratamento químico.

A microfluorescência de raio x usa o método da fluorescência citado anteriormente, porém fazendo análises pontual na amostra.

4.3.2 Ensaio de densidade

A densidade, que é uma das propriedades mais importantes para a identificação de um mineral, foi obtida em balança hidrostática Mettler Toledo JP1603C. A densidade relativa de uma amostra é a relação entre seu peso específico e o seu peso específico na água, expressa por um número puro, e calculada através da fórmula:

$$d = \frac{(P_{ar})}{(P_{ar} - P_{\acute{a}gua})} \quad (1)$$

Onde:

P_{ar} = peso da amostra no ar (peso a seco);

$P_{\acute{a}gua}$ = peso da amostra submersa no líquido.

A densidade depende essencialmente do:

- a) Arranjo estrutural dos átomos. Nos polimorfos, a composição química é a mesma, mas o arranjo dos átomos é diferente, portanto, quanto mais “compacta” for a estrutura, maior será a densidade;
- b) Peso atômico dos átomos que compõem o mineral. Nos compostos com estruturas cristalinas semelhantes, têm densidade maior os minerais constituídos de átomos mais pesados e
- c) Raio iônico dos elementos constituintes. Quanto menor for o raio iônico dos elementos químicos mais compacto o empacotamento estrutural e maior a densidade.

A obtenção da densidade relativa baseia-se no princípio de Arquimedes: “qualquer corpo mergulhado num líquido sofre um empuxo de baixo para cima,

igual ao peso do líquido deslocado”. O valor numérico da densidade relativa é a relação do peso do objeto no ar e o peso de igual volume de água.

Segundo Schumann (2006), as densidades das apatitas variam entre 3,16 e 3,20g/cm³.

4.3.3 Índice de refração

Quando um raio de luz incide em uma superfície de separação de dois meios de índice de refração diferentes, uma parcela da energia será refletida enquanto outra parcela se propagará através do meio de transmissão. Ao passar para o meio de transmissão, a onda sofre um desvio na sua direção (Figura 4.2), sua velocidade aumenta ou diminui devido as diferenças das estruturas atômicas das duas substâncias, ou de suas densidades ópticas ou índices de refração.

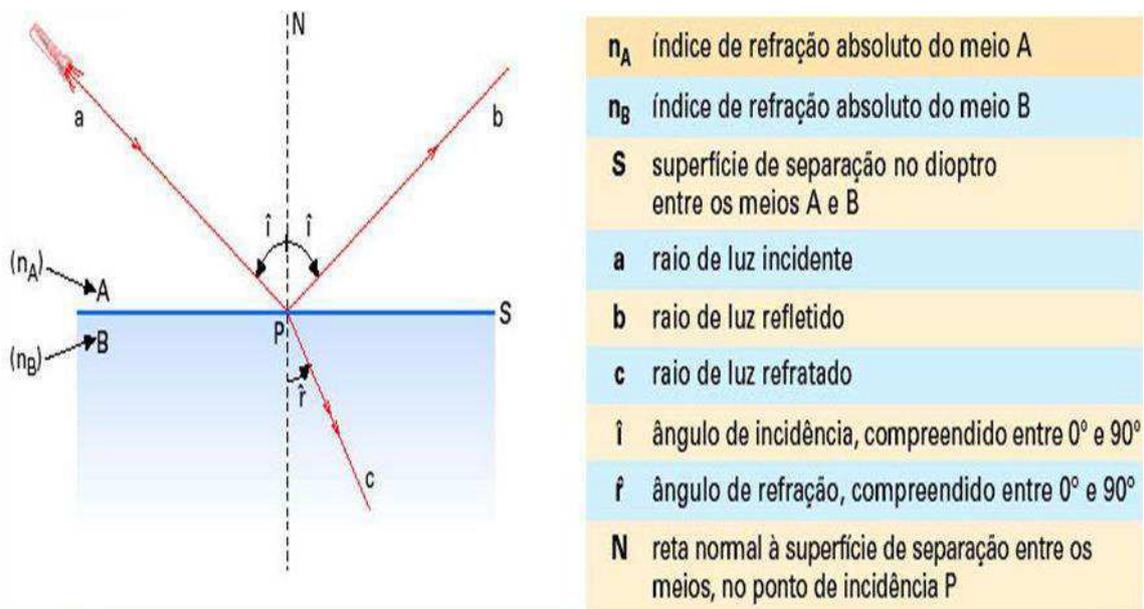


Figura 4.2 - Comportamento da luz ao incidir em dois meios com índice de refração diferentes.

O índice de refração é definido como a razão entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz para um comprimento de onda específico num certo meio/mineral.

$$n = \frac{C}{V} \quad (2)$$

Onde:

n = índice de refração;

C = velocidade da luz no vácuo;

V = velocidade da luz para comprimento de onda específico num meio.

O índice de refração de um mineral é inversamente proporcional a velocidade de propagação da luz em seu interior, ou quanto mais denso opticamente for o mineral, menor será a velocidade de propagação da luz. De fato, a densidade óptica, ou índice de refração do mineral é diretamente proporcional a sua densidade, obedecendo a seguinte relação:

$$n - 1 = k.r \quad (3)$$

Onde:

n = índice de refração do mineral

k = uma constante;

r = densidade do mineral.

O índice de refração do diamante é de 2,4. Isto significa que a velocidade da luz no vácuo é 2,4 vezes maior do que a velocidade da luz no interior do diamante.

O índice de refração da luz no vácuo é considerado arbitrariamente como sendo igual a 1, que é praticamente aquele obtido para o ar: 1,00029 (temperatura a 15°C e 1 atm de pressão). De fato, tratamos o índice de refração de um mineral de forma relativa, comparando-o com o do vácuo (ou ar), ou seja, quantas vezes o seu índice de refração é maior do que aquele do vácuo, e, portanto, uma grandeza adimensional.

O índice de refração das apatitas estudadas foi medido em refratômetro gemológico portátil modelo RTG-181 da marca INSTRUTHERM, totalizando 20 leituras dos índices extraordinários e 20 dos índices ordinários.

4.3.4 UV visível

Para o reconhecimento de causas de cor nas apatitas, assim como da mudança de cor após tratamento térmico, espectros de absorção a temperatura ambiente, na faixa de 400 a 850 nm, foram obtidos por espectroscopia óptica

no equipamento UV/Vis/NIR (Ultraviolet-visible- nearinfrared) Lambda 750S, equipado com esfera de integração, do Laboratório de Pesquisas Gemológicas do CETEM.

A espectroscopia no ultravioleta visível (UV/VIS) utiliza luz na faixa do visível do ultravioleta (UV) e do infravermelho próximo.

O equipamento utilizado na espectroscopia UV/VIS é chamado de espectrofotômetro. A amostra é inserida no caminho óptico do aparelho. Então, luz UV e/ou visível em um comprimento de onda conhecido (ou uma faixa de comprimentos de ondas) é passada pela amostra. O espectrofotômetro mede o quanto de luz foi absorvida pela amostra. O resultado é evidenciado pelo gráfico da absorbância versus o comprimento de onda na faixa do ultravioleta e/ou visível.

4.3.5 Infravermelho

Os espectros foram obtidos no espectrômetro Spectrum 400 (FT-R/NIR), equipado com condensador de feixes 5x, do Laboratório de Pesquisas Gemológicas do CETEM. As leituras foram realizadas na faixa de 400 a 4000 cm^{-1} , a temperatura ambiente, com resolução de 2cm^{-1} e 16 varreduras.

Para as análises por espectroscopia de infravermelho, as amostras foram preparadas em uma mistura de brometo de potássio em pó com 1% do material de apatita, essa diluição busca melhorar a relação sinal/ruído, conforme descrito por (HAOHAO, ETIENNE BALAN, *et al.*, 2013). Tal mistura é submetida à alta pressão formando as pastilhas para análises. Essas pastilhas são chamadas de pastilhas de KBr. O Brometo de potássio é “invisível” da faixa ultravioleta até os comprimentos de ondas do infravermelho por não ter linhas de absorção nessa região, por isso é utilizado na diluição, evitando assim que os espectros extrapolem o limite de detecção. Foram analisadas pastilhas com apatitas verdes naturais e pastilhas com apatitas azuis tratadas termicamente a 700°C .

A espectrometria infravermelha IR (Infrared) é um método fundamentado na interação da amostra analisada com a emissão eletromagnética de comprimento de onda da ordem de 1 mm a $1\ \mu\text{m}$ (radiação infravermelha). A

incidência dessa radiação nas moléculas da amostra promove mudanças no estado rotatório e vibratório dos átomos e das moléculas, por serem as transições entre os estados rotatórios e vibratórios quantizadas, isso se manifesta em proporções distintas na absorção da radiação infravermelha em cada comprimento de onda.

A interação da energia eletromagnética com as moléculas de forma a afetar as vibrações moleculares (modos vibracionais) está diretamente relacionada à variação de magnitude do momento dipolar de ligação da molécula durante a vibração. O momento dipolar é definido como a diferença entre as cargas (deslocamento eletrônico entre átomos) em função da distância entre as mesmas, e à medida que a distância varia em função das vibrações, um campo magnético oscilante é criado e pode interagir com o campo eletromagnético da radiação emitida numa região específica.

A dependência de um momento dipolar se torna então a principal regra de seleção para espectroscopia no infravermelho: não havendo variação do momento dipolar não ocorrerá a formação de um campo oscilante para interagir com a radiação, e nenhuma forma de absorção ou emissão relacionada aos modos vibracionais será observada pela molécula. Existe atualmente uma série de métodos de espectrometria infravermelha apropriada para fins diversos. Na mineralogia, são mais frequentes os estudos de amostras de um mineral (com grãos menores do que 1 μm) preparadas em pó, misturado com KBr ou KCl (puros) e prensado na forma de discos finos. Os principais acessórios do espectrômetro infravermelho são: uma fonte de radiação, um monocromador, conjunto de espelhos, um detector da radiação infravermelha e um registrador, como indicado na Figura 4.3.

O resultado da medição é um espectro infravermelho vibratório da matéria estudada. Trata-se de um gráfico em cuja abscissa está o comprimento de onda da radiação infravermelha e, na ordenada, está a fração da intensidade da radiação incidente necessária para que as transições ocorram (denominada transmitância/absorbância). A mudança nos estados de vibração e de rotação das moléculas manifesta-se com a diminuição da transmitância em comprimentos de onda correspondentes (são as denominadas bandas de absorção).

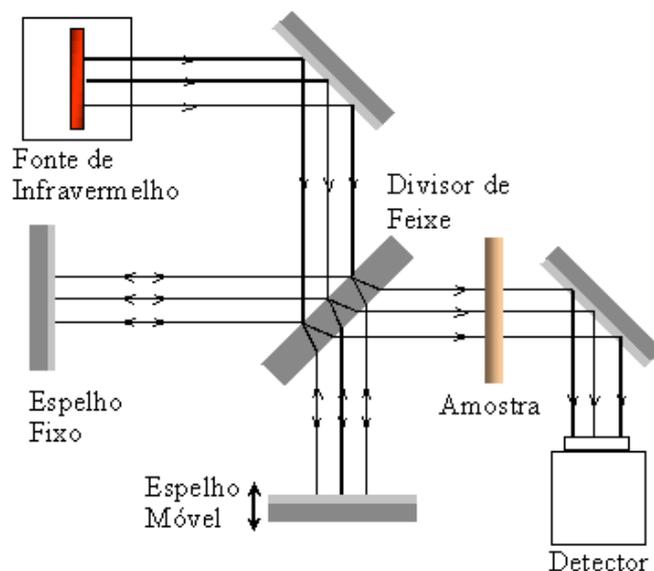


Figura 4.3 - Principais acessórios do espectrômetro por transformada de Fourier de absorção no infravermelho.

4.3.6 Raman

As apatitas foram analisadas também por espectroscopia Raman, no GemRam™ da BWTEK e no GL Gem Raman PL532™, do Laboratório de Pesquisas Gemológicas do CETEM, com laser de $632,5\text{cm}^{-1}$. Os espectros foram obtidos na faixa de 170 e 2600cm^{-1} e os tempos de aquisição dos espectros foram variados de acordo com cada amostra.

A espectroscopia Raman é um método analítico similar à espectroscopia infravermelha, mas baseada no chamado efeito (dispersão) Raman: o raio de luz que penetra em um meio qualquer, parte dele é absorvida, outra atravessa o meio e uma terceira se dispersa. Supondo um raio (fóton) de luz incidente sobre a molécula de um material, se a colisão for perfeitamente elástica a luz (fóton) se dispersa sem mudar o comprimento de onda (energia); se a colisão for inelástica, ocorre a dispersão (ou a mudança de direção da propagação da luz) e o comprimento de onda também se modifica. É compreensível que essa mudança seja quantizada e, se a luz incidente for monocromática, o espectro da radiação dispersa conterá determinado número de linhas, cujo comprimento de onda estará deslocado em comparação ao comprimento de onda original.

A dispersão Raman é detectada em função do comprimento de onda é registrada e esse resultado é denominado espectro Raman. As bandas de

absorção de Raman recebem o nome de linhas de Raman. A posição dessas linhas de Raman informa sobre o tipo de átomos ligados e sobre as ligações na molécula (de um cristal), cuja intensidade é diretamente proporcional à concentração de uma determinada componente da amostra.

4.3.7 EPR

Os espectros de EPR (Ressonância Paramagnética Eletrônica) evidenciam como um spin eletrônico sob influência do campo cristalino interage com o campo magnético externo. O espectrômetro possui uma fonte que fornece uma onda monocromática com a frequência conhecida. É produzido um campo magnético estável e homogêneo e entre os dois polos deste a amostra fica posicionada e orientada em relação ao eixo c para ser analisada.

A ressonância magnética ocorre quando parte da energia da onda monocromática é absorvida pela amostra e a energia transmitida é analisada por um cristal de detecção (Calas 1988). Na mineralogia esta técnica permite o estudo de impurezas paramagnéticas de elementos traços e/ou defeitos formados por irradiação natural ou artificial em materiais amorfos ou cristalinos permitindo evidenciar centros de erro.

O EPR permite a identificação de impurezas paramagnéticas de elementos traços e defeitos formados por irradiação em materiais amorfos ou cristalinos, permitindo revelar centros de cor. As amostras foram analisadas no Departamento de Física da UFMG à temperatura ambiente e também a baixa temperatura em um espectrômetro equipado com uma cavidade cilíndrica (Bruker), que opera na faixa de frequência de microondas de 9,38GHz. As análises foram feitas em monocristais e também em amostras em pó tratadas termicamente no forno tubular Lindberg blue M às seguintes temperaturas: 30°C, 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C e 700°C.

4.3.8 Luz Ultravioleta

A luminescência é a capacidade de alguns minerais de florescer. Ao receber uma quantidade suficiente de energia, o elétron na órbita do átomo pula para um nível mais externo de energia e após um determinado tempo, o elétron retorna para o nível energético original. Esse salto é acompanhado de

um fóton com comprimento de onda dado pela diferença entre os dois níveis de energia. Em condições favoráveis o comprimento de onda dessa radiação está na faixa de 380 a 780nm, podendo assim ser percebida como luz visível fluorescência pode ser dada pela construção das órbitas eletrônicas de alguns átomos (CHVÁTAL, 1972).

O fenômeno da fluorescência é a emissão de luz por um mineral, quando este é irradiado por uma luz ultravioleta de ondas curtas e longas. A presença de determinados elementos químicos na estrutura cristalina dos minerais é responsável por essa reação emitindo a luz (CHVÁTAL, 1972).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Geologia Local

Na área estudada foram reconhecidas 3 unidades litológicas (Complexo Floresta, Suíte Olhos D'Água do Cunha eskarns). Afloram ortognaisses de coloração cinza claro a escuro com bandas ricas em anfibólio e biotita (máficos) e outras ricas em feldspato e quartzo (félsicas). Tais rochas apresentam dobras abertas a levemente fechadas, assimétricas com escala variando de centimétrica a métrica, sendo constituídas por biotita, quartzo e feldspato com presença de veios de injeção pegmatítica.

Correlacionando aos registros na literatura, verifica-se na Figura 5.1 ortognaisses de composição tonalítica-granodiorítica e idade paleoproterozoica relacionados ao Complexo Floresta. Esses ortognaisses são predominantemente mesocráticos, de coloração cinza escura, com porções homogêneas e heterogêneas de coloração cinza clara (NASCIMENTO, 2013).



Figura 5.1 - Aspectos de campo de ortognaisses bandados do Complexo Floresta.

Fonte: Autor (2017).

Nota-se na Figura 5.2 rochas em blocos centimétricos e decimétricos soltos de coloração rosada compostos basicamente por quartzo e feldspato. Estes seriam os metasenitos da Suíte olho D'Água do Cunha.



Figura 5.2 - Ocorrência de rochas em blocos da suíte Olho D'Águado Cunha.

Fonte: Autor (2017).

Associadas ao Complexo Floresta, as apatitas estudadas ocorrem em lentes centimétricas a métricas de skarns, que ocorrem concordantemente com o bandamento na direção de foliação sudeste, e com mergulhos de médio a alto ângulo variando entre 60° e 70° para nordeste (Figura 5.3).

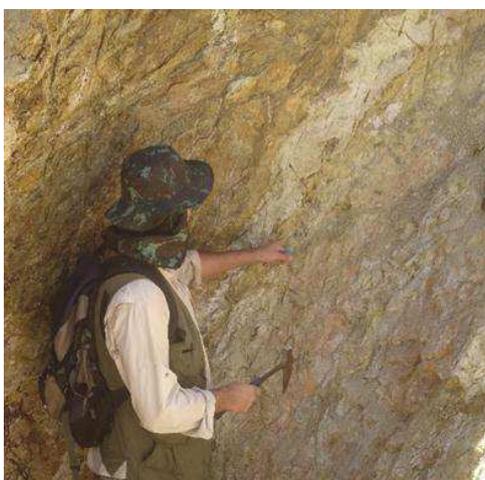


Figura 5.3 - Afloramento com a ocorrência de apatita.

Fonte: Autor (2017).

5.2 Tratamento térmico

As amostras brutas coletadas em campo estavam em forma de agregados, com tamanhos de até 8 cm, algumas com o hábito bem definido (Figura 5.4). A cor sempre é verde com pouca variação na tonalidade, o grau de fraturamento é alto devido às intemperes do ambiente aliado às rupturas naturais.

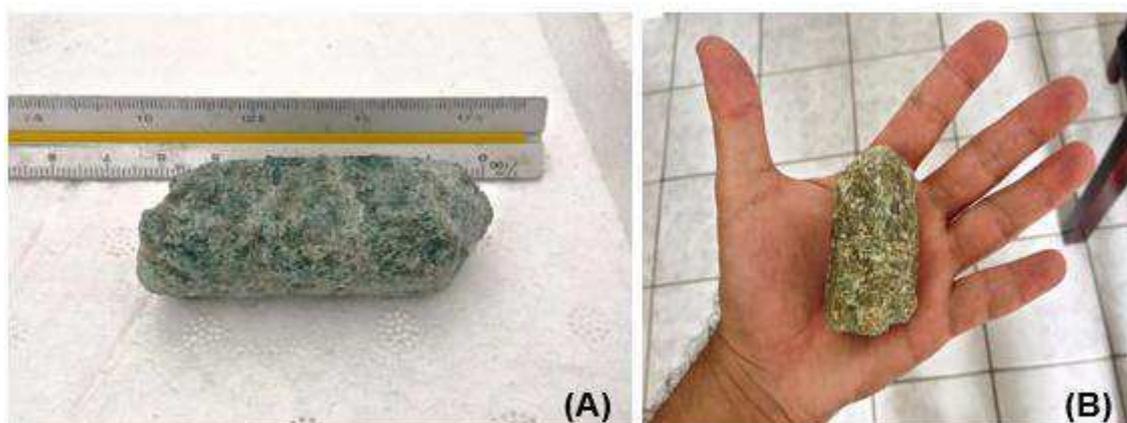


Figura 5.4 - Amostras brutas de apatita apresentando hábito bem definido e até 8cm de comprimento no eixo maior C.

Fonte: Autor (2017).

As amostras brutas foram fragmentadas de forma manual e com muito cuidado até encontrar porções com boa transparência, sendo essas as amostras de cristais que usamos em nossos ensaios.

As amostras selecionadas para análise possuem coloração verde médio a escuro. Os grãos analisados no microscópio óptico se mostraram com boa transparência, exibindo poucas inclusões, o que propicia seu uso como gema.

A densidade dos grãos selecionados variou de 3,162 a 3,195 g/cm³, os valores de referência variam entre 3,16 e 3,23 g/cm³ (SCHUMANN, 2006).

As medidas de índice de refração, que nas apatitas variam de 1,628 a 1,649, Schumann (2006), variaram de 1,635 a 1,641 nas amostras analisadas, sendo o no invariante foi possível reconhecer o caráter uniaxial das apatitas, que apresentaram birrefringência de 0,006.

Após o tratamento térmico a 700°C as pedras alteraram sua coloração para um azul claro, com aspecto neon, muito semelhante ao da turmalina

Paraíba, como pode ser observado na Figura 5.5. Não houve variação nos valores de densidade e índice de refração para as amostras tratadas termicamente.

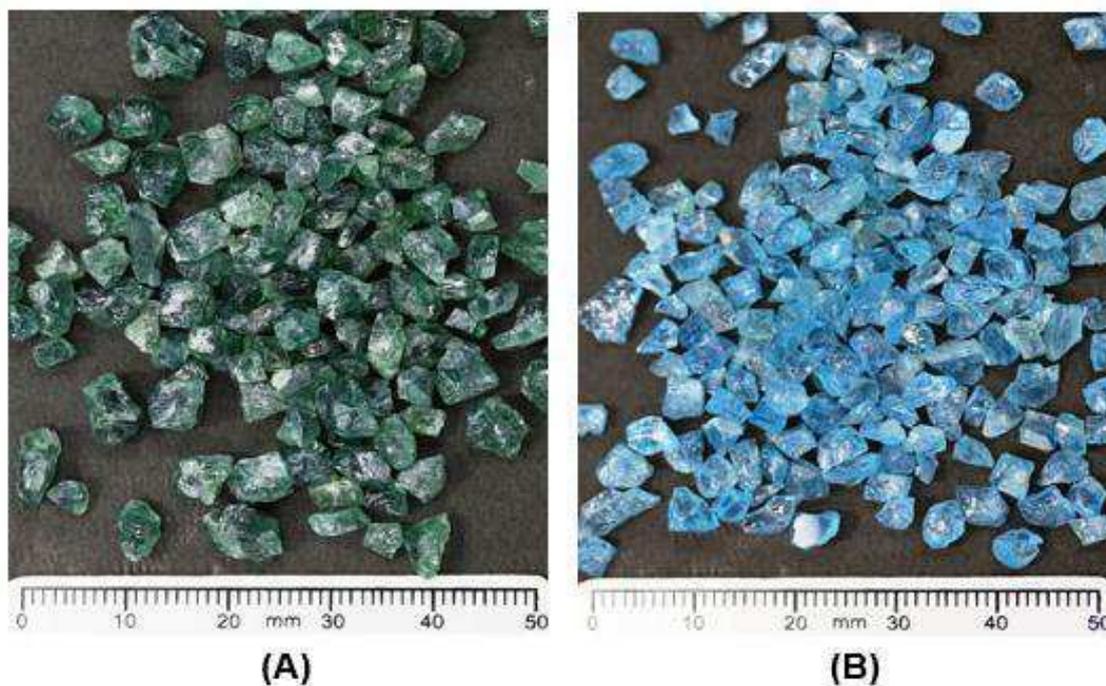


Figura 5.5 - A imagem **A** mostra grãos de apatita selecionados para tratamento térmico, a imagem **B** mostra a coloração resultante de tratamento térmico.

Fonte: Autor (2017).

De acordo com Tardif-becquet (2014), a temperatura ideal para obter a coloração azul é de 700°C, mantendo-se o aquecimento por quinze minutos. Em tratamentos térmicos realizados nas seguintes temperaturas: 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 650°C, 700°C, 750°C, 800°C e 850°C foi constatado que a coloração verde perde intensidade até a temperatura de 600°C, quando torna-se verde azulada. Por fim, na temperatura de 700°C, a apatita torna-se completamente azulada, ao passar para temperatura de 750°C, ela continua azul, porém com uma tonalidade menos intensa e às temperaturas de 800°C e 850°C perde a coloração azulada tornando-se transparente, como observado na Figura 5.6. Tal ensaio constatou que a temperatura ideal para tratamento é de 700°C.



Figura 5.6 -Tratamento térmico em diversas temperatura.

Fonte: Autor (2017).

5.3 Fluorescência e microfluorescência de raio x

A apatita tem a fórmula química definida por $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F},\text{Cl})$ podendo ter as seguintes variedade em relação à composição: hidroxiapatita, fluorapatita e clorapatita.

Na Tabela 5.1 os teores estão expressos em % e foram determinados por análise semi-quantitativa (standardless) em espectrômetro por fluorescência de raio-X - (WDS-2), modelo AXIOS (Panalytical). Conforme as análises químicas, foi constado que o mineral em estudo é uma fluorapatita com concentrações de teores nos elementos Si, La, Ce, Nd, Sm, Pr e Th. Alguns dos elementos cromóforos também estão na sua composição Mn, Fe, V, Cr e Cu. Destaque para a anomalia para o elemento Tório com 0,38%, 19 vezes maior que apresentado por Pan e Fleet (2002) para as apatitas de Durango, México.

Nascimento (2013) e Tardif-becquet (2014) publicaram os resultados de análises ICP-MS, que é um ensaio de maior detalhe onde foram detectados elementos traços como As, La, Ce, Th, U e Y. Estando os elementos Th, U e Y

com proporções relativamente elevadas. Nascimento (2013) responsabiliza os elementos traços As, Th, U e Y pela coloração verde das apatitas.

Na microfluorescência apenas elementos com peso atômico maiores são detectados, portanto o Flúor não foi observado nessa análise.

Observa-se nas Figura 5.7 a Figura 5.15, os resultados que são semelhantes ao da fluorescência com destaque para a anomalia de Th. Na microfluorescência as análises são pontuais mostrando que não ocorre variação química relevante entre os cristais de apatita da região.

Tabela 5.1 - Resultados da análise semi-quantitativa por fluorescência de raio-X.

	Azul	Azul	Média Azul	Verde	Verde	Média verde
Al₂O₃	0,009	0,010	0,010	0,008	0,000	0,004
SiO₂	1,857	1,890	1,874	1,830	1,816	1,823
P₂O₅	37,223	37,384	37,304	37,161	37,083	37,122
SO₃	1,475	1,454	1,465	1,511	1,523	1,517
CaO	56,153	56,080	56,117	56,359	56,404	56,382
MnO	0,012	0,014	0,013	0,016	0,000	0,008
Fe₂O₃	0,043	0,046	0,045	0,034	0,038	0,036
CuO	0,005	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000
ZnO	0,005	0,000	0,003	0,000	0,003	0,002
As₂O₃	0,010	0,009	0,010	0,013	0,000	0,007
SrO	0,090	0,089	0,090	0,083	0,082	0,083
Y₂O₃	0,033	0,032	0,033	0,036	0,032	0,034
La₂O₃	0,029	0,046	0,038	0,046	0,057	0,052
CeO₂	0,160	0,190	0,175	0,199	0,205	0,202
Pr₂O₃	0,074	0,043	0,059	0,000	0,051	0,026
Nd₂O₃	0,154	0,147	0,151	0,160	0,173	0,167
Sm₂O₃	0,034	0,000	0,017	0,000	0,000	0,000
Gd₂O₃	0,047	0,000	0,024	0,056	0,000	0,028
PbO	0,010	0,011	0,011	0,012	0,034	0,023
ThO₂	0,380	0,382	0,381	0,410	0,408	0,409
F	1,769	1,755	1,762	1,836	1,863	1,850
Cl	0,416	0,403	0,410	0,222	0,218	0,220
U	0,011	0,009	0,010	0,008	0,009	0,009
NiO	0,000	0,006	0,003	0,000	0,000	0,000
SOMA (%)	99,999	100,000	100,000	100,000	99,999	100,000

Fonte: Autor (2017).

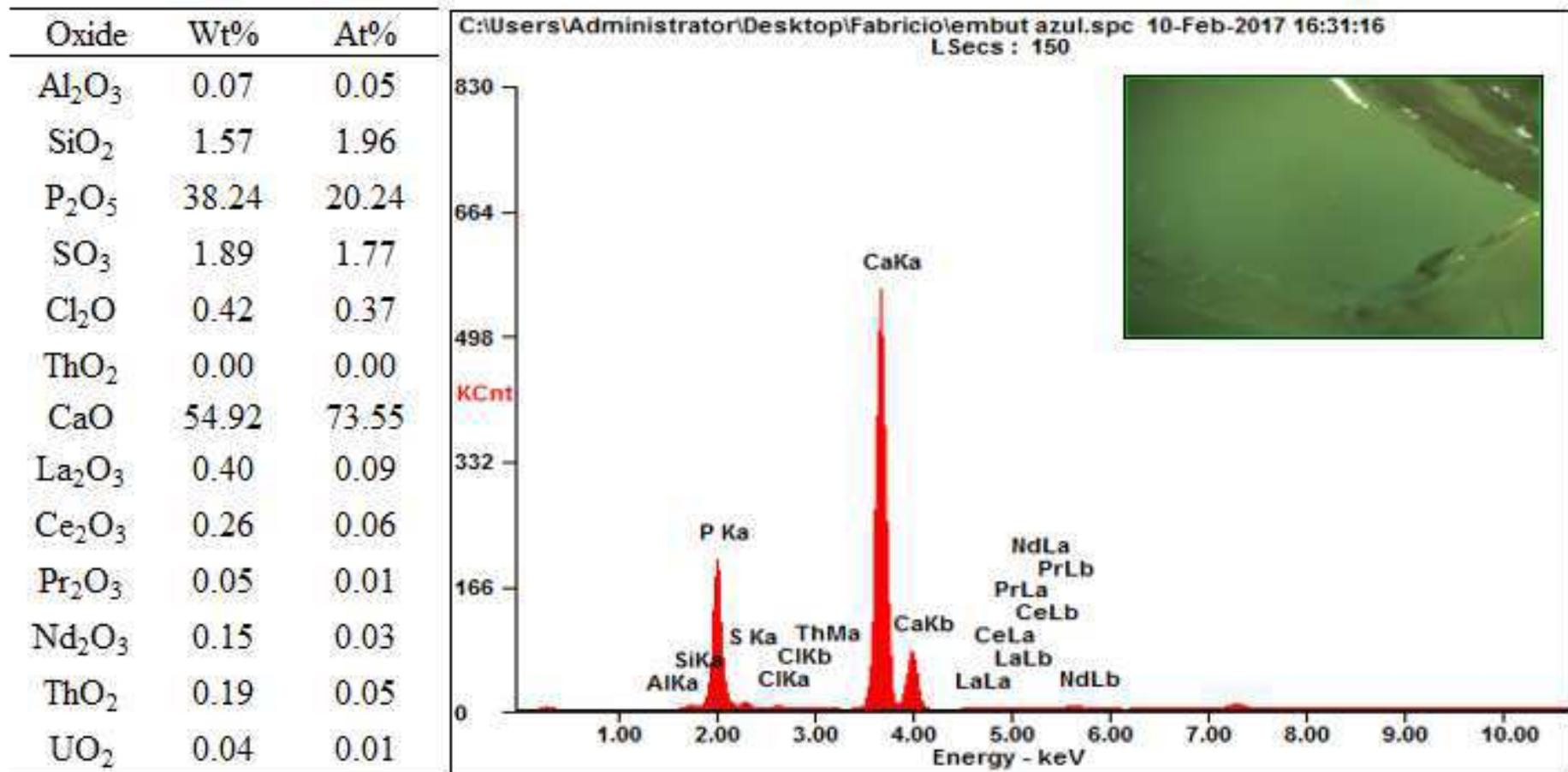


Figura 5.7 - Resultados da análise por microfluorescência de raio-X na amostra Azul 1

Fonte: Autor (2017).

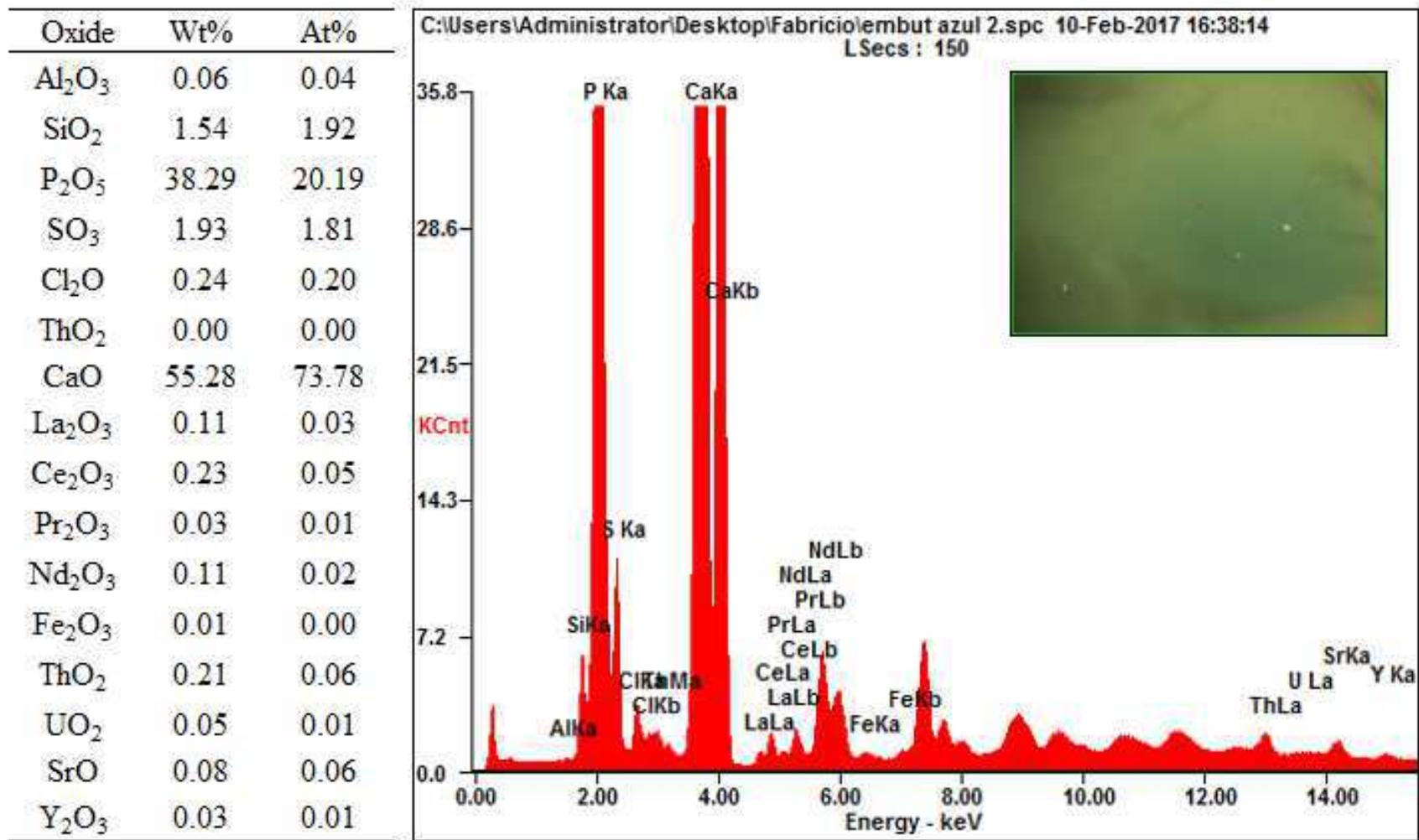


Figura 5.8 - Resultados da análise por microfluorescência de raio-X na amostra Azul 2.

Fonte: Autor (2017).

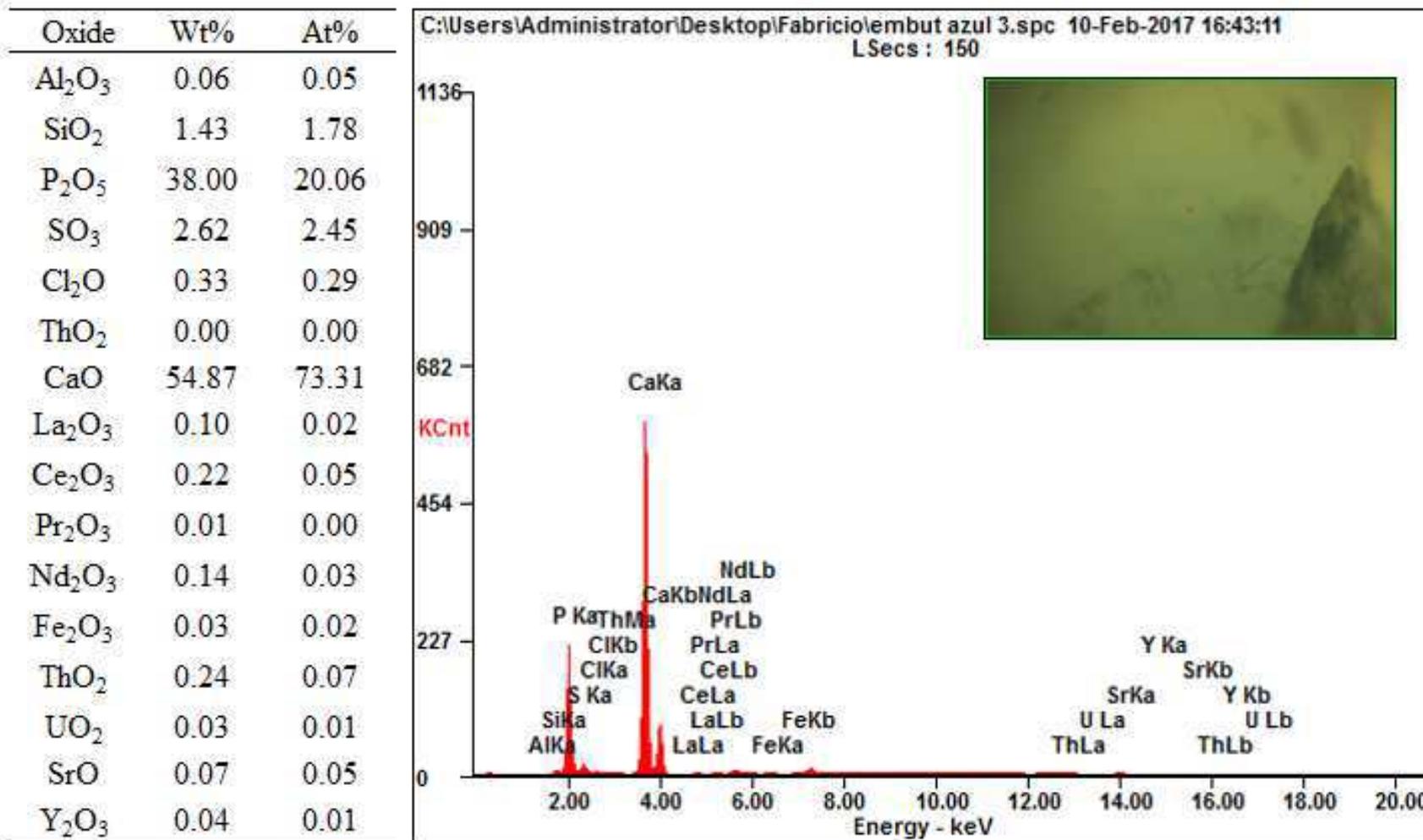


Figura 5.9 - Resultados da análise por microfluorescência de raio-X na amostra Azul 3.

Fonte: Autor (2017).

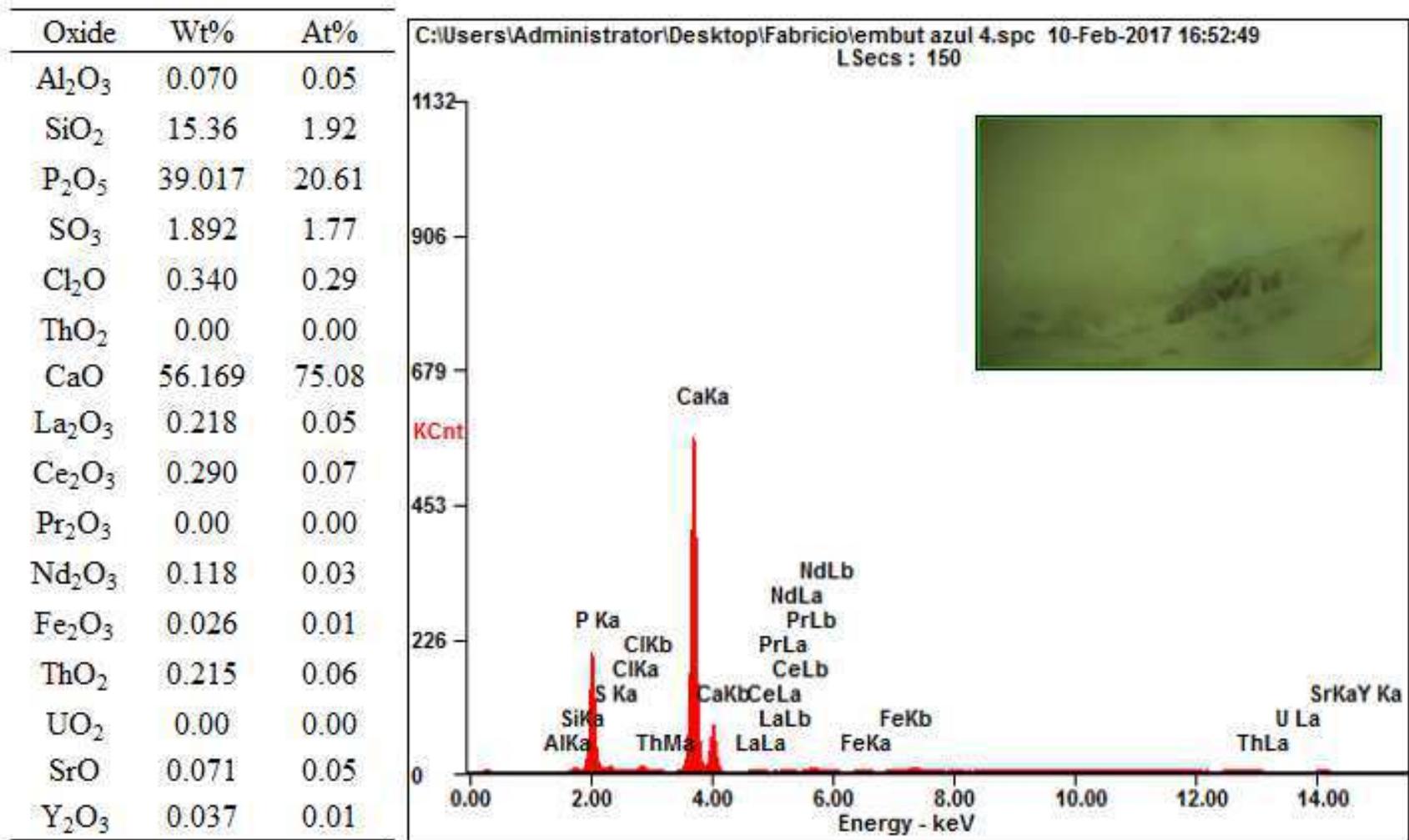


Figura 5.10 - Resultados da análise por microfluorescência de raio-X na amostra Azul 4.

Fonte: Autor (2017).

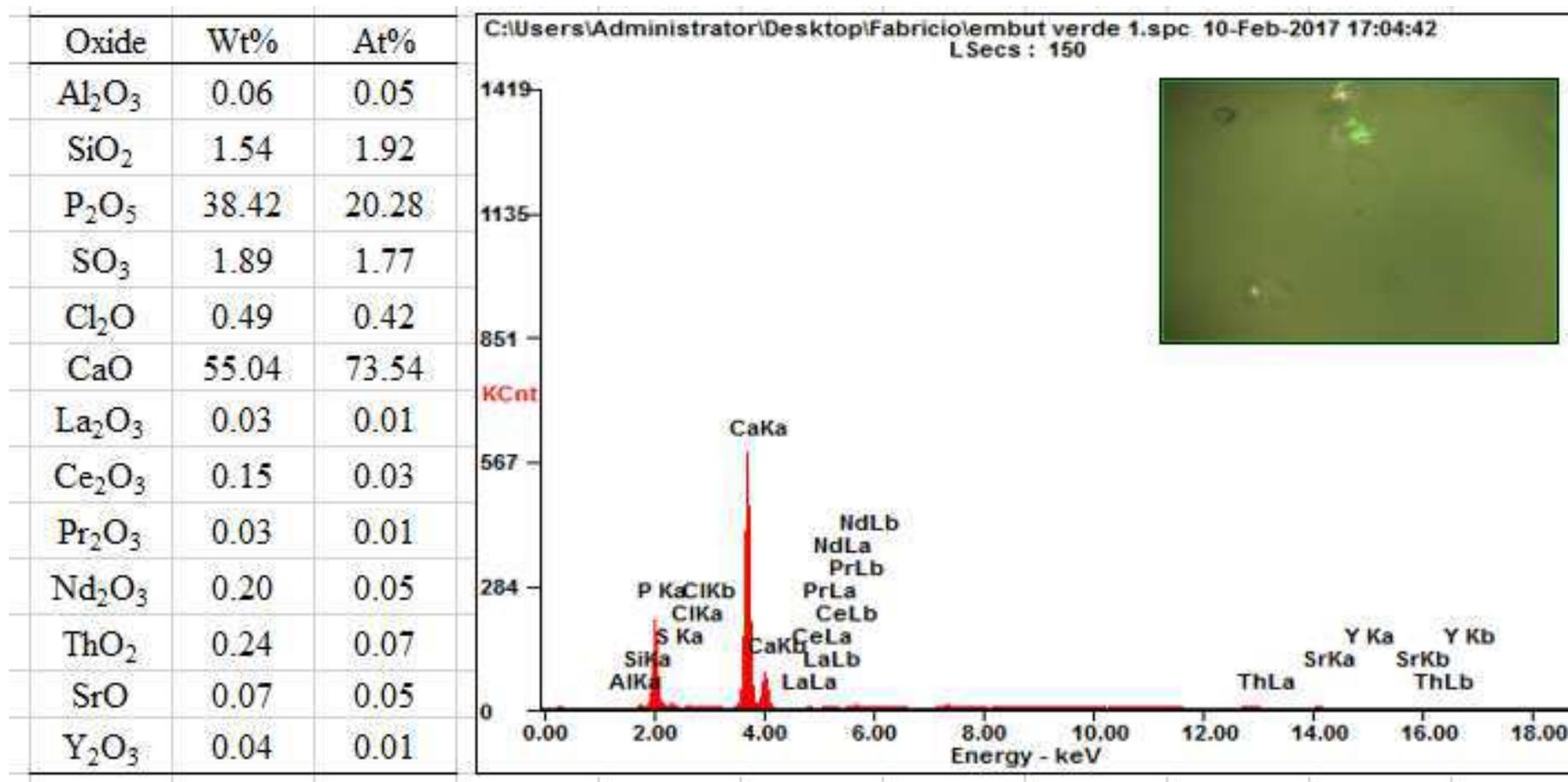


Figura 5.11 - Resultados da análise por microfluorescência de raio-X na amostra Verde 1.

Fonte: Autor (2017).

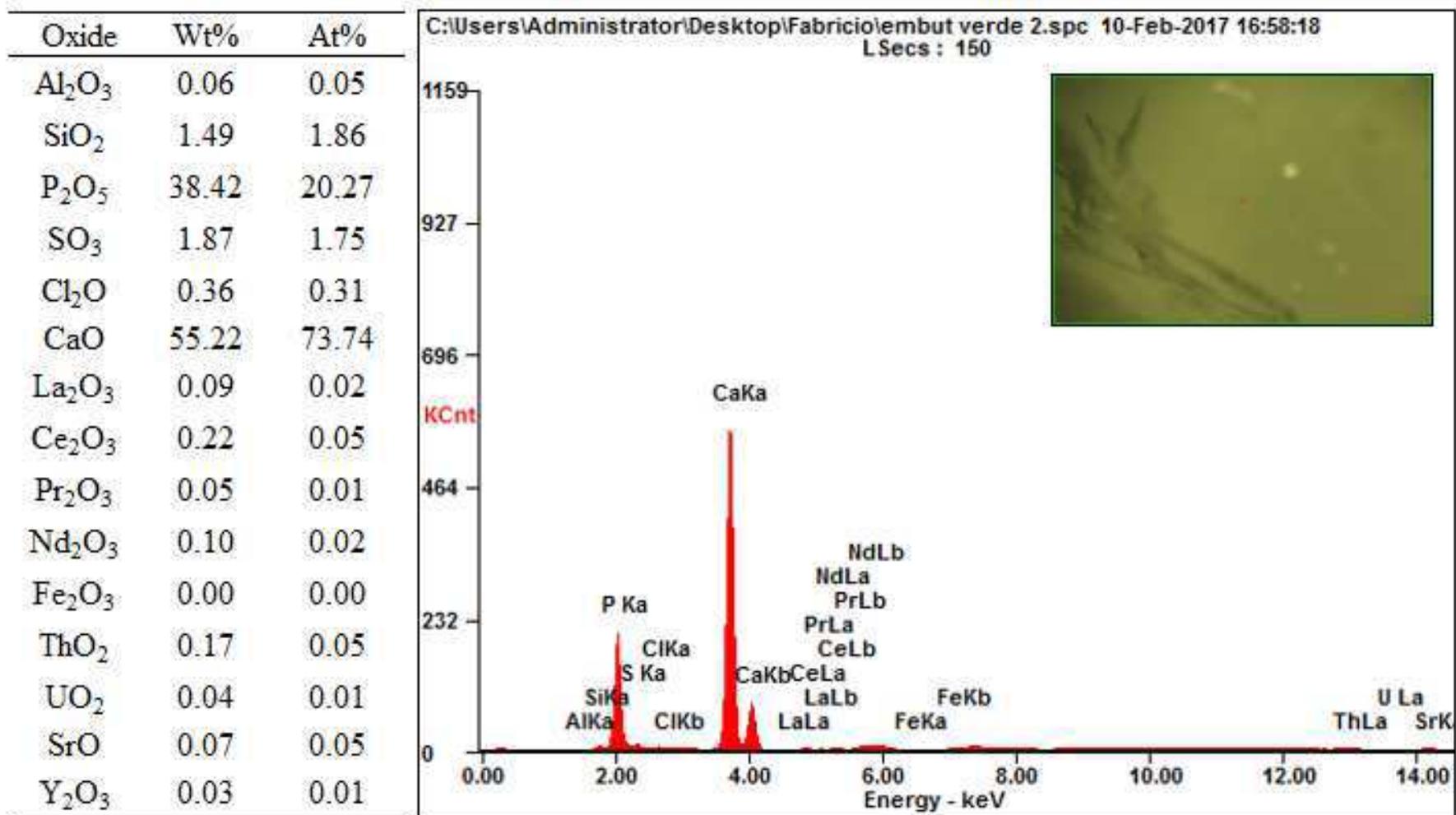


Figura 5.12 - Resultados da análise por microfluorescência de raio-X na amostra Verde 2.

Fonte: Autor (2017).

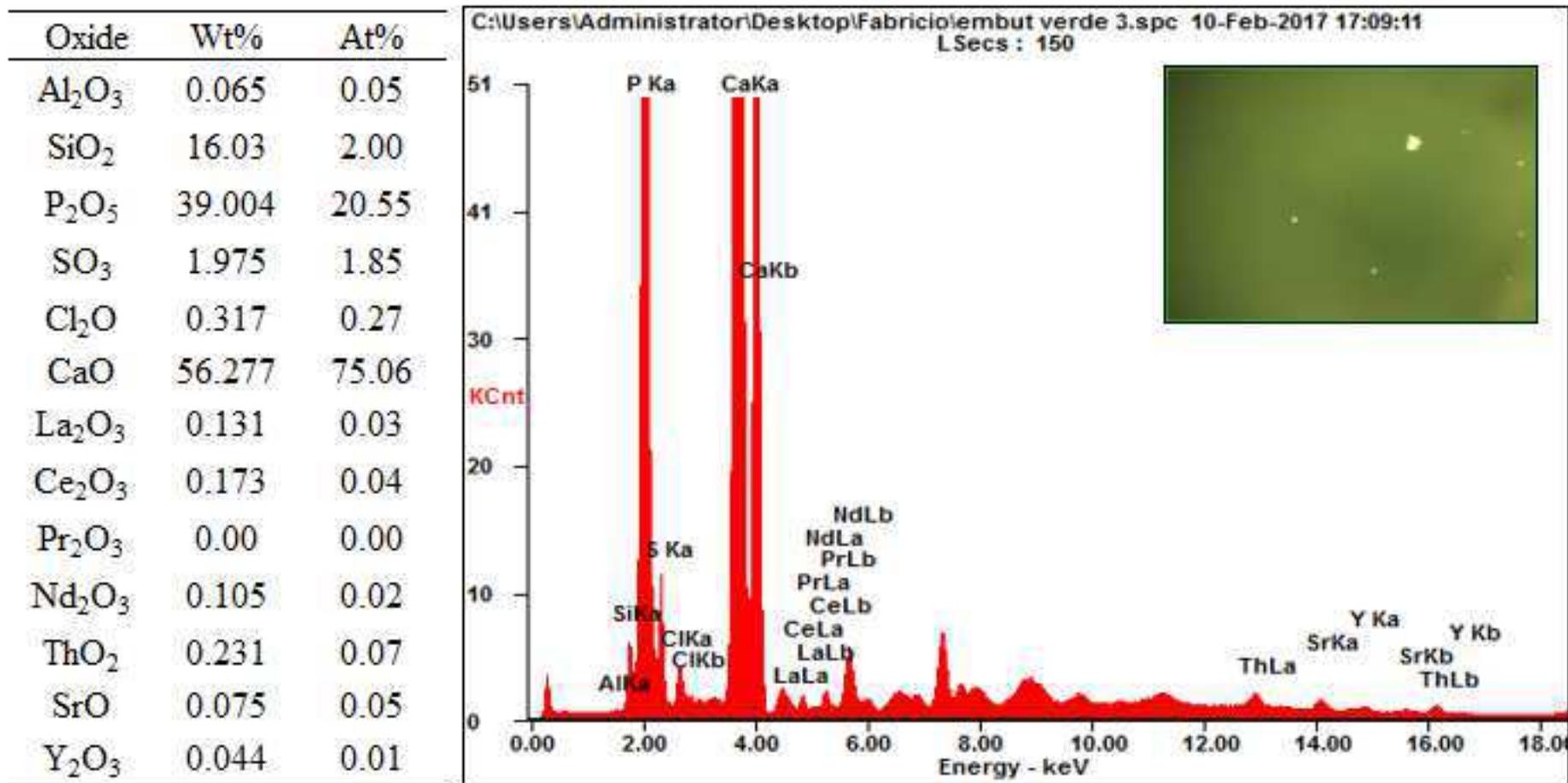


Figura 5.13 - Resultados da análise por microfluorescência de raio-X na amostra Verde 3.

Fonte: Autor (2017).

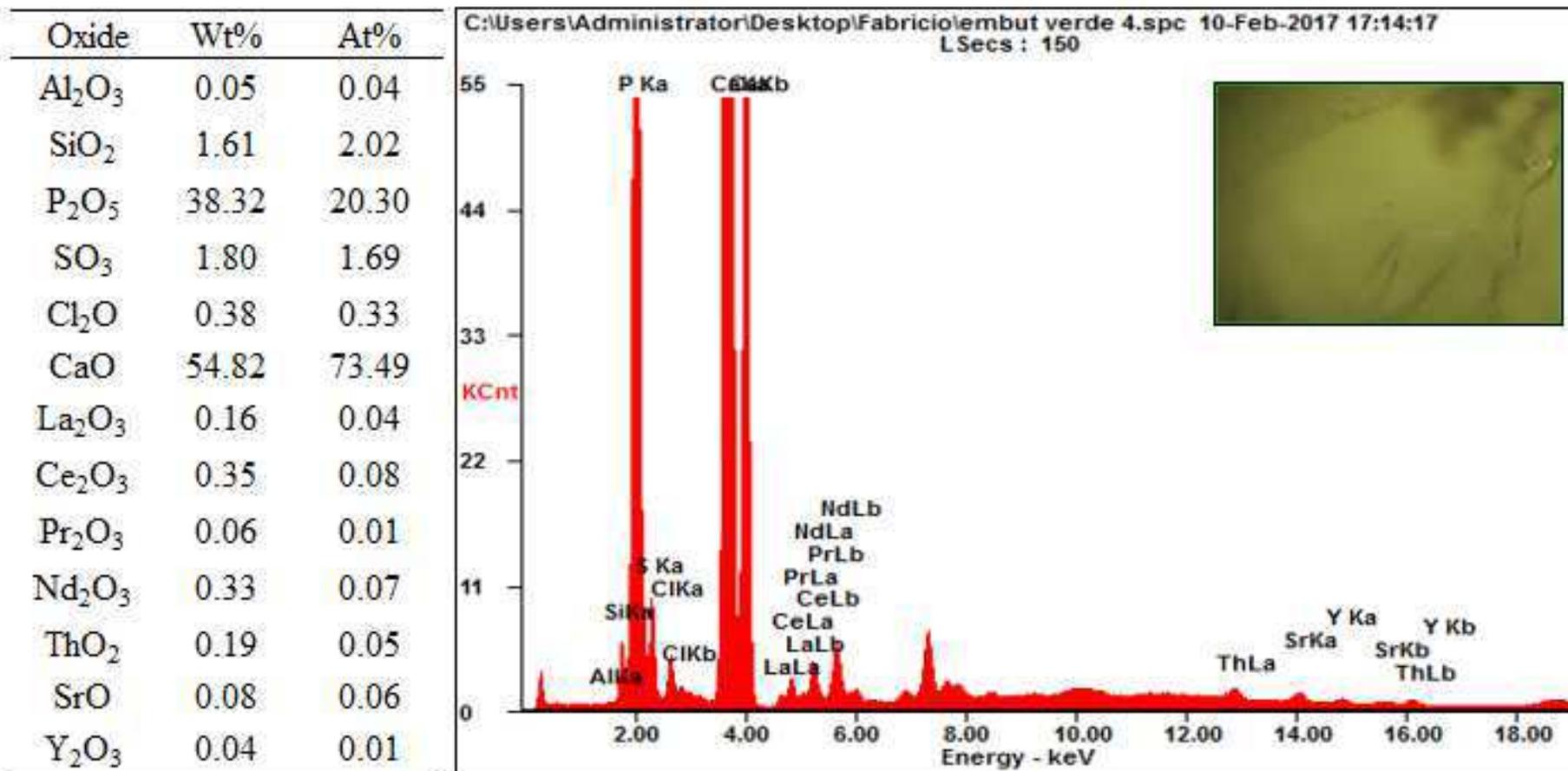


Figura 5.14 - Resultados da análise por microfluorescência de raio-X na amostra Verde 4

Fonte: Autor (2017).

Oxide	Wt%	At%
Al ₂ O ₃	0.06	0.04
SiO ₂	1.55	1.94
P ₂ O ₅	39.06	20.62
SO ₃	1.86	1.74
Cl ₂ O	0.44	0.39
CaO	56.14	75.02
La ₂ O ₃	0.10	0.02
Ce ₂ O ₃	0.23	0.05
Pr ₂ O ₃	0.00	0.00
Nd ₂ O ₃	0.18	0.04
ThO ₂	0.25	0.07
SrO	0.08	0.06
Y ₂ O ₃	0.03	0.01

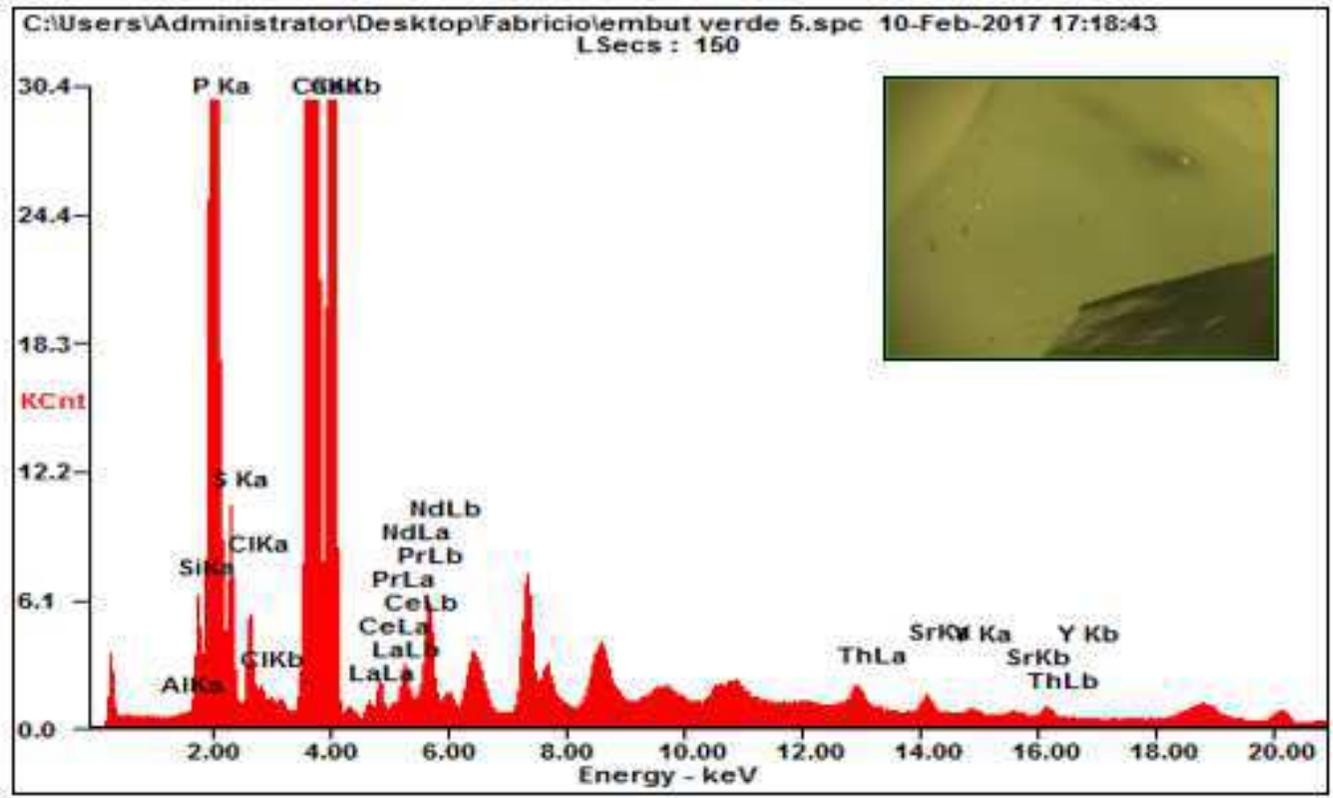


Figura 5.15 - Resultados da análise por microfluorescência de raio-X na amostra Verde 5.

Fonte: Autor (2017).

5.4 UV Visível e Infravermelho próximo (UV/VIS-NIR)

As análises por espectroscopia na faixa da luz ultravioleta visível e infravermelho próximo (UV/VIS-NIR) foram realizadas em amostras brutas com coloração verde natural e amostras tratadas termicamente a 700°C, que, ao final do tratamento, adquiriram coloração azul. Ambas as amostras, verdes e azuis, apresentaram bandas de absorção características de elementos terras raras.

As bandas em aproximadamente 740 e 800nm (Figura 5.16) foram claramente identificadas como relacionadas a transições eletrônicas do íon Nd^{3+} , que também pode estar associado aos demais picos melhor definidos observados no espectro (CANTELAR, LINFANTE, *et al.*, 2001). Esses picos geralmente aparecem como doublets devido à quase sobreposição das bandas de seu acompanhante inevitável, de composição química quase idêntica, Pr^{3+} (PEARSON, 2003), cujas transições eletrônicas podem também estar relacionadas às assimetrias observadas entre 400 e 500 nm (ROSSMAN, 2014).

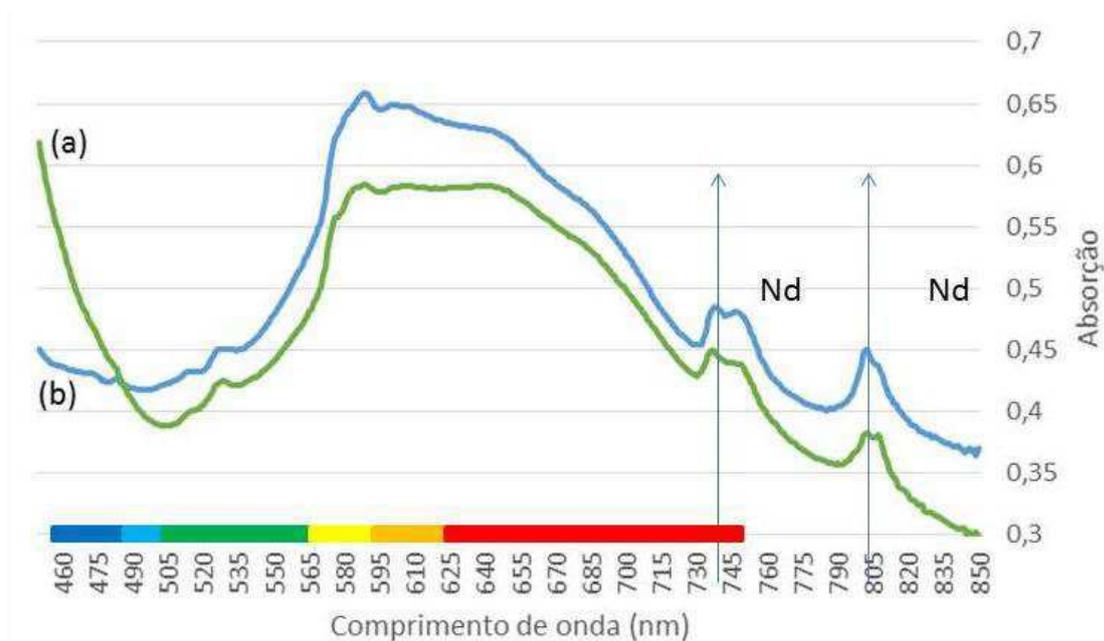


Figura 5.16 - Espectro de absorção óptica das amostras (a) apatita verde natural e (b) apatita azul tratada termicamente.

Fonte: Autor (2017).

A larga banda de absorção observada na região de aproximadamente 550 a 700 nm, absorvendo todo o laranja e amarelo, e boa parte do vermelho, com grande influência na cor do mineral, é muitas vezes relacionada, por causa da cor verde, a um centro buraco SiO^{3-} em um complexo com íons terras raras trivalentes, cujo modelo é representado por $\text{SiO}^{3-}(\text{Ce}^{3++}\text{K})$ (GILINSKAYA e MASHKOVTSSEV, 1995, RIBEIRO, GUEDES, *et al.*, 2005) associam essa mesma banda a um centro de cor relacionado ao íon Mn^{5+} para apatitas azuis.

Segundo (RIBEIRO, GUEDES, *et al.*, 2005), as apatitas de cor azul natural com bandas de absorção centradas em 610 e 650 nm tem a origem da cor causada pelos íons Mn^{5+} ou equivalente $(\text{MnO}_4)^{3-}$. (GILINSKAYA e MASHKOVTSSEV, 1995) questionam estudos que tratam o Mn^{5+} como a razão da cor azul nas apatitas, segundo esse autor os estudos são ambíguos e geram dúvidas.

Como observado nos experimentos de (RIBEIRO, GUEDES, *et al.*, 2005) ambas as amostras apresentam as mesmas bandas de absorção, porém as de cor verde têm menor intensidade.

A principal mudança na cor, observada, é relacionada à redução na absorção em direção aos comprimentos de onda mais energéticos. A amostra verde absorve fortemente os tons de azul do espectro visível, após o tratamento térmico a cor azul não está mais sendo fortemente absorvida, por isso a pedra ficou azul. Após 650°C as amostras perdem absorção próximo ao ultravioleta perdendo a tonalidade verde e tornando-se azul. Após 900°C a cor azul desaparece (RIBEIRO, GUEDES, *et al.*, 2005).

5.5 Infravermelho

De maneira geral, as frequências correspondentes ao íon $(\text{PO}_3)^{-4}$ são iguais entre as amostras de apatita verde natural e as azuis aquecidas, encontram-se nas faixas de 1000 cm^{-1} e 2000 cm^{-1} (CLARCK, 2015). Os picos nas bandas entre 1410 cm^{-1} e 1565 cm^{-1} representam os carbonatos sendo que os do tipo A estão na faixa de 1505 cm^{-1} e 1565 cm^{-1} e os de tipo B na faixa entre 1410 cm^{-1} e 1455 cm^{-1} , (Figura 5.17), segundo Michael, Xiaoyang e Penelope (2004). As maiores diferenças nos dados conferem aos picos das hidroxilas, que ocorrem em 3700 cm^{-1} , segundo Michael, Xiaoyang e Penelope

(2004). Estes picos são evidentes nas apatitas naturais, enquanto que nas tratadas termicamente se apresentam de forma branda, o que sugere a perda de água pelo aquecimento. Porém, estas análises não permitiram observar outros tipos de substituições iônicas dentro da estrutura cristalina das apatitas que poderiam estar relacionadas a uma mudança de cor.

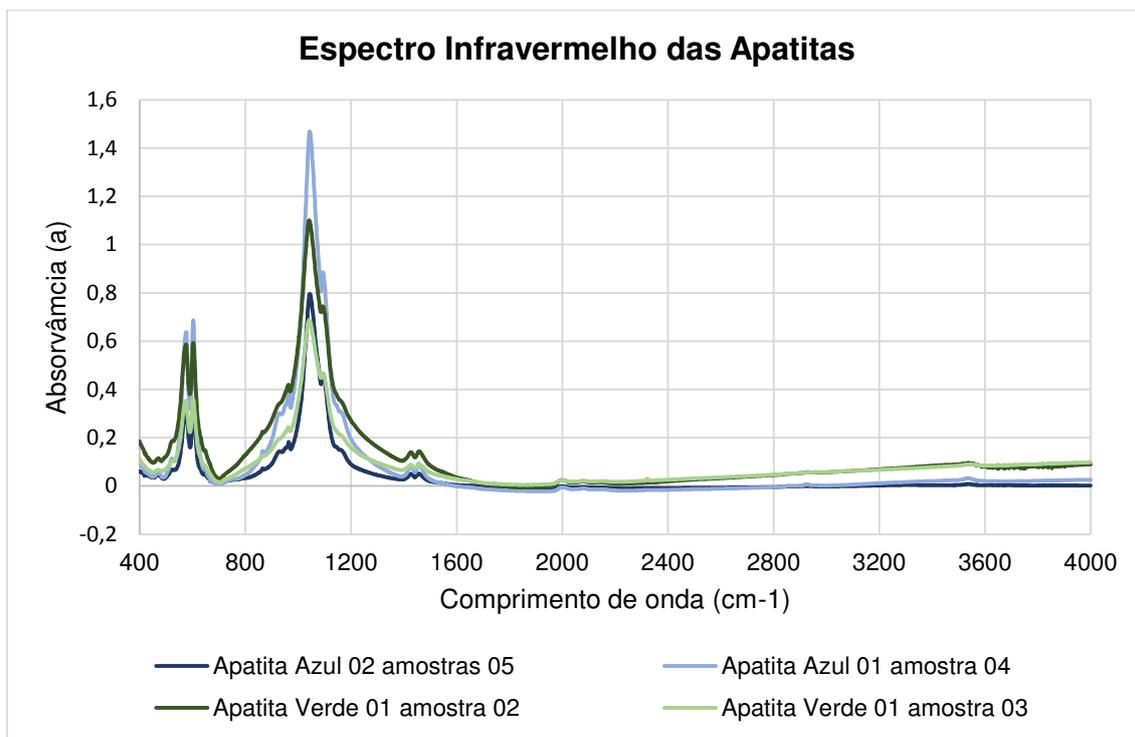


Figura 5.17 - Espectro de Infravermelho das apatitas Azul e Verde.

Fonte: Autor (2017).

5.6 Raman

As análises por espectroscopia Raman foram realizadas em amostras brutas com coloração verde natural e amostras tratadas termicamente a 700°C, que, ao final do tratamento, adquiriram coloração azul. Ambas as amostras, apresentaram bandas de absorção características de elementos terras raras.

Os espectros apresentaram banda larga e fraca que pode ser atribuída à ligação Ca-F onde o pico está na faixa 311cm⁻¹. (PENEL *et al.*, 1997).

Os picos referentes ao íon (PO₃)⁻⁴ foram observados nas seguintes bandas do espectro Raman: muito fracos entre 580 e 620 cm⁻¹, entre 430 e 450 cm⁻¹, entre 1030 e 1080 cm⁻¹ e por fim um pico exprimido em 960 cm⁻¹, (Figura 5.18).

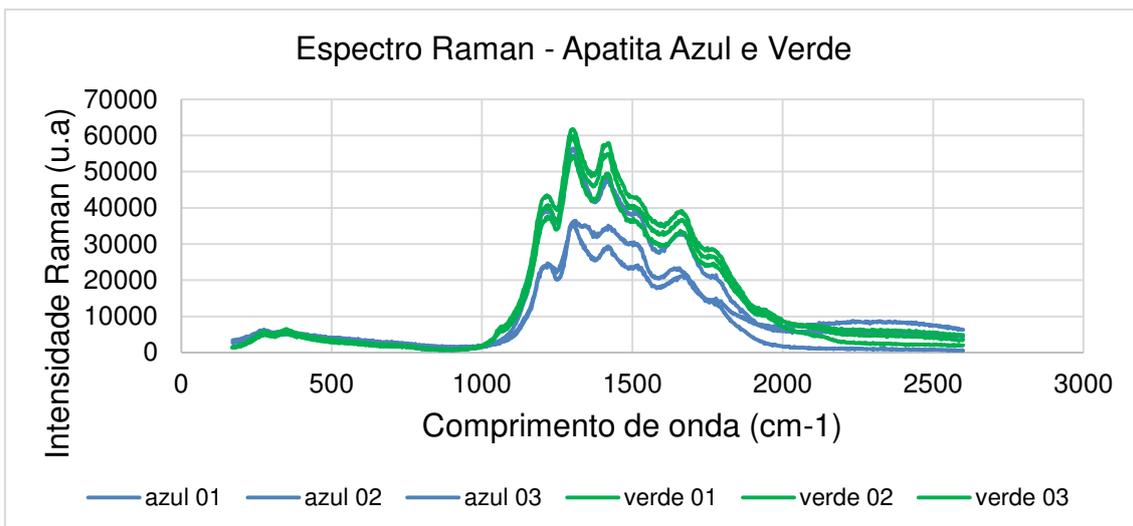


Figura 5.18 - Espectro Raman – Apatita Azul e Verde.

Fonte: Autor (2017).

5.7 EPR

As medidas de EPR realizadas no Laboratório de Ressonância Magnética do Departamento de Física, localizado no Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), a partir de amostras pulverizadas de apatitas verdes naturais e azuis tratadas termicamente. As amostras passaram por tratamento térmico, nas seguintes faixas de temperatura 30°C, 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C e 700°C por 10 minutos cada, medindo-se o sinal de EPR para cada etapa. Observam-se os resultados na Figura 5.19.

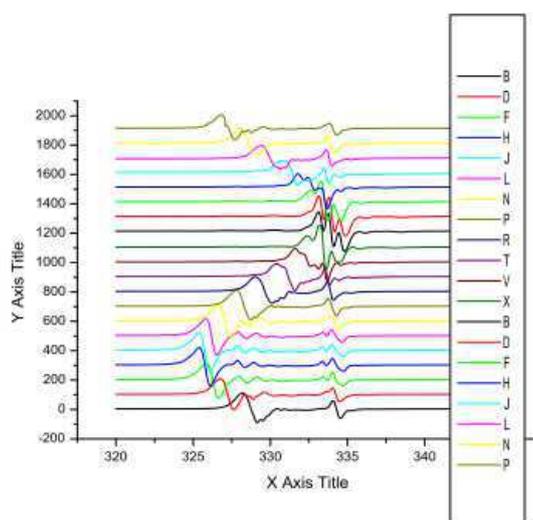


Figura 5.19 - Espectros EPR das apatitas.

Fonte: Autor (2017).

Vários estudos procuram explicar as cores das apatitas (JOHSON, PRENER e KINGSLEY, 1963, GILINSKAYA e MASHKOVTSSEV, 1995, RIBEIRO *et al.*, 2005).

Johson, Prener e Kingsley (1963) e Ribeiro *et al.* (2005) relacionaram a cor azulada da apatita ao íon Mn^{5+} ou equivalente $(MnO_4)^{3-}$. Já Gilinskaya e Mashkovtsev (1995) atribuíram a coloração azul das apatitas ao radical SO^3- .

Ribeiro *et al.* (2005), através de investigações por ressonância paramagnética eletrônica (EPR), absorção óptica, fotoluminescência e dicroísmo circular magnético de absorção (MCDA) atribuíram a cor azul das apatitas tratadas termicamente a 700 C^o ao íon Mn^{5+} que substitui o $(PO_4)^{3-}$.

Ribeiro *et al* (2005) após realizar ensaios EPR à temperatura ambiente encontraram 3 defeitos na estrutura da apatita: um centro buraco O⁻, um centro de moléculas CO₂ e um centro ainda desconhecido. As medidas tomadas de EPR em baixa temperatura evidenciam um espectro mal definido com linhas assimétricas. Essas estruturas lineares confusas foram explicadas por uma distorção de Jahn-Teller devido à configuração tetraédrica distorcida do MN^{5+} . Mesmo não sendo observadas em apatitas naturais foram confirmados em apatitas enriquecidas de Mn^{5+} . E reafirmando Hanneman (2011) onde relata uma transferência de carga entre o O₂⁻ e o Mn^{5+} (GENDAT, 2017).

5.8 Luz Ultravioleta

Foram observadas as manifestações das apatitas verdes naturais e apatitas azuis tratadas termicamente sob excitações pelos comprimentos de ondas de 254 nm e 365 nm da lâmpada de luz ultravioleta compacta UVP modelo UVGL-25.

As apatitas verdes naturais expostas a luz ultravioleta não apresentaram nenhum tipo de reação ou alteração. As apatitas azuis tratadas quando expostas a luz ultravioleta de ondas curtas apresentaram uma coloração violácea.

A coloração violácea observada nas apatitas tratadas, quando excitadas por luz ultravioleta de ondas curtas, pode ser uma característica diagnóstica de tratamento térmico para apatitas azuis, conforme observado na Figura 5.20.

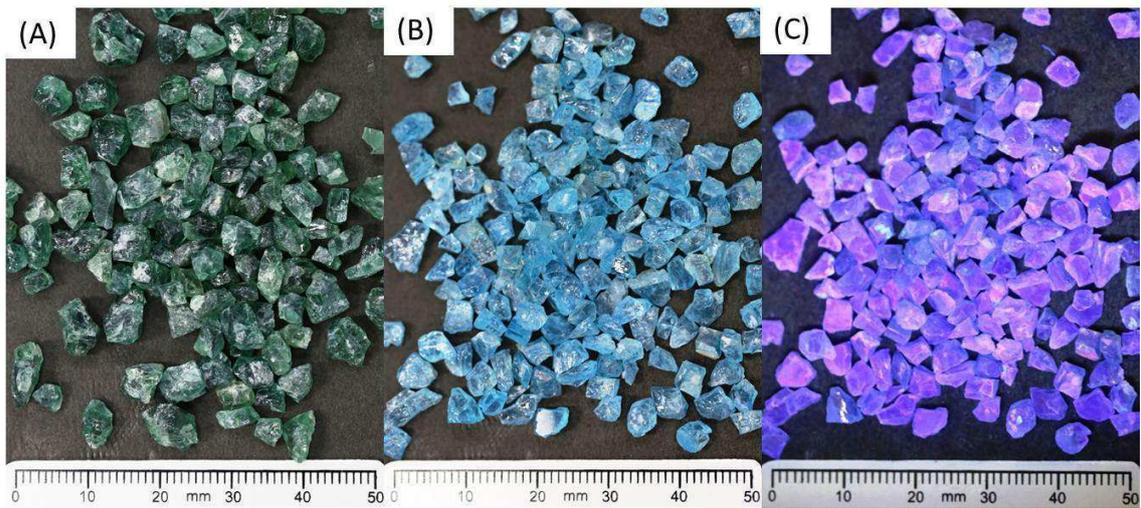


Figura 5.20 - (A) Amostras selecionadas para tratamento térmico, (B) amostras após o tratamento térmico, (C) fluorescência violácea nas amostras tratadas.

Fonte: Autor (2017).

6 CONCLUSÕES

As apatitas da região de Sumé apresentam-se em cristais fraturados e em alguns casos com habito bem definido podendo chegar a 8cm de comprimento.

Os cristais separados para os ensaios e análise são muito pequenos e raramente apresentam boa cristalinidade.

As análises físicas apresentaram índice de refração e densidade compatível com a literatura que são 1,635 a 1,641 e 3,16 e 3,23g/cm³ respectivamente.

O tratamento térmico realizado foi confirmado que a faixa de temperatura de 700°C é a que apresenta a melhor cor azul, ou seja, a pedra tem maior aceitação no mercado agregando assim valor ao produto. A partir da temperatura de 600°C o cristal de apatita perde intensidade da coloração verde e ao passar de 750°C ela perde vivacidade azul e às temperaturas acima de 800°C tornam-se transparentes.

Os resultados das análises químicas de fluorescência e microfluorescência mostraram que se trata de uma fluorapatita, apresentando concentrações de Neodímio e Praseodímio e alta anomalia de Tório. Essa alta anomalia de Tório seria facilmente detectada por mapeamento geofísico radiométrico.

As análises de UV-Visível constataram as bandas dos terras raras Neodímio e Praseodímio.

Quando comparadas as amostras verdes brutas e as tratadas azuis, os espectros de Infravermelho evidenciaram nas amostras tratadas a perda de água e os carbonatos de substituição. Os picos na faixa 1505 cm⁻¹ e 1565 cm⁻¹ representam o carbonato tipo A, que substitui os aníons dos canais. Os picos na faixa entre 1410 cm⁻¹ e 1455 cm⁻¹ representam os carbonatos que ocuparam os aníons de PO₄³⁻.

A mudança de cor após tratamento térmico a 700°C das apatitas verdes naturais para as apatitas azuis artificiais é creditada à substituição do íon (PO₄)³⁻ pelo íon Mn⁵⁺.

As apatitas verdes naturais, quando submetidas à radiação ultravioleta de ondas curtas, aparentemente não demonstram qualquer reação. Enquanto as apatitas azuis tratadas, quando submetidas à radiação ultravioleta de ondas curtas, apresentam coloração violeta. Logo esta é uma característica que pode ser usada como diagnóstica.

Nota-se a possível existência de um depósito de fosfato, mineral industrial de grande valia para o setor agrícola. Sugerem-se estudos adensados focando a extração desse minério.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F. F. M. D.; BRITO NEVES, B. B. D.; FUCK, R. A. Brazilian structural provinces: an introduction. **Earth-Science Reviews** 17, 17, 1981. 1-29.
- BRITO NEVES, B. B.; SANTOS, E. J.; SCHMUS, W. R. V. Tectonic History of the Borborema Province. **Tectonic evolution of South America**, Rio de Janeiro, 2000. 151 - 182.
- CABY, R.; ARTHAUD, M. H.; ARCHANJO, C. H. Lithostratigraphy and petrostructural characterization of supracrustal units in the Brasiliano Belt of Northeast Brazil: geodynamic implications/ South Amer. **Earth Sc.** 8, 1995. 235-246.
- CANTELAR, E. et al. Optical characterisation of rare earths in natural fluorapatite. **Journal of Alloys and Compounds**, 2001. 851 - 854.
- CHVÁTAL, M. **Mineralogia para principiantes - Cristalografia**. [S.l.]: [s.n.], 1972.
- CLARCK, K. I. **QUANTIFICATION OF CO₂ CONCENTRATION IN APATITE**. UNIVERSITY OF MICHIGAN. MICHIGAN, p. 28. 2015.
- CPRM. **GEOLOGIA, TECTÔNICA E RECURSOS MINERAIS DO BRASIL**. Brasilia: CPRM, 2003. 692 p.
- ELLIOTT, J.; WILSON, ; DOWKER,. APATITE STRUCTURES. **International Centre for Diffraction Data**, v. 45, 2002.
- FERREIRA, V. P.; SIAL, A. N. **Late Proterozoic to Cambian peralkalic and shoshonitic plutons and shear zones, northeast Brazil**. Ferreira, V.P. and Sial, A.N. (1992). Kyoto. 1992.
- GENDAT. <https://www.gemdat.org/>, 2017. Acesso em: 03 maio 2017.
- GILINSKAYA, L. G.; MASHKOVTSSEV, I. R. BLUE AND GREEN CENTRES IN NATURAL APATITES BY ES RAND OPTICAL SPECTROSCOPY DATA. **Journal of Structural Chemistry**, L. G. Gilinskaya and R. I. Mashkovtsev, 1995.
- HANNEMAN, W. W. **Pragmatic Spectroscopy For Gemologists**. Hanneman Gemological Instruments. [S.l.], p. 27. 2011.
- HAOHAO, Y. et al. A carbonate-fluoride defect model for carbonate-rich fluorapatite. **American Mineralogist**, 98, 2013. 1066-1069.
- JARDIM DE SÁ, E. F. **A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e o seu significado geodinâmico na Cadeia Brasileira/Pan-Africana**. Universidade de Brasília. Brasília, p. 804. 1994.
- JOHSON, P. D.; PRENER, S. J.; KINGSLEY, J. D. Apatite: Origin of Blue Color, 1963.
- LIMAVERDE, J. D. A. **Produção, industrialização e comércio de gemas no nordeste**. Fortaleza: [s.n.], v. 1, 1980. 132 p.
- MEDEIROS, V. C.; TORRES, H. H. F. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Sumé. Folha SB.24-Z-D-V**. CPRM. [S.l.]. 2000.

MICHAEL, E. F.; XIAOYANG, L.; PENELOPE, L. K. Accommodation of the carbonate ion in apatite: An FTIR and X-ray structure study of crystals synthesized at 2–4 GPa. **American Mineralogist**, 89, 2004. 1422 - 1432.

MINDAT. <https://www.mindat.org/>, 2017. Acesso em: 03 maio 2017.

NASCIMENTO, G. H. **Estudo Geocronológico dos skarns mineralizados em apatita da Região de Sumé (PB)**. UFPE. Recife, p. 71. 2013.

PAN , ; FLEET , M.. **Compositions of the Apatite-Group Minerals: Substitution Mechanisms and Controlling Factors**. [S.I.]. 2002.

PEARSON, G. **Spectra of gem materials**. Australian Gemmologist. [S.I.], p. 478-485. 2003.

PENEL, G. et al. Infrared and Raman microspectrometry study of fluor-fluor-hydroxy and hydroxy-apatite powders. **JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE:MATERIALS IN MEDICINE**, 1997. 271—276.

RIBEIRO, H. B. et al. About the blue and green colours in natural fluorapatite. **phys. stat. sol.**, 2005. 720–723.

ROSSMAN, G. R. **Optical spectroscopy**. Reviews in Mineralogy and Geochemistry. [S.I.], p. 371-398. 2014.

SANTOS, E. J. **O complexo granítico Lagoas das Pedras: Acresção e colisão na região de Floresta (Pernambuco), Província Borborema**. USP. [S.I.], p. 219. 1995.

SANTOS, E. J. Ensaio preliminar sobre terrenos e tectônica acrecionária na Província Borborema. **39º Congresso Brasileiro de Geologia**, Salvado, 1996. 47 - 50.

SANTOS, E. J. D.; NUTMAN, A. P.; BRITO NEVES, B. B. D. Idades SHRIMP U-Pb do Complexo Sertânia: Implicações Sobre a Evolução Tectônica da Zona Transversal, Província Borborema. **Revista do Instituto de Geociências - USP**, São Paulo, v. 4, p. 1-12, Abril 2004.

SANTOS, E. J. et al. An overall view on the displaced terrane arrangement of the Borborema Province, NE Brazil. **International Geological**, 2000.

SANTOS, E. J. et al. **Uma Síntese dos Eventos Tectono-magmáticos Pré-Cariris Velhos no Terreno Alto Moxotó, Província Borborema, e seu significado tectônico**. XVII Congresso Brasileiro de Geologia. CURITIBA. 2008.

SANTOS, E. J. et al. **Magmatismo Anorogênico Pré-Cariris Velhos da Região de Sumé e Camalaú (PB) e seu Significado na Evolução da Província Borborema**. CNPq. Recife, p. 32. 2012.

SANTOS, E. J.; MEDEIROS, V. C. Constraints from granitic plutonism on Proterozoic crustal growth of the Transverse Zone, Borborema Province, NE Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, 29, 1999. 73-84.

SANTOS, L. C. M. L. **Mapeamento Geológico e Análise Litoestratigráfica do Precambriano da Região de Sucuru (Paraíba), Terreno Alto Moxotó, Província Borborema**. UFPE. Recife, p. 148. 2010.

SCHUMANN, W. **Gemas do Mundo**. 9ª edição ampliada e atualizada. ed. Barueri: Disal, 2006.

TARDIF-BECQUET, D. **ESTUDO MINERALÓGICO, QUÍMICO E TRATAMENTO DE COR DAS APATITAS GEMOLÓGICAS DE JUNCO DO SERIDÓ, PARAÍBA, BRASIL**. UFOP. OURO PRETO. 2014.

TOLEDO, M. C. M. D.; PEREIRA, V.. A VARIABILIDADE DE COMPOSIÇÃO DA APATITA ASSOCIADA A CARBONATITOS. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, p. 27-64, 2001.

VAN SCHMUS, W. R. et al. U/Pb and Sm/ Nd geochronologic studies of the eastern Borborema Province, northeastern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, 1995. 267 - 288.