



UFRJ

Luiza Rodrigues Rocha

**CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E GEMOLÓGICA DAS
OCORRÊNCIAS DE OPALA VERDE NA REGIÃO DE BOA
NOVA, BAHIA.**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia

UFRJ
Rio de Janeiro
Agosto, 2014



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

**CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E GEMOLÓGICA DAS
OCORRÊNCIAS DE OPALA VERDE NA REGIÃO DE BOA
NOVA, BAHIA.**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Dr. Jurgen Schnellrath

Co-orientador: Dra. Cícera Neysi de Almeida

Rio de Janeiro, agosto 2014

ROCHA, Luiza Rodrigues.

CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E
GEMOLÓGICA DAS OCORRÊNCIAS DE OPALA
VERDE NA REGIÃO DE BOA NOVA, BAHIA./ Luiza
Rodrigues Rocha – Rio de Janeiro: UFRJ/ CCMN/
IGEO/ GEOLOGIA.

45 f. : il.; 29,7 cm.

Orientadores: Jurgen Schnellrath

Cícera Neysi de Almeida

(Instituto de Geociências – Departamento de
Geologia – UFRJ, Trabalho de conclusão de curso para
obtenção de grau em Bacharel em Geologia. (IGL-U08)

Referencias Bibliográficas : p. 45.

1. Gemologia. 2. Opala. 3. Boa Nova. 4. Causas de Cor.

LUIZA RODRIGUES ROCHA

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E GEMOLÓGICA DAS
OCORRÊNCIAS DE OPALA NA REGIÃO DE BOA NOVA,
BAHIA.**

Aprovada por:

Prof. Dr. Jurgen Schnellrath – Pesquisador Titular – Centro de
Tecnologia Mineral – UFRJ

Prof. Dr. Julio Cezar Mendes – Professor Associado – Instituto de
Geociências - UFRJ

Dra. Rosana Coppede – Pesquisadora Colaboradora – Centro de
Tecnologia Mineral - UFRJ

AGRADECIMENTOS

Aqui vão os meus sinceros agradecimentos àqueles que fizeram parte disso tudo.

Primeiramente a Deus, que, entre os caminhos mais tortuosos que a vida pode levar, me levou a chegar aonde eu cheguei.

À minha mãe Neide pelo seu infinito amor. Ela sabe o que é padecer no paraíso... Só as mães são felizes.

Aos meus orientadores, por todas as conversas esclarecedoras orientando meus estudos e por disponibilizarem todos os recursos necessários à conclusão deste trabalho. Um obrigado em especial ao Professor e amigo Dr. Jurgen Schnellrath. Não aprendi somente ciência gemológica, mas também a ser um Ser Humano melhor.

A toda equipe do CETEM, pelas conversas, risadas e muita história pra contar, que contribuíram para que os dias fossem deliciosos. Um especial agradecimento a: Antonieta, "Nininho", Josimar e Otávio.

Aos meus companheiros de graduação da Turma de 2009 do BCMT e de tantas outras turmas... aquém cito: Livia Borges, Renata Carneiro, João Terra, Carolina Santiago (Carolzinha) e Rhenan Braun.

A todo pessoal do IGEO, sempre prontos a tirar qualquer dúvida.

“Go placidly amid the noise and haste, and remember what peace there may be in silence. As far as possible without surrender be on good terms with all persons. Speak your truth quietly and clearly; and listen to others, even the dull and the ignorant; they too have their story. Avoid loud and aggressive persons, they are vexations to the spirit. If you compare yourself with others, you may become vain and bitter; for always there will be greater and lesser persons than yourself. Enjoy your achievements as well as your plans. Keep interested in your own career, however humble; it is a real possession in the changing fortunes of time. Exercise caution in your business affairs; for the world is full of trickery. But let this not blind you to what virtue there is; many persons strive for high ideals; and everywhere life is full of heroism. Be yourself. Especially, do not feign affection. Neither be cynical about love; for in the face of all aridity and disenchantment it is as perennial as the grass. Take kindly the counsel of the years, gracefully surrendering the things of youth. Nurture strength of spirit to shield you in sudden misfortune. But do not distress yourself with dark imaginings. Many fears are born of fatigue and loneliness. Beyond a wholesome discipline, be gentle with yourself. You are a child of the universe, no less than the trees and the stars; you have a right to be here. And whether or not it is clear to you, no doubt the universe is unfolding as it should. Therefore be at peace with God, whatever you conceive Him to be, and whatever your labors and aspirations, in the noisy confusion of life keep peace with your soul. With all its sham, drudgery, and broken dreams, it is still a beautiful world. Be cheerful. Strive to be happy.”

Max Ehrmann, “Desiderata”- 1920

RESUMO

ROCHA, Luiza Rodrigues. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E GEMOLÓGICA DAS OCORRÊNCIAS DE OPALA VERDE NA REGIÃO DE BOA NOVA, BAHIA. 2014, xii, 45f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

A opala é conhecida e apreciada mundialmente pelas suas características únicas, dentre as quais podemos destacar a sua grande diversidade de cores. As opalas verdes do município de Boa Nova no estado da Bahia são conhecidas desde a década de 1970, alternando épocas de produção e paralisação das atividades garimpeiras. Recentemente (2010) notícias de um retorno das atividades de lavra e de alta produção nos levaram a visitar o local. As opalas ocorrem em pacotes de rochas constituídas de gnaisses a xistos quartzosos, intercaladas com camadas de anfíbolito. Elas se destacam pelos seus diversos tons de verde, indo de amarelado, passando por um verde maçã, a um verde bem escuro. Nas frentes de lavra é comum observar a associação com calcedônia branca e dendritos de manganês em meio a uma matriz avermelhada. A caracterização mineralógica e gemológica das treze amostras disponibilizadas incluiu a determinação da densidade e dos índices de refração, difração de raios-X e espectroscopia Raman. A fim de investigar a causa da variação dos tons de verde foram realizadas análises químicas por espectrometria de fluorescência de raios-X e espectroscopia UV-VIS-NIR.

A difração de raios-X revelou um baixo grau de cristalinidade destas opalas, permitindo enquadrá-las como opalas-CT. As mesmas técnicas revelaram também o intercrescimento com calcedônia, por vezes visível na forma de vênulas brancas. As opalas de Boa Nova apresentam uma variação considerável em termos de densidade (2,05 a 2,12 g/cm³) e índices de refração (1,440 a 1,454), o que, embora compatíveis com opalas-CT, pode ser explicado tanto pelo intercrescimento com a calcedônia e outros filossilicatos (paligorskita e serpentina), como pela variação da sua composição química a nível dos elementos menores responsáveis pela cor.

O principal objetivo deste trabalho foi de contribuir para o melhor entendimento das causas da cor verde destas opalas e a razão da sua grande variação. A análise por espectrometria de fluorescência de raios-X por dispersão de energia identificou claramente a presença de três elementos químicos com participação decisiva na cor das opalas: níquel, ferro e cromo, nesta ordem. Trabalhos anteriores desconsideravam a presença do cromo e a proporção entre os três elementos encontrados, o que no final pode ser considerado um fator determinante para o surgimento dos diferentes tons de verde. As opalas verde amareladas são praticamente desprovidas de cromo e possuem teores elevados de níquel e ferro. As opalas de cor “verde maçã” possuem teores de níquel elevados e baixos valores de cromo e ferro. As opalas verdes mais escuras apresentam níquel elevado e quantidade de cromo e ferro equivalentes. Neste estudo são apresentados espectros UV-VIS-NIR como auxílio de indicação dos elementos. A presença de inclusões de minerais níquelíferos é normalmente apontada como a causa da cor de opalas e calcedônias verdes (crisoprásio), mas não foram detectados em nenhuma análise, o que nos leva a crer que, apesar de presente em grandes quantidades o elemento níquel não se encontra em inclusões e sim disperso em toda opala. Estudos de microscópio eletrônico de

varredura foram capazes de detectar fases de intercrescimento de calcedônia e inclusões ricas em ferro e cromo, mas nenhuma inclusão portadora de níquel.

Palavras chave: Opala Verde, Boa Nova, Causas de Cor.

ABSTRACT

ROCHA, Luiza Rodrigues. CHEMICAL AND GEOMOLOGICAL CHARACTERIZATION OF THE OPAL OCCURRENCE IN THE REGION OF BOA NOVA, BAHIA. 2014, xii, 45f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Opal is known and appreciated worldwide for its unique characteristics, among which we highlight its wide range of colors. The green opals in Boa Nova in the state of Bahia are known since the 1970s, alternating periods of production and stoppage of prospecting activities. Recently (2010) news of a return of mining and high production activities led us to visit the site. Opal occurs in rocks consisting of gneisses and quartzitic schist intercalated with layers of amphibolite. The opals stand out for their various shades of green, ranging from yellow, through a green apple, to a very dark green. In the mining fronts it is common to observe the association with white chalcedony and dendrites of manganese in the midst of a reddish matrix. The gemological and mineralogical characterization of the thirteen samples available included the determination of density and refractive index and X-ray diffraction. In order to investigate the cause of the variation in shades of green, chemical analysis was performed by X-rays fluorescence spectrometry and UV-VIS-NIR.

The diffraction of X-rays revealed a low degree of crystallinity of these opals, allowing to fit them as opal-CT. The same techniques also revealed the intergrowth with chalcedony, sometimes visible as white venules. The Boa Nova's opals exhibit considerable variation in density (2.05 to 2.12 g / cm³) and refractive index (1.440 to 1.454) which, although compatible with opal-CT, can be explained both by intergrowth with chalcedony and other phyllosilicates (palygorskite and serpentine) as the variation of chemical composition at the level of minor elements responsible for the color.

The main objective of this study was to contribute to a better understanding of the causes of the green color of these opals and its great variation. Analysis by energy dispersive X-ray fluorescence spectroscopy clearly identified the presence of three chemical elements with a decisive role in the color of opals: nickel, iron and chromium, in this order. Previous studies disregarded the presence of chromium and the proportion found among the three elements, which in the end can be considered a determining factor for the emergence of different shades of green. The yellowish green opals are virtually devoid of chrome and have high levels of nickel and iron. Opals with a "green apple" color have high levels of nickel and low values of chromium and iron. The darker green opals have high quantities of nickel and equivalent chromium and iron contents. In this study, UV-VIS-NIR spectra are presented as an aid for indicating elements. The presence of inclusions of nickeliferous minerals is usually cited as the cause of the color of opals and green chalcedonies (chrysoprase), but were not detected in any analysis, which leads us to believe that, in spite of being present in large amounts, the element nickel is not in inclusions, but dispersed throughout opal. Studies of scanning electron microscopy were able to detect phases of intergrowth of chalcedony and inclusions rich in iron and chromium, but no carrier inclusion of nickel.

Keywords: Green Opal, Boa Nova, Causes of Color.

Índice

1. Introdução	11
1.1. Objetivo	11
1.2. Metodologia	11
1.3. Localização geográfica da área estudada	11
1.4. Geologia da area	13
1.5. Aspectos gerais das Opalas.	15
2. Métodos de Estudo e Amostragem	16
2.1. Equipamentos e Preparação das amostras	16
2.1.1 <i>Densidade</i>	16
2.1.2 <i>Índice de Refração</i>	17
2.1.3 <i>Análise de Espectros de Absorção UV/VIS/NIR</i>	18
2.1.4 <i>Microscopia Eletrônica de Varredura</i>	19
2.1.5 <i>Difratômetro de Raios-X</i>	20
2.1.6 <i>Fluorescência de Raios-X</i>	21
2.2. Materias Analisados	22
3. Resultados.	24
3.1. Caracterização Gemológica	24
3.2. Caracterização Mineralógica	27
3.2.1 <i>Tipologia das Opalas</i>	27
3.2.2 <i>Análise Semi Quantitativa dos Elementos Causadores de Cor</i>	28
3.2.3 <i>Difração de Raios -X</i>	31
3.3. Espectrofotômetro UV/Visível/NIR	32
3.4. Microssonda Eletrônica de Varredura	37
4. Conclusões	44
5. Referências Bibliográficas	45

1. INTRODUÇÃO

1.1 Objetivo

O Brasil é um dos líderes mundiais na produção de gemas de cor com contribuições de várias províncias gemológicas em vários estados. Com isso, o objetivo deste trabalho é a caracterização das ocorrências das opalas verdes no município de Boa Nova no estado da Bahia, buscando, entre outras coisas, a causa de sua cor verde diferenciada. A ocorrência de opalas verdes no Brasil não é muito comum, sendo a sua cor geralmente atribuída à presença de inclusões níquelíferas. Com os resultados obtidos neste estudo esperamos colaborar com a promoção e consequente exploração e comercialização dessas opalas.

1.2 Metodologia

A metodologia constitui-se em análises bibliográficas, trabalhos de campo, gabinete e laboratório.

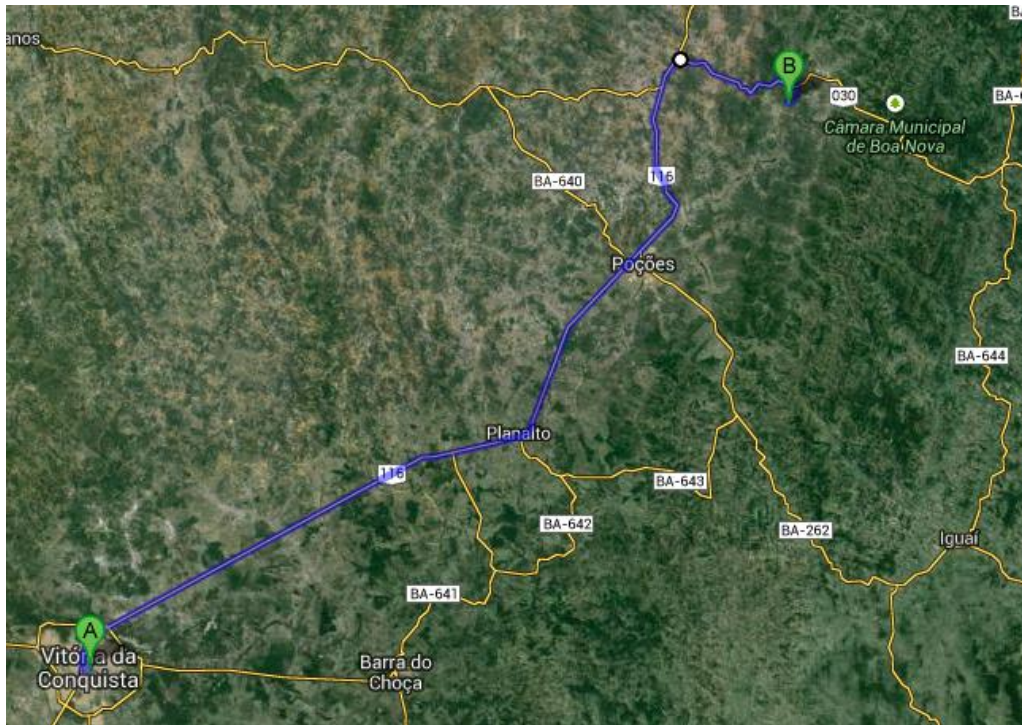
Foram feitas análises bibliográficas das ocorrências de Opala como um todo pelo Brasil, particularmente no Nordeste do Brasil, com destaque para os estados do Piauí e da Bahia, além de outros estados produtores, como o Rio Grande do Sul. Foram consultados trabalhos conceituais de mineralogia, revistas com artigos focados em Gemologia e artigos sobre a geologia regional da área.

Os trabalhos de campo foram realizados no mês de abril de 2010. Durante o trabalho de campo foram coletadas amostras de variados tamanhos, que posteriormente foram analisadas.

Os trabalhos de campo consistiram no reconhecimento da área e os métodos utilizados para a extração dos minerais. Foram visitados alguns pontos, onde se extraía o mineral de forma manual em um garimpo. Também foram feitas fotos do local da ocorrência.

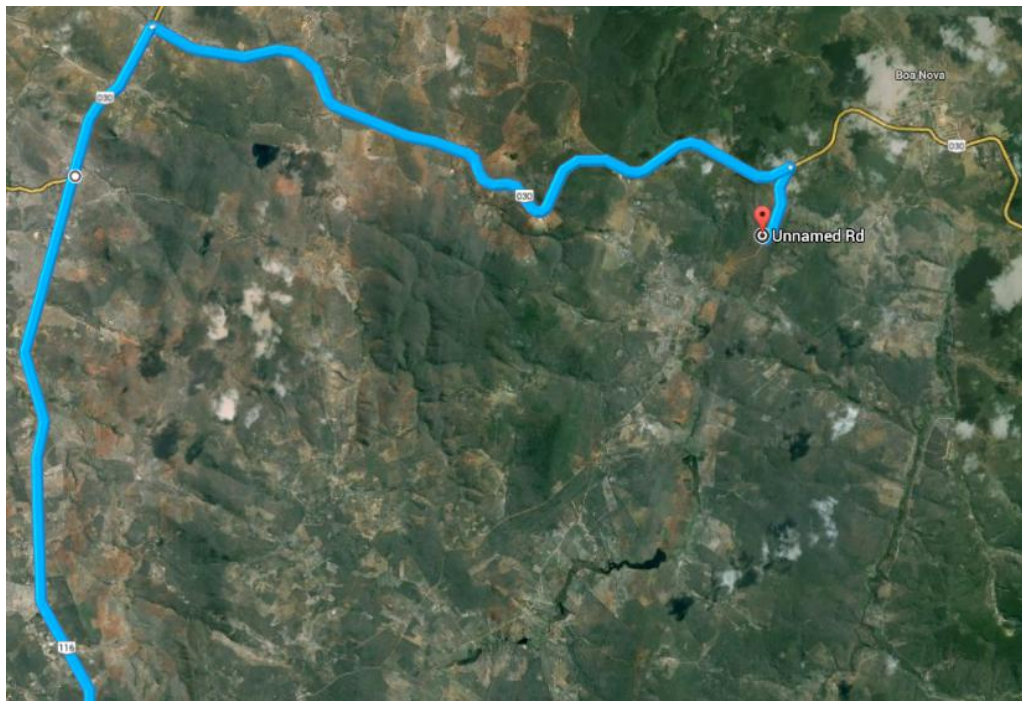
1.3 Localização Geográfica da área Estudada

A área se localiza no município de Boa Nova a N-E da cidade de Vitória da Conquista, estado da Bahia, com uma distância de aproximadamente 440 Km da capital do estado, Salvador (Figura 1). O acesso é feito geralmente por Vitória da Conquista pela estrada pavimentada Rio-Bahia (BR-116). Após 89 km dobra-se à direita para BR-030, igualmente pavimentada. Após 14 km dobra-se novamente à direita e segue-se por 1,4 km de estrada de terra até o local da ocorrência (Figura 2). Leva-se cerca de uma hora e meia de viagem de Vitória da Conquista até Boa Nova.



10 km

Fig 1: Local da ocorrência das Opalas e suas vias de acesso a partir de Vitória da Conquista. (retirado de: Google Maps)



2 km

Fig 2: Local da ocorrência com vias de acesso em maior detalhe (retirado de: Google Maps).

1.4 Geologia da área

De acordo com Cassedane (1975), as rochas da região afloram amplamente, principalmente quando estão desprovidas de sua cobertura pela erosão. São constituídas de gnaisses com passagens xistosas e quartzíticas, e de camadas anfibolíticas. Estas rochas são fáceis de identificar, já que a sua alteração produz um solo de cor vermelho-escura, contrastando com o solo branco predominante na região. Podem também ser observados localmente alguns de veios de quartzo, afloramentos de granulitos e algumas intrusões ultrabásicas. Os garimpos se estendem de um lado ao outro da estrada de terra (Fig. 3). Ainda de acordo com Cassedane (1975) a crista das colinas, onde está focada a atuação do garimpo, é constituída de quartzitos brancos silicificados. Mais abaixo o solo é coberto por blocos ferruginosos e silicificados. Trincheiras e escavações são abertas ao acaso e de forma irregular. As paredes, onde é possível observar a rocha fresca, apresentam uma massa marrom a verde atravessada irregularmente por veios de opala e calcedônia (Figura 4). A rocha decomposta é uma pequena intrusão ultramáfica, evidenciada por vários critérios petrográficos, em particular a ausência de quartzo e a presença de numerosos pequenos veios de amianto. Mais recentemente os garimpeiros iniciaram escavações de trincheiras, alguns passando por debaixo da estrada de terra.



Fig 3: Vista do local da ocorrência. As trincheiras e escavações são abertas às margens da estrada de terra. (Foto: Dr. Jurgen Schnellrath)



Fig 4: Detalhe de um afloramento onde é possível observar o solo avermelhado envolvendo um bloco de rocha fresca (15 cm) e veios de calcedônia. (Foto: Dr. Jurgen Schnellrath)

A origem para esse depósito se deve a uma silificação superficial da rocha ultramáfica pela circulação ascendente de água (hidrotermalismo), ainda segundo Cassedane (1975). À época da visita ao local, o garimpo vinha sendo explorado por um grupo de pessoas do município de Governador Valadares (MG). A figura 5 mostra parte da produção de blocos retirados e dispostos em local próximo à saída de um túnel. A atividade é esporádica e não há dados de produção. Entretanto, em um depósito em Governador Valadares foram vistas toneladas de blocos ainda não trabalhados e dezenas de quilos de opalas verdes já devidamente selecionadas e preparadas (Figura 6).



Fig 5: Blocos de calcedônia e opala retirados a partir de um túnel.
(Foto: Dr. Jurgen Schnellrath).



Fig 6: Resultado final da seleção da produção das opalas pelos garimpeiros.
(Foto: Dr. Jurgen Schnellrath)

1.5 Aspectos gerais da Opala

A Opala é considerada um mineralóide. Embora seja um material formado por processos geológicos, apresentando, portanto, características minerais, não possui uma estrutura cristalina definida. Trata-se de uma sílica amorfa hidratada ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) com um teor variável de água em sua composição, podendo chegar a 20%. Geralmente ocorre preenchendo vazios da rocha encaixante, resultando em veios, nódulos ou massas disformes (Figura 7). Apresenta características físicas como: fratura conchoidal, brilho vítreo a resinoso, por vezes nacarado ou graxo, densidade entre 1,99 a 2,23, dureza na escala de Mohs de 4,5 a 5,5, transparente a translúcida, podendo algumas vezes ser opaca e sem brilho, traço branco e pode ter várias cores. O índice de refração das opalas fica entre 1,42 a 1,47 e, quanto maior a quantidade de água na gema, menor será o seu índice de refração. Algumas opalas podem apresentar índices de refração mais altos devido à incorporação de outros elementos (como metais de transição) e/ou à presença de inclusões e intercrescimentos com outras substâncias. A opala tem um comportamento isotrópico sob polarizadores cruzados (monorrefringente). As opalas podem exibir dois fenômenos ópticos: a opalescência, que se traduz num aspecto leitoso e nacarado devido ao espalhamento não seletivo da luz branca em seu interior, e a opalização, ou jogo-de-cores, que é a decomposição da luz visível nas suas diferentes cores espectrais variando conforme o ângulo de observação. Este último é observado apenas nas opalas ditas preciosas.

Segundo Florke et al. (1991), existem quatro tipos de opala, divididas em dois grupos: opala cristalina e opala não-cristalina:

- 1) Opala cristalina: este grupo apresenta duas divisões:
 - opala-C, constituída por cristobalita lamelar e desordenada;
 - opala-CT, constituída por uma mistura de cristobalita e tridimita fibrosa e lamelar.
- 2) Opala não-cristalina: opala-A, amorfa, com duas divisões:
 - opala AG, constituída por esferas de sílica, semelhante à gel;
 - opala AN, hialita, constituída por massas botriodais, semelhante a vidro.



Fig 7: Os diferentes modos de ocorrência de opalas: A) Geodo, B) Estruturas de fluxo e C) cimentando brechas. Retirado de: Brum *et al.* (2009).

2. MÉTODOS DE ESTUDO E AMOSTRAGEM

2.1 Equipamentos e Preparação das amostras.

2.1.1 Densidade.

Matematicamente a densidade (D) é a razão entre a massa de uma substância (m) e o seu volume (V). Para obter tais dados foi utilizada uma balança (modelo JPJ603C, Figura 8), onde primeiramente lia-se o peso da amostra no ar (p_{ar}) e em seguida fazia-se a leitura com a amostra já submersa totalmente em água ($p_{água}$). Após a leitura dos dados aplicava-se a seguinte equação:

$$D = \frac{m}{V}$$

Onde: $V = \text{Peso no ar} - \text{Peso na água}$. $m = \text{Peso no ar}$. A densidade das Opalas varia de 1,99 a 2,23 (Lazzarelli, 2002).



Fig 8: Balança no laboratório do CETEM onde foram obtidos valores de peso na água e no ar.

2.1.2 Índice de Refração.

O índice de refração é obtido através de uma leitura no refratômetro gemológico de contato, cujo princípio de funcionamento é a reflexão interna total da luz (Figura 9). Na prática o que se mede, portanto, é o ângulo crítico a partir do qual ocorre a reflexão interna total. Na escala vista pela ocular, ao invés de ângulos, é lido diretamente o valor exato do índice de refração. Todas as amostras foram submetidas a um desbaste, gerando uma face plana, e a um posterior polimento, até atingir o espelhamento, para a leitura desse índice. Para Opala os índices de refração variam de 1,42 a 1,47 (Lazarelli, 2002).



Fig 9: Refratômetro Gemológico para leitura dos índices de refração entre 1,30 a 1,81 com filtro polarizador e filtro de luz amarela (Schneider RF2).

2.1.3. Análise de Espectros de Absorção UV/VIS/NIR.

A espectroscopia nas faixas da luz ultravioleta, visível e infravermelha próxima (UV/VIS/NIR), analisa as transições eletrônicas que ocorrem nos orbitais mais externos dos elementos presentes na amostra, principalmente dos metais de transição (3d). Estas transições eletrônicas provocam uma absorção seletiva da luz, gerando cor nas gemas. O principal uso desta técnica em gemologia, portanto, é a verificação da causa de cor de pedras coradas, através da identificação das absorções características de cada elemento. O equipamento utilizado é um espectrômetro da Perkin Elmer, modelo Lambda 750S, equipado com uma esfera de integração (Figura 10). Este equipamento faz uma varredura de comprimentos de onda entre 250 nm e 2500 nm.



Fig 10: Detalhe da esfera de integração do espectrômetro UV/VIS/NIR com uma amostra posicionada para análise.

2.1.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

A imagem produzida em um microscópio eletrônico de varredura resulta do bombardeamento por um feixe de elétrons sobre a amostra em um ambiente de alto vácuo. Os detalhes ultraestruturais que podemos observar através do MEV não podem ser observados em aparelhos óticos. Há necessidade de metalização do material a ser analisado para que a superfície possa ser condutora, escoando os elétrons do feixe incidente na amostra. Como a opala não é condutora, ela foi recoberta com um filme de carbono vaporizado por um filamento. O mesmo é fixado em uma pastilha metálica (plug) com auxílio de uma fita adesiva dupla-face. É possível também a microanálise química com o acoplamento de um detector de Raios γ de energia dispersiva (EDAX), possibilitando assim a verificação qualitativa ou quantitativa dos elementos químicos presentes. Com esse método também é possível identificar as inclusões que podem estar ajudando a causar a variação de cores. O MEV utilizado é um Leica S440, equipado com um sistema de microanálise por dispersão de energia (EDS) Link ISIS L300 com detector de SiLi Pentafet, janela ultrafina ATW II, de resolução de 133eV para 5,9KeV e software para operação automática, inclusive do MEV (Figura 11).

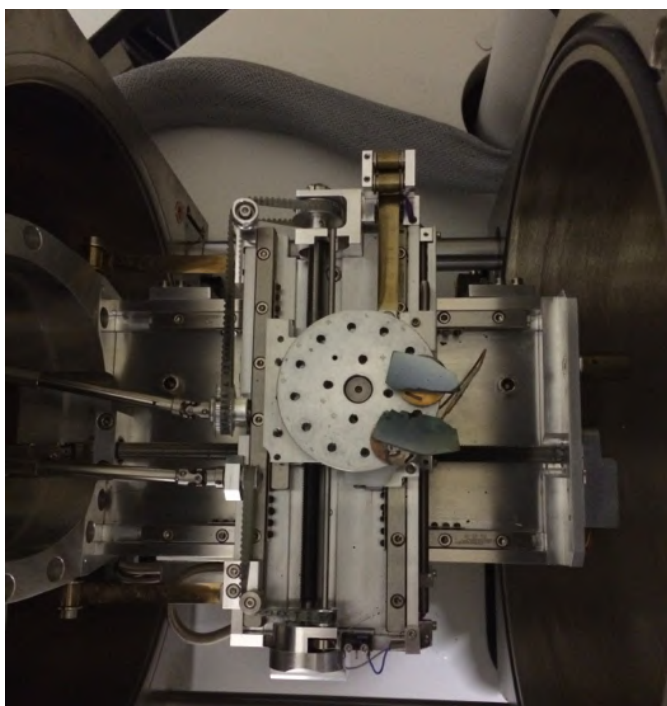


Fig 11: Compartimento de amostras do Microscópio Eletrônico de Varredura com 2 amostras de opalas já posicionadas.

2.1.5. Difratorômetro de Raios-X.

Com esta análise podemos determinar o grau de cristalinidade das opalas e, desta forma, enquadrá-las nos diferentes tipos (Opala-A, -C ou -CT). Para tal as amostras são trituradas até a obtenção de um pó ultra fino (na faixa granulométrica de talco) e postas de modo compacto sobre porta-amostras próprios do difratorômetro de raios-x. Em seguida é coletado o difratograma entre 4° e $80^\circ 2\theta$. O equipamento utilizado é da Bruker, modelo AXS D4 Endeavour (Figura 12) com tubo de Co operando a 40Kv e 40mA.



Fig 12: Difratorômetro de Raios -X da Bruker, modelo AXS D4. (Fonte: site da Bruker).

2.1.6. Fluorescência de Raios- X.

Para esta análise foi utilizado o espectrômetro por fluorescência de Raios – X da Thermo Scientific, modelo ARL Quant’X (Figura 13). A análise dos elementos de interesse se dá por uma combinação de filtros primários, correntes e voltagens. Inicialmente foram realizadas análises qualitativas de forma a mostrar todos os elementos de fato presentes em uma determinada amostra, visando auxiliar a interpretação correta dos resultados da análise quantitativa posterior. A análise utilizada é baseada no modelo de parâmetros fundamentais, que, por dispensar o uso de padrões e a elaboração de curvas de calibração, gera um maior erro nos resultados, devendo, portanto, ser vistos como semi quantitativos. Não se deve esquecer também, que os resultados são automaticamente normalizados a 100%, sendo, portanto, necessário fazer uma correção posterior em função do teor não analisado de água nas opalas. O uso desse equipamento no método quantitativo ocorreu em duas etapas. Na primeira etapa foi utilizado um colimador de grande abertura (8,8mm de diâmetro), gerando resultados considerados representativos para cada amostra. Posteriormente foram escolhidas amostras que se destacaram por um evidente zoneamento de cor, geralmente de verde amarelado a verde escuro. Com o uso de um colimador de apenas 1 mm de abertura, foi possível, numa segunda etapa, direcionar o feixe de raios-X para as áreas de interesse e assim obter mais informações sobre diferença composicional das diferentes zonas de cor nas opalas.

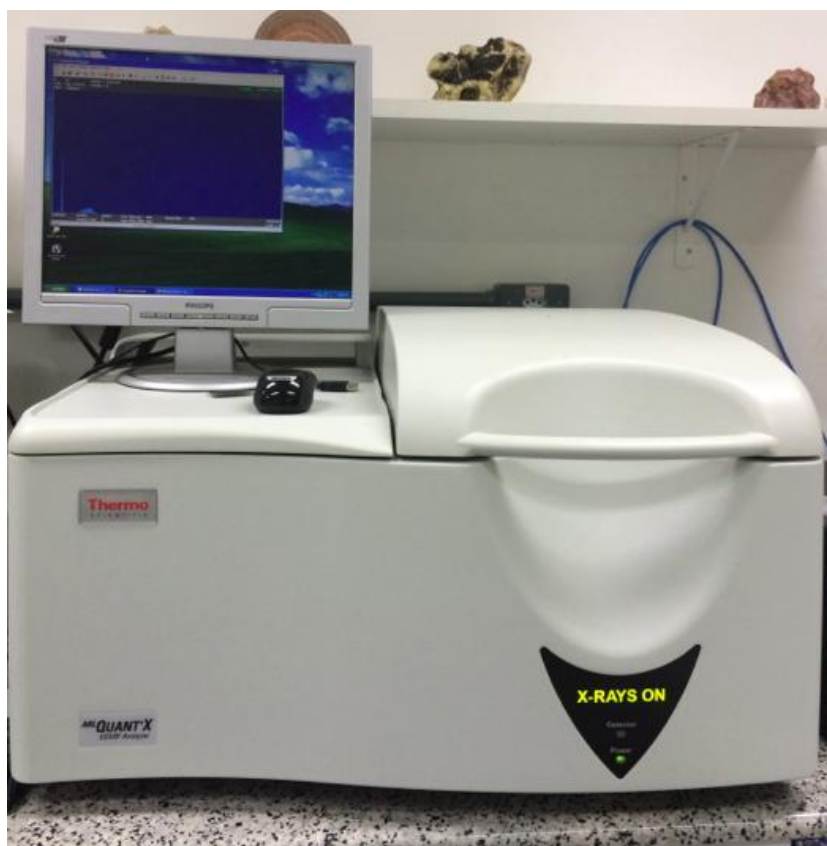


Fig 13: Equipamento de Fluorescência de Raio-X.

2.2. Materias Analisados

Para o estudo de caracterização gemológica e mineralógica foram utilizadas 14 opalas (Tabela 1), Dentre estas 12 amostras são originadas da mina de Boa Nova. As outras duas, já conhecidas e caracterizadas pelo laboratório anteriormente, (OP-Branca e OP-Cristobalita), foram utilizadas como base comparativa.

Posteriormente foram investigadas ainda outros 3 fragmentos (Figura 14) e, de uma amostra de mão, foi feita uma seção delgada (Figura 15).

Tabela 1: Amostras estudadas, suas principais variações de cores.

Amostra	Cor	Imagem
OPBN-01	Verde Escura	
OPBN-02.1	Verde Médio	
OPBN-02.2	Verde Médio	
OPBN-03.1	Verde Maça	
OPBN-03.2	Verde Maça	
OPBN-04.1	Verde Claro	
OPBN-04.2	Verde Claro	
OPBN-05.1	Verde Amarelo	
OPBN-05.2	Verde Amarelo	






OPBN-06.1	Verde claro com Inclusões	
OPBN-06.2	Verde claro com Inclusões	
OPBN-07	Verde escura	
OP-Branca	Branca	
OP-Crisobalita	Azul	



Fig 14: Amostras de fragmentos maiores polidos para análise



Fig 15: Lâmina delgada evidenciando o contraste entre o veio de opala (claro) e a calcedônia (marrom).

3. RESULTADOS

3.1. Caracterização Gemológica

Tabela 2: Amostras estudadas com os seus principais aspectos de identificação: peso, densidade e índice de refração (média obtida após 3 medidas).

Amostra	Opala	Peso (g)	Densidade	Índice de Refração
OPBN-1	Verde Escura	7,914	2,07	1,446
OPBN-02.1	Verde Médio	22,588	2,06	1,447
OPBN-02.2	Verde Médio	9,967	2,06	1,446
OPBN-03.1	Verde Maça	28,831	2,11	1,449
OPBN-03.2	Verde Maça	59,027	2,10	1,448
OPBN-04.1	Verde Claro	7,221	2,10	1,445
OPBN-04.2	Verde Claro	16,607	2,11	1,450
OPBN-05.1	Verde Amarelo	11,658	2,09	1,448
OPBN-05.2	Verde Amarelo	16,644	2,12	1,454
OPBN-06.1	Verde Claro com Inclusões	14,619	2,05	1,440
OPBN-06.2	Verde Claro com Inclusões	14,569	2,11	1,452
OPBN-07	Verde Escura	6,284	2,09	1,452
OP- Branca	Branca	108,264	1,97	1,435
OP- Cristobalita	Azul	28,446	2,25	1,475

As opalas apresentaram variações consideráveis tanto de seus índices de refração como de suas densidades (Figuras 16 e 17), mas ainda assim dentro dos limites de opalas comuns, segundo Lazzairelli (2002). Em algumas opalas houve dificuldade na leitura exata dos índices de refração, visto que as superfícies não apresentam um polimento ideal, que pode ser explicado pela presença de outras fases intercrescidas, como filossilicatos (paligorskita e serpentina). Por vezes foram obtidas leituras duplas de índices de refração, sendo uma referente à opala e outra à calcedônia, que ocorre intimamente associada às opalas de Boa Nova. Os dados médios das densidades e dos índices de refração encontram-se listados na tabela 2.

Para opalas puras existe uma correlação positiva entre o seu índice de refração e sua densidade. Quanto maior o índice de refração, maior a sua densidade (Taliaferro, 1935). Este fato está relacionado ao teor de água nas opalas. Quanto mais água, menores a densidade e o índice de

refração. Em função da presença de outras fases (calcedônia, paligorskita e serpentina) nas opalas verdes de Boa Nova, ocorreu uma maior dispersão dos pontos quando comparadas às opalas puras (Figura 19), especialmente em função dos valores de densidade.

É possível estimar o teor de água nas opalas conhecendo seus índices físicos, como densidade e índice de refração (Taliaferro, 1935). Em função do que já foi dito anteriormente, utilizamos para isto os valores de índice de refração, menos suscetíveis a variações em função da presença de outras fases. O valor médio do índice de refração das opalas foi plotado em um gráfico (Figura 18), de onde podemos deduzir o valor médio de água presente nas amostras, entre 6% e 7%. Esse valor ficou bem próximo do obtido anteriormente por Cassedane (1975), que determinou a perda ao fogo em 7,33%.

As amostras de opala verde estudadas apresentaram índices entre 1,440 a 1,454 e densidades entre 2,05 a 2,12. Esses resultados são compatíveis com as amostras avaliadas por Cassedane (1975), que, em média, apresentaram índice de refração de 1,445 e densidade de 2,07. A relação entre esse dois aspectos físicos da opala podem ser vistos nos gráficos a seguir:

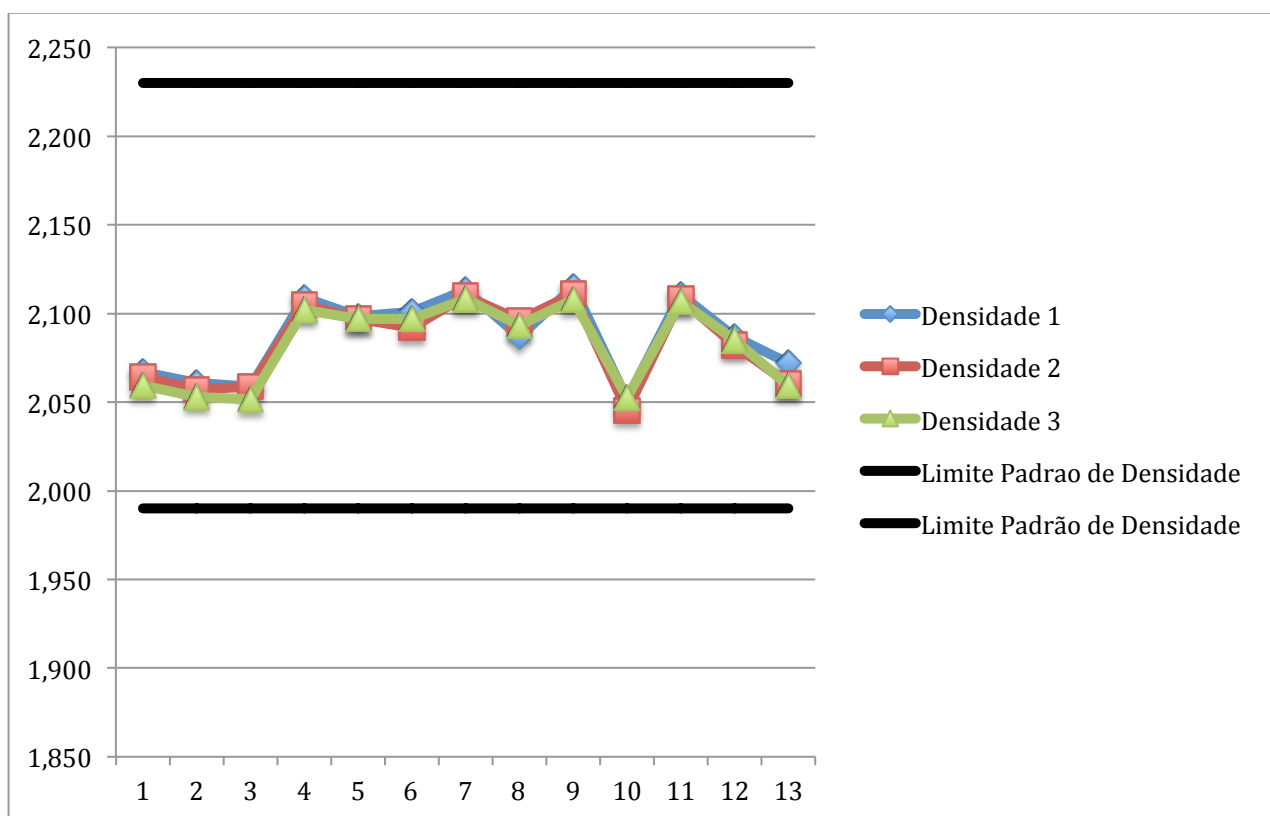


Fig 16: Gráfico representando as 3 medições de densidade e também seus limites.

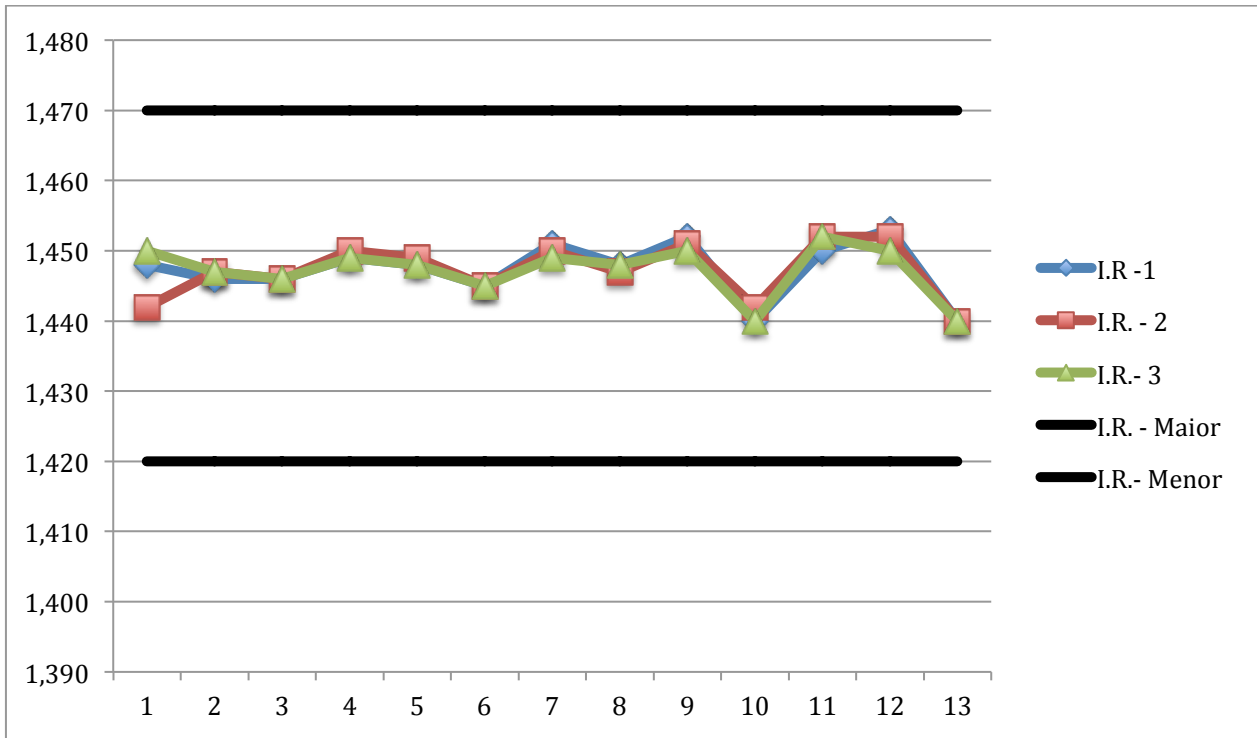


Fig 17: Gráfico representando as 3 medições de índice de refração e também seus limites.

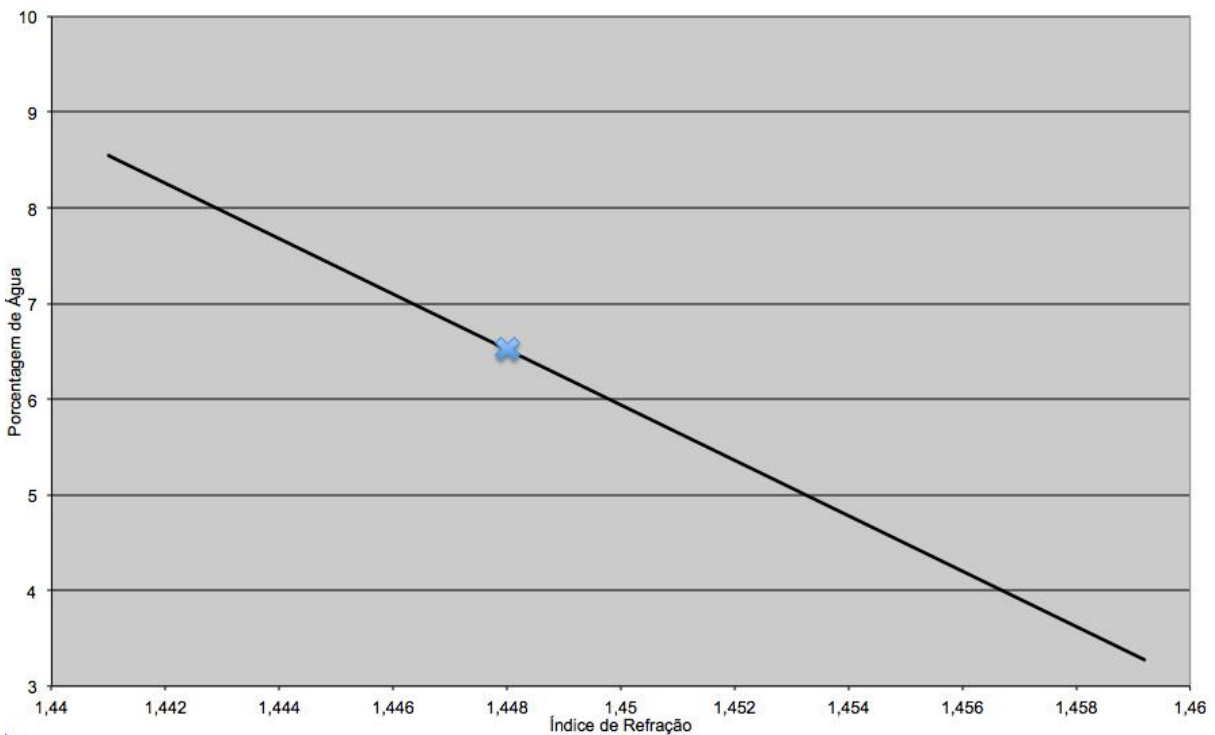


Fig 18: Gráfico com os valores de água em relação ao índice de refração. Valor médio do índice de refração das Opalas de Boa Nova representado por um X. Gráfico elaborado por Taliaferro (1935).

3.2. Caracterização Mineralógica

3.2. 1 Tipologias das Opalas

As opalas comuns apresentam diferentes graus de cristalinidades, se dividindo em opalas C e opalas CT. As opalas do tipo C são as mais cristalinas, normalmente formadas a altas temperaturas, apresentando, em análises de difração de Raios -X, picos bem característicos e intensos de Cristobalita e, ao mesmo tempo, índices de refração e densidades elevados devido a pouca porcentagem de água que compõe a sua estrutura. As opalas do tipo CT são menos cristalinas e com um teor considerável de água. De acordo com Pimentel (2007), em função dos baixos índices de refração e densidade, podemos classificar as opalas de Boa Nova como opalas-CT (Figura 19).

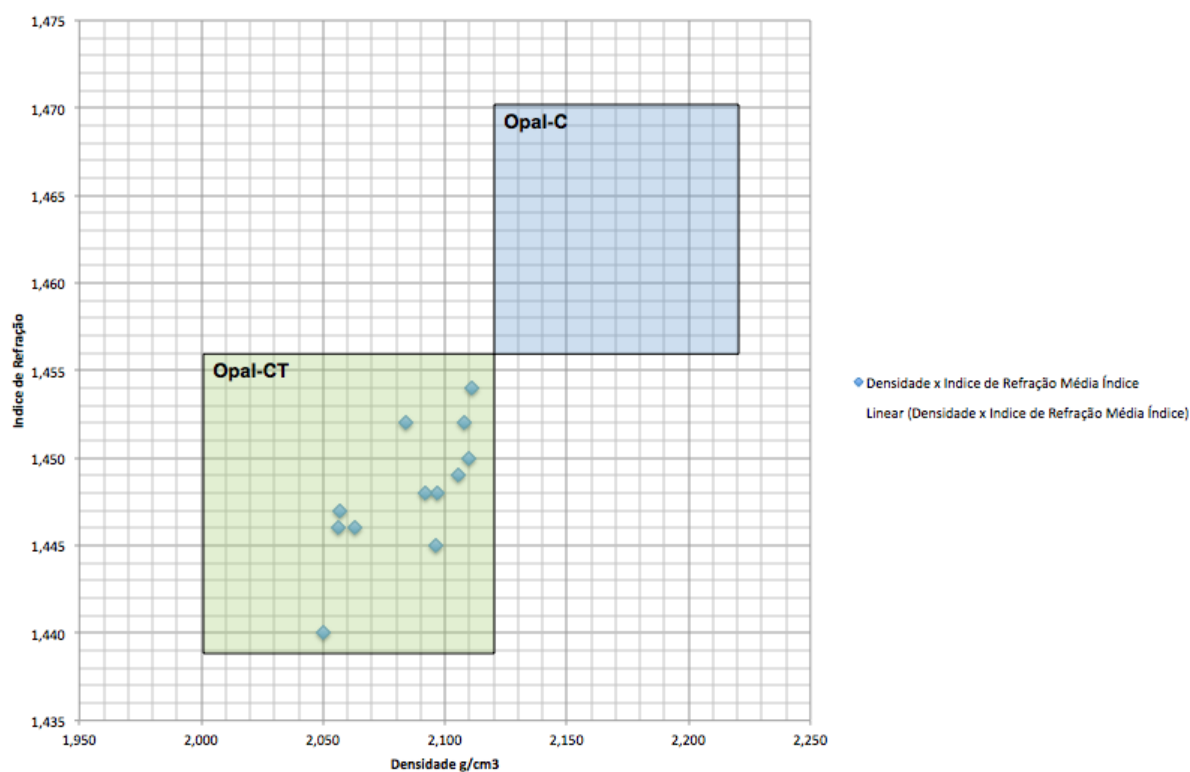


Fig 19: Classificação de opala-C e -CT através do índice de refração x densidade. Modificado de Pimentel (2007).

3.2.2 Análise semi quantitativa e identificação dos elementos causadores de cor.

Os resultados apresentados na tabela 3 são os teores (expressos em porcentagem) de todos os componentes presentes na amostra. De acordo com Fritsch e Rossman (1987 e 1988) teores relativamente baixos de elementos de transição, como cobre, cobalto, ferro, cromo, níquel, entre outros, em função de sua valência, coordenação química (octaédrica, tetraédrica) e campo cristalino, são os principais responsáveis pela cor de um mineral. Geralmente estes elementos ocorrem substituindo elementos maiores da estrutura cristalina de minerais alocromáticos. Para uma melhor visualização dos dados, observa-se, na figura 20, a distribuição do percentual dos três principais elementos, identificados como potenciais causadores de cor.

A literatura cita as seguintes causas de cor para opalas verdes: filossilicatos ricos em ferro, como a celadonita (Bustillo, 2003); intercrescimento com fases niquelíferas, como nas opalas da Polônia (Webster, 1975) e da Tanzânia (Schmetzer et al., 1976); e cromo em opalas da Turquia (Bank, 1997). Cassedane (1975), que analisou pela primeira vez as opalas de Boa Nova, concluiu que a cor era devida à presença de ferro. Estes trabalhos reforçam a tese de que os elementos ferro, níquel e cromo, em destaque na tabela 3, são de fato importantes na coloração das opalas estudadas neste trabalho.

Na tabela 3 e na figura 20 a opala branca é utilizada como referência, a fim de auxiliar na identificação dos elementos causadores das cores nas opalas estudadas.

Tabela 3: Teores de cada elemento constituinte das opalas, com destaque para os elementos responsáveis pela cor como Ni, Fe e Cr. Valores corrigidos em relação ao teor de água (7,33%).

Amostra	Quantidade Relativa de elementos em m/m%									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	NiO	P ₂ O ₅	Cl	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	Cr ₂ O ₃
OP -1	90,17	0,71	0,56	0,28	0,25	0,21	0,17	0,13	0,80	0,08
OP - 2.1	89,48	0,84	1,51	0,25	0,24	0,09	0,16	n.d.	n.d.	0,06
OP- 2.2	89,90	0,84	1,04	0,24	0,25	0,00	0,29	n.d.	n.d.	0,10
OP - 3.1	89,24	0,72	1,90	0,23	0,33	0,11	0,07	n.d.	n.d.	0,01
OP- 3.2	88,81	0,88	1,96	0,33	0,30	0,19	0,04	0,07	n.d.	0,03
OP- 4.1	88,77	0,69	2,32	0,45	0,21	0,13	0,02	n.d.	n.d.	0,01
OP- 4.2	88,83	0,87	2,27	0,21	0,32	0,09	0,03	n.d.	n.d.	0,02
OP- 5.1	88,99	0,73	2,02	0,30	0,25	0,12	0,19	0,03	n.d.	0,00
OP- 5.2	89,47	0,75	1,73	0,15	0,15	0,09	0,28	n.d.	n.d.	0,00
OP- 6.1	91,11	0,74	0,90	0,12	0,31	n.d.	0,24	n.d.	0,06	0,08
OP- 6.2	88,75	0,77	2,12	0,33	0,42	0,09	0,05	n.d.	n.d.	0,11
OP- 7	89,77	0,80	1,07	0,38	0,31	n.d.	0,15	0,02	n.d.	0,12
OP- Branca*	91,22	0,86	n.d.	n.d.	0,35	n.d.	n.d.	0,15	0,07	n.d.

*A opala Branca é representada para simples comparação.

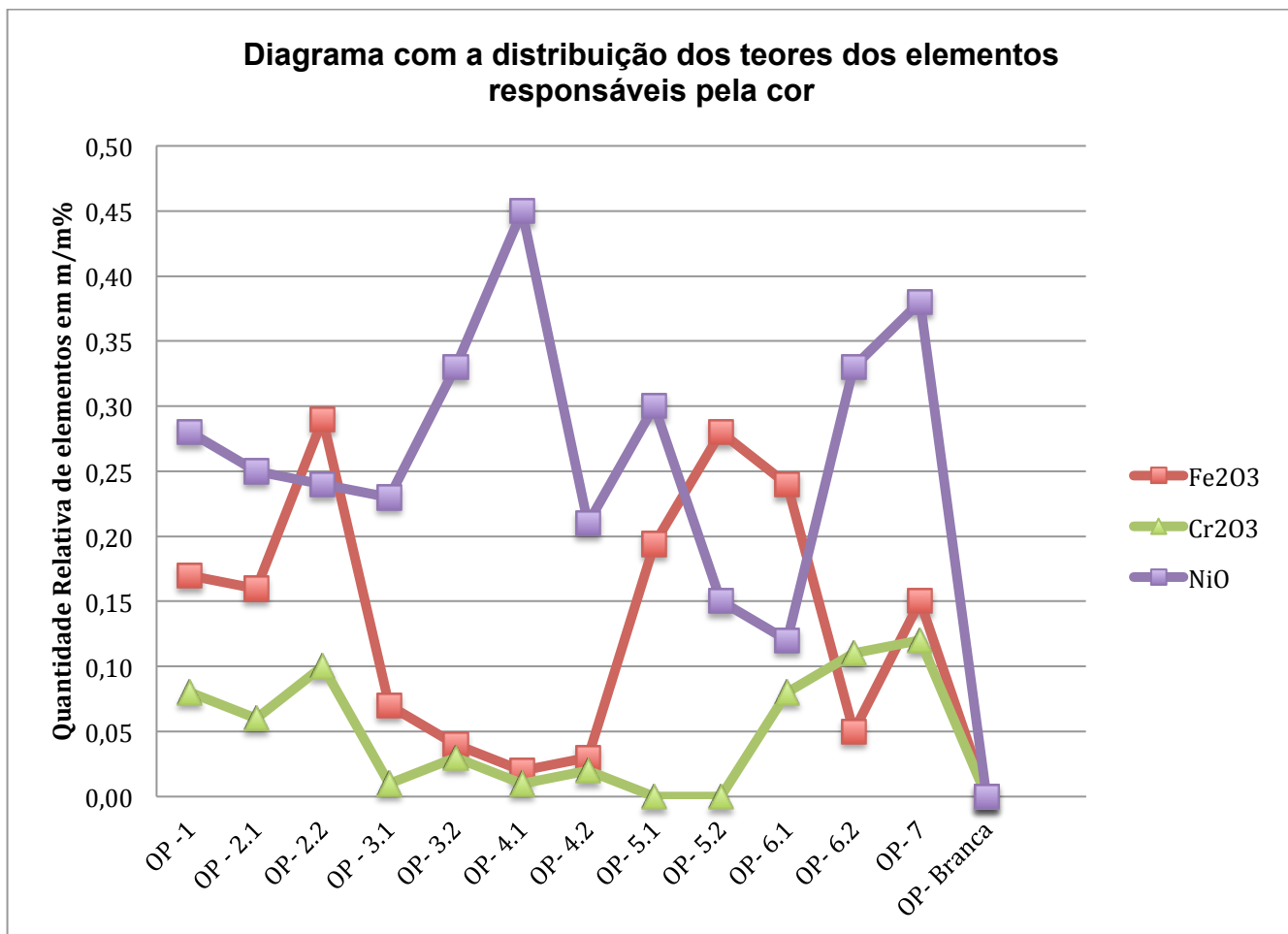


Fig 20: Diagrama com a distribuição dos teores dos elementos responsáveis pela cor. Neste caso, na forma de seus óxidos: NiO, Fe₂O₃ e Cr₂O₃. Colimador de 8,8 mm.

Ainda, para um melhor entendimento das causas de cor, foram selecionadas, dentre as 12 amostras de opalas de Boa Nova, três consideradas mais limpas (menos inclusões) e bem representativas das principais tonalidades reconhecidas: verde escura, verde maçã e verde amarelada. Utilizando um colimador mais restrito (1 mm), atingindo apenas a área que melhor representasse as diferentes tonalidades, foram feitas novas análises (Tabela 4 e Figura 21).

Tabela 4: Teores dos principais elementos responsáveis pela cor em amostras selecionadas. Colimador de 1mm.

AMOSTRA	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	NiO
OP-1	0,61	0,58	1,64
OP-4.1	0,04	0,03	0,57
OP-5.2	0,30	n.d.	0,35

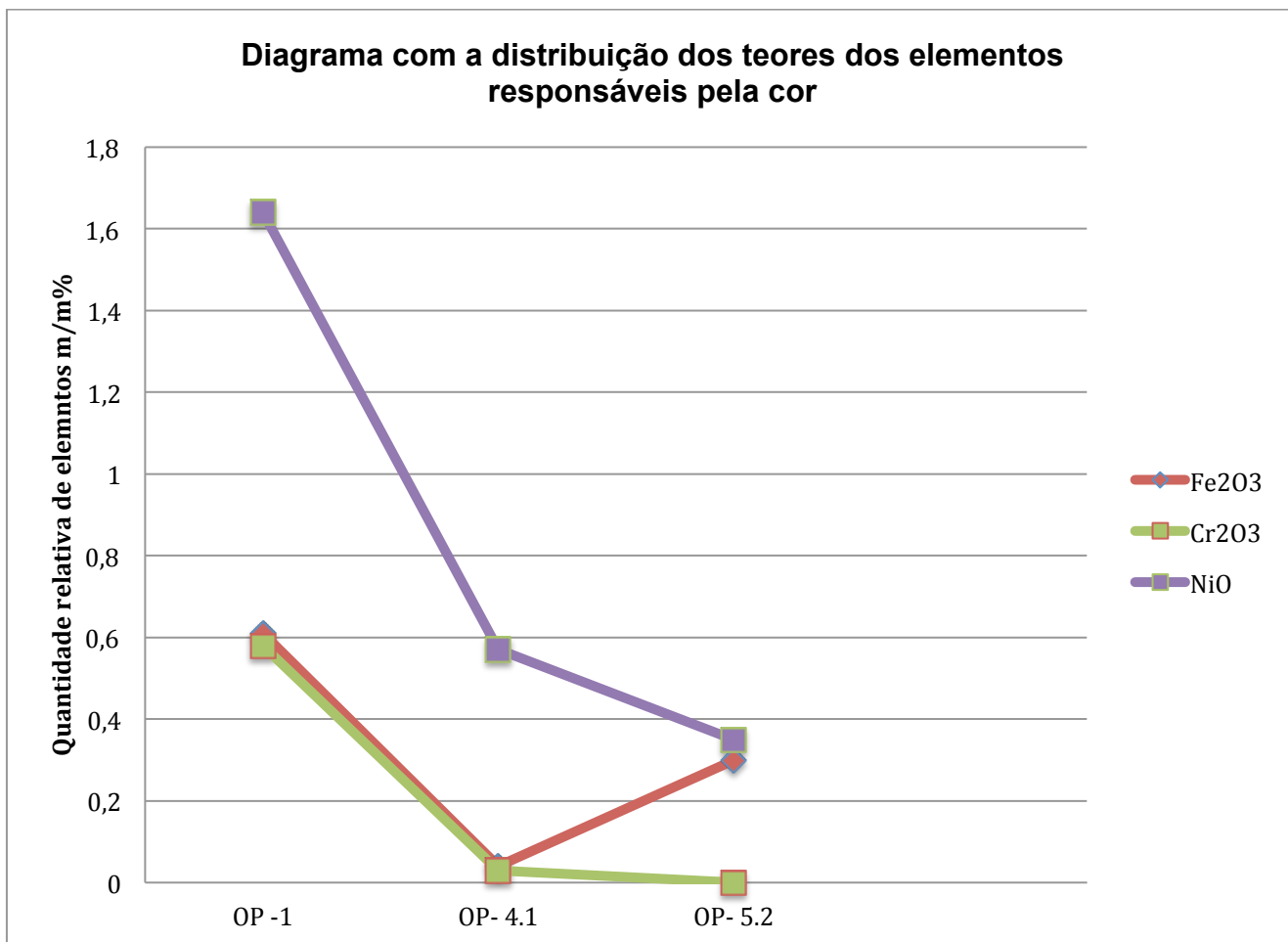


Fig 21: Diagrama com a distribuição dos elementos responsáveis pelas cores nas amostras representativas de cada cor. Colimador de 1 mm.

De acordo com Cassedane (1975), as opalas verdes de Boa Nova devem a sua cor verde a presença apenas de ferro, uma vez que, à época, não foram detectadas outras impurezas químicas. Nessa nova análise feita, podemos ver que, além do ferro, o níquel e o cromo exercem papel fundamental na coloração destas opalas.

De acordo com resultados obtidos podemos afirmar que: A opala verde escura (OP-1) deve a sua cor a elevados teores de níquel, além de altos teores, quase equivalentes, de cromo e ferro (mais altos que nas outras opalas); a opala “verde maçã” (OP- 4.1) deve sua cor principalmente à presença de níquel, já que os valores de cromo e ferro são muito baixos; a opala verde amarelada (OP- 5.2) deve a sua cor à presença de ferro e níquel em proporções semelhantes, sendo que o cromo não foi detectado.

3.2.3 Difração de Raios – X.

O difratograma abaixo (Figura 22) apresenta as fases presentes numa amostra representativa das opalas de Boa Nova. Como podemos observar, a baixa cristalinidade associada aos picos de cristobalita e tridmita, indicada não apenas pela baixa intensidade dos respectivos picos, mas também por serem bem largos, confirmam a sua classificação em opalas do tipo CT. Vale destacar ainda a presença de picos que indicam a existência de outras três diferentes fases minerais, justificando as leituras difusas dos índices de refração. O pico bem marcante em $31,13^\circ 2\theta$ se deve à presença de calcedônia. Esta fase mineral é muitas vezes vista com o uso de uma simples lupa de mão. Os picos em $10,35^\circ 2\theta$ e $14,42^\circ 2\theta$ sugerem, respectivamente, a presença de paligorskita e serpentina.

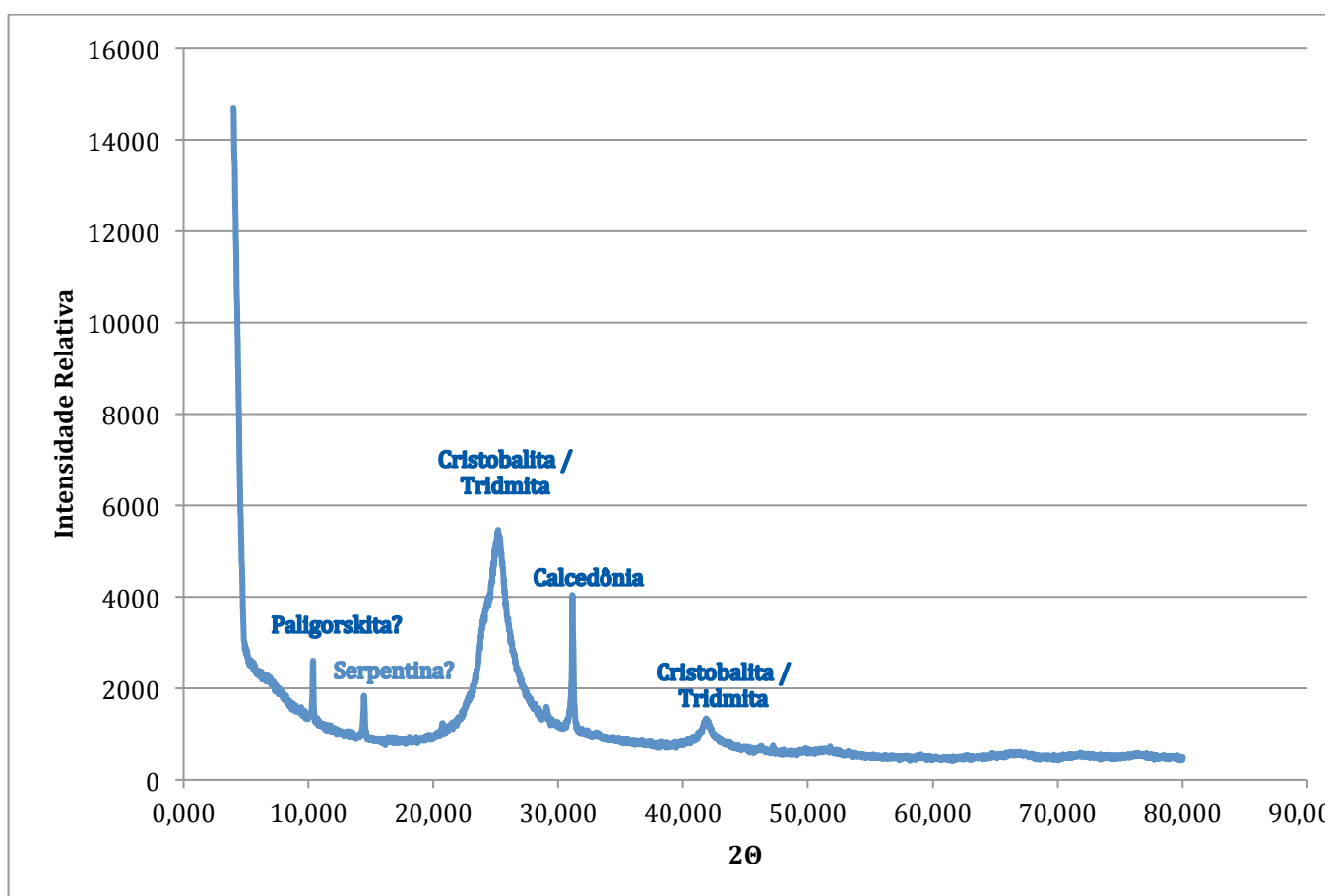


Fig 22: Difração de raios-X em amostra representativa de opala verde.

3.3 Espectrofotômetro UV/Visível.

Nessa análise foram utilizadas apenas as amostras representativas de cada cor: verde escuro (OP-1), verde maçã (OP-4.1) e verde amarelo (OP-5.2). O uso deste instrumento visa a identificação dos elementos (quando possível também a sua coordenação e valência), responsáveis pela cor das opalas verdes de Boa Nova. Para a interpretação dos espectros (Figuras 24, 25 e 26) as informações químicas obtidas com a fluorescência de raios-X foram de grande valia. Foi analisada também uma opala branca (Figura 23), a fim de identificar as bandas/picos que não apresentam relação com a cor verde das opalas estudadas. Os espectros foram colhidos entre 250 e 2250 nm, sendo que a região de maior interesse é a parte do espectro visível, ou seja, entre 380 nm e 760 nm, pois são as absorções seletivas nesta região que irão definir a cor. Em todos os espectros há a presença de um “degrau” por volta de 860nm, devido à troca de lâmpadas feitas pela próprio equipamento durante a análise; este artefato deve ser desconsiderado na hora da interpretação dos espectros.

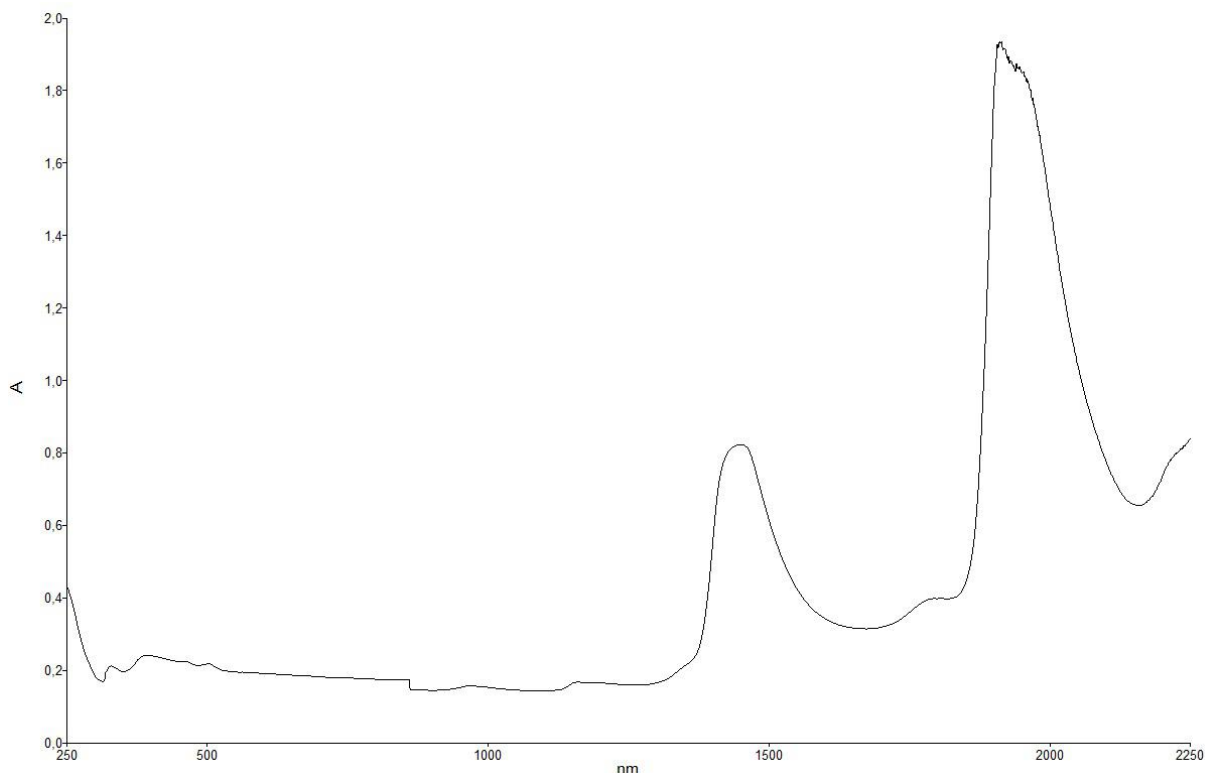


Fig 23: Espectro de absorção da amostra Opala Branca. Espectro utilizado apenas para fins de comparação.

Elementos presentes – OP Branca										
Elementos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	NiO	P ₂ O ₅	Cl	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	Cr ₂ O ₃
Quantidades (m/m%)	91,22	0,86	n.d	n.d	0,35	n.d	n.d	0,15	0,07	n.d

O primeiro espectro a ser observado é o da opala branca (Figura 23). Com base neste espectro, podemos concluir que os dois picos mais intensos na faixa do infravermelho, localizados aproximadamente a 1450 e 1950 nm, não estão relacionados com a cor, tendo sido identificados por Fritsch et al (1987) como combinações de vibrações de moléculas de água. Estas bandas aparecem em todos os demais espectros, sendo que a intensidade do pico a 1950 nm serviu de escala para todos os espectros apresentados, pressupondo um teor de água relativamente estável nas diferentes amostras.

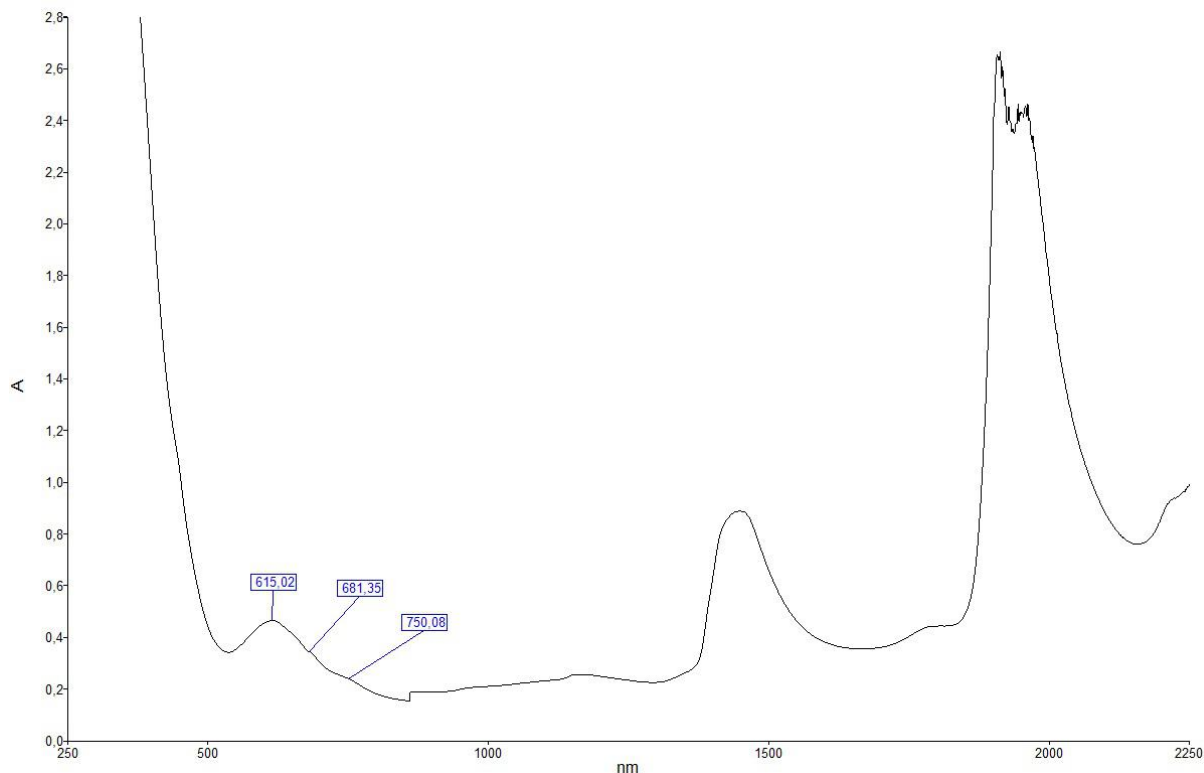


Fig 24: Espectro de absorção da amostra OP-1.

AMOSTRA	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	NiO
OP -1	0,61	0,58	1,64

Na figura 24 observamos claramente a presença de bandas a 615, 681 e 750 nm. Bank et al. (1997) atribuíram bandas a 370 e 599 nm e uma linha a 681 nm à presença de cromo. Como a opala verde escura é a que possui os maiores teores de cromo, concluímos que a banda a 615 nm e o pico a 681 nm são devidas à presença deste elemento. A banda a 750 nm é atribuída ao níquel, também presente em grandes quantidades nesta amostra, o que será discutido em mais detalhe no espectro da opala de tonalidade verde maçã. Importante também ressaltar a forte absorção que ocorre abaixo de 500 nm e, especialmente, no ultravioleta próximo. Além de uma contribuição do cromo, que deve, segundo Bank et al. (1997) apresentar uma banda na faixa de 380 nm, sabemos que o ferro trivalente em coordenação octaédrica geralmente provoca uma absorção muito intensa nesta faixa de energia devido a uma transferência de carga entre o metal e o seu ligante (LMCT), no caso o oxigênio. De fato esta amostra é a que apresenta também os maiores teores de ferro. Desta forma surge uma estreita janela de transmissão exatamente na faixa verde do espectro visível, o que explica a cor desta opala.

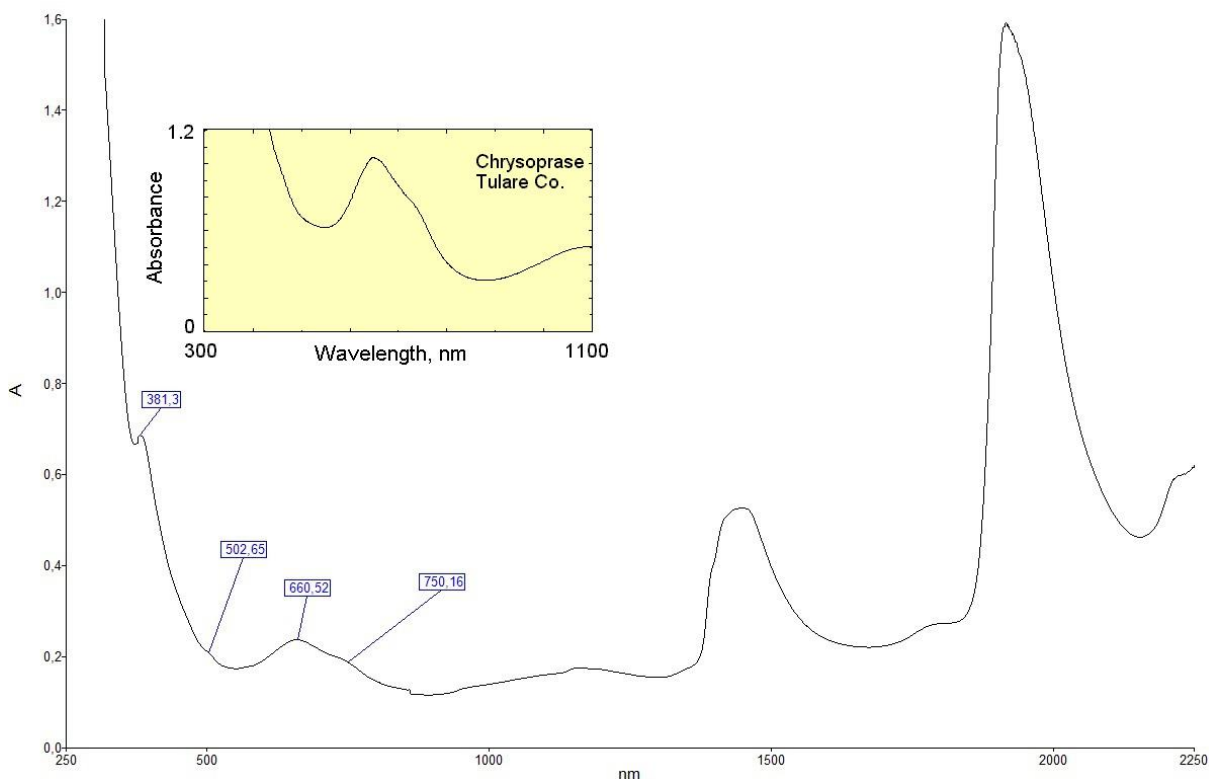
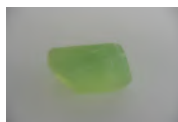


Fig 25: Espectro de absorção da amostra Opala Branca OP-4.1. Espectro inserido retirado de: <http://minerals.gps.caltech.edu/FILES/Visible/quartz/Index.html>

AMOSTRA	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	NiO
OP- 4.1	0,04	0,03	0,57

Na figura 25 observamos bandas a 660 e 750 nm muito semelhantes às observadas em crisoprásio, conforme podemos ver no espectro inserido acima e interpretadas, no mesmo link, como devidas à presença de níquel (Ni²⁺) em filossilicatos. Neste trabalho não foi possível identificar a fase portadora do níquel, como veremos no capítulo sobre o uso do microscópio eletrônico de varredura. Atribuímos, portanto, as bandas a 660 e 750 nm simplesmente à presença de níquel. O pico a 381 nm é característico da presença de Fe³⁺ em sítios octaédricos de silicatos. Como o teor de ferro desta amostra é baixo, a absorção na faixa da luz ultravioleta também é reduzida, permitindo que o pico a 381 nm fique em evidência. Concluímos, portanto, que o pico a 381 nm é devido à presença de Fe³⁺. Para a assimetria observada em 502 nm não encontramos, até o momento, uma explicação plausível. A larga janela de transmissão que se forma entre 500 e 600 nm explica a cor típica de substâncias minerais coloridas pelo níquel (verde maçã).

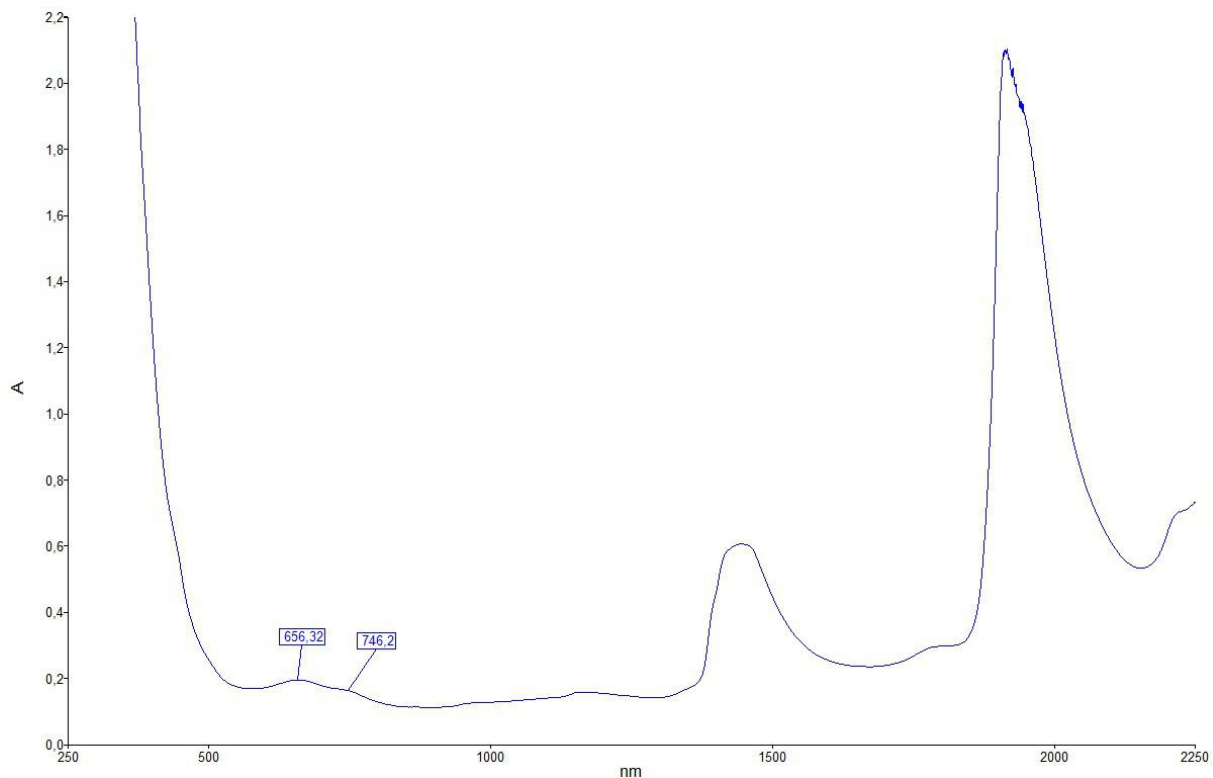


Fig 26: Gráfico mostrando os picos de absorção de luz, através do espectrofotômetro UV/Visível. Amostra OP-5.1.

AMOSTRA	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	NiO
OP- 5.2	0,30	n.d.	0,35

O espectro apresentado acima apresenta as mesmas absorções, embora mais fracas, atribuídas anteriormente à presença de níquel (656 e 746 nm). De fato o teor de níquel é mais baixo que na opala verde maçã. Entretanto, o seu maior teor de ferro mais elevado é responsável pela forte absorção na faixa da luz ultravioleta próxima. A combinação desses dois fatores é responsável pela cor mais amarelada destas opalas.

3.4 Microsonda Eletrônica de Varredura.

As análises foram realizadas usando duas lâminas petrográficas, uma mostrando a transição entre rocha encaixante/calcedônia e a opala verde e outra apenas da opala verde. O objetivo era revelar as fases portadoras dos elementos causadores da cor, geralmente inclusões nas opalas. Quando detectadas, as fases foram analisadas quimicamente com o auxílio do EDS.

De início foram observadas estruturas marcantes (Figura 27) interpretadas como intercrescimento de calcedônia e opala. No MEV a calcedônia, mas rica em sílica e com menor teor de água, aparece mais clara, e a opala, hidratada, em um tom de cinza mais escuro. A calcedônia também ocorre preenchendo poros na opala (Figura 28).

Foram observadas ainda fases ricas em ferro (Figura 29). A presença, além de silício e ferro (Figura 30), sugere a possibilidade de ser uma nontronita, embora o sódio não tenha sido detectado. Nontronita é um filossilicato que pode ocorrer eventualmente num íntimo intercrescimento com a opala, formando a cloropala.

Na figura 31 podemos ver inclusões idiomórficas e, pelo seu espectro EDS (Figura 32), que são constituídas de silício e ferro, além de oxigênio. Pela ambiente geológico relatado por Cassedane (1975), acreditamos que possam ser do mineral faialita. Não foi possível, no âmbito deste trabalho, confirmar a sua identificação com o uso de um micro espectrômetro Raman.

A figura 33 apresenta um complexo quadro de inclusões dentro de uma opala verde de Boi Nova, tendo sido feitas análises em três diferentes pontos. O primeiro espectro EDS foi colhido sobre a matriz de opala (Figura 34). Importante destacar que a opala, nesta região próxima das inclusões, está bastante enriquecida em ferro. O segundo espectro EDS foi feito sobre uma parte mais escura. O espectro EDS correspondente (Figura 35) apresenta teores de silício, magnésio, alumínio e ferro. A inclusão foi interpretada como sendo uma filossilicato do grupo da saponita (ferrisaponita) e/ou paligorskita (ferripaligorskita). O último espectro EDS (Figura 36) foi colhido sobre os pontos mais claros. A diferença, com relação ao espectro anterior, está na presença do cromo, não detectado no ponto 2. Apesar do espectro apresentar também todos os elementos da inclusão anterior (saponita/paligorskita), acreditamos que isto se deva ao fato das inclusões mais claras, interpretadas como cromita, serem muito pequenas, de forma que o substrato destas, justamente o citado filossilicato, estar sendo excitado também pelo feixe de elétrons.

Finalmente, foi identificada uma última inclusão (Figura 37), possivelmente um outro filossilidato, rico em diversos elementos de transição, como ferro, cromo, manganês, titânio e vanádio (Figura 38).

Como pode ser concluído, conseguimos observar fases portadoras de ferro e cromo, que justificam os teores analisados nas opalas por fluorescência de raios-X, entretanto não foi possível identificar no MEV fases portadoras de níquel, o elemento causador de cor com os maiores teores.

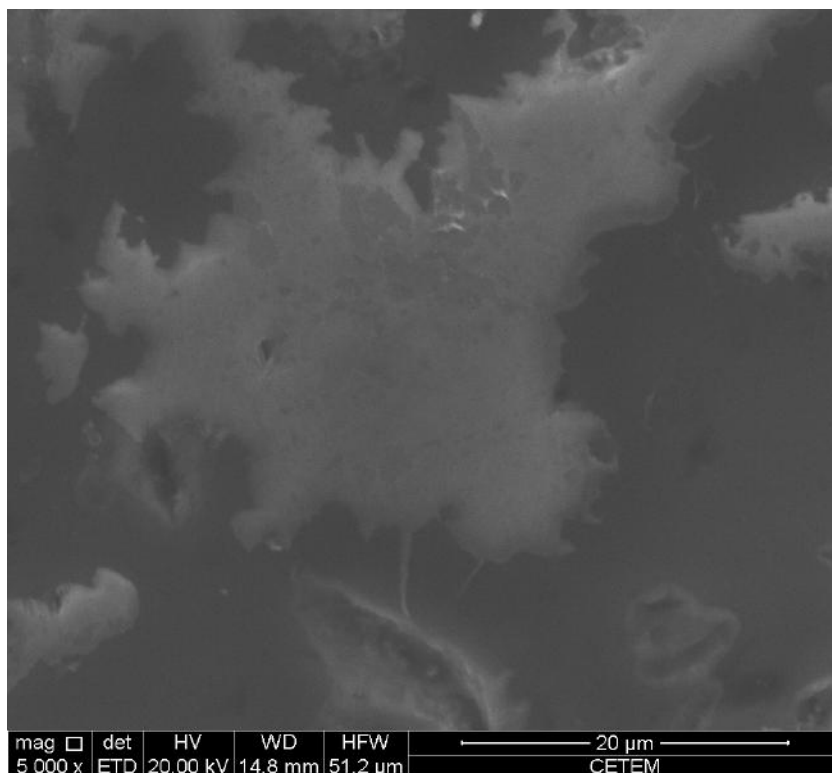


Fig 27: Intercrescimento de calcedônia, mais clara, e opala.

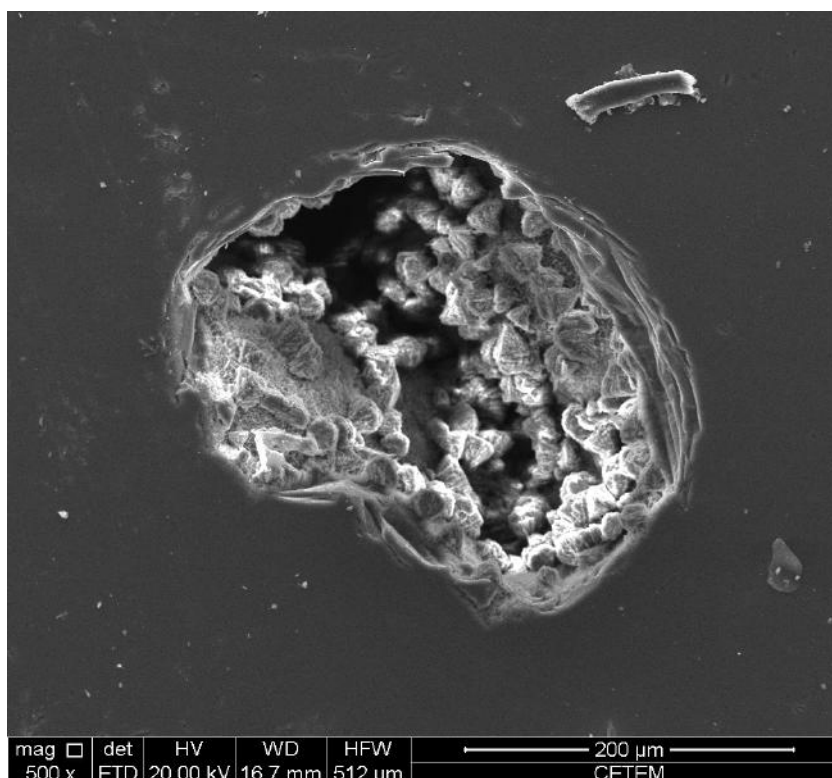


Fig 28: Poro na opala preenchido por calcedônia.

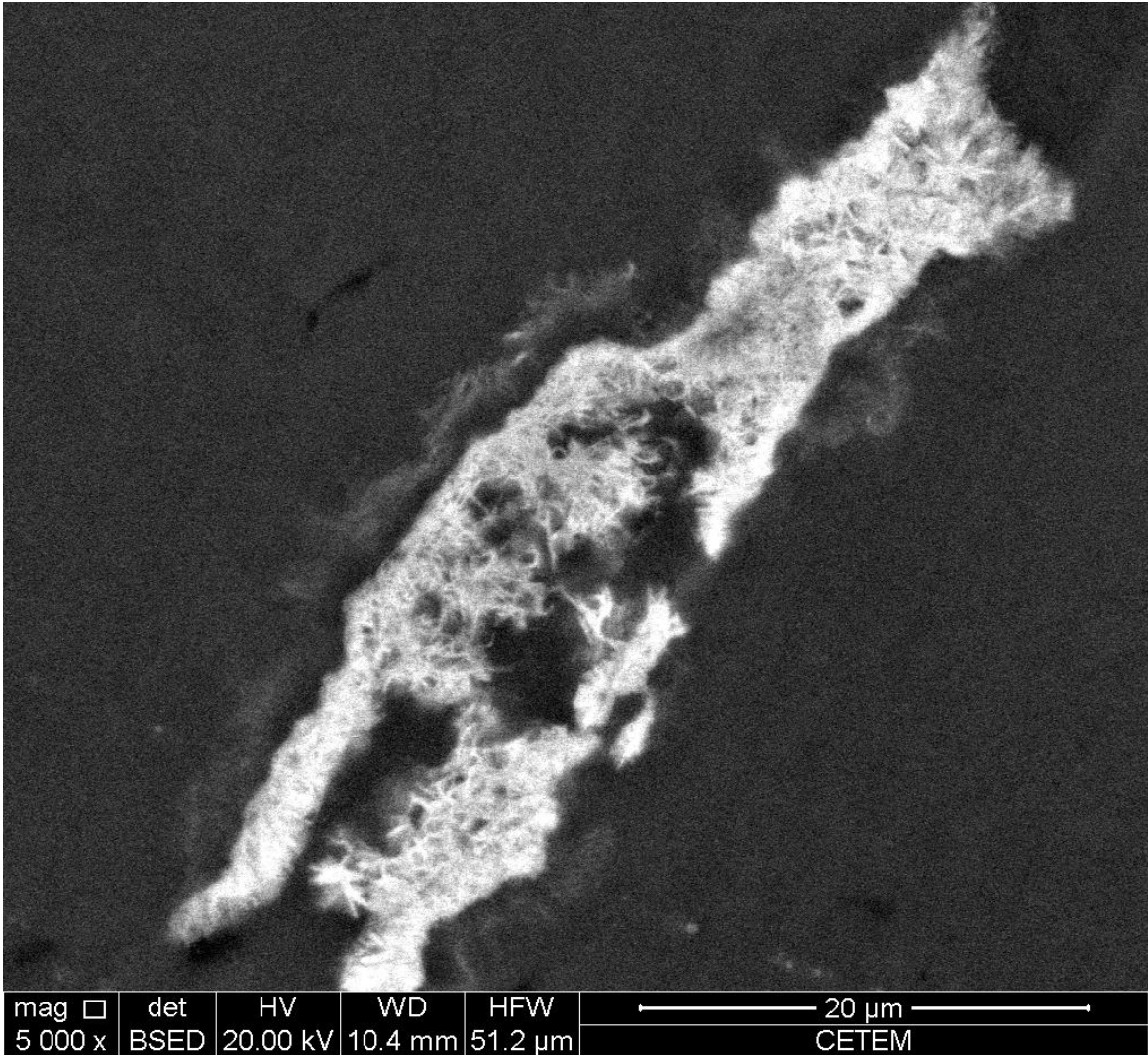


Fig 29: Inclusão não identificada rica em ferro

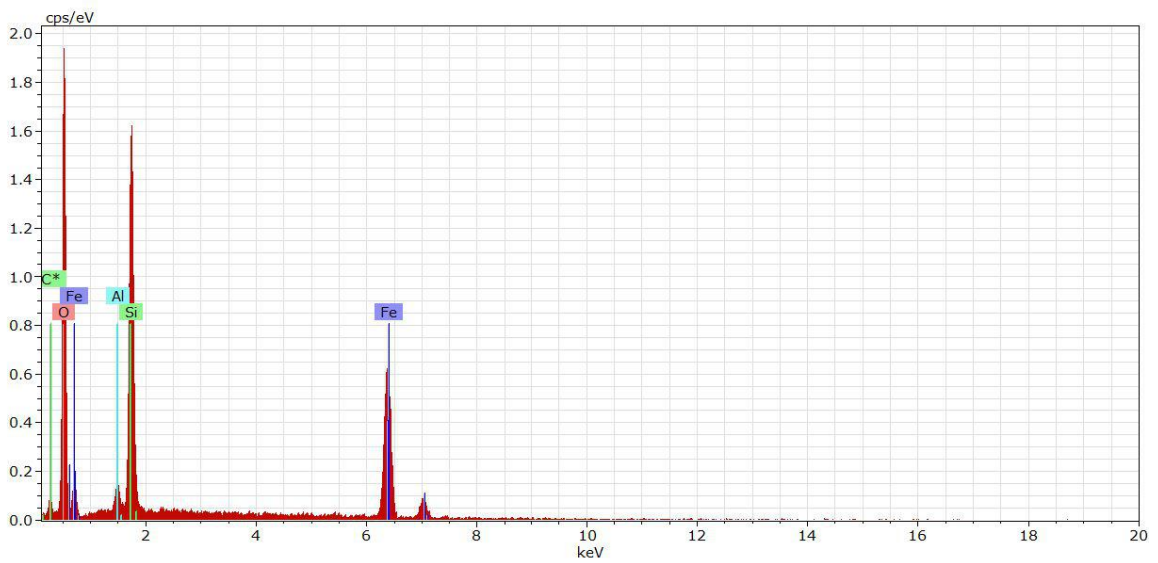


Fig 30: Análise química (EDS) da inclusão da figura 29 (fase rica em ferro).

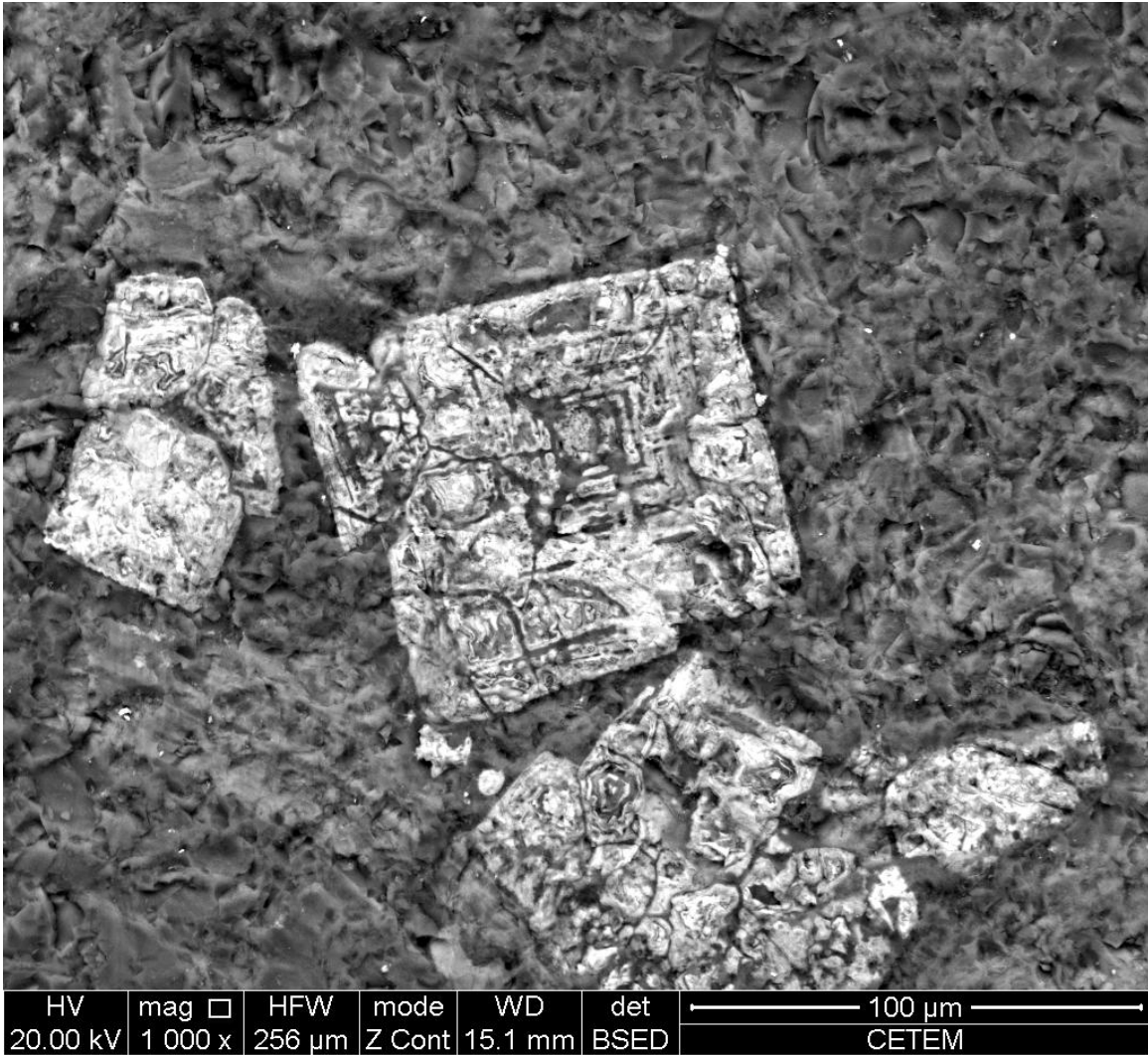


Fig 31: Provável inclusão de faialita.

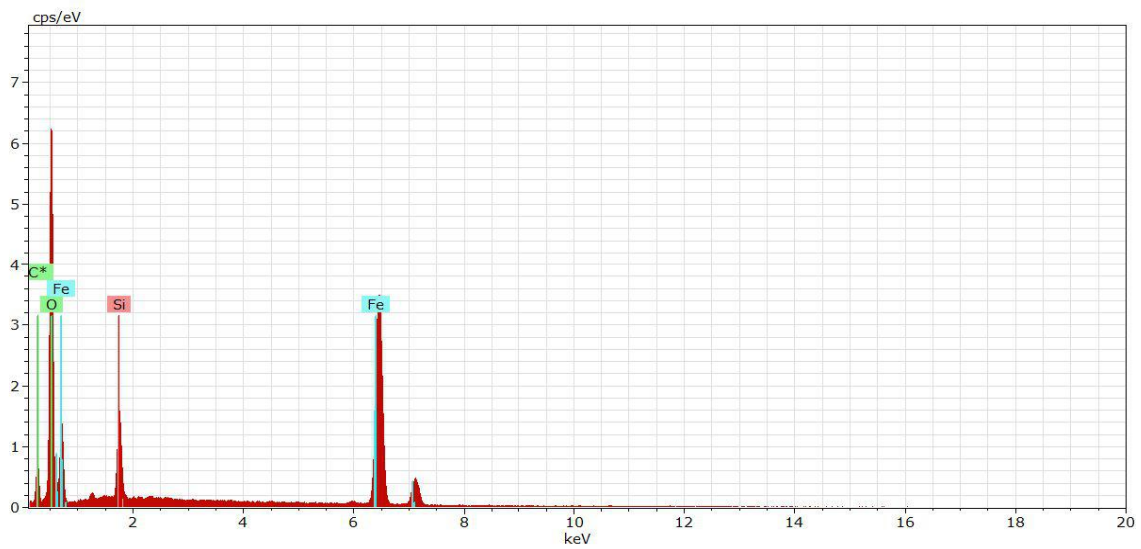


Fig 32: Análise da inclusão da figura 31 (provável faialita)

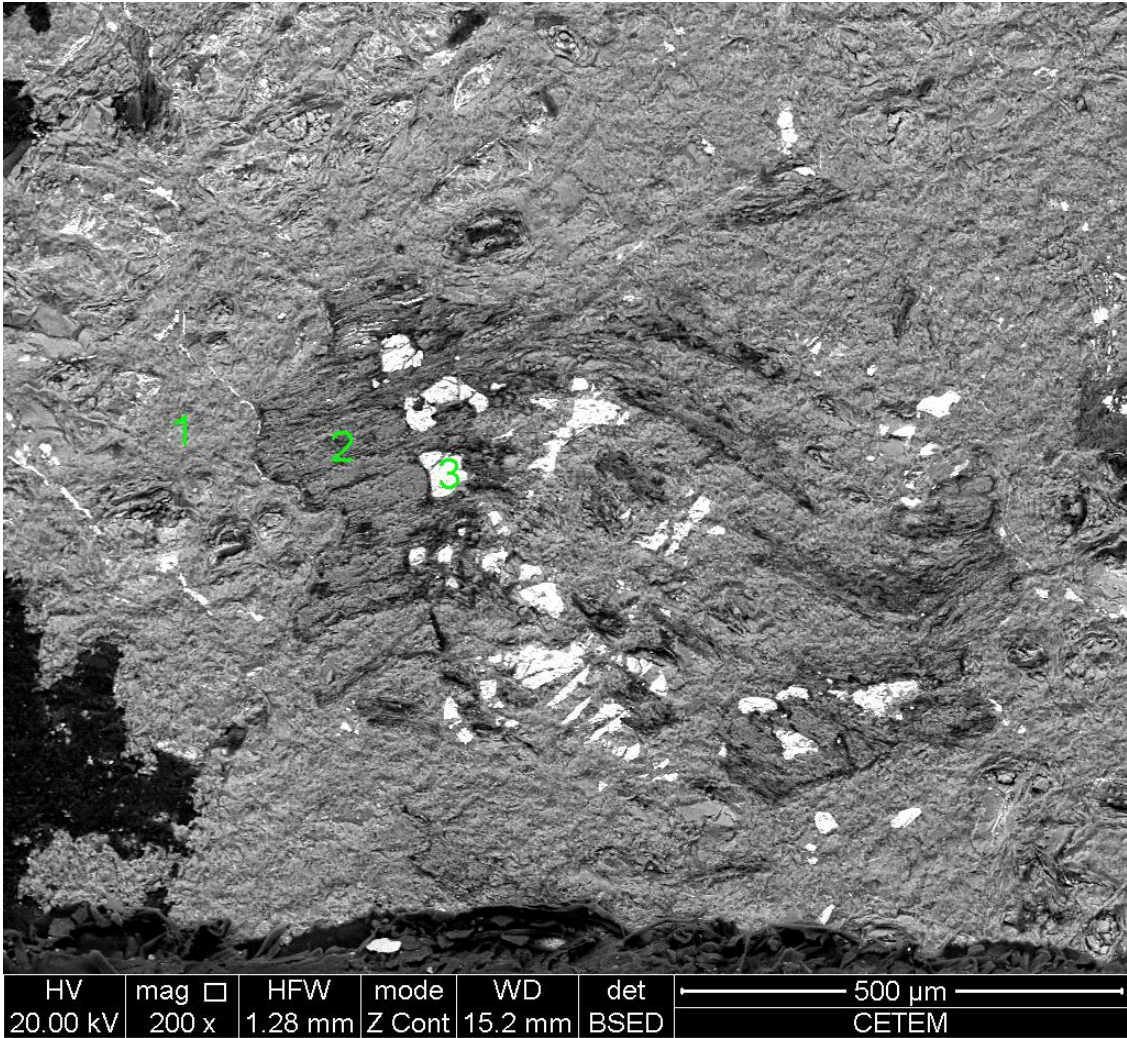


Fig 33: Complexo quadro de inclusões, com destaque para os diferentes pontos analisados com EDS (1, 2 e 3).

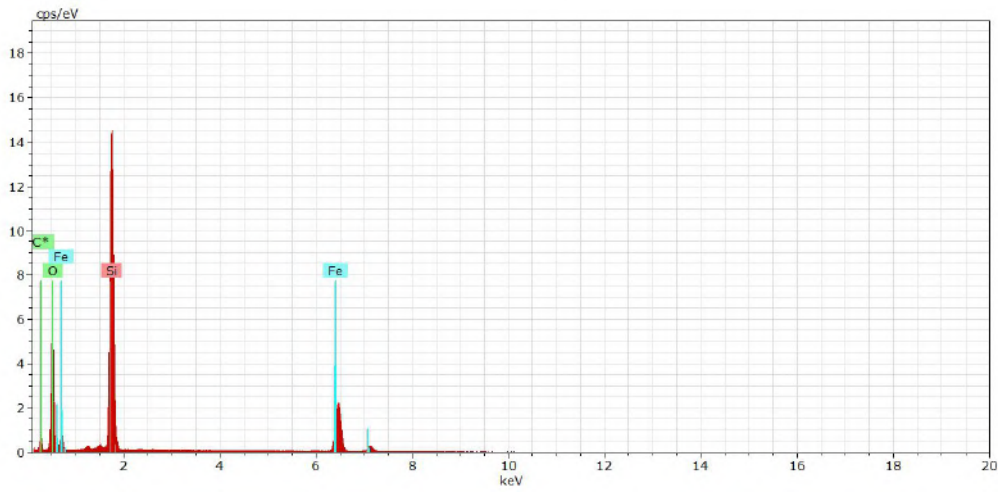


Fig 34: Análise no EDS da inclusão referente a Figura 33, ponto 1.

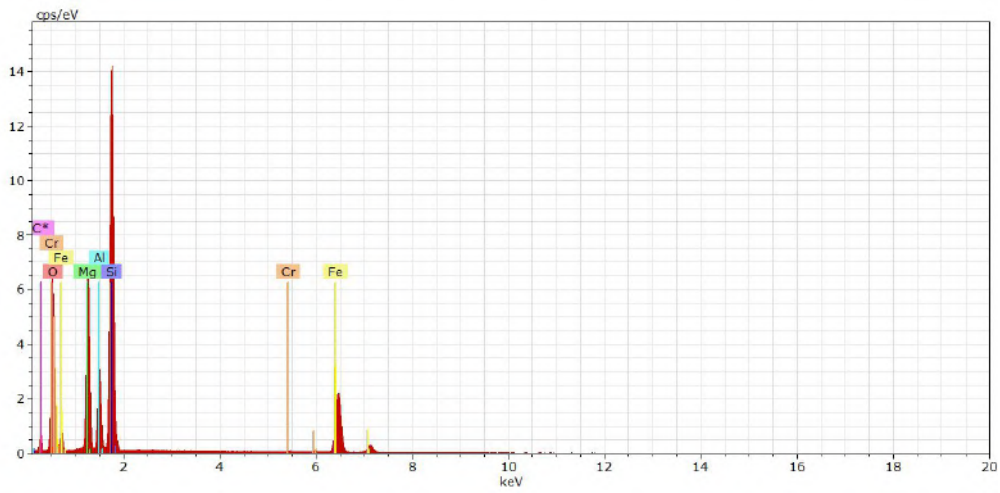


Fig 35: Análise no EDS da inclusão referente a Figura 33, ponto 2.

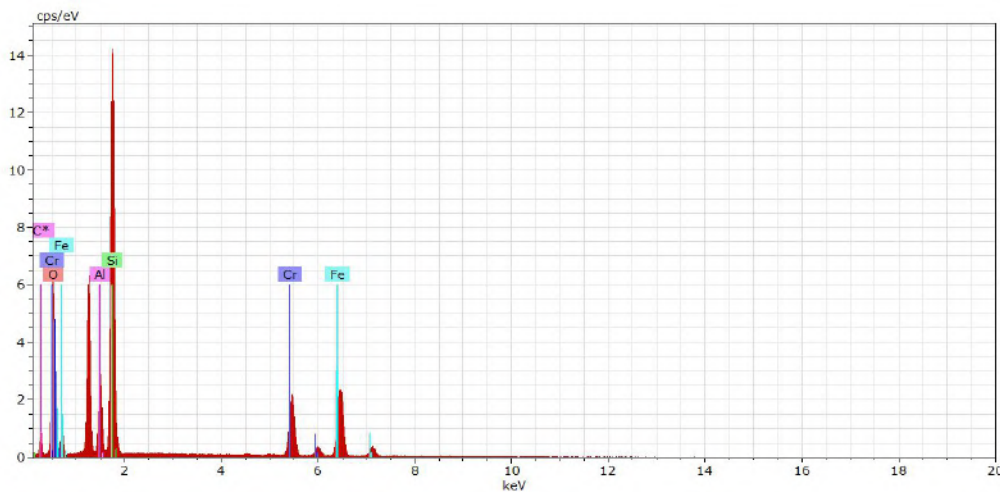


Fig 36: Análise no EDS da inclusão referente a Figura 33, ponto 3.

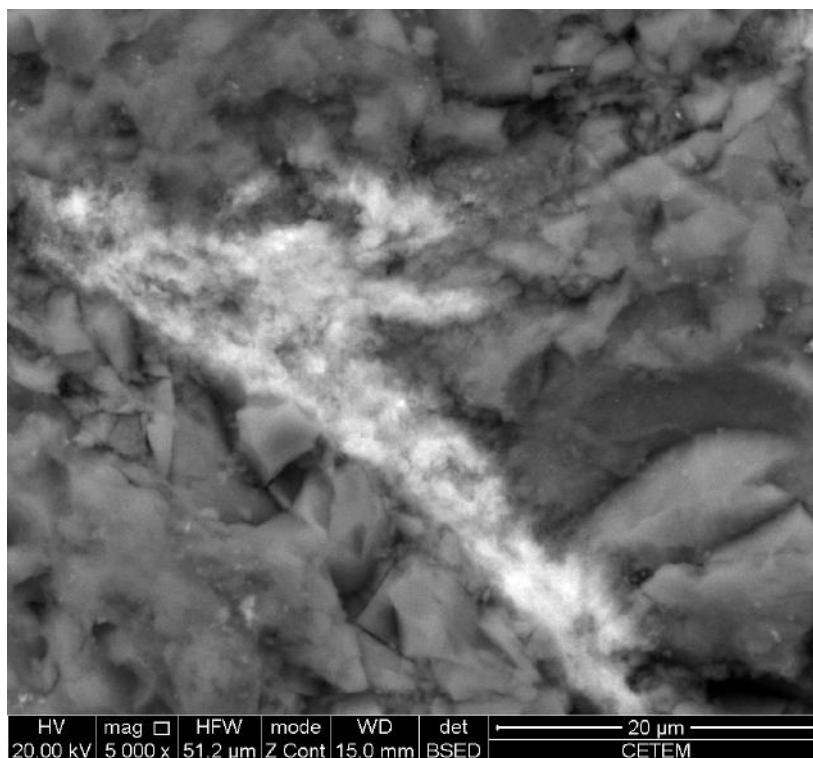


Fig 37: Filossilicato, rico em diversos elementos de cor branca.

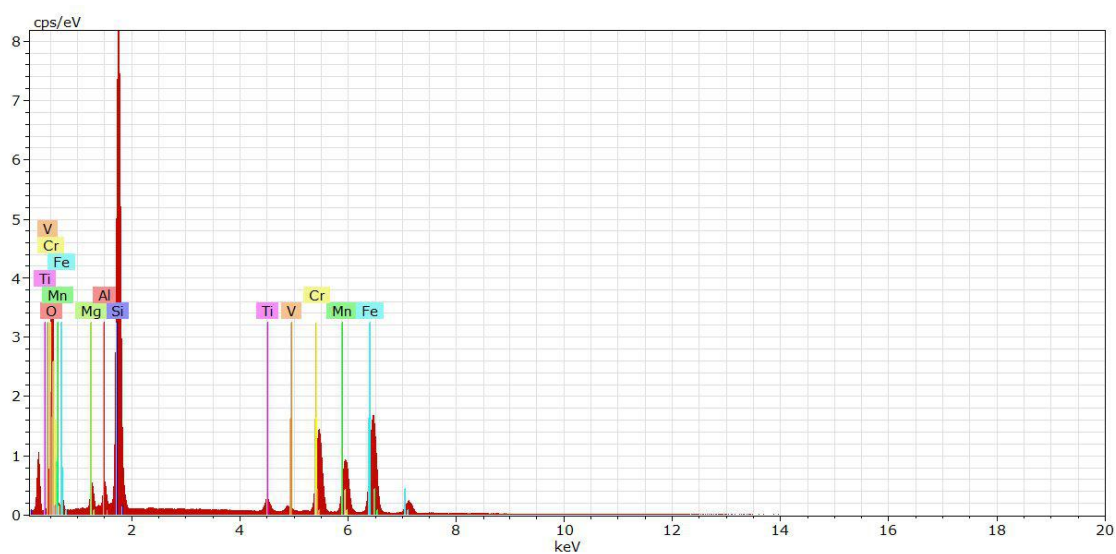


Fig 38: Filossilicato rico em diversos elementos de transição, como ferro, cromo, manganês, titânio e vanádio.

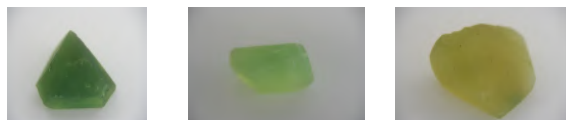
4. CONCLUSÃO

Através desse trabalho foi possível aprofundar a caracterização das opalas verdes de Boa Nova, na Bahia. Foram acrescentados dados de difração de raios-X, microscopia eletrônica de varredura, fluorescência de raios-X e espectroscopia UV-VI-NIR, além de uma nova determinação de suas densidades e índices de refração. Através do presente estudo foi possível tirar diversas conclusões sobre as causas das variadas cores das opalas encontradas na região.

As opalas extraídas em Boa Nova não são consideradas puras, pois contêm inclusões e/ou apresentam intercrescimento com outros minerais. As três principais fases encontradas, detectáveis na difração de raios-X, foram: calcidônia, saponita/paligorskita e serpentina. Por um lado a presença destas fases prejudicaram a leitura dos índices de refração e por outro aumentaram os valores das densidades, causando uma maior dispersão dos dados no gráfico de correlação $n \times D$.

Com os dados da análise de difração de raios-X, associados aos valores de índice de refração e densidade, foi possível caracterizar todas as opalas estudadas como opalas-CT. Através da elaboração de um gráfico, conforme proposto por Taliaferro (1935), estimamos ainda um teor de água médio para estas opalas entre 6% a 7%, muito próximo do valor obtido por Cassedane (1975), que foi de 7,33%.

A fluorescência de raios-X revelou a presença de diferentes elementos de transição responsáveis pela cor verde das opalas e suas diferentes tonalidades: níquel, ferro e cromo. A relação destes três elementos com as diferentes tonalidades das opalas ficou ainda mais evidente, quando foram analisadas as amostras mais representativas de cada cor e utilizado um colimador de feixe mais estreito, sendo assim possível selecionar melhor a área a ser analisada.



Segue um resumo sobre das observações feita após os dados da análise química:

- **Verde Escuro:** cromo e ferro em valores equivalentes e medianos, mas ainda baixos, quando comparados aos valores de níquel.
- **Verde Maçã:** níquel como elemento principal, ferro e cromo quase ausentes.
- **Verde Amarelado / Amarelo:** presença de ferro equivalente ao níquel e cromo ausente.

Foram registrados, pela primeira vez, espectros de absorção no UV/VIS/NIR. Embora não tenha sido possível aprofundar a interpretação dos espectros, ainda assim foram tiradas conclusões sobre as causas de cor das opalas de Boa Nova, que corroboram com os resultados das análises químicas.

E, finalmente, empregando o microscópio eletrônico de varredura, com EDS acoplado, foi possível observar a presença de diversas fases como inclusões ou intercrescimento com a opala. São elas: calcidônia, filossilicatos diversos, dentre os quais destacamos a nontronita e a saponita/paligorskita, a cromita e a faialita. Muitas destas fases contêm elevados percentuais de ferro e cromo, mas não o elemento níquel. Supõe-se que o níquel ocorra de forma mais dispersa na opala, possivelmente na forma de nano-inclusões, frequentemente relatadas em opalas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Bank H., Henn U., Milisenda C.C. 1997. Grüner Opal aus der Tükei. *Z. Dt. Gemmol. Ges.* 46(1): 2 - 3.

Brum M.M.T., Augustin A.H., Juchem P.L., Hartmann L.A. 2009. Opala no Rio Grande do Sul, Brasil. *In: I Seminário sobre Design e Gemologia de Pedras, Gemas e Jóias do Rio Grande do Sul*, <http://www.upf.br/ctpedras/sdgem/>.

Cassedanne J.P. 1975. L'opale verte de la fazenda Brejinho (Brésil). *Bull. A.F.G.*45: 6 - 7.

Flörke O.W, Graetsch H., Martin B., Roller K and Wirth R. 1991. Nomenclature of micro- and non-crystalline silica minerals, based on structure and microstructure. *Neues Jahrbuch für Mineralogie Abhandlungen*,163(1): 19 - 42.

Fritsch E., Stockton C. M. 1987. Infrared spectroscopy in Gem Identification. *Gems and Gemology Spring 1987: 18 - 26*.

Fritsch E., Rossman G.R. 1987. An update on colors in Gems, Part 1. *Gems and Gemology, Fall 1987: 126 - 139*.

Fritsch E., Rossman G.R. 1988. An update on colors in Gems, Part 2. *Gems and Gemology, Spring 1988: 3 - 15*.

Jones J.B., Sanders J.V., Segnit E.R. 1964. Structure of opal. *Nature* 204: 990 - 991

Koivula J.I., Fryer C.W. 1984. Green Opal from East Africa. *Gems and Gemology, Winter 1984: 226-227*

Lazzarelli N. H. 2002. *Blue Chart - Gem Identification: Natural / Treated / Synthetic / Imitation*. Hervé Nicolas Lazzarelli, 20p.

Pimentel P.C. 2007. *Caracterização de opalas-CT coloridas de qualidade gema*. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto de Geociências, UFRJ, Rio de Janeiro, 43p.

Schmetzer K., Berdesinski W., Krupp H. 1976. Grüner opal aus Tansania. *Der Aufschluss* 27(11): 381 -384.

Shigley J.E., Lours B.M., Renfra D.N. 2009. Chrysoprase and Prase Opal from Haneti, Central Tanzania. *Gems and Gemology, Winter 2009: 271 - 279*

Taliaferro N. L.1935. Some properties of opal. *American Journal of Science* 30(179): 450 - 474

Webster R. 1975. *Gems: Their Sources, Descriptions and Identification*. Newnes-Butterworths, London, 931p.