



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

ISAAC GOMES DE OLIVEIRA

CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DO POTENCIAL GEMOLÓGICO DE
TURMALINAS DE QUIXERAMOBIM, CE, BRASIL

FORTALEZA

2020

ISAAC GOMES DE OLIVEIRA

CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DO POTENCIAL GEMOLÓGICO DE TURMALINAS
DE QUIXERAMOBIM, CE, BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de
pós Graduação em Geologia do
Departamento de Geologia da Universidade
Federal do Ceará, como requisito para
obtenção do título de Mestre em Geologia.

Orientadora: Profa. Dra. Irani Clezar Mattos.

FORTALEZA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

O47c Oliveira, Isaac Gomes de.
Caracterização e análise do potencial gemológico de turmalinas de Quixeramobim, Ce, Brasil / Isaac Gomes de Oliveira. – 2020.
80 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, 3, Fortaleza, 2020.
Orientação: Profa. Dra. Irani Clezar Mattos.

1. Polariscópio Gomes. 2. Quixeramobim. 3. Turmalinas. 4. Avaliação Gemológica. I. Título.

CDD 551

ISAAC GOMES DE OLIVEIRA

CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DO POTENCIAL GEMOLÓGICO DE TURMALINAS
DE QUIXERAMOBIM, CE, BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de
pós Graduação em Geologia do
Departamento de Geologia da Universidade
Federal do Ceará, como requisito para
obtenção do título de Mestre em Geologia.
Área de concentração: Geodinâmica e
Recursos Minerais.

Aprovado em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Profª. Dra. Irani Clezar Mattos (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profª. Dra. Tereza Falcão de Oliveira Neri
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profª. Dra. Lucilene Dos Santos
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico a Deus, a meus pais Antônio Valmir e Maria Fernanda, irmão e irmã, e a minha “mãe” geológica (Tereza), que sem eles não teria conseguido chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade Federal do Ceará (UFC) que me deu a oportunidade de cursar Geologia; ao Programa de Pós Graduação em Geologia desta mesma Universidade através de seu mestrado; ao laboratório de Gemologia da UFC que forneceu todo o apoio técnico desde que entrei em 2015; ao laboratório de Geoquímica que me permitiu utilizar o método Arquimedes para conferir dados; aos laboratórios do departamento de Física: Espectroscopia Raman e LabCres; a coordenação da pós-graduação, a secretaria e a chefia do departamento que me auxiliaram nos procedimentos para conclusão do curso de mestrado.

Muito tenho que agradecer a caríssima, ilustríssima, excelentíssima Tereza Neri minha orientadora e “mãe” geológica que sempre esteve ao meu lado desde que ingressei no laboratório de Gemologia no segundo semestre de 2015; me orientando, tirando minhas dúvidas de outras disciplinas, corrigindo meus artigos e demais trabalhos acadêmicos.

A caríssima professora e minha orientadora Irani Mattos, que se mostrou uma professora excelente, me orientando e auxiliando desde a graduação e agora no mestrado, esclarecendo dúvidas e me aconselhando.

Ao caríssimo professor Carlos William do departamento de Física e ao sempre atencioso professor Ayala por todo o suporte conferido nas análises realizadas em seu departamento.

Ao caríssimo professor Clóvis Parente, que se mostrou um excelente, justo professor e que me ajudou tanto durante a minha carreira como pesquisador, me aconselhando e tirando dúvidas acadêmicas.

As caríssimas professora Lucilene dos Santos e Dra. Diolande Gomes, sempre se disponibilizaram a me ajudar e tirar dúvidas desde a época da minha graduação, no mestrado não foi diferente.

A todo o corpo docente e a todos os funcionários do departamento de Geologia da UFC, que sempre me dedicaram apreço.

A todos os meus amigos que conheci na Geologia na graduação e na pós, que também muito me ajudaram e colaboraram comigo.

A Geocapta, Empresa Júnior de Geologia, que muito cooperou e colaborou comigo, apesar de não ser membro.

Aos meus queridos pais Valmir e Fernanda por tudo que puderam e fizeram por mim durante toda a minha vida; aos meus amigos e familiares em geral que sempre confiaram

em mim e desejam o melhor.

À Deus e ao meu anjo da guarda que me deram criatividade, saúde e discernimento. A todos muitíssimo obrigado!!!

“Eu tenho um espaço em branco, então vou
continuar inventando”

(O autor).

RESUMO

Este estudo visa a caracterização gemológica de alguns espécimes da região de Quixeramobim (CE) que possuem potencial para serem utilizados como gemas. Esta região pertence ao Distrito Pegmatítico Solonópole – Quixeramobim (DPSQ), o DPSQ está inserido no Domínio Ceará Central que pertence a Província Borborema (zona setentrional). Foram realizados estudos referentes as propriedades gemológicas, além dos dados referentes a sua composição química; a avaliação da sua qualidade gemológica e cálculo do valor comercial; a análise destas amostras no Polariscópio Gomes (Disposição Construtiva Introduzida em Polariscópio Para Estudo e Análise de Gemas) a fim de constatar o grau de facilidade ao visualizar a figura de interferência; espectrometria Raman e análises para orientação cristalográfica. Os exemplares nas cores azul, verde e rosa possuem majoritariamente as mesmas características gemológicas das turmalinas de outras regiões, porém com algumas variações em algumas propriedades. Os minerais possuem boa qualidade de cor e inclusões fluidas perceptíveis. As turmalinas possuem figuras de interferência moderadamente fáceis de serem vistas. Logo, por meio dos instrumentos listados e análises acuradas foi possível realizar a caracterização e avaliação comercial e óptica. As diversas propriedades gemológicas e químicas são padrão para o grupo mineral, mas características como: birrefringência, pleocroísmo e densidade relativa são anômalos, estas irregularidades são causadas pelo teor do elemento ferro; o caráter e sinal óptico não apresentam características que permitam um estudo de proveniência; a correlação entre o pleocroísmo e a figura de interferência está ligada à quantidade de sódio. Portanto o trabalho possui uma compilação dos dados destes minerais neste município do Brasil, também comprovando que os exemplares possuem boas a medianas características para serem utilizados como gemas.

Palavras-Chave: Polariscópio Gomes. Quixeramobim. Turmalinas. Avaliação Gemológica.

ABSTRACT

This project has as its main aim the gemological characterization of specimens from Quixeramobim (CE) that have potential to be used as gemstones. This region belongs to the Pegmatitic District Solonópole - Quixeramobim (DPSQ), the DPSQ is inserted in the Central Ceará Domain which belongs to the Borborema Province (northern zone). Studies were carried out regarding the gemological properties, in addition to the data regarding its chemical composition; the evaluation of its gemological quality and calculation of commercial value; the analysis of these samples in the Polariscope Gomes (Constructive Arrangement Introduced in Polariscope for Gem Study and Analysis) to verify the degree of ease when viewing the interference figure; Raman spectrometry and analysis for crystallographic orientation. The specimens in blue, green and pink have the same gemological characteristics as tourmaline from other regions, although they can have some variations in some properties. Minerals have good color quality and noticeable fluid inclusions. Tourmaline has interference figures that are moderately easy to see. Thus, through the listed gemological instruments and accurate analysis, it was possible to verify an excellent commercial and optical characterization and evaluation. Noting that several gemological and chemical properties are standard for the mineral group, but characteristics such as: birefringence, pleochroism and relative density are anomalous, these irregularities are caused by the content of the iron element; the character and optical sign do not have characteristics that allow a study of provenance; the correlation between pleochroism and the interference figure is linked to the amount of sodium. So the work has a compilation of the data of these minerals in this municipality in Brazil, also proving that the specimens have good to medium characteristics to be used as gems.

Keywords: Polariscope Gomes. Quixeramobim. Tourmaline. Gemological Evaluation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	- Área de Pesquisa, situada no interior no Ceará; Limita-se com os municípios de Madalena (Norte); Quixadá, Banabuiú e Choró (Leste); Senador Pompeu, Solonópole e Pedra Branca (Sul); Boa Viagem (Oeste)	20
Figura 2	- Localização da Província Borborema no Brasil	31
Figura 3	- Subdivisão da Província Borborema	32
Figura 4	- Domínio Ceará Central limitado a SE	33
Figura 5	- Turmalinas azuis do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim analisadas	41
Figura 6	- Turmalinas verdes do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim analisadas	42
Figura 7	- Turmalinas rosa do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim analisadas	43
Figura 8	- Infográfico dos códigos das cores em HTML	44
Figura 9	- Tabela de figuras de interferência (caráter óptico) com analisador de gipso	45
Figura 10	- Representação dos quatro espectros mais comuns em turmalinas	54
Figura 11	- Inclusões nas amostras de turmalina estudadas do Município de Quixeramobim	55
Figura 12	- Inclusões nas amostras de turmalina estudadas do Município de Quixeramobim	56
Figura 13	- Organização cristalográfica molecular da turmalina rosa (Hot Pink 2), orientação a (oxigênio) e b (boro)	67

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	- Correlação entre a densidade e a birrefringência das turmalinas rosa	53
Gráfico 2	- Distribuição da qualidade gemológica das turmalinas de Quixeramobim..	58
Gráfico 3	- Distribuição das turmalinas analisadas conforme o grau de facilidade ao observar o caráter e sinal óptico por meio do polariscópio Gomes	64
Gráfico 4	- Correlação entre a figura de interferência e o pleocroísmo nas turmalinas rosa do Município de Quixeramobim	65
Gráfico 5	- Espectroscopia Raman do vidro de suporte das amostras de turmalinas do Município de Quixeramobim	71
Gráfico 6	- Espectroscopia Raman das amostras de turmalina rosa do Município de Quixeramobim	72
Gráfico 7	- Espectroscopia Raman das amostras de turmalina azul do Município de Quixeramobim	72
Gráfico 8	- Espectroscopia Raman das amostras de turmalina verde do Município de Quixeramobim	72
Gráfico 9	- Espectroscopia Raman das três cores das amostras de turmalinas do Município de Quixeramobim	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Características gemológicas das turmalinas azuis de Quixeramobim	59
Tabela 2	- Características gemológicas das turmalinas verdes de Quixeramobim	60
Tabela 3	- Características gemológicas e da composição química das turmalinas rosa de Quixeramobim	61
Tabela 4	- Componentes químicos das amostras de turmalina de Quixeramobim – CE	62
Tabela 5	- Classificação das amostras de Quixeramobim conforme o seu carácter e sinal óptico	63
Tabela 6	- Classificação gemológica e avaliação comercial dos exemplares de Quixeramobim	64
Tabela 7	- Dados obtidos a partir de refinamento da difração de raio X em monocristal, para amostras de turmalinas rosa e teores químicos obtidos pelo método EDS	68

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	19
2	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA	20
3	ESTADO DA ARTE SOBRE AS TURMALINAS	21
3.1	Paragênese	21
3.2	Cores	22
3.3	Aprimoramentos da cor	23
3.4	Ocorrência	23
3.5	Variedades e nomes comerciais	25
3.6	Propriedades físicas e ópticas	25
3,7	Inclusões	26
3.8	Turmalinas brasileiras	26
3.9	Espécies	26
4	GEOLOGIA REGIONAL	30
4.1	Província Borborema	30
5	MATERIAIS E MÉTODOS	40
5.1	Refratômetro	46
5.2	Dicroscópio	46
5.3	Lâmpada de Luz Ultravioleta	47
5.4	Microscópio Gemológico	47
5.5	Balança Hidrostática	48
5.6	Espectroscópio	48
5.7	Boletim Referencial de Preços de Diamantes e Gemas de Cor	48
5.8	Polariscópio Gomes (Disposição construtiva introduzida em polariscópio para estudo e análise de gemas)	49
5.9	Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV-EDS)	49
5.10	Difratômetro de raio-X em monocristal	50
5.11	Espectroscópio Raman	51
5.11.1	Consulta Bibliográfica	51
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
7	CONCLUSÕES	74

INTRODUÇÃO

Sabe-se da importância do conhecimento gemológico para a caracterização das gemas naturais, sintéticas, orgânicas e artificiais. O instrumento recém-inventado (2016), pelo autor, Polariscópio Gomes (Disposição construtiva introduzida em polariscópio para estudo e análise de gemas) proporciona ao observador a visualização do caráter e sinal óptico dos minerais em escala macroscópica desde que estes possuam, pelo menos, um grau regular de diafaneidade (semitranslúcido), o que torna a identificação mais rápida e eficiente (Oliveira, 2018).

Em alguns países é de regra a realização da caracterização gemológica de todos os espécimes minerais, ocasionalmente, não apenas em nível nacional, mas em escala regional; pois as características ópticas e físicas dos minerais podem ter pequenas variações nas suas propriedades como: índice de refração, birrefringência, pleocroísmo e densidade relativa de acordo com a sua região de formação. A caracterização gemológica se faz muito necessária para atualização dos dados ópticos das gemas, também para evitar os casos de fraudes que são recorrentes e as várias tentativas de golpes, sendo comuns o superfaturamento de gemas e a atividade comercial que envolva pedras sem nenhum valor econômico. No Brasil, este estudo se faz necessário em razão da desatualização e falta de dados em várias regiões. A caracterização também é importante para identificar possíveis proveniências do mineral (interferindo diretamente no valor comercial) e também para casos de perícia e investigação criminal.

O termo imitações é usado para designar produtos que imitam gemas naturais ou sintéticas que são fabricados pelo homem no intuito de reproduzir efeito óptico, cor e aparência das gemas naturais ou sintéticas, mas não possuem suas propriedades físicas, químicas, nem a sua estrutura cristalina (IBGM/DNPM, 2009).

Os parâmetros como beleza, raridade e durabilidade são levados em consideração nas análises gemológicas, para que uma gema possua valor comercial. Também devem ser considerados: a cor, lapidação e teor de inclusões; com estes dados é possível avaliar a qualidade gemológica de uma gema. Mas, esta avaliação só é possível com uma caracterização gemológica prévia; utilizando as características ópticas dos minerais para que possa ser efetuada uma identificação não destrutiva ou que danifique a gema.

Para isto são utilizados equipamentos como o refratômetro, tradicional, dicrosscópico,

espectroscópio, lâmpada ultravioleta, balança de precisão e microscópio gemológico. Com estes instrumentos é possível realizar a leitura do índice de refração, birrefringência, caráter, sinal óptico, anisotropia, pleocroísmo, espectro de absorção, fluorescência e análise das inclusões de um material gemológico. O polariscópio tradicional permite observar a anisotropia ou a isotropia de um mineral; o Polariscópio Gomes vai além, este fornece o caráter e o sinal óptico (características mais específicas da anisotropia) da gema, tornando-se mais um instrumento para a caracterização gemológica.

A caracterização gemológica se faz muito necessária para evitar os casos comuns de fraudes que são recorrentes e as várias tentativas de golpes relacionadas às gemas, sendo comuns o superfaturamento de gemas e a atividade comercial que envolva pedras sem nenhum valor econômico. No Brasil, as pedras preciosas mais utilizadas para a quitação de dívidas no judiciário são diamante, rubi, safira e esmeralda. O art. 655 do Código Civil brasileiro institui que bancos e órgãos governamentais aceitem pedras lapidadas em penhora quando uma dívida entra em cobrança na justiça; pela lei, jóias possuem tanto valor quanto o ouro (Brasil, 2002).

Anderson (1984) relata que a turmalina apresenta um pleocroísmo notável, que varia em intensidade, no entanto, é constantemente marcada por um pleocroísmo particularmente forte, resultante provavelmente de seu conteúdo em ferro. Anderson (1984) e Deer *et al* (2010) explanam ainda que algumas características físicas e ópticas da turmalina, tais como o índice de refração, a birrefringência e a densidade aumentam com o incremento do teor de alguns elementos, tais como Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn e Ti. A turmalina é um grupo de minerais que possuem a mesma estrutura cristalina, mas variam em composição química, cor e outras propriedades. Nove espécies são tudo o que você encontrará em livros de referência mais antigos. Quinze são agora conhecidos e ainda há outros sendo considerados para novas espécies (Arem & Clark, 2019).

As amostras de turmalina utilizadas nesta pesquisa são provenientes do Distrito Pegmatítico de Solonópole Quixeramobim (DPSQ) (Ceará), estes minerais foram coletados para serem analisadas no Polariscópio Gomes e caracterizadas gemologicamente. Para Souza (1985) o DPSQ pode ser individualizado em cinco campos pegmatíticos de acordo com a concentração da mineralogia acessória, na ocasião, o autor constatou um zoneamento de sul (Solonópole) para norte (Quixeramobim): (i) O primeiro destes campos, de sul para norte, corresponde ao campo de Nova Floresta-Feiticeiro, situado no município de Jaguaribe, que é

constituído por pegmatitos mineralizados em cassiterita e tantalita/columbita; (ii) O segundo campo, a NE de Solonópole contém pegmatitos lítio-berilo-tantalíferos e lítio-berilo-estaníferos, com ocorrência de veios pegmatíticos com fluorita; (iii) O campo a W e NW de Solonópole é o maior detentor de pegmatitos lítio-berilo tantalíferos do Distrito Solonópole-Quixeramobim; (iv) O campo de Berilândia – Carnaubinha, local de proveniência dos cristais de turmalina estudados (até então nunca estudados gemologicamente), detém pegmatitos portadores de berilo industrial, em sua maioria, além de água-marinha e turmalina gemológica; (v) O campo de Rinaré-Banabuiú apresenta pegmatitos ricos em turmalina e berilo, situado ao norte da cidade de Banabuiú.

Visando a avaliação do nível de facilidade ao visualizar o caráter e sinal óptico na “Disposição construtiva introduzida em polariscópio para estudo e análise de gemas”. Os minerais tiveram suas figuras de interferência analisadas e interpretadas, estas imagens foram classificadas em: excepcional, excelente, bom, ruim e regular.

1. As amostras cuja classificação é “excepcional” possuem uma figura de interferência extremamente nítida e com contornos bem definidos.
2. Os exemplares tidos como “excelente” são detentores de um caráter e sinal óptico de fácil interpretação, possuindo pouca dificuldade ao visualizá-lo.
3. As gemas cuja classificação foi “bom” detém uma figura de interferência mais difícil de ser analisada, com uma figura não tão nítida.
4. As amostras classificadas como “regular” possuem um elevado grau de dificuldade ao serem analisadas, com o caráter e sinal óptico sendo visto com certa dificuldade, exibindo um contorno pouco definido.
5. Os exemplares cuja classificação foi “ruim” não possuem uma figura de interferência nítida, esta falta de nitidez foi ocasionada pelo baixo grau de diafaneidade das amostras, sendo possível apenas classifica-los como anisotrópicos.

A diafaneidade apresenta-se como um fator de grande relevância para o Polariscópio Gomes, pois apenas gemas com um bom grau de diafaneidade (semitranslúcidas) podem permitir a visualização das figuras de interferência (Oliveira, 2018).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo principal do trabalho foi avaliar e caracterizar algumas turmalinas provenientes da região Quixeramobim, por meio de integração de dados gemológicos, estudo cristalográfico e uso do Polariscópio Gomes.

1.1.2 Objetivos específicos

Caracterizar gemologicamente e desenvolver estudos cristalográficos em alguns exemplares de turmalinas da região de Berilândia, Município de Quixeramobim.

Elaborar tabelas com os dados ópticos das turmalinas, as separando por cor, com os dados gemológicos nestas tabelas consta as seguintes propriedades: índice de refração, birrefringência, densidade relativa, espectro de absorção, pleocroísmo, fluorescência e aspectos internos (inclusões).

Desenvolver uma tabela com os dados gemológicos e de mercado das turmalinas visando avaliar o valor de mercado de alguns exemplares de turmalinas da região de Quixeramobim; e com o valor corrigido de acordo com a inflação do ano vigente (2020).

Desenvolver uma tabela com o grau de facilidade ao visualizar o caráter e sinal óptico das gemas em questão com o Polariscópio Gomes.

Obter os dados vibracionais por meio da espectroscopia Raman e organizados em gráficos, para que estes fossem mais uma característica de identificação das turmalinas.

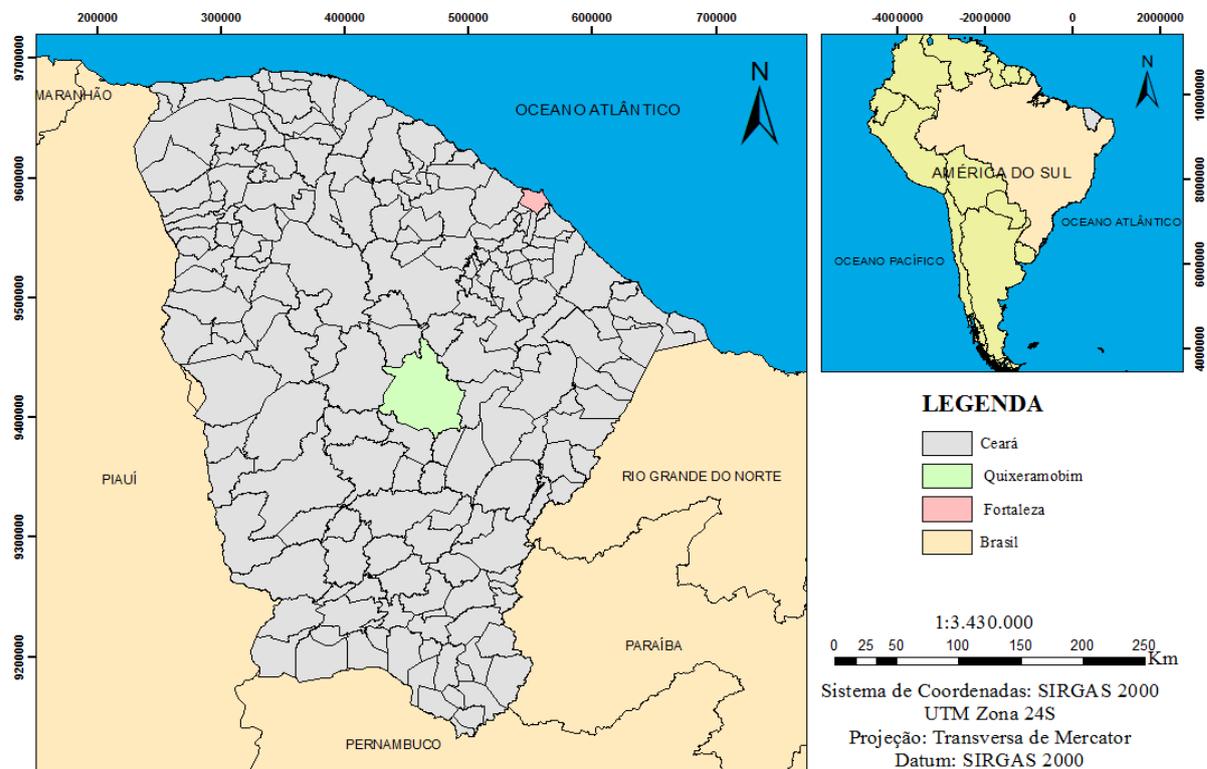
Correlacionar as propriedades gemológicas com a composição química; resultando em justificativas para as anomalias e peculiaridades encontradas.

Obter informações referentes a organização cristalográfica dos minerais de cor rosa, esta organização serve para embasar a correlação da qualidade das figuras de interferências geradas com a intensidade do pleocroísmo das amostras.

2. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

A área do município de Quixeramobim compreende aproximadamente 3275 km², representando 2,44% da área do estado do Ceará. Está inserida na porção do Ceará Central; na mesorregião do Sertão Cearense. Estão situados na região onze distritos: Lacerda, Manituba, Passagem, Uruquê, Panabibu, Belém, Menelândia, Damião Carneiro, Encantado, São Miguel e Berilândia, localidade de onde as amostras analisadas nesta pesquisa são provenientes. Quixeramobim limita-se com os municípios de Madalena (Norte); Quixadá, Banabuiú e Choró (Leste); Senador Pompeu, Sonolópole e Pedra Branca (Sul); Boa Viagem (Oeste) (Figura 1). O município de Quixeramobim é a segunda maior cidade do sertão central, dados do IBGE atribuem ao município, uma população de 75.565 habitantes e está distante 203 km da capital Fortaleza utiliza-se da BR-116 e na altura de Quixadá usa-se a CE-060 para os trajetos dentro do município as estradas locais.

Figura 1: Área de Pesquisa, situada no interior no Ceará; Limita-se com os municípios de Madalena (Norte); Quixadá, Banabuiú e Choró (Leste); Senador Pompeu, Sonolópole e Pedra Branca (Sul); Boa Viagem (Oeste).



Fonte: Elaborada pelo autor.

3. ESTADO DA ARTE SOBRE AS TURMALINAS

A turmalina é um borosilicato que tem simetria romboédrica mais acentuada que hexagonal. Considera-se a fórmula química geral $XY_3Z_6B_3Si(O,OH)_{30}(OH,F)$, os íons na posição Y estão rodeados por íons de oxigénio e (OH) dispostos octaédricamente; os três octaedros envolvem o eixo ternário e cada tetraedro compartilha uma aresta com cada um dos outros dois tetraedros vizinhos equivalentes. Os íons Y e os íons de oxigénio ou (OH), seus envolventes, constituem, assim, um pequeno fragmento com forma trigonal de uma camada de brucita. Cada um dos seis átomos de Si está rodeado por quatro oxigénios, em disposição tetraédrica, e cada um dos seis tetraedros compartilha dois oxigénios com os tetraedros adjacentes de modo a formar um anel com seis membros e de composição Si_6O_{18} . Os íons Al, B e Na unem, de diferentes maneiras, o núcleo central da estrutura que tem a composição $Y_3(OH)_4Si_6O_{21}$. Os três íons de B têm coordenação tetraédrica e compartilham um vértice com um tetraedro (SiO_4). Este fato explica a razão porque o Al não pode substituir o Si nos seis membros do anel silicatado da turmalina: o oxigénio de ligação entre os tetraedros de Al e de Si, já consideravelmente mais fraca que a ligação Si-O-Si, quebraria devido à influência enfraquecedora da ligação B-O. Os íons Al (posições Z) estão coordenados com seis átomos de oxigénio formando um octaedro muito distorcido, e o Na (posição X) tem uma coordenação tetraédrica imediata com três oxigénios e um oxidrila. Das quatro posições (OH) possíveis, somente uma, a posição O(1), é ocupada pelo F; assim, a fórmula aniônica é dada por $O_{30}(OH,F)$ de preferência a fórmula $O_{27}(OH,F)_4$ (Deer *et al* 2010).

3.1 Paragênese

A turmalina é tipicamente um mineral de pegmatitos graníticos, filões pneumatolíticos e de alguns granitos: aparece também, frequentemente, em rochas metamórficas como produto do metassomatismo do boro ou como resultado da recristalização de grãos detríticos do sedimento original. Nas rochas graníticas série escorlita "schorl"-elbaíta e são, geralmente, bastante ricas em ferro, possuindo os granitos com turmalina, típicos de sudoeste da Inglaterra, cristais negros prismáticos visíveis macroscopicamente e que apresentam, em lâmina delgada, pleocroísmo amarelo ou amarelo azulado. Em alguns pegmatitos e no material da fase final dos filões graníticos desenvolvem-se turmalinas de lítio, que apresentam muitas vezes uma variação na cor e na composição química, correspondente à sua posição no pegmatito (Deer *et al* 2010).

No pegmatito Varuträsk (Suécia) ocorrem turmalinas negras e coloridas na fase pegmatítica zonal original, enquanto a rubelita e as turmalinas zonadas estão restringidas principalmente às unidades com substituição de sódio, na denominada fase pneumatogênica. Na fase de alteração pneumatolítica pode ocorrer turmalinização por introdução de boro que ataca os minerais normais do granito. Assim, o tipo de rocha, denominado luxulianito é considerado como um produto da modificação pneumatolítica incompleta de um granito porfiróide alcalino por emanações bóricas: neste primeiro mineral a ser atacado, originando turmalina amarela, e feldspato foi substituído por uma turmalina azul ou azul-esverdeada. Algumas turmalinas amarelas podem ser de origem primária, mas após um período de corrosão servem de núcleo ao desenvolvimento de turmalina secundária, disposta em cristais aciculares radiais, dando os denominados "sóis" de turmalina (Arem & Clark, 2019) (Deer *et al* 2010).

Foi sugerido que os fluidos da turmalinização que ocorreu no sudoeste de Inglaterra tenham tido como fonte última (particularmente para o boro) os sedimentos que constituem as rochas encaixantes, os quais também tiveram uma contribuição muito importante, por assimilação, associações mineralógicas pneumatolíticas ígneas, podem compreender topázio, lepidolita, petalita, espodumênio, cassiterita, fluorita, apatita, columbita e etc (Deer *et al* 2010).

3.2 Cores

As turmalinas ocorrem em todas as cores, do incolor ao preto. Os cristais são frequentemente divididos em zonas ao longo de seu comprimento (bicolor, tricolor, multicolor e assim por diante) ou em zonas concentradas (turmalina melancia). A dravita é geralmente preto a marrom, podendo ser incolor. Uvita é preto, marrom e verde, geralmente cores escuras. Schorl tende a ser preto, azul ou azul esverdeado. A buergerita é sempre marrom escura a preta, com uma iridescência de cor bronze ou *Schiller* sob a superfície do cristal.

A liddicoatita é uma espécie relativamente recentemente descrita que, durante anos, foi considerada elbaita (de Madagascar), mas, quando investigada, acabou sendo uma analogia de cálcio da elbaita. Chromodravita, como seria de esperar, é uma cor verde escura intensa da URSS (*União das Repúblicas Socialistas Soviéticas*). Na Zâmbia, foi encontrada elbaita manganífera amarela brilhante, com composição próxima à tsilaisita.

Certas variedades de cores da turmalina têm nomes amplamente usados. Acroíta é incolor; rubelita refere-se a tons rosa e vermelho, e turmalina azul geralmente referida como indicolita (Arem & Clark, 2019).

3.3 Aprimoramentos da cor

Existem alguns procedimentos que possibilitam a melhora ou a mudança da cor em turmalinas, tais como: Aquecimento, clareia pedras azuis e verdes, comuns, estáveis, indetectáveis; pode produzir outras cores, raras, constantes e imperceptíveis; esta modificação é obtida entre temperaturas de 450-600 °C, no qual as pedras verdes adquirem tom esmeralda e as castanhas um vermelho luminoso (Schumann, 2006). A irradiação produz cores vermelha, rosa escuro, amarelo, laranja e cores parciais, comuns, podem desbotar no aquecimento ou exposição prolongada à luz brilhante, indetectáveis. Tratamento ácido, alvejante de inclusões escuras, usadas principalmente nos olhos de gatos, ocasionais, estáveis, indetectáveis. Enchimentos de plástico vedam tubos ociosos para impedir a entrada de sujeira, ocasionais, estáveis, detectam com ponto quente (Arem & Clark, 2019).

3.4 Ocorrência

A turmalina ocorre em xistos cristalinos; em granitos e pegmatitos de granito (especialmente a elbaita); em gnaisse e outras rochas metamórficas de contato (especialmente dravita, uvita). A turmalina também é encontrada como inclusões em quartzo.

- *Sri Lanka* : cristais amarelos e marrons; esta é a fonte original da turmalina de gemas, agora conhecida por ser uvita e não dravita.
- *Birmânia*: A área de Mogok produz turmalinas vermelhas, também alguns elbaitas rosa e uvitas marrons.
- *Mursinka, Urais, URSS*: também em *Nerchinsk* , cristais azuis, vermelhos e violetas em granito decomposto.
- *Carélia central, URSS* : cromodravita (verde escuro).
- *Brasil* : em Minas Gerais e outros estados, geralmente elbaita, com uma enorme variedade de cores e, às vezes, grandes cristais; também turmalina bicolor, olho de gato, melancia. Especialmente dignos de nota são os imensos cristais vermelho-amora da mina de Jonas Lima e o excelente material vermelho-escuro da Ouro Fino.

- *Caxemira, Índia* : Cristais verdes de elbaita (índices de refração (no)1.643, (ne)1.622; DR 3.05 g/cm³, birrefringência de 0,021).
- *Nuristão, Afeganistão* : elbaita excelente em tons de azul, rosa, verde e até verde esmeralda.
- *Usakos, Namíbia*: Elbaita fina de cor verde rica (turmalina cromada).
- *Klein Spitzkopje, Otavi, Namíbia* : Turmalina em muitos tons de verde e outras cores (elbaita).
- *Zimbábue* : Na área da floresta de Somabula, elbaita gemológica.
- *Moçambique* : Em Alta Ligonha, elbaita de cor pálida em vários tons; bicolores.
- Madagascar: Liddicoatita (anteriormente considerada elbaita) em uma enorme variedade de cores, tons; cristais frequentemente zoneados concêntricamente com muitas zonas de cores, de contorno triangular; muitos cristais muito grandes. Também fina rubelita.
- *Tanzânia* : Elbaita contendo Cr e V, resultando em ricos tons de verde.
- *Quênia* : Fino, vermelho escuro e outras cores; o vermelho é dravita; (também tons de amarelo).
- *Glenbuchat, Aberdeenshire, Escócia*: elbaita colorida até vários centímetros, adequada para a lapidação.
- *Califórnia*: Elbaita em abundância em Pala e em outras localidades, tanto em cristais finos quanto em material precioso. O elbaita rosa daqui é um tom pastel único.
- *Maine*: Em Newry, um enorme depósito de elbaita gemológica, com requintado material de gema nas cores verde, azul esverdeado, azul e rosa a vermelho.
- *Connecticut*: Em Haddam, elbaita em cristais pequenos, mas finos, com zonas de cores.
- *México*: Buergerita ocorre em riolito em San Luis Potosi.
- *Nova York*: Nova Jersey: em Franklin e Hamburgo , Nova Jersey, e em Gouverneur e DeKalb , Nova York, cristais uvitas, alguns com potencial para gemas. Este material sempre foi considerado como dravita.
- *Zâmbia*: Na *Chipata* , cristais vermelhos escuros semelhantes ao dravita queniano. Índices de 1.624-1.654; birrefringência = 0,030; DR = 3,03-3,07 g/cm³ (média 3,05). Também tsilaisita, material amarelo precioso com MnO até 9,2%, muito raro.

Existem muitas outras localidades de turmalina, mas as anteriores são as principais produtoras de gemas (Arem & Clark, 2019).

3.5 Variedade e nomes comerciais

1. *A turmalina cromífera*: colorida por cromo exibe intensa coloração verde. Com o filtro *Chelsea*; vermelho ou rosa indica conteúdo de cromo.
2. *Acroíta*: turmalina incolor.
3. *Dravita*: frequentemente aplicada à turmalina amarela e marrom, mesmo que não seja da espécie de dravita.
4. *Indicolita*: turmalina azul em diversas tonalidades.
5. *Melancia*: rosa no interior com uma borda verde.
6. *Mudança de cor*: Mudança de cor distinta da luz do dia para a luz incandescente.
7. *Multicolorida*: com mais de uma cor, geralmente com duas ou três cores.
8. *Olho de gato*: turmalina com acatassolamento em uma variedade de cores.
9. *Paraíba*: cores intensas extremamente valorizadas pelo comércio causadas pelo cobre.
10. *Rubelita*: pouco aplicada às gemas da faixa rosa ao vermelho, geralmente fortemente arroxeadas, alaranjadas ou acastanhadas.
11. *Turmalina Canária*: amarela brilhante do Malawi.
12. *Verdelita*: turmalina verde em várias tonalidades (Arem & Clark, 2019).

3.6 Propriedades Ópticas e Físicas

Os índices de refração, a birrefringência e a densidade relativa da turmalina aumentam com o incremento do teor em (Fe^{2+} Fe^{3+} Mn + Ti). A intensidade do pleocroísmo é variável, mas é particularmente forte nas turmalinas que contêm ferro. A absorção é sempre no $> n_e$ ocorrendo a absorção máxima quando o eixo dos zz está perpendicular à direção de vibração do polarizador (Deer *et al* 2010).

A Elbaita é a espécie de gema mais comum, seguida por schorl, dravita e uvita. Embora raras outras espécies ocasionalmente apareçam como minerais valiosos também. As propriedades de algumas espécies são tão próximas que muitas vezes é difícil fazer uma distinção. Para propósitos gemológicos/ópticos é suficiente para distingui-los todos como turmalina. Na maior parte da literatura gemológica, encontra-se apenas uma gama limitada de propriedades para a turmalina. Isso é feito para simplificar o processo de identificação. No entanto, ele tem a desvantagem significativa de que não identifica uma gema que não esteja em seu material de referência (Arem & Clark, 2019).

3.7 Inclusões

A turmalina exhibe cavidades alongadas ou em forma de rosca, às vezes com inclusões bifásicas. Os tubos geralmente correm paralelos ao comprimento dos cristais e, quando densamente compactados, podem produzir um efeito acatassolamento que produz gemas de olho de gato em cabochões. Pode haver fraturas cheias de gás em turmalinas vermelhas; também filmes planos que refletem a luz e parecem pretos. Também: hornblenda; cristais de mica; apatita e zircão (Arem & Clark, 2019).

3.8 Turmalinas Brasileiras

As turmalinas rosa do Brasil podem apresentar fluorescência (fraca) de baixa absorção na cor azul ou lilás. Em Minas Gerais e outros estados, geralmente é mais comum a espécie elbaíta, com uma enorme variedade de cores e, às vezes, grandes cristais. Também existem turmalinas bicolores e com acatassolamento (Arem & Clark, 2019).

Na região Nordeste do país, macro região do estado do Ceará, foram realizados estudos por Carrino *et al* (2019), Nogueira Neto *et al* (2019), Trumbull *et al* (2013), Leal Neto (2005), e Soares *et al* (2004), envolvendo as propriedades e as rochas hospedeiras de turmalinas de algumas localidades; também havendo uma classificação das mesmas por Soares (2004). Os estudos sobre as turmalinas Paraíba, a mais valiosa no mercado, envolvem propriedades ópticas, físicas, causas de cor, composição química, rocha hospedeira e espectrometria Raman e foram desenvolvidas por autores como Abduriyim *et al* (2006), Beurlen *et al* (2011) e Beurlen *et al* (2009).

3.9 Espécies

A turmalina é um grupo de minerais que possuem a mesma estrutura cristalina, mas variam em composição química, cor e outras propriedades. Na maioria dos livros mais antigos existem nove espécies. Quinze são agora conhecidos e ainda existem outros sendo considerados para novas espécies (Arem & Clark, 2019).

Buergerita

Cristais marrom-escuros a pretos com iridescência de cor bronze. Raro, encontrado principalmente em San Luis Potosi, México. Possui a seguinte fórmula química $\text{NaFe}_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{21}\text{F}$. As propriedades gemológicas incluem elevada densidade relativa ($3.32\text{-}3.29 \text{ g/cm}^3$) índice de refração ($1.735\text{-}1.655$) e birrefringência ($0.065\text{-}0.080$). Possui um pleocroísmo que vai de um amarelo marrom até um amarelo pálido.

Cromodravita

Cristais verde a preto. A fonte primária rara é o centro da Carélia, na Rússia. Possuindo a seguinte estrutura química $\text{NaMg}_3\text{Cr}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_4$. Sendo detentora de elevada densidade relativa ($3.39\text{-}3.41 \text{ g/cm}^3$) índice de refração ($1.778\text{-}1.772$) e baixa birrefringência (0.006). Detém um pleocroísmo que vai de um verde escuro até um amarelo esverdeado.

Dravita

Exemplares marrom, preto, preto esverdeado, vermelho escuro e verde azulado pálido a verde esmeralda. Possui muitas fontes de fornecimento. Com índices de refração ($1.675\text{-}1.604$) e birrefringência ($0.016\text{-}0.032$) considerados baixos quando comparados a outros grupos como a Buergerita, porém possui a maior densidade relativa do grupo da Turmalina ($3.90\text{-}3.10 \text{ g/cm}^3$). Sua fórmula química é dada por $\text{NaMg}_3\text{Al}_6\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH})_3(\text{OH},\text{F})$. O pleocroísmo é bastante variável.

Elbaíta

Sua composição é $\text{Na}(\text{Li},\text{Al})_3\text{Al}_6\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH})_3(\text{OH}, \text{F})$. Sendo a turmalina mais comum, com muitas fontes de fornecimento. Ocorre em todas as cores. Possui densidade relativa moderada a baixíssima ($3.10\text{-}2.82 \text{ g/cm}^3$), birrefringência ($0.013\text{-}0.024$) e índice de refrações ($1.648\text{-}1.603$) comumente encontradas como as propriedades médias das turmalinas, talvez por serem as mais usuais no mercado. As cores do pleocroísmo são diversas.

Feruvita

Cristais marrom escuro a preto. Fonte primária rara, Cuvier Island, Nova Zelândia. Sua estrutura química é $(\text{Na},\text{K})(\text{Mg},\text{Fe}^{+2})_3\text{Fe}_6^{+3}(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{O},\text{OH})_4$. As propriedades gemológicas incluem elevada densidade relativa (3.20 g/cm^3) índice de refração ($1.687\text{-}1.669$) e birrefringência (0.018). Possui um pleocroísmo que vai de marrom escuro/verde-oliva a verde azeitona claro/marrom claro

Foitita

Exemplares pretos azulados, incomum encontrado principalmente na Califórnia. Com índices de refração (1.644-1.642), birrefringência (0.022) e densidade relativa (3.17 g/cm³) considerados medianos para o grupo da turmalina. Sua fórmula química não é bem definida e o pleocroísmo variável.

Liddicoatita

Conhecida por seu complexo zoneamento multicolorido; incomum, encontrada principalmente em Madagascar. Sua estrutura química é Ca(Li,Al)₃Al₆B₃Si₆O₂₇(OH)₃(OH, F). As propriedades gemológicas incluem elevado índice de refração (1.737-1.621), birrefringência baixa (0.016) e densidade relativa (3.02 g/cm³) baixa. Assim como a elbaíta as cores do pleocroísmo são diversas.

Magnesiofoitita

Minerais marrom esverdeados, cinza azulado. Raro, encontrado principalmente em Honshu, Japão. Com índices de refração (1.650-1.624), birrefringência (0.026) e uma baixíssima densidade relativa (2.96 g/cm³), a menor DR do grupo da turmalina. Sua fórmula química não é bem definida e o pleocroísmo idem.

Olenita

Cristais rosa pálido. Raro, encontrado principalmente na Península de Kola, na Rússia. Sua estrutura química é não bem definida bem como o pleocroísmo. As propriedades gemológicas incluem elevado índice de refração (1.737-1.621), birrefringência baixa (0.016) e densidade relativa (3.02 g/cm³) baixa.

Povondraíta

Também chamado de ferridravita, preta, quase opaco. Fonte primária rara, Cochabamba, Bolívia. Não possui fórmula química bem definida, tampouco como o pleocroísmo. As propriedades gemológicas incluem elevadíssimo índice de refração (1.820-1.734) o maior entre as turmalinas, birrefringência igualmente alta (0.057) e densidade relativa (3.33-3.18 g/cm³).

Rossmanita

Minerais na cor rosa a marrom. Fonte primária rara, Strážek Moldanubicum, República

Tcheca. As propriedades gemológicas incluem índice de refração (1.645-1.642) e birrefringência (0.021) moderados, densidade relativa (3 g/cm^3) baixa. Não possui fórmula química bem definida, tampouco como o pleocroísmo.

Schorl

Comum, possui muitas fontes. Ocorre nas cores verde, preto, marrom, azul ou azul escuro. Sua fórmula química é $\text{Na}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Al}_6\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH})_3(\text{OH}, \text{F})$, seu pleocroísmo é muito variável. Possui uma densidade relativa elevada a baixa ($3.24\text{-}2.82 \text{ g/cm}^3$), sua birrefringência (0.016-0.036) é variável e o índice de refração igualmente oscilante (1.698-1.620).

Tsiliaisita

É uma variedade rica em manganês de elbaíta. Possui como estrutura química $\text{Na}(\text{Mn},\text{Al})_3\text{Al}_6(\text{BO})_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{O},\text{OH}, \text{F})_4$. Um pleocroísmo bem definido se faz presente indo de um amarelo marrom para um amarelo intenso. Suas propriedades gemológicas e físicas são bastante parecidas com as da elbaíta, incluem índice de refração (1.648-1.622) e birrefringência (0.023-0.028) moderados, densidade relativa (3.13 g/cm^3) média para o grupo.

Uvita

Possui propriedades gemológicas praticamente dentro da média do grupo das turmalinas, índice de refração (1.660-1.612), birrefringência (0.017-0.021) e densidade relativa (3.10 g/cm^3). Ocorre nas cores preto, verde, marrom, ocasionalmente outras cores; ocorrendo de várias fontes. Possui como fórmula química $\text{CaMg}_3(\text{Al}_5\text{Mg})\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH})_3(\text{OH}, \text{F})$

Vanadiumdravita

Ocorre nas cores verde escuro a preto. As propriedades gemológicas incluem elevadíssimo índice de refração (1.786-1.729) o maior entre as turmalinas, birrefringência igualmente alta (0.057) e densidade relativa (3.32 g/cm^3).

4. GEOLOGIA REGIONAL

Do ponto de vista geológico, o Distrito Pegmatítico Quixeramobim compreende uma aglutinação de segmentos crustais com idades arqueano-paleoproterozoicas (sequências vulcanossedimentares, com rochas máficas e ultramáficas associadas, e suítes TTGs (tonalito-trondhjemitó-granodiorito) do terreno granito-greenstone Troia-Pedra Branca) e proterozoicas (complexos Ceará/Independência e Tamboril/Santa Quitéria), tanto do ponto de vista cartográfico quanto pela caracterização litoquímica, geocronológica e de ambiência tectônica. Além disso, possui um campo pegmatítico que se insere geologicamente na porção central da região de Dobramentos Nordeste ou Província Borborema, a qual também faz parte dos dobramentos Jaguaribeanos de Brito Neves (1975). A configuração atual, em quase sua totalidade, é herdada do ciclo Tecto-orogênico Brasileiro que foi processada no final do proterozoico superior.

4.1 Província Borborema

Geologicamente, a área de Quixeramobim está inserida no Domínio Ceará Central (Figura 2) (Ceará Central, Caby & Arthaud, 1986; Domínio Ceará Central, Jardim de Sá, 1994, Monié *et al*, 1997), no qual tal domínio pertence à porção setentrional da Província Borborema.



Figura 2: Localização da Província Borborema no Brasil (Schobbenhaus & Campos, 1984).

Representando o extremo nordeste da Plataforma Sulamericana, a Província Borborema caracteriza-se por atividade tectônica intensa ao final do Proterozóico, resultado de colisão continental compreendendo os crátons São Luís-Oeste África e São Francisco-Congo. A colisão, correspondendo ao Ciclo Brasileiro-Pan-Africano, completou-se, no caso da Província Borborema, por volta de 600- 550 Ma.

A maioria dos autores subdividem a porção setentrional da Província Borborema em três ou quatro domínios (ver, p. ex, Trompette, 1994) (Figura 3).

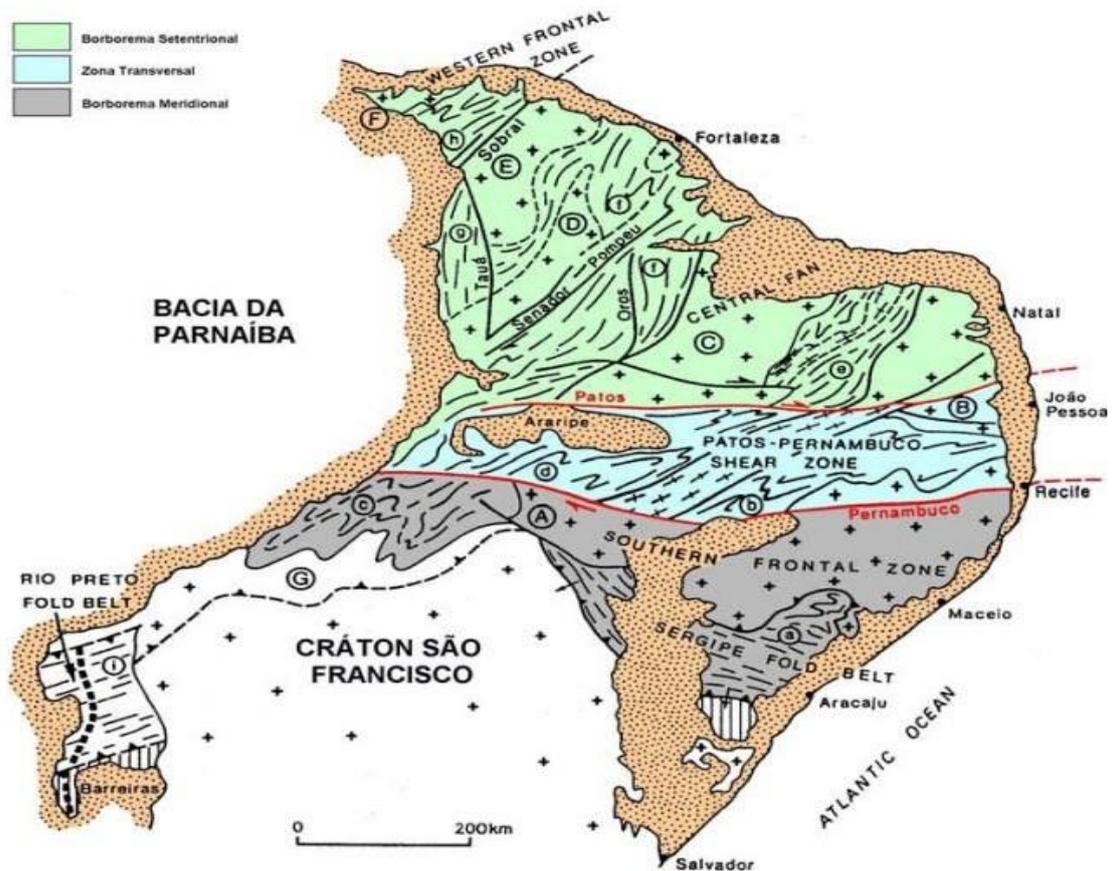


Figura 3: Subdivisão da Província Borborema (Trompette, 1994).

Domínio Ceará Central

São conhecidas algumas definições a respeito da geografia do Domínio Ceará Central (DCC), nas quais consideram que o Lineamento Transbrasiliano (Sobral-Pedro II), megatranscorrência dextral, por muitos interpretado como prolongamento, no Brasil, do Lineamento 4°50 (Trompette, 1994), constitui o limite oeste do domínio, encoberto em algumas partes pelas rochas sedimentares da Bacia do Parnaíba.

O Domínio Ceará Central é produto de longa e complexa história geológica, iniciada nos tempos arqueanos. Alguns episódios de acreção crustal e vários ciclos orogênicos registraram estruturas com características magmáticas, metamórficas e deformacionais.

As feições geológicas atuais do domínio (Figura 4) foram obtidas no final do Ciclo Brasileiro/Pan Africano (fim do Proterozóico/início do Paleozóico), depois da colisão continental incluindo os crátons São Luis/Oeste África e São Francisco/Congo, fazendo parte da formação da Pangea e Gondwana Ocidental.

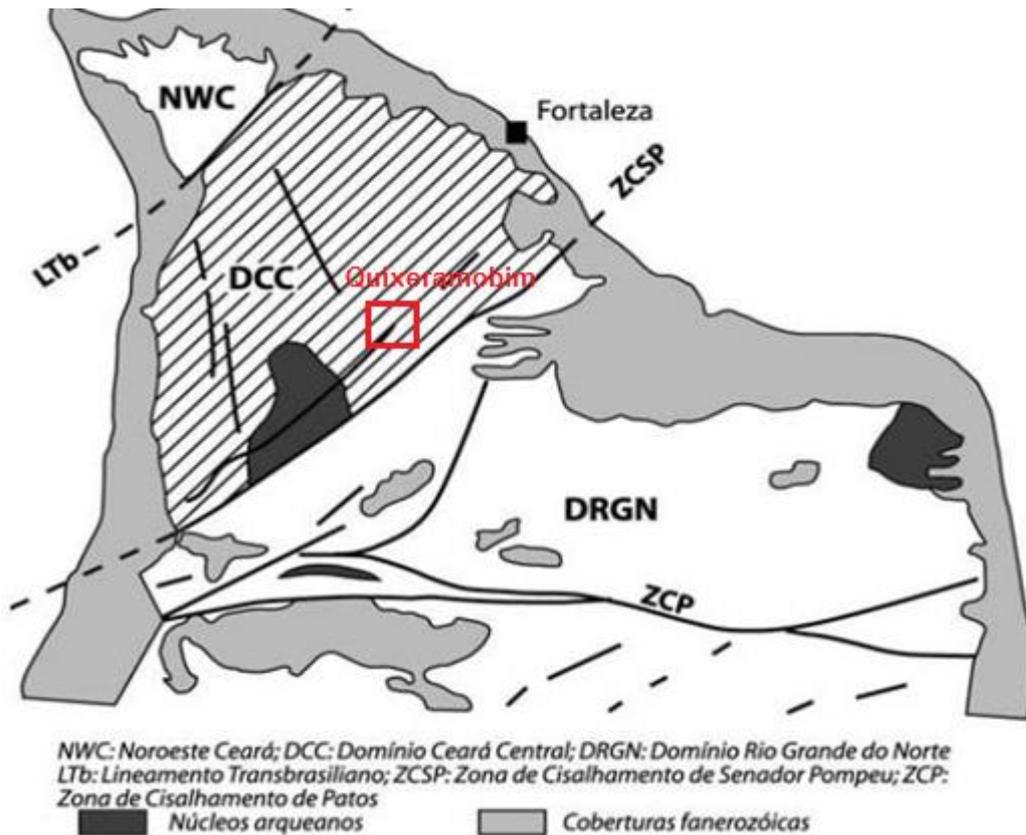


Figura 4: Domínio Ceará Central limitado a noroeste pelo Lineamento Transbrasiliano e a sudeste pela Zona de Cisalhamento de Patos (Fetter, 1999).

Rochas do Arqueano

Os afloramentos de terrenos arqueanos do Domínio Ceará Central, neste contexto, ocorrem nas proximidades da região de Pedra Branca e Mombaça. Mais recentemente, várias datações U-Pb em zircão confirmaram a existência de pequeno bloco neoarqueano, em torno de 2,7-2,8 Ga (Figura 4) na região (Fetter, 1999).

Com cerca de 6.000 km², recortado pela zona de cisalhamento dúctil de Sabonete-Inharé, o bloco apresenta limites ainda mal definidos, em grande parte por causa das grandes semelhanças litológicas que apresenta com os terrenos paleoproterozóicos vizinhos (Fetter, 1999). Ainda se necessita de estudos geocronológicos para sua melhor delimitação. Dados geocronológicos obtidos recentemente (idades modelo Sm/Nd) mostram que este bloco arqueano passou por um intenso retrabalhamento no paleoproterozóico.

Rochas do Paleoproterozóico

Rochas de idade paleoproterozóica são comuns no Domínio Ceará Central,

correspondendo a maioria da área aflorante. Dessa forma, podem ser subdivididas em duas sub-unidades: os terrenos do tipo TTG que constituem o Complexo Cruzeta junto com os terrenos arqueanos (Cavalcante *et al.*, 2003) e os terrenos granito gnaisses.

Terrenos TTG

Os terrenos TTG (tonalito-trondhjemitó-granodiorito) bordeiam a noroeste o bloco arqueano de Pedra Branca, aflorando desde a região de Madalena/Boa Viagem até a região de Choró. São formados essencialmente por rochas metaplutônicas de composição tonalítica a granodiorítica associadas a faixas supracrustais (Suíte Metamórfica Algodões-Choró - Martins, 2000) constituídas de rochas metavulcânicas básicas (anfíbolitos com ou sem granada) e rochas metassedimentares diversas, inclusive formações ferríferas e manganésíferas bandadas.

Estas sequências foram datadas pelo método U-Pb em zircão (Fetter, 1999; Martins, 2000). Os resultados apresentados são compatíveis e apontam para idade em torno de 2,1-2,13 Ga para os ortognaisses tonalíticos. Em amostras dos anfíbolitos da Sequência Algodões, uma isócrona Sm-Nd em rocha total (Martins & Oliveira, 2004) forneceu idade de ca. 2,23 Ga compatível, segundo os autores, com o caráter intrusivo dos tonalitos/granodioritos nas rochas supracrustais.

Tanto no caso dos ortognaisses como das rochas supracrustais, as idades modelo são muito próximas das idades U-Pb e os valores ϵ_{Nd} são positivos, mostrando que se trata de material juvenil. Segundo Martins *et al.* (1998) e Martins & Oliveira (2004).

É provável que a unidade atualmente denominada Complexo Cruzeta tenha resultado da acreção de vários arcos insulares paleoproterozóicos (idades compreendidas entre 2,1 e 2,15 Ga) em torno de pequeno núcleo arqueano (Fetter, 1999).

Como no caso do Complexo Pedra Branca, é predominante, nesta unidade, o registro deformacional (tangencial) e metamórfico (fácies anfíbolito alto, às vezes acompanhado de migmatização mais ou menos acentuada) relacionados ao Ciclo Brasileiro.

Terrenos gnaiss-migmatíticos

Trata-se de associação complexa de rochas metaplutônicas, na qual predominam rochas de composição granítica, embora metatonalitos e metagranodioritos também sejam comuns, bem como rochas supracrustais diversas (metapelitos, quartzitos, rochas

calcissilicáticas, metavulcânicas básicas, etc.). Assemelham-se ao embasamento do Domínio Rio Grande do Norte (Complexo Caicó) ou do Domínio Orós-Jaguaribe. Do ponto de vista geocronológico, estes terrenos não foram bem caracterizados no Ceará Central, mas é possível que, como nos domínios vizinhos, apresentam TDM compreendida entre 2,4 e 2,7 Ga, indicando o retrabalhamento de crosta arqueana (Fetter, 1999).

Rochas do Meso-Neoproterozóico

O Meso-Neoproterozóico é caracterizado por coberturas metassedimentares que podem ser reunidas no Complexo Ceará (Arthaud *et al.*, 1998).

Boa parte do Domínio Ceará Central está coberta por rochas metassedimentares e foram subdividas, com conotações apenas cartográficas, em sequências informais (sequências Itatira, Canindé, Independência, etc. Arthaud, 1998). As subdivisões não apresentam, por enquanto, significado geológico claro e não se pode dizer se representam o resultado de evolução separada de várias bacias ou se correspondem ao desmembramento de uma única entidade.

Tais unidades possuem certas características em comum: são associações de rochas essencialmente pelíticas ou semi-pelíticas, com contribuições variáveis, mas subordinadas, de quartzitos e carbonatos (mármore e rochas calcissilicáticas). A presença de rochas metavulcânicas ácidas ou básicas é limitada.

Sua idade deposicional original ainda não é muito nítida: existe, no Domínio Ceará Central, apenas uma idade U-Pb de 772 ± 31 Ma em zircão de metariolito da Sequência Independência (Fetter, 1999) e esta pode ser interpretada como idade de deposição, mas apenas como uma das alternativas possíveis.

Atualmente, os dados de idade modelo TDM disponíveis para as sequências não são, ainda, conclusivos, mas demonstram que boa parte do material sedimentar é proveniente da erosão dos domínios paleoproterozóicos ou mesmo arqueanos que formam seu embasamento, com idades modelo tão antigas como 2,25 Ga na sequência de Itatira (Santos *et al.*, 2003). Entretanto, boa parte dos valores TDM disponíveis para estas sequências (Fetter, 1999; Santos *et al.*, 2003) é mesoproterozóica e, no caso da região de Redenção, existe pelo menos uma idade TDM neoproterozóica (949 Ma em rochas calcissilicáticas). Considerando a importante contribuição do continente paleoproterozóico como fonte de material, é provável que a deposição dos sedimentos originais seja bem mais recente do que os TDM mais novos, o que

leva a pensar que ela aconteceu, na realidade, no Neoproterozóico, ao contrário do que foi considerado por Cavalcante *et al.*, no Mapa Geológico do Ceará (2003), que atribuíram as sequências ao Paleoproterozóico.

Esta conclusão condiz diretamente com a idade dos metarriolitos de Independência, que representariam manifestação magmática associada a extensão e afinamento crustal que culminaram com a abertura de bacia oceânica (Oceano Farusiano na Província do Hoggar, África do Oeste, Caby *et al.*, 1981) posteriormente fechada durante a colisão brasileira. Neste caso, o Complexo Ceará, pelo menos no centro do Domínio Ceará Central, corresponderia a depósitos de margem passiva neoproterozóica.

Porém, os dados geocronológicos disponíveis ainda são insuficientes para explicar de maneira satisfatória a história deposicional das rochas metassedimentares, e mostram que sua história metamórfica/deformacional é monocíclica e que o único ciclo orogênico que afetou as coberturas foi o Ciclo Brasileiro, ao final do Neoproterozóico. A idade do metamorfismo brasileiro no Ceará Central foi obtida em paragnaisses da região de Itatira (Santos *et al.*, 2003).

Complexo Tamboril-Santa Quitéria

Tal complexo está representado desde os mapeamentos efetuados pela CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) nos anos setenta, aparecendo bem delimitada no Mapa Geológico do Ceará publicado em 1983 (Cavalcante *et al.*, 1983). Uma das suas características marcantes é a intensa migmatização associada à presença de grande volume de granitos anatóxicos e de restitos constituídos essencialmente por anfibolitos e rochas calciossilicáticas.

Fetter *et al.* (2003) chegaram à conclusão que os protólitos desta unidade foram gerados em ambiente de arco magmático continental, acima de zona de sutura localizada a oeste (possivelmente no Lineamento Transbrasileiro, posteriormente reativada em transcorrência dextral) e com mergulho para leste.

Dessa forma, a inferência foi baseada inicialmente na assinatura isotópica (idades modelo) das rochas migmatíticas (de protólitos dioríticos a graníticos) e da sola metassedimentar da unidade, com várias idades modelo neoproterozóicas (Fetter *et al.*, 2003). No caso das rochas metaplutônicas do Complexo Tamboril-Santa Quitéria, os dados implicam em mistura de magmas juvenis neoproterozóicos com gnaisses paleoproterozóicos circunvizinhos (Fetter *et al.*, 2003). As rochas metassedimentares basais seriam, em parte,

produto da erosão do material juvenil. A intensa deformação e a anatexia avançada, adquiridos durante o pico da colisão brasileira, dificultam a reconstituição da geometria do arco.

As datações U-Pb em zircão de vários corpos graníticos deformados do complexo variam entre 649 e 615 Ma. Os granitos representam os últimos estágios da evolução do arco, caracterizados por aumento progressivo da participação crustal, principalmente por refusão do material magmático mais precoce (Fetter *et al.*, 2003).

Ainda, Fetter *et al.* (2003) consideram a possibilidade da sequência metassedimentar de Independência ser uma bacia de back-arc formada durante a evolução do arco de Santa Quitéria, que teria se iniciado por volta de 770 Ma. Esta interpretação é prejudicada pela natureza da sedimentação da seqüência, caracteristicamente de natureza plataformal. A interpretação de que o Complexo Ceará representa uma margem passiva e o Complexo Tamboril-Santa Quitéria representa um arco magmático implica na existência de uma zona de sutura na interface entre as duas unidades.

Granitóides brasileiros

As fases sucessivas da colisão estão marcados pela geração de granitos em todas as cadeias: os pré-colisionais ou arcos magmáticos continentais, associados à subducção, os sin-colisionais associados à fase tangencial, e os tardi-orogênicos e os pós-orogênicos associados ao desenvolvimento de transcorrências e desespessamento da crosta.

Resumidamente, os granitos sin-colisionais podem ser subdivididos em dois conjuntos: os granitos sin-fase tangencial, associados ao espessamento da crosta, e os granitos sintranscorrências, associados à fase de extrusão lateral consecutiva ao espessamento.

Dessa forma, os granitos associados ao estágio tangencial ainda não são muito bem conhecidos, pois boa parte deles se encontra, atualmente, na forma de lâminas gnáissicas muito deformadas e difíceis, no presente estado da cartografia, de serem individualizados. Dois exemplos de granitos do tipo S ocorrem na região compreendida entre a Zona de Cisalhamento Dúctil de Senador Pompeu e a Zona de Cisalhamento Dúctil de Orós: trata-se dos muscovita granitos de Senador Pompeu e de Banabuiú, respectivamente. De outro lado, o nível crustal atualmente exposto no Domínio Ceará Central é muito profundo e grande parte dos granitos do tipo S gerados nas zonas de intensa fusão crustal (tipo leucogranitos himalaianos) provavelmente foi eliminada há tempo pela erosão quando da volta da crosta à sua espessura normal.

Rochas do Paleozóico

Como supracitado, os últimos granitos relacionados com a orogênese brasileira datam do Cambriano médio (Granito da Serra do Barriga, $522 \pm 7,6$ Ma pelo método U-Pb em monazita). A dinâmica de movimentação das megazonas de cisalhamento se prolonga, em condições frágeis, provavelmente até o fim do Cambriano / início do Ordoviciano e, no caso do Lineamento Transbrasiliano, até o Devoniano (provavelmente de maneira descontínua). Ao final da história brasileira, formam-se pequenas bacias do tipo pull-apart controladas pela atividade tardia das transcorrências (bacias de Jaibaras, Cococi, entre outras, Parente *et al*, 2004).

Pegmatitos

Pegmatito é uma rocha ígnea, principalmente de composição granítica, que se distingue de outras rochas ígneas pelas suas variadas texturas grosseiras, ou pela sua abundância de cristais com textura gráfica ou outras características texturais. Portanto o termo "pegmatito" é baseado mais em aspectos texturais do que composicionais (London, 2008).

No que diz respeito aos aspectos texturais, os pegmatitos do nordeste do Brasil são homogêneos e heterogêneos. Os pegmatitos homogêneos apresentam textura uniforme, ao passo que os pegmatitos heterogêneos possuem alto grau de diferenciação textural, apresentando um zoneamento interno distinto, completo ou não, com cristais bem desenvolvidos em tamanho e ocorrência de minerais raros. Há, ainda, segundo (Rolff, 1946), pegmatitos mistos, que são intermediários entre os pegmatitos homogêneos e heterogêneos, e apresentam bolsões de minerais (corpos de substituição), ao contrário de zonas individualizadas.

A maior parte dos pegmatitos ocorre encaixados em rochas metamórficas e geralmente estão relacionados com batólitos graníticos, a partir dos quais parecem ter derivado, adquirindo assim a mesma assinatura geoquímica. Usualmente, os pegmatitos aparentam ser ligeiramente mais recentes do que o granito parental e são enriquecidos em certos minerais ou elementos, como o Li, Cs, Y, Nb, Ta ou B. Os pegmatitos tendem a concentrar-se em grupos e são distribuídos ao redor da intrusão granítica, sendo esta distribuição influenciada quer pela natureza e estrutura da rocha encaixante, quer pelo nível de erosão posteriormente atingido, assim como pelo grau de fracionamento atingido pelos magmas pegmatíticos. Este

tipo de zonamento é mais comum nos pegmatitos da família LCT (Li, Cs,Ta) (Simmons, et al., 2003).

Os corpos pegmatíticos do município de Quixeramobim estão relacionados a intrusões graníticas de idade brasileira. Esses corpos intrusivos seccionam litotipos dos complexos Ceará, unidade Canindé, nas porções mais a norte; e Acopiara, nas regiões de Solonópole e Jaguaribe. Essas unidades são constituídas essencialmente por rochas paraderivadas de médio a alto grau metamórfico; e por corpos granitoides, de dimensões variadas, de idades neo e paleoproterozoicas (DNPM, 1986).

Distrito Pegmatítico de Solonópole Quixeramobim (DPSQ)

Para Souza (1985) o Distrito Pegmatítico Solonópole Quixeramobim (DPSQ) pode ser individualizado em cinco campos pegmatíticos: (i) O primeiro destes campos, de sul para norte, corresponde ao campo de Nova Floresta-Feiticeiro, situado no município de Jaguaribe, que é constituído por pegmatitos mineralizados em cassiterita e tantalita/columbita; (ii) O segundo campo, a NE de Solonópole contém pegmatitos lítio-berilo-tantalíferos e lítio-berilo-estaníferos, com ocorrência de veios pegmatíticos com fluorita; (iii) O campo a W e NW de Solonópole é o maior detentor de pegmatitos lítio-berilo-tantalíferos do Distrito Solonópole-Quixeramobim; (iv) O campo de Berilândia-Carnaubinha, onde fica localizado a região de Morro dos Tonhos, local de proveniência dos cristais de turmalina estudados, detém pegmatitos portadores de berilo industrial, em sua maioria, além de água-marinha e turmalina gemológica; (v) O campo de Rinaré-Banabuiú apresenta pegmatitos ricos em turmalina e berilo, situado ao norte da cidade de Banabuiú.

O DPSQ está situado no centro-oeste do Ceará, que apresenta a maior concentração de pegmatitos com potencial econômico, abrangendo os municípios de Solonópole, Quixadá, Milhã e Banabuiú (Souza, 1985; Marques Júnior, 1992). As amostras de turmalina estudadas nesta pesquisa provêm do DPSQ, em Quixeramobim, englobado pelo Campo Pegmatítico Berilândia-Carnaubinha que se insere geologicamente no Domínio Ceará Central. Também foram realizados diferentes estudos na área de Distrito Pegmatítico Solonópole Quixeramobim (DPSQ) por autores como: Nogueira Neto *et al* (2019), Trumbull *et al* (2013), Leal Neto (2005) e Soares *et al* (2004).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram selecionadas de modo aleatório dez amostras de turmalina sendo três azuis claras (Figuras 5A, 5B e 5C), quatro verdes (Figuras 6D, 6E, 6F e 6G) e três rosas (Figura 7H, 7I e 7J); em um montante de exemplares já separados previamente por possuírem uma cor relativamente forte e uma boa diafaneidade. Ressaltando que a intenção foi de adquirir uma amostragem representativa da população de turmalinas do município de Quixeramobim utilizadas como gemas. O trabalho foi dividido em três etapas.

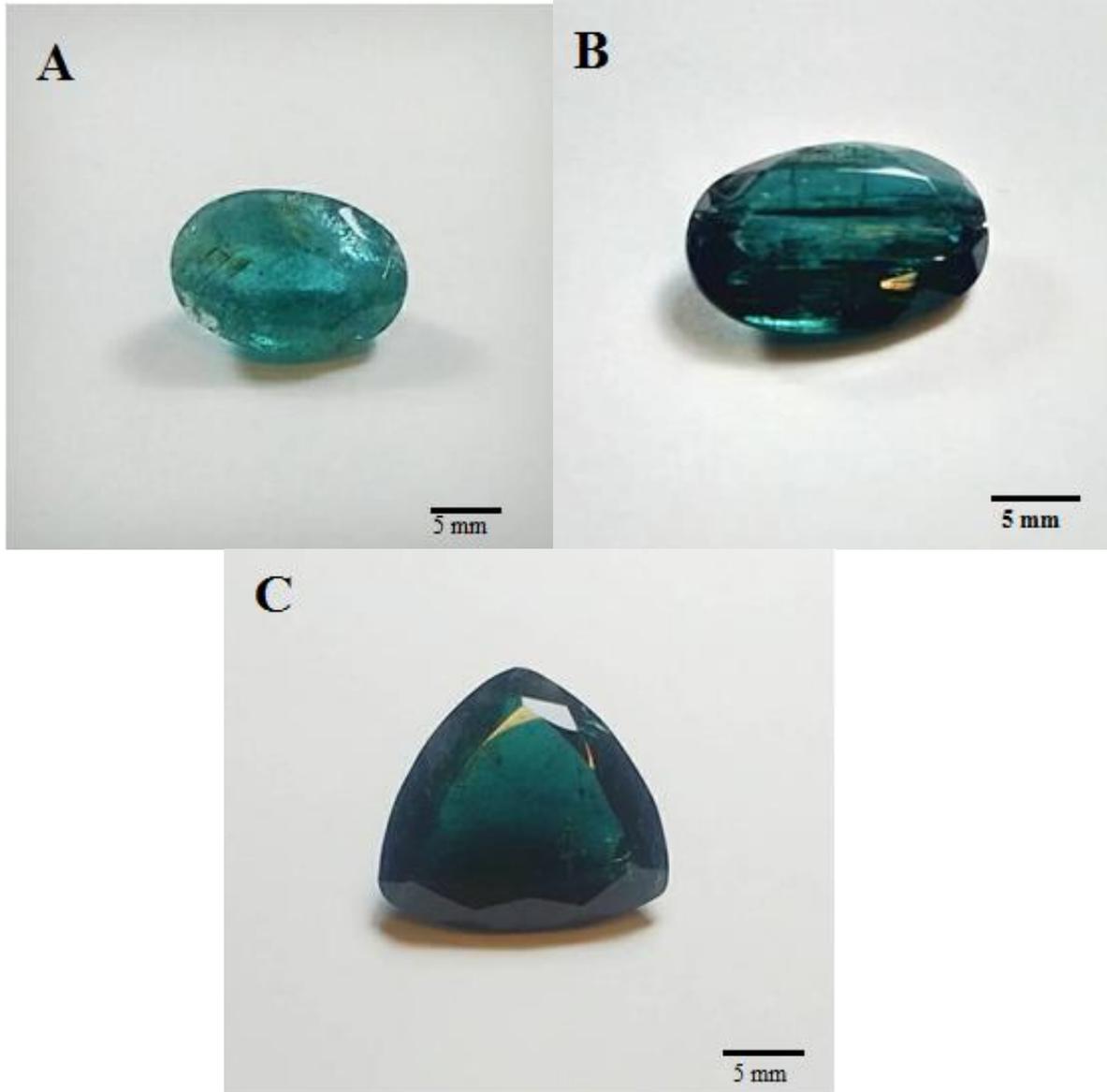
Na primeira etapa o método de trabalho proposto para análise das dez amostras de turmalinas, incluiu a utilização de diversos instrumentos gemológicos, sendo aplicado o uso de refratômetro, balança hidrostática, dicrosscópico, espectroscópico, lâmpada fluorescente e microscópico gemológico.

Na segunda fase, para constatação da qualidade gemológica e cálculo do valor comercial das amostras foi utilizado o “Boletim Referencial de Preços de Diamantes e Gemas de Cor”, em decorrência dos dados do boletim serem de 2009, os preços foram corrigidos de acordo com a inflação do ano (2019) vigente; adicionalmente, foi utilizada uma tabela empregada pelo comércio que possui 384 cores e códigos hexadecimais (Código de cor: Infográfico dos códigos das cores em HTML, 2013)(Figura 8) para avaliação da cor dos minerais.

A terceira etapa consistiu em realizar análises com os minerais da região citada, com o Polariscópio Gomes (Disposição Construtiva Introduzida em Polariscópio Para Estudo e Análise de Gemas); possui como finalidade principal determinar o grau de facilidade em visualizar o caráter e sinal óptico da figura de interferência de minerais e gemas, utilizando como referência a Tabela de figuras de interferência (Figura 9). Na presente pesquisa foram realizadas análises das figuras de interferência com o Polariscópio Gomes em dez amostras de turmalinas.

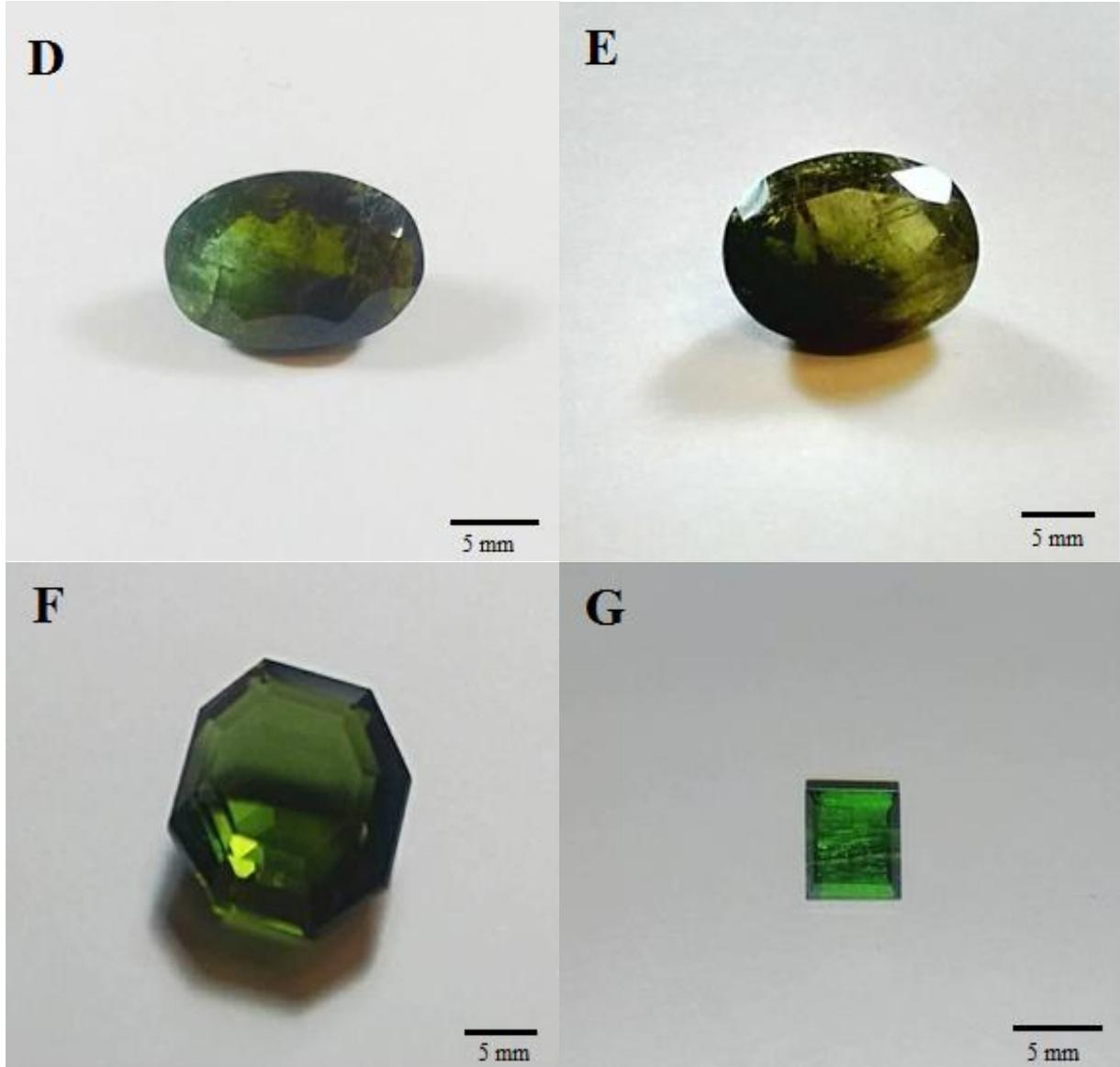
Na quarta etapa, foram analisados os aspectos vibracionais, a organização cristalográfica e a interpretação dos dados geoquímicos, o que permitiu perceber a correlação entre a composição química das amostras e alguns aspectos ópticos.

Figura 5: Turmalinas azuis do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim analisadas. A) Turmalina azul clara (Dark Turquoise), com as seguintes dimensões: 16.33 x 11.07 x 7.10 mm. B) Turmalina azul escura (London Blue Topaz), com as seguintes dimensões: 16.40 x 10.80 x 4.94 mm. C) Turmalina azul escura (Deep Sky Blue 4), com as seguintes dimensões: 19.60 x 18.40 x 8.40 mm.



Fonte: autor

Figura 6: Turmalinas verdes do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim analisadas.
D) Turmalina verde clara (Chartreuse 4), com as seguintes dimensões: 15.32 x 10.02 x 7.07 mm.
E) Turmalina verde escura (Olive Drab), com as seguintes dimensões: 16.30 x 12.56 x 8.37 mm.
F) Turmalina verde clara (Green 3), com as seguintes dimensões: 14.20 x 13.96 x 6.37 mm.
G) Turmalina verde intensa (Chartreuse 3), com as seguintes dimensões: 5.85 x 5.84 x 4.65 mm.



Fonte: autor

Figura 7: Turmalinas rosa do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim analisadas. H) Turmalina rosa (Hot Pink 2) analisada, com as seguintes dimensões: 14.30 x 10.07 x 4.61 mm. I) Turmalina rosa (Deep Pink 1) analisada, com as seguintes dimensões: 15.99 x 12.12 x 5.98 mm. J) Turmalina rosa (Deep Pink 2) analisada, com as seguintes dimensões: 7.20 x 4.93 x 3.38 mm.



Fonte: autor

Figura 8: Infográfico dos códigos das cores em HTML.

LightSteelBlue1	#CAEFFF	Brown1	#FF4040	SeaGreen3	#43CDB8	LightSteelBlue	#B0C4DE	Seashell3	#F08080	Azure3	#C0C0C0	Pink4	#8B4513	Goldenrod4	#D2B48C
LightSteelBlue2	#B0C4DE	Brown2	#E9967A	SeaGreen4	#2E8B57	LightBlue	#ADD8E6	Seashell4	#F5DEB3	Azure4	#66B3FF	LightPink1	#F08080	DarkGoldenrod1	#DAA520
LightSteelBlue3	#4682B4	Brown3	#CD3333	PaleGreen1	#90EE90	PowderBlue	#B0E0E6	AntiqueWhite1	#FAFAD2	StateBlue1	#66B3FF	LightPink2	#F08080	DarkGoldenrod2	#DAA520
LightSteelBlue4	#66B3FF	Brown4	#8B4513	PaleGreen2	#90EE90	PaleTurquoise	#AFEEEE	AntiqueWhite2	#FAFAD2	StateBlue2	#66B3FF	LightPink3	#F08080	DarkGoldenrod3	#DAA520
LightBlue1	#66B3FF	Salmon1	#FF4040	PaleGreen3	#7FFFD4	DarkTurquoise	#00CED1	AntiqueWhite3	#FAFAD2	StateBlue3	#66B3FF	LightPink4	#F08080	DarkGoldenrod4	#DAA520
LightBlue3	#90EE90	Salmon3	#FF4040	SpringGreen1	#00FF00	Turquoise	#40E0D0	Bisque1	#F5DEB3	RoyalBlue1	#4169E1	PaleVioletRed2	#EE82EE	RosyBrown2	#D2B48C
LightBlue4	#66B3FF	Salmon4	#FF4040	SpringGreen2	#00FF00	Cyan	#00FFFF	Bisque2	#F5DEB3	RoyalBlue2	#4169E1	PaleVioletRed3	#EE82EE	RosyBrown3	#D2B48C
LightCyan1	#00FFFF	LightSalmon1	#FF4040	SpringGreen3	#00FF00	LightCyan	#00FFFF	Bisque3	#F5DEB3	RoyalBlue3	#4169E1	PaleVioletRed4	#EE82EE	RosyBrown4	#D2B48C
LightCyan2	#00FFFF	LightSalmon2	#FF4040	SpringGreen4	#00FF00	CadetBlue	#5F9EA0	Bisque4	#F5DEB3	RoyalBlue4	#4169E1	Maroon1	#800000	IndianRed1	#CD5C5C
LightCyan3	#00FFFF	LightSalmon3	#FF4040	Green1	#00FF00	MediumAquaMarine	#66CDAA	PeachPuff1	#FFDAB9	Maroon2	#800000	Maroon2	#800000	IndianRed2	#CD5C5C
LightCyan4	#00FFFF	LightSalmon4	#FF4040	Green2	#00FF00	Aquamarine	#7FFFD4	PeachPuff2	#FFDAB9	Maroon3	#800000	Maroon3	#800000	IndianRed3	#CD5C5C
PaleTurquoise1	#90EE90	Orange1	#FF4040	Green3	#00FF00	DarkGreen	#006400	PeachPuff3	#FFDAB9	Maroon4	#800000	Maroon4	#800000	IndianRed4	#CD5C5C
PaleTurquoise2	#90EE90	Orange2	#FF4040	Green4	#00FF00	DarkOliveGreen	#556B2F	PeachPuff4	#FFDAB9	Sienna1	#A0522D	VioletRed1	#DDA0DD	Sienna1	#A0522D
PaleTurquoise3	#90EE90	Orange3	#FF4040	Chartreuse1	#7FFFD4	DarkSeaGreen	#2F4F4F	NavajoWhite1	#FFDAB9	DodgeBlue1	#1E90FF	VioletRed2	#DDA0DD	Sienna2	#A0522D
PaleTurquoise4	#90EE90	Orange4	#FF4040	Chartreuse2	#76EE00	SeaGreen	#2E8B57	NavajoWhite2	#FFDAB9	DodgeBlue2	#1E90FF	VioletRed3	#DDA0DD	Sienna3	#A0522D
CadetBlue1	#4682B4	DarkOrange1	#FF4040	Chartreuse3	#66CD00	MediumSeaGreen	#3CB371	NavajoWhite3	#FFDAB9	DodgeBlue3	#1E90FF	VioletRed4	#DDA0DD	Sienna4	#A0522D
CadetBlue2	#4682B4	DarkOrange2	#FF4040	Chartreuse4	#458B00	LightSeaGreen	#20B2AA	NavajoWhite4	#FFDAB9	DodgeBlue4	#1E90FF	Magenta1	#800080	Burlywood1	#F0E68C
CadetBlue3	#4682B4	DarkOrange3	#FF4040	OliveDrab1	#8FBC8F	SpringGreen	#00FF00	LemonChiffon1	#FFFACD	SteelBlue1	#3CB371	Magenta2	#800080	Burlywood2	#F0E68C
CadetBlue4	#4682B4	DarkOrange4	#FF4040	OliveDrab2	#8FBC8F	PaleGreen	#90EE90	LemonChiffon2	#FFFACD	SteelBlue2	#3CB371	Magenta3	#800080	Burlywood3	#F0E68C
CadetBlue1	#4682B4	DarkOrange1	#FF4040	OliveDrab3	#8FBC8F	SeaGreen	#2E8B57	LemonChiffon3	#FFFACD	SteelBlue3	#3CB371	Magenta4	#800080	Burlywood4	#F0E68C
Turquoise2	#40E0D0	Coral1	#FF4040	OliveDrab4	#8FBC8F	Green	#008000	LemonChiffon4	#FFFACD	SteelBlue4	#3CB371	Orchid1	#FF8C00	Wheat1	#F5DEB3
Turquoise3	#40E0D0	Coral2	#FF4040	DarkOliveGreen1	#556B2F	Chartreuse	#7FFFD4	Cornsilk1	#FFF5EE	DeepSkyBlue1	#00BFFF	Orchid2	#FF8C00	Wheat2	#F5DEB3
Turquoise4	#40E0D0	Coral3	#FF4040	DarkOliveGreen2	#556B2F	MedSpringGreen	#00FF00	Cornsilk2	#FFF5EE	DeepSkyBlue2	#00BFFF	Orchid3	#FF8C00	Wheat3	#F5DEB3
Cyan1	#00FFFF	Tomato1	#FF4040	DarkOliveGreen3	#556B2F	GreenYellow	#ADFF2F	Cornsilk3	#FFF5EE	DeepSkyBlue3	#00BFFF	Orchid4	#FF8C00	Wheat4	#F5DEB3
Cyan2	#00FFFF	Tomato2	#FF4040	DarkOliveGreen4	#556B2F	LimeGreen	#32CD32	Cornsilk4	#FFF5EE	DeepSkyBlue4	#00BFFF	Plum1	#DDA0DD	Wheat5	#F5DEB3
Cyan3	#00FFFF	Tomato3	#FF4040	Khaki1	#F0E68C	YellowGreen	#9ACD32	Ivory1	#FFFFE0	SkyBlue1	#87CEEB	Plum2	#DDA0DD	Wheat6	#F5DEB3
Cyan4	#00FFFF	Tomato4	#FF4040	Khaki2	#F0E68C	ForestGreen	#228B22	Ivory2	#FFFFE0	SkyBlue2	#87CEEB	Plum3	#DDA0DD	Wheat7	#F5DEB3
DarkSlateGray1	#2F4F4F	OrangeRed1	#FF4040	Khaki3	#F0E68C	OliveDrab	#6B8E23	Ivory3	#FFFFE0	SkyBlue3	#87CEEB	Plum4	#DDA0DD	Wheat8	#F5DEB3
DarkSlateGray2	#2F4F4F	OrangeRed2	#FF4040	Khaki4	#F0E68C	DarkKhaki	#8B8414	Ivory4	#FFFFE0	SkyBlue4	#87CEEB	Plum5	#DDA0DD	Wheat9	#F5DEB3
DarkSlateGray3	#2F4F4F	OrangeRed3	#FF4040	LightGoldenrod1	#FFD700	PaleGoldenrod	#F0E68C	Honeydew1	#FFFACD	LightSkyBlue1	#ADD8E6	Plum6	#DDA0DD	Wheat10	#F5DEB3
DarkSlateGray4	#2F4F4F	OrangeRed4	#FF4040	LightGoldenrod2	#FFD700	LightGoldenrodYellow	#F0E68C	Honeydew2	#FFFACD	LightSkyBlue2	#ADD8E6	Plum7	#DDA0DD	Wheat11	#F5DEB3
Aquamarine1	#7FFFD4	Red1	#FF0000	LightGoldenrod3	#FFD700	LightYellow	#FFFFE0	Honeydew3	#FFFACD	LightSkyBlue3	#ADD8E6	Plum8	#DDA0DD	Wheat12	#F5DEB3
Aquamarine2	#7FFFD4	Red2	#FF0000	LightGoldenrod4	#FFD700	Yellow	#FFFF00	Honeydew4	#FFFACD	LightSkyBlue4	#ADD8E6	Plum9	#DDA0DD	Wheat13	#F5DEB3
Aquamarine3	#66CDAA	Red3	#FF0000	LightYellow1	#FFFFE0	Gold	#FFD700	LavenderBlush1	#FFF0F5	StateGray1	#C0C0C0	Plum10	#DDA0DD	Wheat14	#F5DEB3
Aquamarine4	#458B74	Red4	#FF0000	LightYellow2	#FFFFE0	LightGoldenrod	#EEDD82	LavenderBlush2	#FFF0F5	StateGray2	#C0C0C0	Plum11	#DDA0DD	Wheat15	#F5DEB3
DarkSeaGreen1	#2E8B57	DeepPink1	#FF1493	LightYellow3	#C0C0C0	goldenrod	#DAA520	LavenderBlush3	#FFF0F5	StateGray3	#C0C0C0	Plum12	#DDA0DD	Wheat16	#F5DEB3
DarkSeaGreen2	#2E8B57	DeepPink2	#FF1493	LightYellow4	#C0C0C0	DarkGoldenrod	#8B0000	LavenderBlush4	#FFF0F5	StateGray4	#C0C0C0	Plum13	#DDA0DD	Wheat17	#F5DEB3
DarkSeaGreen3	#2E8B57	DeepPink3	#FF1493	Yellow1	#FFFF00	DarkGoldenrod1	#8B0000	LavenderBlush5	#FFF0F5	Chocolate3	#D2691E	Plum14	#DDA0DD	Wheat18	#F5DEB3
DarkSeaGreen4	#2E8B57	DeepPink4	#FF1493	Yellow2	#FFFF00	DarkGoldenrod2	#8B0000	LavenderBlush6	#FFF0F5	Chocolate4	#D2691E	Plum15	#DDA0DD	Wheat19	#F5DEB3
SeaGreen1	#2E8B57	HotPink1	#FF69B4	Yellow3	#FFFF00	DarkGoldenrod3	#8B0000	LavenderBlush7	#FFF0F5	Chocolate5	#D2691E	Plum16	#DDA0DD	Wheat20	#F5DEB3
SeaGreen2	#2E8B57	HotPink2	#FF69B4	Yellow4	#FFFF00	DarkGoldenrod4	#8B0000	LavenderBlush8	#FFF0F5	Chocolate6	#D2691E	Plum17	#DDA0DD	Wheat21	#F5DEB3
MistyRose1	#F5DEB3	Gold1	#FFD700	Gold1	#FFD700	RosyBrown1	#D2B48C	Chocolate1	#D2691E	Chocolate7	#D2691E	Plum18	#DDA0DD	Wheat22	#F5DEB3
MistyRose2	#F5DEB3	HotPink3	#FF69B4	Gold3	#FFD700	RosyBrown2	#D2B48C	Chocolate2	#D2691E	Chocolate8	#D2691E	Plum19	#DDA0DD	Wheat23	#F5DEB3
MistyRose3	#F5DEB3	HotPink4	#FF69B4	Gold4	#FFD700	RosyBrown3	#D2B48C	Chocolate3	#D2691E	Chocolate9	#D2691E	Plum20	#DDA0DD	Wheat24	#F5DEB3
MistyRose4	#F5DEB3	HotPink5	#FF69B4	Gold5	#FFD700	RosyBrown4	#D2B48C	Chocolate4	#D2691E	Chocolate10	#D2691E	Plum21	#DDA0DD	Wheat25	#F5DEB3
Azure1	#00FFFF	Pink1	#FF69B4	LightGreen	#90EE90	LightGreen	#90EE90	IndianRed1	#CD5C5C	Sienna1	#A0522D	Goldenrod1	#DAA520	Burlywood1	#F0E68C
Azure2	#00FFFF	Pink2	#FF69B4	LightGreen	#90EE90	LightGreen	#90EE90	IndianRed2	#CD5C5C	Sienna2	#A0522D	Goldenrod2	#DAA520	Burlywood2	#F0E68C
Azure3	#00FFFF	Pink3	#FF69B4	LightGreen	#90EE90	LightGreen	#90EE90	IndianRed3	#CD5C5C	Sienna3	#A0522D	Goldenrod3	#DAA520	Burlywood3	#F0E68C
Azure4	#00FFFF	Pink4	#FF69B4	LightGreen	#90EE90	LightGreen	#90EE90	IndianRed4	#CD5C5C	Sienna4	#A0522D	Goldenrod4	#DAA520	Burlywood4	#F0E68C

Fonte: Código de Cor (2013).

Figura 9: Tabela de figuras de interferência (caráter óptico) com analisador de gipso (2017).

ESTUDO CONOSCÓPICO AO MICROSCÓPIO DE LUZ POLARIZADA: TABELA DE FIGURAS DE INTERFERÊNCIA (CARÁTER ÓTICO) COM ANALISADOR DE GIPSO			
Indicatriz Uniaxial Positiva (Uni+)		Indicatriz Uniaxial Negativa (Uni-)	
Indicatriz Biaxial Positiva (Bi+) de Eixo Ótico			
Indicatriz Biaxial Negativa (Bi-) de Eixo Ótico			
Indicatriz Biaxial Positiva (Bi+) de Bissetriz Aguda			
Indicatriz Biaxial Negativa (Bi-) de Bissetriz Aguda			

Fonte: Fujimore & Ferreira (1987).

5.1 Refratômetro

Este instrumento é um dos mais úteis em gemologia para identificação das gemas, com ele é possível medir o índice de refração do mineral, desde que este índice esteja entre 1.40 a 1.81 e que o cristal seja transparente ou translúcido. É possível ainda determinar a birrefringência, caráter e sinal óptico das gemas analisadas, estas últimas são obtidas por meio de cálculos matemáticos.

Gemas podem ser classificadas como anisotrópicas ou isotrópicas, neste último caso, a substância pertence ao sistema cristalino cúbico, em que apenas um índice de refração (n) pode ser identificado no mineral, ou é um material amorfo, neste, torna-se impossível a leitura de um índice de refração, sendo atestada a falta de birrefringência, caráter e sinal óptico. Caso seja anisotrópico de caráter uniaxial, independentemente do sinal óptico, pertencerá a um desses sistemas cristalinos: Trigonal, Tetragonal e Hexagonal com dois índices de refração, se o mineral for de caráter biaxial, pertencerá aos sistemas cristalinos Ortorrômbico, Monoclínico ou Triclínico, em que cada mineral possui três índices de refração principais com diferentes direções e valores (Anderson, 1984).

Para obter o índice de refração, birrefringência, caráter e sinal óptico; por meio de uma leitura completa e com uma margem de erro mínima, torna-se necessário realizar de quatro a seis leituras, dependendo da dificuldade ao visualizar o índice de refração da gema, rotacionando o material aproximadamente em 45° graus a cada nova leitura (Anderson, 1984). Seu uso facilita especialmente a discriminação entre minerais ou materiais isotrópicos e os minerais do Município de Quixeramobim, uma vez que as gemas analisadas (turmalinas) são anisotrópicas (uniaxial).

5.2 Dicroscópio

Com este instrumento é possível visualizar o pleocroísmo das gemas. O pleocroísmo é causado pela absorção distinta da luz nos cristais birrefringentes, este é classificado de três formas; se a mudança de tonalidade no mineral for muito visível o pleocroísmo é classificado como forte, quando a variação não é tão visível este é tido como médio e quando a mudança é pouco perceptível é classificado como fraco. Este fenômeno não ocorre em gemas isotrópicas, amorfas e opacas, tampouco na maioria das translúcidas (Schumann, 2006). Esta mudança nas cores da gema analisada, ocorre quando se rotaciona o dicroscópio rente a um mineral, é decorrente da falta de compensação dos índices de refração de gemas anisotrópicas. É

considerada uma consequência de minerais com os índices de refração muito diferentes; quando ocorre uma compensação de $n_o > n_e$ ou $n_e > n_o$ para os minerais uniaxiais e $n_z > n_x$ ou $n_x > n_z$ para os minerais biaxiais. Para este procedimento faz-se necessário rotacionar a gema (turmalina) através do microscópio e observar se ocorre uma mudança de tonalidade; se esta mudança for muito visível o pleocroísmo é classificado como forte, quando a variação não é tão visível este é tido como médio e quando a mudança é pouco perceptível é classificada como fraca.

5.3 Lâmpada de Luz Ultravioleta

A fluorescência é um método de grande importância para a identificação das gemas, ela é causada pela presença de elementos químicos ativadores que ocorrem na estrutura cristalina do mineral (Schumann, 2006), contudo é um método pouco eficaz para a turmalina, pois majoritariamente estas não possuem fluorescência. A fluorescência pode ser aferida em laboratório através do uso de lâmpadas de luz ultravioleta e em um ambiente escuro ou com pouca iluminação, vale ressaltar o fato de que gemas que contêm um elevado teor de ferro na composição não exibem fluorescência.

Este método é útil especialmente para diferenciar minerais naturais dos sintéticos, visto que alguns apresentarão uma cor diferente dos naturais devido aos elementos na rede cristalina; para constatação de tal característica faz-se necessário expor o mineral a poucos centímetros da lâmpada ultravioleta; caso haja uma mudança na cor do mineral é devido a presença de elementos químicos que saltam de uma camada de valência para a outra, retornando em seguida, a mudança de cor é a manifestação dessa energia sob a forma de luz.

5.4 Microscópio Gemológico

O Microscópio Gemológico permite a leitura imediata dos diversos tipos de inclusões (sólidas, líquidas, gasosas), fraturas na estrutura do cristal (*healed fractures*), manchas, zoneamento de cores e alterações cristalinas (*fingerprints*) e inclusões aciculares (*silk inclusions*) (Hughes, 2017), ou seja, possibilita visualizar o interior das gemas. Através dos diferentes tipos de inclusões, linhas de crescimento e bolhas de ar, torna-se possível identificar substâncias de origem natural ou sintética. As amostras de turmalina foram analisadas utilizando um fundo claro, conforme a necessidade perante as tonalidades das gemas selecionadas. O uso deste equipamento é de suma importância na identificação de estruturas

internas dos materiais e essencial na caracterização de eventuais especificações em gemas.

5.5 Balança Hidrostática

O método de se obter a densidade relativa com uma balança hidrostática baseia-se no princípio de Arquimedes. Determina-se o volume da gema a ser estudada e a densidade relativa é então facilmente calculada. O objeto a ser determinado é pesado primeiramente no ar (no prato da balança sob a plataforma) e depois na água (na cestinha dentro do copo com água); em seguida utiliza-se a fórmula da densidade que é $d = m/v$. O peso não é, na realidade, um atributo constante; depende da magnitude da gravidade no respectivo local onde ela é medida. A densidade relativa é uma propriedade independente de local e tamanho da amostra. Ela é definida como peso por volume, representado em g/cm^3 e/ou kg/m^3 (Schumann, 2006).

5.6 Espectroscópio

Este instrumento fornece resultados mais qualitativos do que quantitativos, permite observar as bandas de absorção que se formam no espectro luminoso de uma maneira própria a cada pedra examinada; ao colocar a amostra rente a ocular de observação do aparelho, são observadas variadas mudanças em bandas de cores do aparelho (espectros de absorção), enquanto que em alguns minerais essas bandas ficam mais espessas ou finas, já em outros minerais algumas partes do espectro de absorção ficam escuras. Determinados comprimentos de onda (bandas de cor) são absorvidos ao atravessar uma gema; a cor da gema resulta da mistura das partes restantes da luz que originalmente era branca. Muitas gemas, como a turmalina, têm um espectro de absorção muito característico, único, que se manifesta por linhas ou bandas largas, negras e perpendiculares. Os melhores resultados são obtidos em gemas coloridas, transparentes e de tons intensos, turmalinas fornecem espectros notáveis. Nas gemas opacas só é possível a observação dos espectros de absorção quando um pedaço fino da pedra é preparado, por meio de um corte utilizando uma serra, de forma a poder transmitir a luz (Schumann, 2006).

5.7 Boletim Referencial de Preços de Diamantes e Gemas de Cor

Este boletim criado a partir de um convênio entre o DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral) e o IBGM (Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos), traz em

sua sexta edição tabelas referencial de preços de diamantes e gemas coradas; bem como informações de como devem ser avaliadas as gemas em estado bruto (diamantes) e lapidadas (diamantes e demais gemas). Lançado em 2009, este possui todas as etapas de como avaliar a qualidade gemológica de minerais, desde sua cor, teor de inclusões e qualidade da lapidação; com todo o rigor e os cuidados que os padrões internacionais exigem; no qual os principais fatores para uma gema ser de excelente qualidade são: cor forte e saturada, sem desvio de tonalidade e diafaneidade transparente; inclusões invisíveis a vista desarmada e vistas com dificuldade com uma lupa de 10 vezes; análise do acabamento e proporções da lapidação. Os valores do boletim são fornecidos em dólar (2009), como a inflação vigente do ano precisa ser levada em consideração, os usos de sites que calculam o valor da inflação do ano e mês vigente podem e devem ser utilizados.

5.8 Polariscópio Gomes (Disposição construtiva introduzida em polariscópio para estudo e análise de gemas)

Este dispositivo gemológico inédito, criado em 2016 pelo autor, permite que o observador obtenha o caráter e sinal óptico dos minerais; em escala macroscópica, desde que o material possua, no mínimo, um grau regular de diafaneidade (semi translúcido); enquanto que o polariscópio simples permite determinar apenas se o mineral possui ou não uma figura de interferência, não sendo possível visualiza-la como este. Ao inserir o material na máquina serão efetuadas rotações para visualização do caráter e sinal óptico. Sendo muito útil para uma identificação rápida; além de ser muito eficiente para distinção de imitações, vidros, plásticos e resinas. Em minerais brutos é mais difícil ocorrer erros ao visualizar a figura de interferência, pois estas não possuem lapidação; gemas com lapidações angulares tendem a fazer com que o observador interprete que a gema é uniaxial e em lapidações arredondadas faz-se pensar que seria um mineral biaxial.

5.9 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV-EDS)

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um instrumento utilizado rotineiramente para a análise microestrutural de materiais sólidos e suas composições químicas; sendo possível aferir quais são os elementos presentes e as suas quantidades. Seu funcionamento é similar ao de um microscópio óptico tradicional, no entanto, neste caso, a luz e as lentes de vidro são substituídas por um feixe de elétrons e lentes eletromagnéticas,

respectivamente (Nagatani, 1987). O equipamento disponível no DEGEO/UFC (HITACHI TM-3000) é acoplado um espectrômetro de energia dispersiva (EDS, SWIFT ED-3000 – Oxford Instruments).

O EDS (Energy Dispersive System) é um espectrômetro de raio-X que pode ser utilizado em microanálises qualitativas ou semiquantitativas de elementos químicos presentes em qualquer amostra contendo elementos da Tabela Periódica entre o Boro (B) e o Urânio (U).

5.10 Difratorômetro de raios-X em monocristal

A aplicação dos raios X ao estudo dos cristais foi o máximo impulso isolado jamais dado à cristalografia. Desde o uso dos raios X, foi possível não somente medir a distância entre os planos atômicos sucessivos, mas também determinar as posições dos vários átomos dentro do cristal (Dana & Hurlbut Jr., 1976). Sabe-se que os tipos diferentes de células possuem fatores de empacotamento (volume ocupado dentro da célula) e números de coordenação (número de átomos vizinho a um dado átomo) que variam de acordo como número de átomos presentes na célula unitária e da geometria das mesmas. Entretanto, como cada átomo presente na célula unitária possui configuração idêntica a um átomo de outra célula unitária subsequente para formação do sólido cristalino, átomos semelhantes em diferentes células podem estar posicionados de maneira laminar em planos paralelos, sendo a direção desses planos através do cristal determinadas por meio de uma notação indicada pelos índices de Miller. A coleta de dados de difração de raios-X (graus de liberdade em θ , φ , ω e κ) foram realizadas em um difratômetro D8 Venture Bruker-AXS SMART-APEX II-CCD (usando radiação $\text{MoK}\alpha$ monocromática (0.70926 Å) em temperatura ambiente. A indexação foi feita no APEX3, assim como a posterior determinação do grupo espacial, no software Saint v8.34A (Bruker 2012) a integração e redução dos dados. Os parâmetros finais foram obtidos usando todas as reflexões. A estrutura foi resolvida usando Olex2, acoplado com ShelXT por métodos diretos e refinando com o programa ShelXL por método de mínimos quadrados usando matriz completa em F2. As análises foram realizadas em três amostras (fragmentos milimétricos) de turmalinas rosas.

5.11 Espectroscópio Raman

É um método analítico semelhante à espectroscopia infravermelha, mas baseada no chamado efeito (dispersão) Raman: quando um raio de luz atravessa um meio qualquer, uma certa parte é absorvida, uma 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, dissipa (ou a mudança de direção da propagação da luz) o comprimento de onda também se modifica. A dispersão de Raman é detectada em função do comprimento de onda, e registrada. O resultado é chamado de espectro de Raman. Para as bandas de absorção de Raman, consagrou-se a denominação linhas de Raman. A posição dessas linhas 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 na amostra (Hutchings *et al* 2008). Este espectro adquirido torna-se mais uma característica de identificação do mineral turmalina, utilizando-se dos picos resultantes.

As medidas de espectroscopia Raman foram realizadas através do espectrômetro modelo LabRam HR (Jobin Yvon, Horiba) equipado com um dispositivo de carga acoplada (charge coupled device – CCD) resfriada à nitrogênio líquido. Para excitação das amostras utilizou-se lasers de diodo com comprimento de onda 785 nm (potência nominal de 100mW); de argônio comprimento de onda 488 nm (potência nominal de 20mW) e HeNe com comprimento de onda de 633 nm (potência nominal de 17mW). O laser foi focalizado nas amostras através de lentes objetivas com aumento de 50x (abertura numérica 0.75 e distância de trabalho de 0.37 nm) e 50xNIR (abertura numérica 0.8 e distância de trabalho de 0.5 nm).

5.11.1 Consulta Bibliográfica

Para comparar e classificar os espectros Raman das amostras analisadas como sendo de turmalinas, foram consultados os espectros destes minerais fornecidos pela RRUFF (RRUFF, acesso em 19/11/2019); em razão de ser uma plataforma *on-line* referência nos estudos envolvendo Raman. Os espectros das gemas de Quixeramobim tiveram seus picos comparados aos da plataforma.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O grupo mineral da turmalina possui características ópticas muito variáveis, como um índice de refração de 1,603-1,820, com uma birrefringência igualmente mutável com 0,006-0,080. Densidade no valor de 2,82-3,90 g/cm³, o pleocroísmo varia de fraco a forte, fluorescência quase sempre inerte e poucas vezes pode ser fraca. Os espectros de absorção são comumente 640, 498, 458 e 451 nm, apenas o caráter e sinal óptico são constantes sendo sempre uniaxial negativo. Informações dos grupos da turmalina são tabelados segundo informações da *International Gem Society* (Arem & Clark, 2019) enfatizando que cada grupo deste mineral possui valores mais exatos e pouco variáveis (conforme detalhado no Capítulo 3, subitem 3.9).

As dez turmalinas analisadas possuem as propriedades ópticas dentro dos limites do mineral turmalina, exceto por raras peculiaridades, sendo elas: birrefringência, densidade relativa e pleocroísmo. Para a caracterização óptica destes minerais, o refratômetro teve um papel fundamental. Identificou-se os índices de refração, com raio ordinário (*no*) e extraordinário (*ne*), o primeiro é sempre invariável e possui valor fixo que não altera-se quando realiza-se novas leituras, o segundo (*ne*) possui valores que alteram-se em uma ou algumas casas decimais a cada nova leitura. Os valores de *no* nas turmalinas analisadas sempre são maiores que os valores de *ne*, razão esta que torna o sinal óptico destas como negativo; valor de *no* maior que *ne*. Com *no* e *ne* apresentando valores dentro da normalidade da espécie mineral, com as maiores medidas do raio ordinário para os exemplares azuis (1,640 – 1,646) e os menores para os exemplares rosas (1,633 – 1,636), bem como os maiores valores do raio extraordinário para as amostras verdes (1,620 – 1,621) e os menores para as azuis (1,605 – 1,611). Conforme ilustrado nas tabelas 1, 2 e 3. A análise pelo refratômetro mostrou que os minerais são uniaxiais negativos, sendo que todos os minerais que se cristalizam no sistema tetragonal, hexagonal e trigonal são uniaxiais.

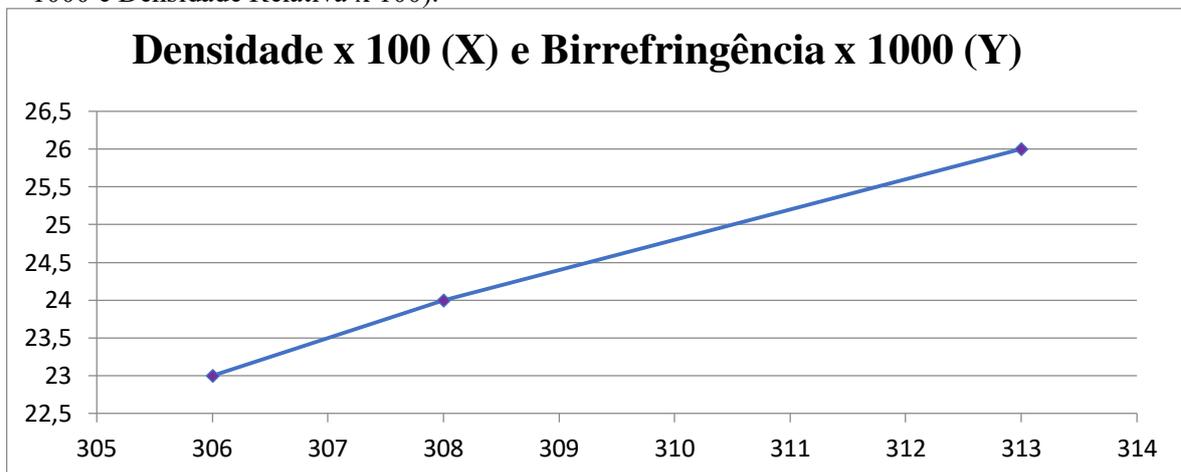
As gemas azuis analisadas possuem uma birrefringência muito elevada e duas possuem valores de 0,004 e 0,003 acima da média máxima (0,032); enquanto as amostras de cor verde e rosa possuem valores médios de 0,016-0,022 para as verdes e 0,023-0,026 para a rosa. Ressaltando que o índice de refração, a birrefringência e a densidade aumentam com o incremento do teor em Fe²⁺, Fe³⁺, Mn e Ti (Deer, 2010). Os valores de birrefringência das dez gemas analisadas podem ser consultados e comparados nas tabelas 1, 2 e 3.

O uso da balança hidrostática apresentou resultados dentro do esperado, exceto nas amostras de turmalina azul, que possuem densidade relativa de 3,39 g/cm³ para a gema azul

clara (Dark turquoise) e $3,28 \text{ g/cm}^3$ para a azul escura (London blue topaz). As amostras verdes detêm uma densidade de $3,23 \text{ g/cm}^3$ para o exemplar mais denso (Chartreuse 4) e $3,07 \text{ g/cm}^3$ para o menos denso (Chartreuse 3), já a turmalina rosa possui $3,13 \text{ g/cm}^3$ para o mineral de maior densidade (Deep Pink 2) e $3,06 \text{ g/cm}^3$ para o de menor densidade (Hot Pink 2). Conforme ilustrado nas tabelas 1, 2 e 3.

Os dados mostram que existe uma correlação entre a densidade relativa e a birrefringência das turmalinas rosa, na medida em que a densidade aumenta o valor da dupla refração cresce conforme caracterizado no gráfico 1, no qual, para melhor visualização o valor da birrefringência foi multiplicado por 1000 e o valor da densidade relativa por 100.

Gráfico 1: Correlação entre a densidade e a birrefringência nas turmalinas rosas. (Birrefringência x 1000 e Densidade Relativa x 100).



Fonte: autor

O pleocroísmo é classificado como forte em sete amostras e moderado em uma. A amostra azul, Dark Turquoise, e a rosa, Deep Pink 2 possuem pleocroísmo classificado com fraco, sendo esta uma característica incomum nas turmalinas; conforme ilustrado nas tabelas 1, 2 e 3. Isto ocorre em detrimento da baixa absorção, no qual um dos raios está sendo mais refletido que a normalidade devido aos aspectos estruturais e composicionais das amostras, diminuindo a compensação dos raios ordinário (no) e extraordinário (ne), quanto menor esta compensação (diferença) menor será a absorção observada (pleocroísmo).

Todas as turmalinas analisadas por meio da incidência de luz ultravioleta não apresentaram esta característica. Este dado mostra que os exemplares não possuem elementos ativadores de fluorescência, como cromo e elementos terras raras. Dentre as várias cores dos vários grupos de turmalina; os exemplares rosa podem ainda que raramente, vir a possuir

fluorescência fraca, em razão da presença de algum elemento traço cromóforo e da ausência do elemento ferro (agente inibidor de fluorescência).

O espectro de absorção captado pelo espectroscópio se aproxima muito da característica padrão da turmalina; o valor obtido em comum para os exemplares verdes e azuis é de 498 nm. Para as turmalinas rosa foram aferidos valores de 410 e 408 nm; enquanto que duas amostras azuis possuem duas faixas (cada uma) no espectroscópio, uma de 670 nm e outra de 490 nm. O exemplar Dark Turquoise possui uma faixa de 700 nm. Sabe-se que os intervalos 391, 414, 490 e 699 nm são indicativos da presença dos íons Fe^{3+} , Mn^{2+} , Mn^{3+} e Fe^{2+} ou Cu^{2+} , respectivamente segundo Merkel & Breeding (2009). Enquanto o Cu^{2+} e o Fe^{2+} produzem bandas de absorção com máximos próximos de 700 nm, o Cu^{2+} também possui uma banda forte com um máximo próximo de 900-925 nm, onde a absorção devido ao Fe^{2+} é tipicamente mínima. Estudos das causas de cor em turmalinas Paraíba (Brasil) mostrou que os picos em ~700 e ~900 nm são causados pelo elemento cobre (Pezzotta & Laurs, 2011). Em razão disto o mineral azul Dark Turquoise pode ter alguma porcentagem do elemento cobre em sua composição. Os valores das amostras citadas estão inseridos nas tabelas 1, 2 e 3; além da representação esquemática na figura 10.

Figura 10: Representação dos quatro espectros mais comuns em turmalinas.



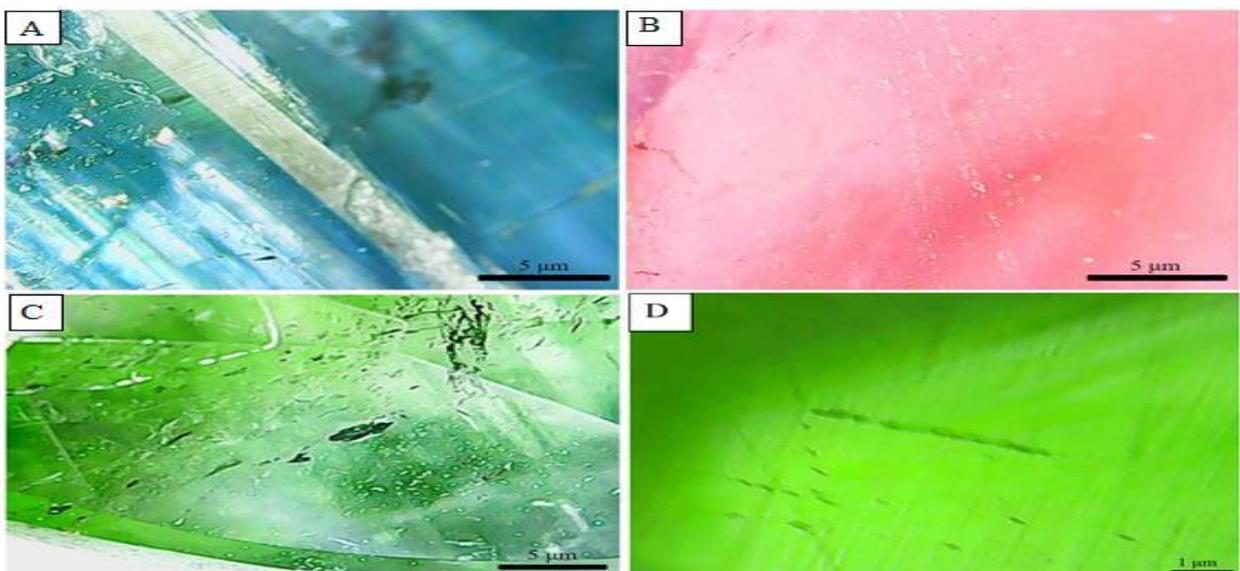
Fonte: adaptado de Schumann (2006).

Ao microscópio gemológico, os cristais de turmalina estudados são caracterizados por fraturas, inclusões sólidas e fluidas (Figura 11A – Turmalina azul London Blue Topaz), para que estas feições auxiliem quando necessário nos casos de proveniência mineral. Foram visualizadas inclusões fluidas orientadas quase que paralelamente na gema rosa (Figura 11B – Hot Pink 2). Foram identificadas inclusões bifásicas (sólido + líquido) na amostra verde (Chartreuse 4) e inclusões fluidas orientadas e semi opacas com leve orientação (Figura 11C e 11D), estes líquidos possuem composição variável e podem ter sido formadas antes, ao mesmo tempo ou posteriores aos minerais hospedeiros. Também foram constatadas estrias profundas e bem contrastantes com a cor dos minerais, além de inclusões sólidas (Figura 12E e 12F – Turmalina Dark Turquoise); estas inclusões são comuns nos exemplares verdes, como ilustrado na amostra verde (Figura 12G – Turmalina Olive Drab).

Inclusões sólidas são geralmente partículas, minerais ou o mesmo mineral em tamanho reduzido; formados antes, ao mesmo tempo ou posteriores aos minerais hospedeiros. As inclusões fluidas presentes mostram que durante o resfriamento e cristalização, alguns fluidos contendo voláteis (e talvez sais) foram aprisionados na estrutura da turmalina, fenômeno bastante comum nos silicatos. Dependendo da sua concentração, organização e distribuição ao longo do cristal permite que estas sejam classificadas em protogenéticas (formadas antes do cristal hospedeiro), singenéticas (durante o crescimento do mineral) e epigenéticas (posteriores a formação do espécime) (Hughes, 2017).

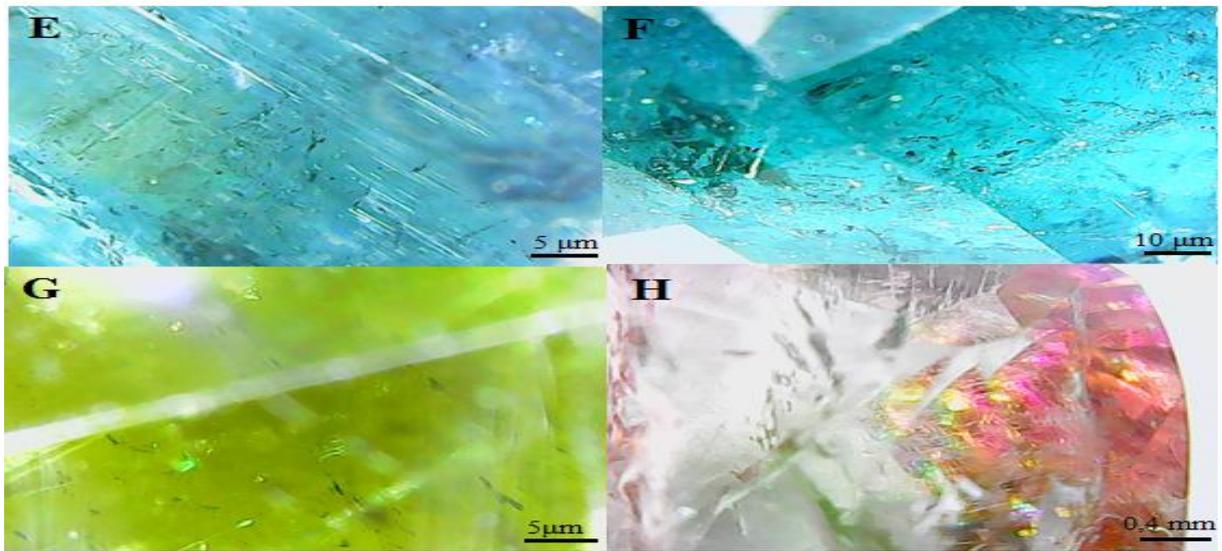
Em um mineral rosa foi identificada uma forte iridescência (Figura 12H – Turmalina Hot Pink 1), esta forma-se devido à entrada da luz através das micro fraturas, que propagam os raios em diferentes comprimentos de ondas, dentro do espectro da luz visível, cujos valores representam várias cores. Em dois exemplares foram encontradas pequenas inclusões aciculares que são indicativas de mudanças na temperatura do ambiente em que os minerais encontravam-se. Com estes dados pode-se posteriormente efetuar um estudo, mais detalhado, para investigar os processos de formações destas gemas.

Figura 11: Inclusões nas amostras de turmalina estudadas do Município de Quixeramobim. A) Inclusões fluidas (transparentes e anastomosadas) e sólidas (pequenas e escuras) na turmalina azul (London Blue Topaz). B) Inclusões fluidas (transparentes) orientadas aproximadamente paralelas na turmalina rosa (Hot Pink 2). C) Inclusões fluidas orientadas (transparentes e anastomosadas) e sólidas (escuras) na turmalina verde clara (Chartreuse 4). D) Inclusões sólidas levemente orientadas na turmalina verde (Green 3).



Fonte: autor

Figura 12: Inclusões nas amostras de turmalina estudadas do Município de Quixeramobim. E) Inclusões sólidas e estrias notáveis na turmalina azul clara (Dark Turquoise); F) Inclusões fluidas (transparentes) pseudo-orientadas e inclusões sólidas. G) Inclusões sólidas típicas das amostras verdes, em particular (Olive Drab). H) Iridescência marcante (jogo de cores) na amostra (Deep Pink 1).



Fonte: autor

Pelo método do EDS no microscópio de varredura eletrônica (MEV), a composição química obtida para a turmalina azul foi $\text{NaFe}_3\text{Al}_6\text{BO}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH})_3$ e $\text{Na}_3\text{Al}_3\text{Al}_6\text{BO}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH})_3$ para as amostras verdes e $(\text{Na,Ca})(\text{Al,Mn})_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_4$ para as rosa. Os teores de elementos como boro (10.8%), alumínio (40-42%), cálcio (0.5-0.7%) e sódio (2.1-2.7%) das amostras condiz com a normalidade. Porém os teores de sílica (41-44%), ferro (1.5-2.7%) e manganês (0.41%) são divergentes dos presentes na literatura (Deer *et al* 2010, Carrino *et al* 2019), principalmente os dois últimos. Estes dados estão organizados na tabela 4. Como as amostras rosa possuíam correlações, as três gemas foram analisadas pelo EDS e estes dados inseridos na tabela 3 e depois foi realizada uma média das três gemas para a tabela 4. Foram analisadas duas turmalinas azuis e duas verdes e feita uma média das quantidades químicas, dados presentes na tabela 4.

As amostras azuis não possuem CaO e MnO, mas detêm um teor bastante considerável de FeO, ressaltando que o índice de refração, a birrefringência e a densidade aumentam com o incremento do teor em Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn e Ti (Deer, 2010). Os minerais verdes possuem peso específico e dupla refração menor que as amostras azuis, fato que deve ocorrer em resposta ao teor de FeO maior nas gemas azuis. Conforme ilustrado nas tabelas 1, 2, 3 e 4.

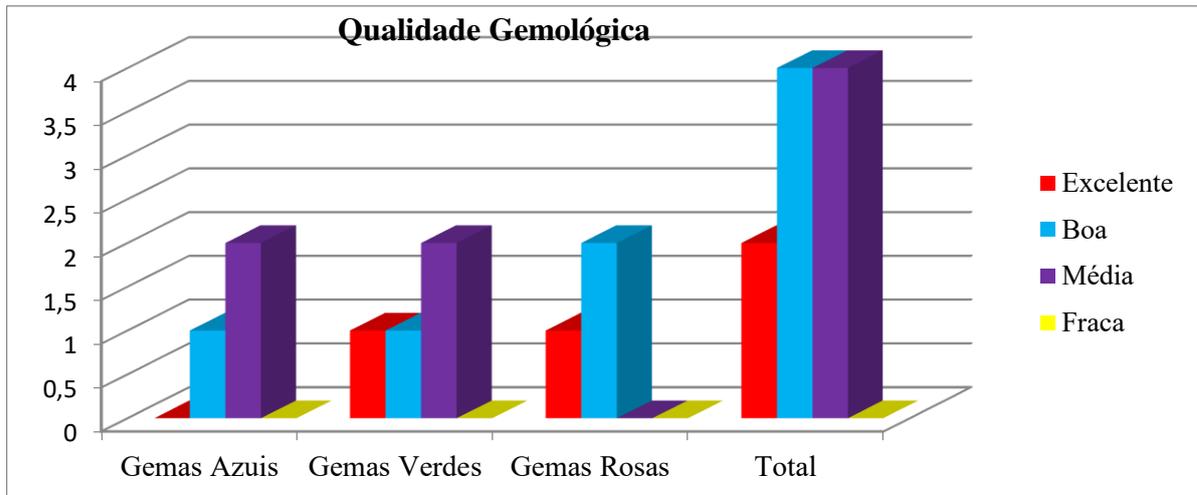
A turmalina rosa não possui ferro em sua estrutura, sua birrefringência é maior que os exemplares verdes, mas sua densidade é a menor entre todos os exemplares estudados, mas

detém manganês em sua composição diferentemente dos outros minerais. As gemas possuem uma quantidade considerável de cálcio, em especial a Hot Pink 2, isto pode ter ocorrido em razão do fluido formador ser cálcio alcalino.

A análise da diafaneidade dos exemplares se deu por meio da visualização de um objeto (ponta de uma caneta) através das turmalinas, nas amostras transparentes a imagem possui contorno e nitidez bem definido, nas semitransparentes a nitidez não é tão visível, enquanto que nas translúcidas o contorno é definido e a nitidez é quase ausente, nas turmalinas semitranslúcidas o contorno é pouco definido e a nitidez é ausente. A diafaneidade das amostras sofre interferência direta do teor de inclusões; sejam elas fluidas ou sólidas, mais predominantemente das fluidas, estas feições interferem na passagem e propagação da luz nas turmalinas, interferindo na visualização das imagens e em alguns casos na saturação ou tonalidade da gema. Em minerais com elevado teor de inclusões fluidas, estas podem reduzir a propagação da luz deixando a gema com a cor menos acentuada, isto pode ser visto na gema Hot Pink 2. Em exemplares com grande número de inclusões sólidas o mineral pode apresentar uma cor mais escura, isto ocorre no exemplar Chartreuse 4 .

Ao serem analisadas para constatação do valor comercial, estas foram enumeradas, avaliadas, tiveram o seu peso mensurado em quilates e compilados em um gráfico (Gráfico 2). Utilizou-se todo procedimento de análise da cor e diafaneidade das amostras, teor de inclusões e qualidade da lapidação conforme as regras do “Boletim Referencial de Preços de Diamantes e Gemas de Cor”. Com duas amostras possuindo “excelente” qualidade gemológica, quatro sendo classificadas como “boas” e quatro como “médias”. As turmalinas rosa possuem as melhores notas gemológicas em relação às outras cores (verde e azul), em parte devido ao baixo teor de inclusões nestas amostras; ressaltando que a amostra de melhor qualidade possui o menor valor de mercado em decorrência de seu pequeno tamanho.

Gráfico 2: Distribuição da qualidade gemológica das turmalinas de Quixeramobim - CE.



Fonte: autor

Com base nas propriedades ópticas e da composição química, as turmalinas verdes e rosa pertencem ao grupo Elbaíta, enquanto que a azul pertence ao grupo Schrol. Nas gemas apesar de ter sido detectado um valor maior de Al na posição Y, as propriedades químicas (teores e quantidade dos óxidos) e gemológicas estão mais coerentes com a elbaíta; a falta de lítio apresentada pode ser devido ao baixo limite de detecção do equipamento (Arem & Clark, 2019) (Henry *et a*, 2011).

Os resultados obtidos por meio dos equipamentos citados anteriormente, somados aos dados aferidos em pesquisas bibliográficas permitiram a confecção de três tabelas com as propriedades ópticas das gemas (separadas por cor) e sua qualidade gemológica (Tabela 1 e 2), na tabela das turmalinas rosa foram adicionados os dados da composição química (Tabela 3), dados estes necessários para correlacionar as propriedades ópticas com os teores químicos. A composição química geral das amostras também foi compilada em tabela (Tabela 4), composição necessária para correlacionar as propriedades ópticas com os teores químicos. Os dados citados nesta última tabela foram normalizados para que a soma das porcentagens fosse 100%, antes disto os valores eram apenas próximos desta porcentagem, em razão de fatores como voláteis, água e limitação na máquina de detecção.

Tabela 1 Características gemológicas de cristais de turmalina azul de Quixeramobim.

Cor da amostra	Azul (Dark Turquoise)	Azul (London Blue Topaz)	Azul (Deep Sky Blue 4)
Diafaneidade	Semitransparente	Semitranslúcido	Semitranslúcido
Índice de refração	1,640 – 1,608	1,641– 1,605	1,646 – 1,611
Caráter e sinal óptico	Uniaxial negativo	Uniaxial negativo	Uniaxial negativo
Birrefringência	0,032	0,036	0,035
Pleocroísmo	Presente: Fraco	Presente: Forte	Presente: Forte
Espectro de absorção	700 nm	670 e 498 nm	670 e 490 nm
Fluorescência	Ausente	Ausente	Ausente
Densidade relativa	3,39 g/cm ³	3,28 g/cm ³	3,20 g/cm ³
Inclusões e aspectos internos	Fraturas; estrias, linhas de crescimento; inclusões sólidas e fluidas	Fraturas; inclusões sólidas e fluidas (orientadas)	Fraturas, estrias, abundantes inclusões sólidas (raramente orientadas) e fluidas

Fonte: autor

Tabela 2 Características gemológicas de cristais de turmalina verde de Quixeramobim.

Cor da amostra	Verde (Green 3)	Verde (Chartreuse 3)	Verde (Chartreuse 4)	Verde (Olive Drab)
Diafaneidade	Transparente	Transparente	Translúcida	Semitransparente
Índice de refração	1,642 – 1,620	1,637 – 1,621	1,638 – 1,620	1,640 – 1,620
Caráter e sinal óptico	Uniaxial negativo	Uniaxial negativo	Uniaxial negativo	Uniaxial negativo
Birrefringência	0,022	0,016	0,018	0,020
Pleocroísmo	Presente: Forte	Presente: Forte	Presente: Forte	Presente: Forte
Espectro de absorção	660 nm	650 e 498 nm	650 nm	498 nm
Fluorescência	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Densidade relativa	3,12 g/cm ³	3,07 g/cm ³	3,18 g/cm ³	3,23 g/cm ³
Inclusões e aspectos internos	Fraturas em pequena quantidade; raras inclusões fluidas e sólidas possuindo leve orientação	Fraturas em pequena quantidade; fissuras, inclusões sólidas e fluidas	Fraturas; inclusões sólidas (às vezes orientadas) e fluidas; muito ocasionalmente e bifásicas (sólida + líquida)	Fraturas; inclusões fluidas, por vezes orientadas preenchendo fraturas; inclusões sólidas; minúsculas inclusões gasosas agrupadas

Fonte: autor

Tabela 3 Características gemológicas e da composição química dos cristais de turmalina rosa de Quixeramobim.

Cor da amostra	Rosa (Hot Pink 2)	Rosa (Deep Pink 1)	Rosa (Deep Pink 2)
Diafaneidade	Semitransparente	Translúcida	Transparente
Índice de refração	1,633 – 1,610	1,636 – 1,612	1,634 – 1,608
Caráter e sinal óptico	Uniaxial negativo	Uniaxial negativo	Uniaxial negativo
Birrefringência	0,023	0,024	0,026
Pleocroísmo	Presente: Forte	Presente: Moderado	Presente: Fraco
Espectro de absorção	410 nm	408 nm	408 nm
Fluorescência	Ausente	Ausente	Ausente
Densidade relativa	3,06 g/cm ³	3,08 g/cm ³	3,13 g/cm ³
Inclusões e aspectos internos	Fraturas; inclusões fluidas, por vezes orientadas preenchendo fraturas; minúsculas e ocasionais inclusões gasosas	Fraturas, fissuras, iridescência em decorrência de uma fratura, poucas inclusões fluidas e por vezes estão preenchendo cavidades	Fraturas; inclusões fluidas (raramente exibindo uma leve orientação) e raras inclusões sólidas
Composição química	BO 10,80 % Na ₂ O 1,602 % Al ₂ O ₃ 42,203 % SiO ₂ 42,732 % CaO 2,260 % MnO 0,403 %	BO 10,80 % Na ₂ O 2,203 % Al ₂ O ₃ 40,806 % SiO ₂ 45,096 % CaO 0,712 % MnO 0,391 %	BO 10,80 % Na ₂ O 2,550 % Al ₂ O ₃ 42,078 % SiO ₂ 44,472 % MnO 0,498 %

Fonte: autor

Tabela 4 Componentes químicos das amostras de turmalina de Quixeramobim - CE.

Amostras/Teores químicos médios em %	BO	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO	MnO	CaO
Turmalina Azul NaFe ₃ Al ₆ (BO ₃) ₃ Si ₆ O ₁₈ (OH) ₄	10,80	2,76	42,25	41,49	2,70	0	0
Turmalina Verde NaAl ₃ Al ₆ (BO ₃) ₃ Si ₆ O ₁₈ (OH) ₄	10,89	2,15	42,02	42,86	1,50	0	0,57
Turmalina Rosa (Na,Ca)(Al,Mn) ₃ Al ₆ (BO ₃) ₃ Si ₆ O ₁₈ (OH) ₄	10,82	2,20	40,99	44,87	0	0,41	0,71

Fonte: autor

Conforme ilustrado na tabela 3 já citada, pode-se perceber que conforme o teor de sódio nas amostras rosa diminui, a quantidade de cálcio aumenta. Isto ocorre em razão de ambos possuírem um raio atômico de tamanho muito parecido, deste modo, ocorrem substituições (de um pelo outro) dentro do sítio cristalino. Como pode ser constatado na turmalina Deep Pink 2 que possui a maior quantidade de óxido de sódio (Na₂O) e ausência de óxido de cálcio (CaO); e a gema Hot Pink 2 detém a menor quantidade de óxido de sódio e a maior de óxido de cálcio.

Os dados da qualidade gemológica e os valores de mercado foram compilados em uma tabela (Tabela 5), sendo notável o elevado preço que as amostras azuis possuem em relação às demais, mesmo que possuam notas menores. Este elevado valor é consequência do tamanho das amostras e não da sua qualidade. A gema rosa com nota gemológica mais alta possui o menor valor comercial, em razão de possuir apenas 1 ct. Este aspecto é recorrente no mundo das gemas, no qual gemas menores tendem a possuir uma qualidade superior as das gemas de vários quilates (ct). O exemplar mais pesado (Deep Sky Blue 4) possui o segundo maior valor, mesmo possuindo quase o dobro do peso do primeiro colocado em valor econômico (Dark Turquoise), isto ocorre pois a qualidade deste último é superior a do Deep Sky Blue 4.

Tabela 5 Qualidade gemológica das turmalinas Quixeramobim e valor de mercado.

Cor da Amostra	Peso (ct)	Nota Gemológica	Qualidade Gemológica	Preço em dólar (2020)
Azul (Dark Turquoise)	9,5	7,00	Boa	2012,36
Azul (London Blue Topaz)	6,5	5,00	Média	453,99
Azul (Deep Sky Blue 4)	18,5	5,5	Média	1739,20
Verde (Chartreuse4)	12	5,75	Média	578,87
Verde (Olive Drab)	7,5	5,25	Média	351,42
Verde (Green 3)	6,5	6,50	Boa	577,76
Verde (Chartreuse 3)	1,5	8,25	Excelente	105,08
Rosa (Hot Pink 2)	4,5	6,00	Boa	332,11
Rosa (Deep Pink 1)	9,5	6,25	Boa	913,04
Rosa (Deep Pink 2)	1	8,50	Excelente	71,91

Fonte: autor

Após serem analisadas 10 amostras do laboratório de gemologia utilizando o Polariscópio Gomes, O grau de qualidade das figuras de interferência foi inserido em uma tabela (Tabela 6), além da confecção um gráfico (Gráfico 3) contendo as análises referentes às amostras, para isto as amostras foram enumeradas, tiveram o seu peso mensurado em quilates.

Houve uma definição em 2018 (pelo autor) dos critérios para o grau de facilidade ao observar a figura de interferência dos minerais, sendo a seguinte classificação: Excepcional, Excelente, Bom, Regular e Ruim.

As amostras cuja classificação foi “excepcional” (nenhuma amostra deste trabalho) possuem uma figura de interferência extremamente nítida e com contornos bem definidos. Os exemplares tidos como “excelente” (uma turmalina) é detentora de um caráter e sinal óptico de fácil interpretação, possuindo pouca dificuldade ao visualizá-lo. As gemas cuja classificação foi “boa” (seis exemplares) detém uma figura de interferência mais difícil de ser analisada, com uma figura não tão nítida. As amostras classificadas como “regular” (um mineral) possui um elevado grau de dificuldade ao ser analisada, com o caráter e sinal óptico sendo visto com certa dificuldade, exibindo um contorno pouco definido. Os exemplares cuja classificação foi “ruim” (três turmalinas) não possuem uma figura de interferência

nítida, esta falta de nitidez foi ocasionada pelo baixo grau de diafaneidade das amostras, sendo possível apenas classifica-los como anisotrópicos. Para a visualização do caráter e sinal óptico, fatores como diafaneidade são muito importantes, se este for de baixo grau a interpretação fica muito comprometida.

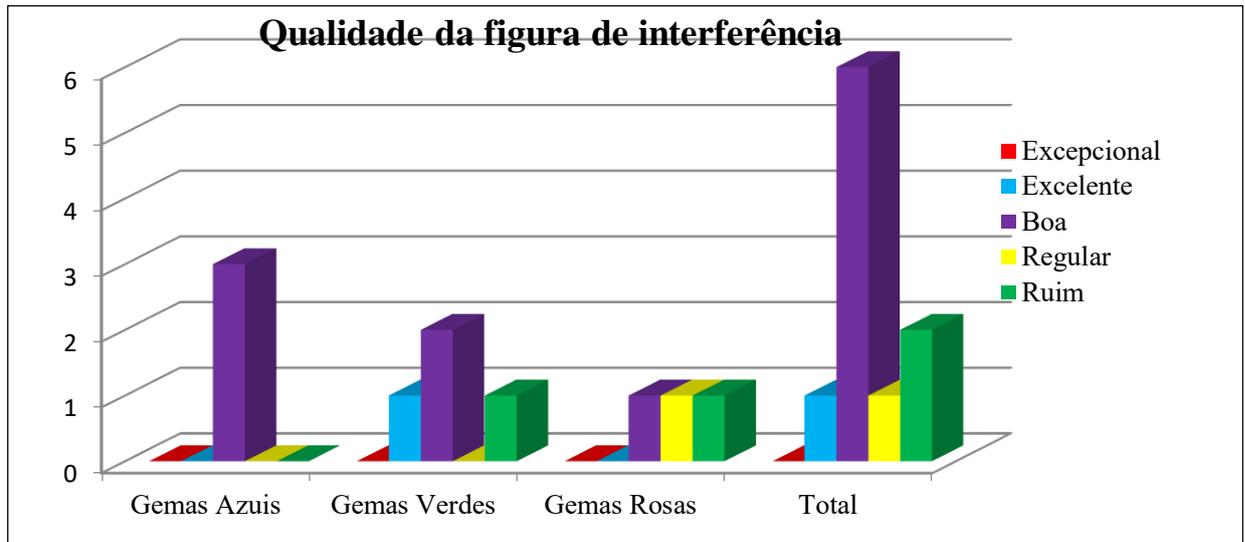
Nas turmalinas rosa, foi percebida uma correlação entre a facilidade de visualizar a figura de interferência e pleocroísmo das amostras; no qual quanto mais perceptível era o dicroísmo maior era a facilidade de identificar o caráter e sinal óptico, conforme ilustrado no gráfico (Gráfico 4). As amostras não possuem nenhuma peculiaridade que se torne uma característica para embasar a proveniência dos exemplares como sendo de Quixeramobim.

Tabela 6 Qualidade das figuras de interferência das turmalinas de Quixeramobim fornecidas pelo Polariscópio Gomes.

Número da amostra	Cor da amostra	Peso (ct)	Qualidade da figura de interferência
1	Azul (Dark Turquoise)	9,5	Regular
2	Azul (London Blue Topaz)	6,5	Regular
3	Azul (Deep Sky Blue 4)	18,5	Regular
4	Verde (Green 3)	6,5	Boa
5	Verde (Chartreuse4)	12	Excelente
6	Verde (Olive Drab)	7,5	Boa
7	Verde (Chartreuse 3)	1,5	Ruim
8	Rosa (Hot Pink 2)	4,5	Boa
9	Rosa (Deep Pink 1)	9,5	Regular
10	Rosa (Deep Pink 2)	1	Ruim

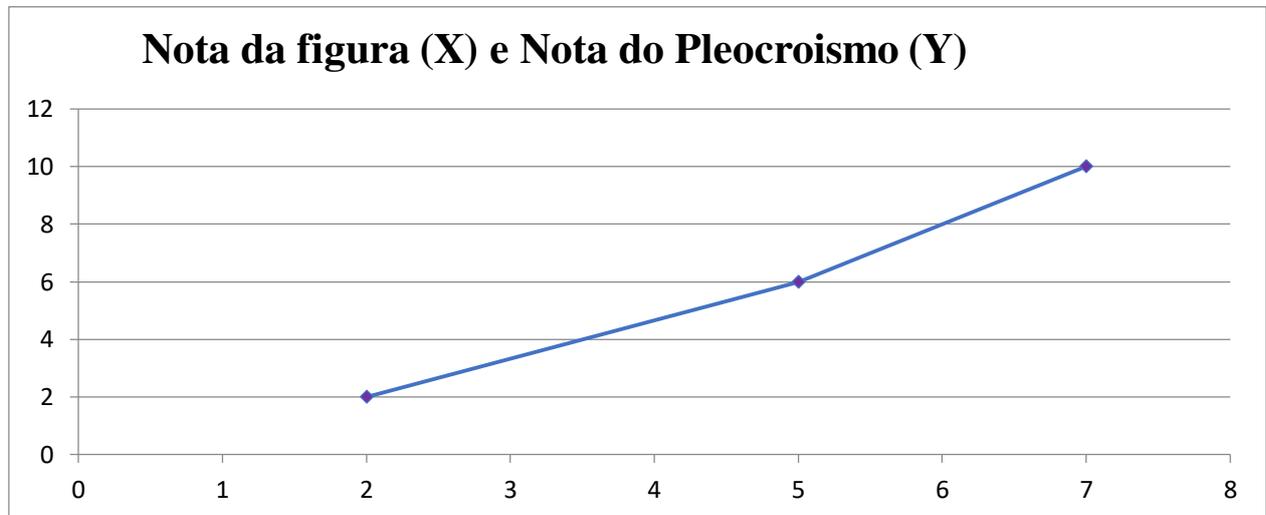
Fonte: autor

Gráfico 3: Distribuição das turmalinas analisadas conforme o grau de facilidade ao observar o caráter e sinal óptico por meio do polariscópio Gomes.



Fonte: autor

Gráfico 4: Correlação entre a figura de interferência adquirida pelo Polariscópio Gomes e o pleocroísmo nas turmalinas rosa do Município de Quixeramobim ((Notas atribuídas a Figura de Interferência, Ruim = 2; Regular = 5; Boa = 7) (Notas atribuídas ao Pleocroísmo, Fraco = 2; Moderado = 6; Forte = 10))



Fonte: autor

Por meio da técnica de difração de raios-X em monocristal foi possível obter a fórmula química, peso molecular, dimensões da célula unitária, volume da célula e densidade relativa; além da organização cristalográfica molecular.

Nas turmalinas, considera-se a fórmula química geral $XY_3Z_6B_3Si_6(O,OH)_{30}(OH,F)$. Os íons na posição Y (Boro) estão rodeados por íons de oxigênio e dispostos octaédricamente; os três octaedros envolvem o eixo ternário e cada tetraedro compartilha uma aresta com cada um dos outros dois tetraedros vizinhos equivalentes. Os íons Y (B) e os íons de oxigênio (O), seus envolventes, constituem, assim, uma forma trigonal. Cada um

dos seis átomos de Si (sílica) está rodeado por quatro oxigênios, em disposição tetraédrica. Os íons de B (boro) têm coordenação tetraédrica e compartilham um vértice com um tetraedro (SiO₄). Este fato explica a razão porque o Al não pode substituir o Si nos seis membros do anel silicatado da turmalina: o oxigênio de ligação entre os tetraedros de Al e de Si, já consideravelmente mais fraca que a ligação Si-O-Si, quebraria devido à influência enfraquecedora da ligação B-O. Os íons Al (posições Z) estão coordenados com seis átomos de oxigênio formando um octaedro muito distorcido (Deer, 2010).

Em termos gerais, as amostras analisadas possuem as mesmas características elencadas acima. Estas informações foram adquiridas por meio da difração de raios-X em monocristal, imagens referentes à organização molecular dos sítios cristalinos da turmalina rosa “Hot Pink 2” está representada pela figura 13, no qual nota-se que o elemento sódio está quase sempre interligado com o alumínio. A fórmula química obtida é coerente com as fórmulas postuladas em Schumann (2006), Deer (2010), Koralay (2013) e Arem & Clark (2019).

O peso molecular é diretamente relacionado aos teores químicos das amostras; conforme ilustrado nas tabelas 3 e 4 (páginas 58 e 59). A turmalina Hot Pink 2 possui os seguintes teores químicos em porcentagem, Al₂O₃ = 42,07; SiO₂ = 44,47; BO = 10,80; MnO = 0,49; Na₂O = 1,60 e CaO = 2,26. O exemplar Deep Pink 1 detêm: Al₂O₃ = 42,80; SiO₂ = 45,09; BO = 10,80; MnO = 0,39; Na₂O = 2,20 e CaO = 0,71. A gema Deep Pink 2 possui: Al₂O₃ = 42,078; SiO₂ = 44,472; BO = 10,804; MnO = 0,498. A amostra com maior peso (Deep Pink 2), possui o peso molecular de 947,92 em massa molecular (u), além de 87,048 % de soma dos óxidos de maior peso como: Al₂O₃ (42,078%), SiO₂ (44,472%) e MnO (0,498%). A gema Hot Pink 2 possui 937,36 u e 85,338% (Al₂O₃ = 42,203; SiO₂ = 42,203; Mn = 0,403). A turmalina Deep Pink 1 têm respectivamente, 939,17 u e 86,293% de soma destes mesmos óxidos, Al: 42,203/ Si: 42,203/ Mn: 0,403. Por possuírem as maiores massas dentre os óxidos presentes nas amostras; ficou constatado que quanto maior a presença destes três elementos, maior é o peso molecular do mineral.

Em relação as dimensões dos eixos da célula unitária *a* e *b* são as mesmas, pois se trata de um mineral cristalizado no sistema trigonal e os valores obtidos em Angstrom 15,8474-15,8520 para os eixos cristalográficos “a” e 7,1059-7,1147Å para os eixos cristalográficos “b” condizem com o Deer (2010). Com base nos valores obtidos por estes parâmetros de rede é possível classificá-las como sendo do grupo Elbaíta, em razão dos valores estarem de acordo com o que é tabelado para o grupo (a – 15,838 Å; b – 15,838 Å; c – 7,103 Å).

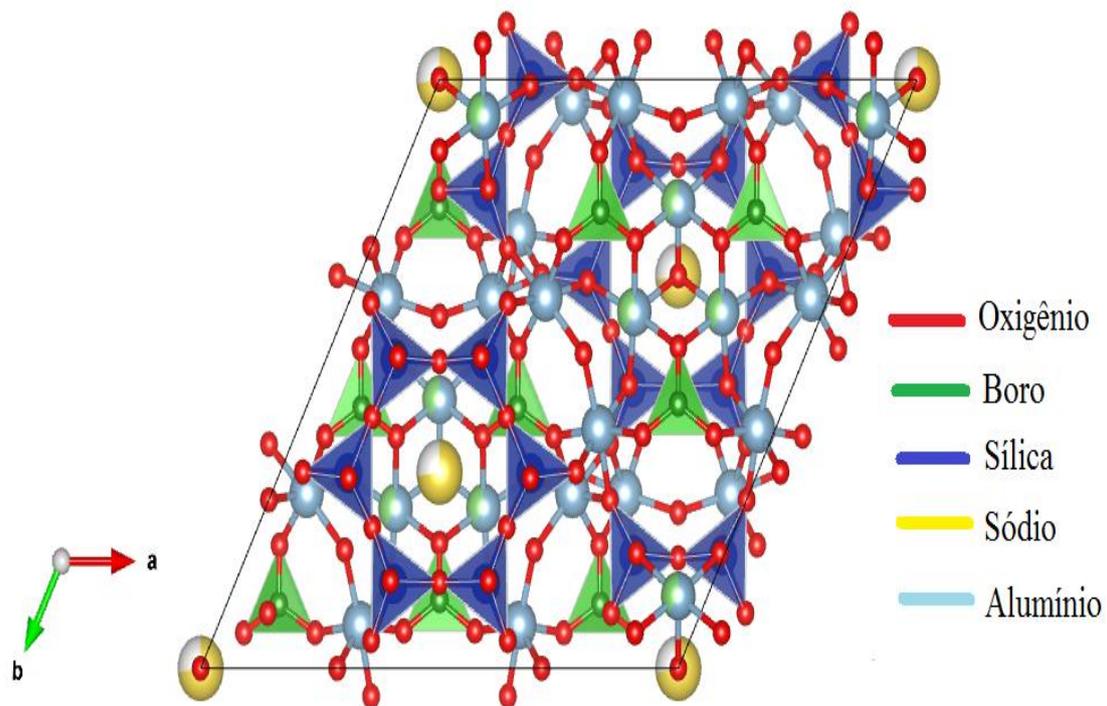
O volume da célula unitária está diretamente ligado com as dimensões e peso das células unitárias, os maiores valores das dimensões dos eixos das células unitárias 15,8757 Å e 7,1147 Å e do volume 1552,9 ocorrem no mesmo mineral (Deep pink 2); quanto maior o valor da célula, maior será o volume ocupado. Sabe-se que um íon ou grupo iônico pode substituir outro íon ou grupo, ocupando um sítio cristalográfico específico no mineral. Na turmalina existem diferentes elementos com tamanho iônico ou atômicos variados; elementos como sódio e cálcio podem alternar se substituindo no sítio cristalino; da mesma forma que o alumínio e o manganês (Arem & Clark, 2019). Estas alternâncias e substituições têm impacto direto na organização das células unitárias e seus respectivos volumes, conferindo diferentes valores mesmo que as três gemas pertençam à mesma espécie mineral (turmalina) (Klein & Dutrow, 2011); estas gemas pertencem ao subgrupo (elbaíta) em razão dos valores das dimensões dos eixos das células unitárias, características gemológicas e composição química.

A densidade das amostras também mostra correlação com os teores químicos, conseqüentemente com o peso molecular, no qual a gema de maior densidade (Deep Pink 2) possui 3,077 g/cm³, peso de 937,36 e detêm como soma dos elementos mais densos o valor de 87,048%; sendo os maiores valores dentre os três minerais, ressaltando também a correlação destes fatores nas outras amostras. A amostra Deep Pink 1 possui peso de 947,92, densidade de 3,050 g/cm³ e soma dos elementos de maior peso é 86,293%; sendo a Hot Pink 2 possui peso de 937,36, densidade de 3,041 g/cm³ e soma dos elementos mais pesados 85,338%.

Importante salientar que a densidade relativa calculada nas turmalinas rosa pelo método de raios-X em monocristal 3,041, 3,050 e 3,078 se aproxima bastante dos valores obtidos com a balança hidrostática, sendo respectivamente 3,06, 3,08 e 3,13.

Estes dados obtidos por meio da difração de raios-X em monocristal, tais como: fórmula química teórica, peso molecular, dimensões da célula unitária, volume e densidade (g/cm³) foram agrupados na tabela 7 como parte das análises cristalográficas, além da inclusão dos teores químicos obtidos pelo método EDS.

Figura 13: Organização cristalográfica molecular da turmalina rosa (Hot Pink 2), orientação a (oxigênio) e b (boro).



Fonte: autor

Tabela 7 Dados obtidos a partir de refinamento da difração de raios-X em monocristal, para amostras de turmalina rosa e teores químicos obtidos pelo método EDS.

Amostra	Hot Pink 2	Deep Pink 1	Deep Pink 2
Fórmula química	$(\text{Na,Ca})(\text{Al,Mn})_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_4$	$\text{Na}(\text{Al,Mn})_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_4$	$\text{Na}(\text{Al,Mn})_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_4$
Peso molecular	937,36	939,17	947,92
Dimensões da célula unitária Eixo a (Å)	15,8474(3)	15,8757(10)	15,8520(2)
Dimensões da célula unitária Eixo b (Å)	15,8474(3)	15,8757(10)	15,8520(2)
Dimensões da célula unitária Eixo c (Å)	7,10590(10)	7,1147(7)	7,10770(10)
Volume da célula unitária	1545,49(6)	1552,9(2)	1546,78(4)
Densidade (g/cm^3)	3,041	3,050	3,078

Composição e teores químicos obtidos pelo método EDS (%)	BO	10,808	BO	10,809	BO	10,804
	Na ₂ O	1,602	Na ₂ O	2,203	Na ₂ O	2,550
	Al ₂ O ₃	42,203	Al ₂ O ₃	40,806	Al ₂ O ₃	42,078
	SiO ₂	42,732	SiO ₂	45,096	SiO ₂	44,472
	CaO	2,260	CaO	0,712	MnO	0,498
	MnO	0,403	MnO	0,391		

Fonte: autor

A espectrometria Raman foi utilizada com o intuito de servir como um “finger print” das gemas desta região geográfica (Quixeramobim, CE), para constatação das ligações químicas nos minerais, também para constatar se as peculiaridades identificadas (pleocroísmo, birrefringência e densidade relativa) na caracterização gemológica, podem ser identificadas no espectro Raman.

Na espectrometria Raman foram analisadas três amostras (1 azul, 1 verde e 1 rosa), as posições dos picos e suas intensidades integradas estão relacionadas à ocupação do local composicional; a intensidade do pico depende fortemente da geometria de espalhamento. Quando um raio de luz atravessa um meio qualquer, uma certa parte é absorvida, uma outra atravessa o meio e uma terceira se dispersa; os estados vibracionais de uma molécula ou cristal, assim como os níveis energéticos em que se localizam os elétrons, só podem ocorrer em energias discretas. A dispersão de Raman é detectada em função do comprimento de onda, e registrada. O resultado é chamado de espectro de Raman (Hutchings *et al* 2008).

Este instrumento possibilitou constatar os picos nas três amostras de turmalinas, estes picos são em aproximadamente 221, 398, 500, 630 (ausente na azul), 705, 726 (presente apenas na verde), 1073 (apenas na rosa) e 1254 (presente na rosa e levemente acentuada na azul) cm⁻¹. Os picos foram comparados aos das turmalinas da RRUFF (RRUFF, acesso em 20/01/2020) e de Carrino *et al* (2019), e indicam as vibrações das principais ligações químicas desses minerais. Na tabela de picos Raman de Koralay (2013) não há um único valor de espectro para cada ligação, existem vários (uma “margem de variabilidade”). No qual o pico 221 evidencia a ligação O(oxigênio)-Al(alumínio)-O(oxigênio); e os picos 398, 500, 630, 705, 726 e 1073 representam respectivamente: Al-O, Si(silício)-O, vibração de balanço, B(boro)-O, B-O, Si-O (Koralay, 2013); estes espectros podem ser visualizados nos gráficos 5, 6, 7, 8 e 9.

Os exemplares possuem os picos regulares para este padrão mineral, pois foram comparados com o banco de dados *online* da RRUFF (RRUFF, acesso em 20/01/2020). Diante das condições de análises na espectroscopia Raman obtida na presente pesquisa, não

foram encontradas as anomalias e correlações entre o pleocroísmo, densidade, qualidade da figura de interferência e birrefringência na espectrometria Raman que fossem condizentes com as anomalias encontradas na caracterização gemológica.

De modo geral, os picos encontrados para as amostras até 1200 cm^{-1} são basicamente os mesmos nas três cores das turmalinas; também foi analisado o substrato (vidro) em que estas gemas foram colocadas. Porém, a amostra rosa possui melhor diafaneidade (transparência), menor espessura e ausência de ferro; esta gema possui um pico em 1254 e uma acentuação em 1376. Este primeiro pico indica processos luminescentes do substrato (vidro), no qual a amostra rosa e as demais foram colocadas. O vidro possui uma acentuação maior e mais extensa (~ 1260) em razão da sua homogeneidade composicional e estrutural, quando comparado a complexidade (química e organização estrutural) das turmalinas, fornecendo um pico mais notável. Estes dados citados são consequência da análise da radiação eletromagnética transmitida, absorvida ou refletida por uma amostra/substância, no domínio da frequência ou comprimento de onda da radiação. Para que cada acentuação nos picos aconteça são necessárias energias bem definidas, e que variam para cada substância (Hutchings *et al* 2008). O segundo pico das amostras que é da ordem de $\sim 1400\text{ nm}$ está associada à moléculas de água na estrutura (Carrino *et al* 2019), estes espectros podem ser visualizados nos gráficos 5, 6, 7, 8 e 9.

Outras amostras de turmalina (azuis e verdes) analisadas por Carrino (2019), provenientes da Província Borborema não possuem picos na ordem 1400 nm ou estes são quase imperceptíveis. As características de absorção centralizadas a $\sim 1400\text{ nm}$ são ocultas em amostras com alto teor de ferro (Carrino *et al* 2019). As amostras (azul e verde) analisadas neste trabalho não apresentam este pico, com o exemplar azul possuindo 2,7% de FeO e o verde detendo 1,5%.

Todas as três gemas foram analisadas nas mesmas condições, o mineral rosa exibiu estes dois picos extras (1254 e 1376), pois é o mais transparente e apresenta baixa intensidade de inclusões e microfissuras, quando comparada aos outros exemplares; isto pode ter intensificado a elevação extra de 1254 nm. A amostra azul detém uma leve acentuação em 1254, mas possui menor diafaneidade e maior número de inclusões de e fraturas internas; a turmalina verde é bem menos transparente que as outras duas e com elevado teor de inclusões e fraturas, esta não possui nada na ordem de 1250 nm. A gema rosa não possui FeO em sua estrutura, logo a acentuação em 1376 nm pode ser visualizada.

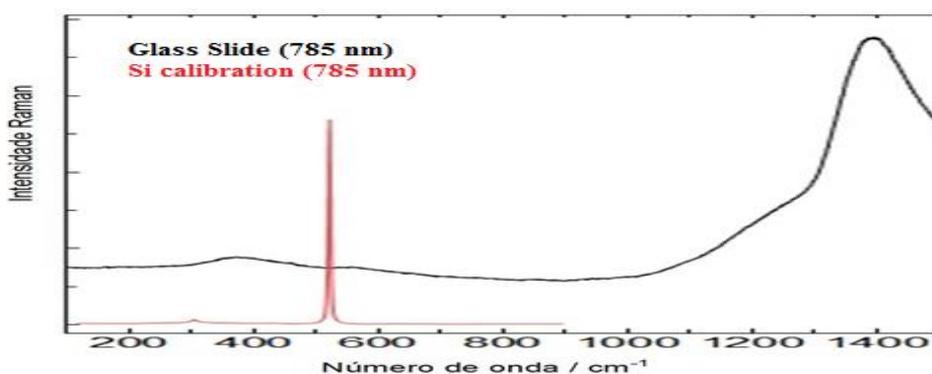
Logo, o espectro Raman apresentou os padrões e regularidades quando comparadas com os dados do RRUFF (RRUFF, acesso em 20/01/2020), diferente dos dados obtidos por meio

da caracterização gemológica que mostraram algumas propriedades não comuns para este grupo mineral, bem como uma correlação entre algumas propriedades como: densidade relativa, birrefringência, pleocroísmo e qualidade da figura de interferência.

Quando comparados, os espectros obtidos das verdes e rosas apresentam similaridades, sendo o azul o mais diferenciado; seja por ausência (de dois picos) ou presença de mais um pico mais acentuado no exemplar azul. Essa diferenciação com azul é coerente, pois a turmalina azul foi classificada como do grupo Schrol em razão das características gemológicas e químicas; enquanto que a verde e rosa são do grupo Elbaíta.

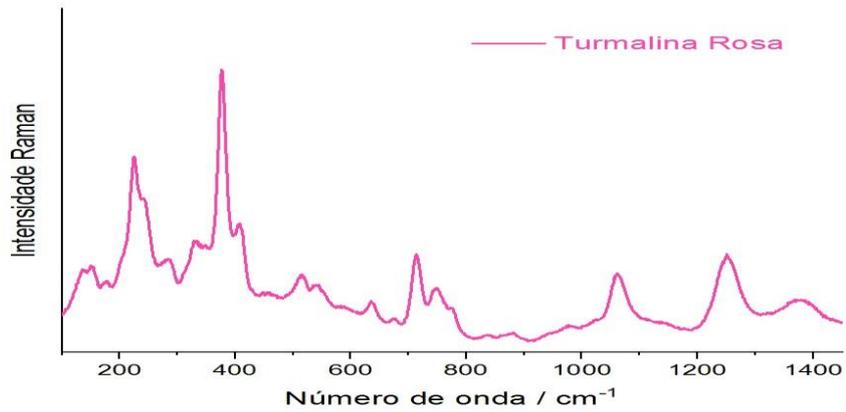
Os diferentes aspectos na organização cristalográfica (célula unitária), os teores, elementos químicos, até mesmo a diafaneidade (as inclusões e microfissuras) que podem gerar falhas na estrutura cristalina ou até mesmo na célula, interferem na acentuação dos picos do espectro Raman; conforme ilustrado nos gráficos 5, 6, 7, 8 e 9. Na tabela de picos Raman de Koralay (2013) não há um único valor de espectro para cada ligação, existem vários (uma “margem de variabilidade”); o que já era esperado, pois em um mesmo mineral ocorrem variações na composição química (substituições nos íons e oscilações nas quantidades) (Deer, 2010), bem como a posição que um íon ocupa dentro da estrutura do mineral. As variações composicionais e estruturais cristalinas, da turmalina são responsáveis pela intensa variedade de cores e as demais características da turmalina (Arem & Clark, 2019).

GRAFICO 5: Espectroscopia Raman do vidro de suporte das amostras de turmalinas do Município de Quixeramobim



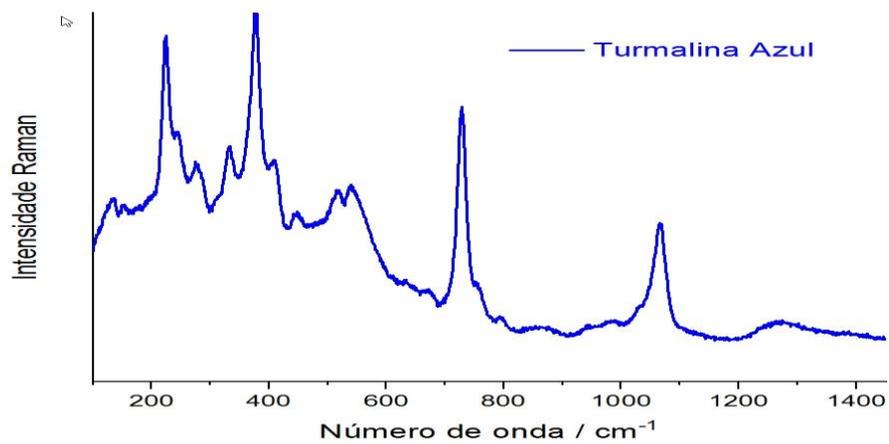
Fonte: autor

GRAFICO 6: Espectroscopia Raman das amostras de turmalina rosa do Município de Quixeramobim



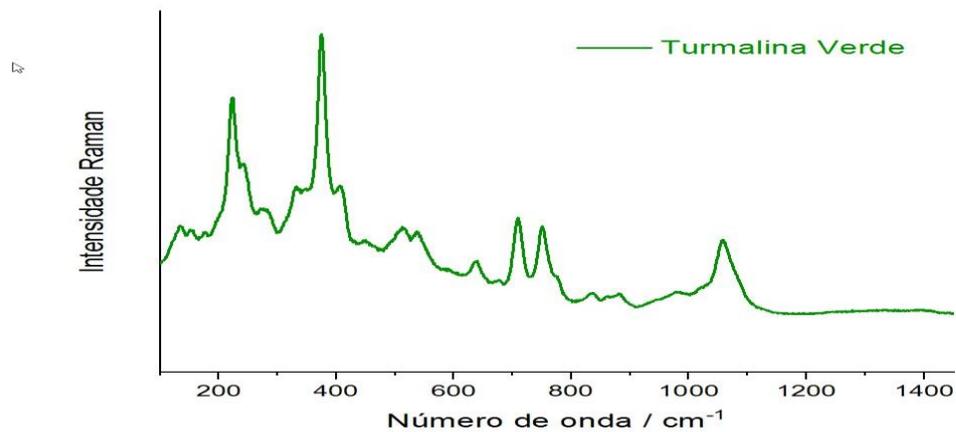
Fonte: autor

GRAFICO 7 – Espectroscopia Raman das amostras de turmalina azul do Município de Quixeramobim



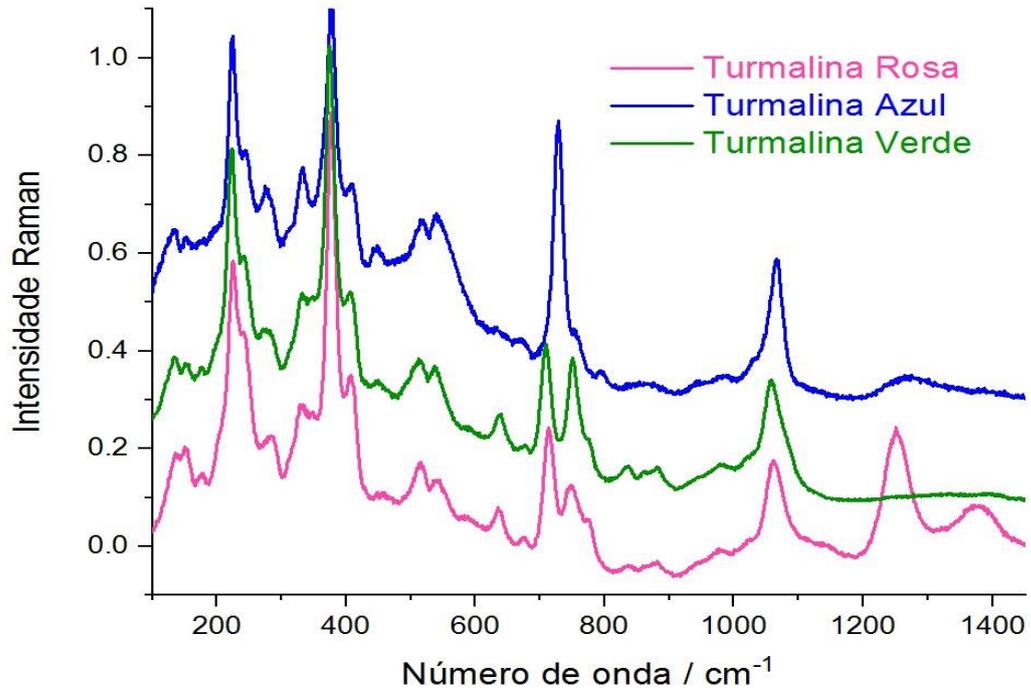
Fonte: autor

GRAFICO 8: Espectroscopia Raman das amostras de turmalina verde do Município de Quixeramobim



Fonte: autor

GRAFICO 9: Espectroscopia Raman das três cores das amostras de turmalinas do Município de Quixeramobim



Fonte: autor

7. CONCLUSÕES

As turmalinas de cor azul possuem uma birrefringência elevada, tangenciando ou superando os valores da média máxima destes minerais. O pleocroísmo das amostras mostrou-se padrão. As demais propriedades ópticas não são anômalas e estão dentro das expectativas. No entanto, a densidade relativa da amostra Dark Turquoise (3.39 g/cm^3) é incomum para este grupo, em decorrência do elevado valor; esta mesma amostra detém um dicroísmo classificado como fraco.

Todas as amostras possuem elevado teor de inclusões fluidas, sólidas e algumas fraturas. No mais, os teores elevados do elemento químico ferro (FeO) nas amostras de cor azul justificam estas anomalias: birrefringência e densidade relativa.

Os exemplares de turmalinas verdes apresentam todas as propriedades ópticas dentro da normalidade e sem quaisquer aspectos anômalos, também sendo detentoras de algumas fraturas, inclusões sólidas por vezes orientadas e em uma das amostras inclusões fluidas preenchendo uma fratura.

As turmalinas rosa possuem características ópticas normais para o grupo, mas com algumas singularidades. A birrefringência está dentro da média, porém é elevada estando entre 0,023 – 0,026. A amostra (Deep Pink 1) detém um dicroísmo moderado e o exemplar (Deep Pink 2) possui um fraco pleocroísmo. Internamente dispõem de algumas fraturas e inclusões ocasionalmente orientadas.

A parte peculiar destas gemas está na correlação entre a birrefringência e a densidade relativa, no qual o peso específico aumenta quase que proporcionalmente com a dupla refração, percebeu-se que o teor de sódio é proporcional ao aumento destas características.

O interior das gemas é abundante tanto em inclusões fluidas, como também em sólidas. Nos exemplares azuis as fluidas são abundantes em forma anastomosada e exibem algumas inclusões sólidas orientadas de forma paralelas as estrias dos minerais.

As turmalinas verdes possuem como caráter “identificador” apenas inclusões sólidas levemente orientadas.

Os exemplares rosa possuem diminutas inclusões transparentes, paralelas e orientadas. Estas peculiaridades apresentadas podem vir a ser utilizadas como parte dos estudos de procedência mineral, aliadas as propriedades gemológicas dos exemplares.

A qualidade gemológica é classificada como “boa”, pois a média das notas atribuídas às gemas é 6,4, numeração alcançada utilizando a metodologia do “Boletim Referencial de Preços de Diamantes e Gemas de Cor”, dentro dos padrões estabelecidos esta é uma nota de

qualidade classificada como “boa”.

O elevado teor de inclusões (principalmente fluidas) é um problema recorrente nas três cores estudadas; porém apresentam-se com mais intensidade nas turmalinas azuis, comprometendo a diafaneidade das amostras e conseqüentemente diminuindo sua qualidade e valor de mercado.

As gemas azuis possuem notas de 5 a 7, parte disto é em corolário da diafaneidade, pois estes minerais possuem uma cor boa. Os exemplares verdes com as menores notas dispõem de cores não tão boas e com desvio de tonalidade. Todas as turmalinas rosa detêm uma qualidade, no mínimo, tida como “boa”; no qual a amostra com desvio de tonalidade (Deep Pink 1) e a gema com baixa saturação (Hot Pink 2) possuem a “cor” como principal fator na queda da qualidade.

Os valores de mercado calculados das turmalinas, de acordo com a inflação do ano (2020) também trazem surpresas. No qual os exemplares de tamanhos mais reduzidos também possuem os menores valores em dólar (US\$ 331,81; 104,76 e 71,20), enquanto que os maiores valores (US\$ 2010,36; 1738,20 e 911,44) pertencem às mostras com mais quilates (ct).

Salientando que nos exemplares analisados; conforme a qualidade gemológica cresce, o tamanho da gema tende a diminuir e as amostras de tamanhos maiores detêm qualidade inferior ao dos minerais de menor tamanho.

Ao se obter as figuras de interferências (uniaxial negativa) por meio do Polariscópio Gomes, constatou-se que as inclusões fluidas atrapalham a visualização do caráter e sinal óptico. Entre as turmalinas analisadas, apenas a verde (Chartreuse 3) e a rosa (Deep Pink 2) não forneceram uma figura visível, em razão do tamanho reduzido e pelo fato das isóginas serem muito espessas.

As amostras classificadas como “regulares” apresentaram figuras de visualização difícil, em detrimento das inclusões (fluidas e sólidas). As gemas cujas figuras foram classificadas como “boa” e “excelente” possuem isóginas bem definidas o que facilita a interpretação.

Percebeu-se a correlação entre a qualidade da figura de interferência nas amostras rosa e a intensidade do pleocroísmo, no qual o elemento cálcio está ausente na amostra que apresenta um pleocroísmo fraco e figura de baixa qualidade, logo a presença do elemento cálcio fornece uma figura de interferência mais visível.

Não existe relação entre o tipo de lapidação, a cor do mineral e o tamanho da amostra com a facilidade em visualizar a figura de interferência. As imagens adquiridas das turmalinas rosa por meio da difração de raios-X em monocristal, permitiram constatar que o sódio

(majoritariamente) ligado ao alumínio aparece nas amostras que fornecem uma boa figura de interferência.

Contudo, ficou evidente que o Polariscópio Gomes é extremamente eficaz na interpretação do caráter e sinal óptico de gemas que possuam um bom grau de diafanidade, tornando a caracterização gemológica mais rápida, segura e eficiente.

A densidade relativa calculada nas turmalinas rosa pelo método de raios-X em monocristal, se aproxima bastante dos valores obtidos com a balança hidrostática; mostrando que este método apesar de “antigo” continua sendo muito eficiente.

Como um todo, as três cores de amostras recolhidas não se encaixam em nenhum dos grupos listados pela Sociedade Internacional de Gemologia (IGS). As turmalinas verdes e rosas são classificadas como do grupo Elbaíta, levando em consideração as propriedades ópticas e químicas. Enquanto que os exemplares azuis pertencem ao grupo Schrol, considerando as propriedades ópticas e químicas; como cor, índice de refração, elevada birrefringência e grande densidade relativa são compatíveis ao que é tabelado ao grupo. Contudo, vale ressaltar que, segundo a própria sociedade (IGS), considerações e mudanças nos critérios podem ocorrer, conforme novas descobertas são realizadas.

Os dados da espectrometria Raman são semelhantes aos das turmalinas disponíveis na bibliografia (estes não estão tabelados a nível mundial, ao contrário das propriedades ópticas/gemológicas) percebeu-se que estas não apresentam anomalias ou peculiaridades; logo o espectro Raman não detectou nenhuma das anomalias nas amostras, diferente dos dados obtidos por meio da caracterização gemológica que mostraram alguns valores não comuns para este grupo mineral.

Por meio da pesquisa fica embasado que as turmalinas do Município de Quixeramobim (região de Berilândia) possuem características ópticas e físicas dentro dos padrões, contudo alguns padrões possuem anomalias. A densidade relativa e a birrefringência elevada dos exemplares azuis são explicadas pelo elevado teor de ferro, o que não ocorre no exemplar rosa, porém este tem manganês em sua estrutura.

O potencial da região é notável, as gemas são detentoras de qualidade gemológica, majoritariamente boa e conseqüentemente um elevado valor de mercado. As figuras de interferência fornecidas pelos espécimes são moderadamente fáceis de serem vistas, salientando a correlação de uma propriedade óptica (pleocroísmo) nas turmalinas rosa com o grau de facilidade ao observar o caráter e sinal óptico no Polariscópio Gomes.

REFERÊNCIAS

ABDURIYIM, A.; KITAWAKI, H.; FURUYA, M.; SCHWARZ, D. “Paraíba”-Type Copper-Bearing Tourmaline From Brazil, Nigeria, And Mozambique: Chemical Fingerprinting By La-Icp-MS. **Gems & Gemology**, v. 42, p. 4-21. 2006.

ALMEIDA, A. R.; PARENTE, C. V., ARTHAUD, M. H. **Geologia da Folha de Quixeramobim SB.24-V-D-III – Programa Geologia do Brasil: Levantamentos Geológicos Básicos**. CPRM, Fortaleza, 2008.

ANDERSON, B. W. **Identificação das Gemas**. 1ª ed., Ao Livro Técnico, Rio de Janeiro, 1984, 460 p.

AREM, J. E.; CLARK D. **Tourmaline Value, Price, and Jewelry Information**. Lincoln: International Gem Society, 2019. Disponível em: <https://www.gemsociety.org/article/tourmaline-jewelry-and-gemstone-information/>. Acesso em 6 ago 2019.

ARTHAUD, M. H. Main structural features of Precambrian domains from Ceará (NE-Brazil). *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BASEMENT TECTONICS*, 14., 1998, Ouro Preto. **Resumos [...]**. Ouro Preto: Universidade de Ouro Preto, 1998. p. 84-85.

ARTHAUD, M. H.; TORQUATO, J. R.; NOGUEIRA NETO, J. A. A deformação do granito Serra Branca-Complexo Granítico de Quixadá – Quixeramobim (CE). *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 35., 1988, Belém. **Anais[...]**. Belém: Sociedade Brasileira de Geologia, 1988. p. 1015-1023.

BEURLIN, H.; MOURA, O. J. M.; SOARES, D. R.; Da Silva, M. R. R.; RHEDE, D. Geochemical and geological controls on the genesis of gem-quality 'Paraíba Tourmaline' in granitic pegmatites from Northeastern Brazil. **Canadian Mineralogist**, v. 49, p. 277-300. 2011.

BEURLIN, H.; MOURA, O. J. M.; SOARES, D. R.; SILVA, M. R. R.; RHEDE, D. Paraíba tourmaline in pegmatites of the Borborema Pegmatite Province: geological and geochemical controls. **Estudos Geológicos**, v. 19, p. 67-71. 2009.

BRAGA, de P. G.; MENDONÇA, J. C. G. **Seqüências vulcano-sedimentares de Orós e Jaguaribe, Folhas SB-24-Z-A-I, Região Sudeste do Ceará**. NUCLEBRÁS/CEMINAS,

Fortaleza, 1984.

BRASIL. Lei nº 10.406, de 10 de janeiro de 2002. **Código Civil**. Brasília. Disponível em: <http://www.camara.gov.br/sileg/integras/247357.pdf>. Acesso em: 06 jan. 2018.

BRITO NEVES, B. B. Tectonic history of the Borborema Province, NW Brazil. *In*: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 31., 2000, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia, 2000. p. 151-182

BRITO NEVES, B.B. **Regionalização Geotectônica do Pré-cambriano Nordestino**. 1975. 198 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1975.

CABY, R., BERTRAND, J. M.; BLACK, R. Oceanic closure and continental collision in the Hoggar-Ifforas Pan-African segment. *In*: KRONER, A. (Org.). **Precambrian Plate Tectonics**. Amsterdã: Elsevier, 1981. p. 407-434.

CABY, R.; ARTHAUD M. H. Major Precambrian nappes of the Brazilian Belt. Ceará, Northeast Brazil. **Geology**, n. 14, p. 871-874. 1986.

CARRINO, T.A.; BARRETO, S.B.; OLIVEIRA, P.J.A.; NETO, J.F.A.; CORREIA, A.M.L. Linking gemology and spectral geology: a case study of elbaïtes from Seridó Pegmatite Province, Northeastern Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 42, n. 2, p. 1-15. 2019.

CAVALCANTE, J. C. Mapa geológico do Estado do Ceará – Escala 1:500.000. Fortaleza. MME/CPRM, 1983.

CAVALCANTE, J. C. Mapa geológico do Estado do Ceará – Escala 1:500.000. MME/CPRM. 2003.

CÓDIGO DE COR – Infográfico dos códigos das cores em HTML. Rio de Janeiro, DEVMEDIA, 2013. Disponível em: <https://www.devmedia.com.br/codigo-cor-infografico-dos-codigos-das-cores-em-html/37238>. Acesso em 6 ago 2019.

DEER, W.A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN. J. **Minerais Constituintes das Rochas – Uma Introdução**. 1. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2010. 727 p.

DNPM. Geologia dos pegmatitos de Metais Raros da Região W e NW de Solonópole (CE).

Anais do XXXIV Congresso Brasileiro de Geologia, Goiânia, Goiás, 1986; V.5; pp 2283-96, p. 17.

FETTER, A. H. Evidence for neoproterozoic continental arc magmatism in the Santa Quitéria Batholith of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the assembly of West Gondwana. **Gondwana Research**, v. 6, p. 265-273. 2003.

FETTER, A. H. **U/Pb and Sm/Nd Geochronological Constraints on the Crustal Framework and Geologic History of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the Assembly of Gondwana**. 1999. 164 f. Tese (PhD em Geociências) – Department of Geology. Kansas University, Lawrence, 1999.

FUJIMORI, S., FERREIRA, Y.A. **Introdução ao uso do microscópio petrográfico**, 2ª ed., Centro Editorial e Didático da UFBA, Salvador, 1979, 202 p.

HENRY, D.J. et al. Nomenclature of tourmaline-supergroup minerals. **American Mineralogist**, v. 96, p. 895-913. 2011.

HUGHES, R.W. **Ruby & sapphire: A Gemologist's guide**. 1. ed. RWH Publishing/Lotus Publishing, Bangkok, 2017, 816 p.

IBGE. **Censo Demográfico 2010**, Brasília: IBGE, 2010.

IBGM/DNPM. **Manual Técnico de Gemas**. 1. ed. IBGM/DNPM, Brasília, 2009, 215 p.

JARDIM DE SÁ, E. F. **A faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e o seu significado geodinâmico na Cadeia Brasileira/Pan Africana**. 1994. 803 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências. Universidade de Brasília, Brasília, 1994.

KORALAY, T.; KADIOĞLU, Y. K.; JIANG, S. Y. Determination of Tourmaline Composition in Pegmatite From Buldan, Denizli (Western Anatolia, Turkey) Using XRD, XRF, and Confocal Raman Spectroscopy. **Spectroscopy Letters**, v 46, p. 499-506. 2013.

LAFUENTE, B.; DOWNS, R. T.; YANG, H.; STONE, N. The power of databases: the RRUFF project. *In*: DANISI, R. M.; ARMBRUSTER, T. (Org.), **Highlights in Mineralogical Crystallography**, Berlin: W. De Gruyter, 2015, p 1-30.

LEAL NETO, A. **Pegmatito várzea torta: caracterização geoquímica e relações com os granitos de anatexia adjacentes**. 2005. 109 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Centro de Ciências. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

LONDON, D. **Pegmatites**. 1. ed. Mineralogical Association of Canada, Quebec, 2008, 347p.

MARQUES JUNIOR, F. **Geologia do Campo Pegmatítico de Berilândia, CE**. 1992. 152 fl. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

MARTINS, G. Geochemistry and geochronology of the Algodões sequence, Ceará, NE Brazil: a Paleoproterozoic magmatic arc in the Central Ceará domain of the Borborema Province. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 40., 1998, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia, 1998. p. 28.

MARTINS, G. **Litogeoquímica e controles geocronológicos da Suíte Metamórfica Algodões-Choró**. 2000. 218 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

MARTINS, G.; OLIVEIRA, E. P. Arcabouço litoestrutural da suíte metamórfica Algodões-Choró, Domínio Ceará Central da Província Borborema. **Revista de Geologia**, v. 17, n. 1, p. 38-51. 2004.

MERKEL, P.; BREEDING, C. Spectral differentiation between copper and iron colorants in gem tourmalines. **Gems & Gemology**, v. 45, n. 2, p. 112-119, 2009.

MONIÈ, P.; CABY, R.; ARTHAUD, M. H. Timing of the Neoproterozoic Brasiliano orogeny in northeast Brazil: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages and petrostructural data from Ceará. **Precambrian Research**, n. 81, p. 241-264. 1997.

NAGATANI, T. C. Development of an ultra high resolution scanning electron microscope by means of a field-emission source and in-lens system. **Scanning Microscope**, v. 1, p. 901-909. 1987.

NOGUEIRA, J. F. **Estrutura, geocronologia e alojamento dos batólitos de Quixadá, Quixeramobim e Senador Pompeu – Ceará Central**. 2004. 123 f. Tese (Doutorado em

Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2004.

NOGUEIRA NETO, J.A.; CAVALCANTI, D. E.; SANTIAGO, C. S.; LIMA, M. N. Estudo espectroscópico preliminar em turmalinas bicolores, azuis e verdes oriundas da Província Borborema, Estado do Ceará, Brasil. CONGRESSO IBÉRICO DE GEOQUÍMICA, 12., 2019, Évora. **Anais** [...]. Évora: Universidade de Évora, 2019, p. 169-172.

OLIVEIRA, I. G. **Análise De Gemas e Minerais Por Meio Do Polariscópio Gomes**. 2018. 54 f. Monografia (Graduação em Geologia) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

PARENTE, C. V.; SILVA FILHO, W. F.; ALMEIDA A. R. Bacias do estágio da transição do domínio setentrional da Província Borborema. In: MANTESSO-NETO, V. *et al.* (Org.), **Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Beca, 2004, p. 525-536.

PEZZOTA, F.; LAURS, B. M. Tourmaline: The kaleidoscopic gemstone. **Elements**, v. 7, p. 333-338. 2011.

ROLFF, P. A. M. A. Minerais dos pegmatitos da Borborema. **Boletim DNPM/DFPM**, v. 78, p. 24-76. 1946.

SANTOS, T. J. S. Nd isotopes and the provenance of metasediments of the Itataia Group, Northwest Borborema Province, NE Brazil. In: SOUTH AMERICAN SYMPOSIUM ON ISOTOPE GEOLOGY, 4., 2003, Salvador. **Short Papers**. Salvador: Companhia Bahiana de Produção Mineral, 2003. p. 286-289.

SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D. A. A evolução da Plataforma Sul-Americana no Brasil e suas principais concentrações minerais. In: SCHOBENHAUS, C. *et al.* (Org.). **Geologia do Brasil**. Brasília: MME/DNPM, 1984. p. 9-53.

SCHUMANN, W. **Gemas do Mundo**. 1. ed. DISAL: São Paulo, 2006. 279 p.

SIMMONS, W. B. S.; WEBBER, K. L. Pegmatite genesis: state of the art. **European Journal of Mineralogy**, v. 20, n. 4, p. 421-438, 2008.

SOARES, D. R.; FERREIRA, A. C. M.; BEURLLEN, H.; FERREIRA, J.A.M.; YADAV, R.; MAIOR, I. S. Elbaíta azul de qualidade gemológica do pegmatito Alto Serra Branca, Pedra Lavrada, Paraíba. **Estudos Geológicos**, v. 21, p. 123-133. 2011.

SOARES, D. R. **Contribuição à petrologia de pegmatitos mineralizados em elementos raros e elbaítas gemológicas da província pegmatítica da Borborema, nordeste do Brasil**. 2004. 286 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Centro de Tecnologia e Geociências. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

SOARES, D. R.; BEURLLEN, H. ; FERREIRA, A. C. M. Evolução composicional das turmalinas do pegmatito Capoeira 2, Província Pegmatítica da Borborema. **Estudos Geológicos**, v. 14, p. 31-43. 2004.

SOUZA, J. V. **Geologia dos pegmatitos de metais raros da região W e NW de Solonópole –CE (Brasil)**. 1985. 109 f. Tese (Docência Titular) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, 1985.

TROMPETTE, R. Geology of Western Gondwana, Pan African-Brasiliano aggregation of South America and Africa. 1. ed. Roterdã: A. A. Balkema, 1994. 350 p.

TRUMBULL, B. R; BEURLLEN, H.; WIEDENBECK, M.; SOARES, D. R. The diversity of B-isotope variations in tourmaline from rare-element pegmatites in the Borborema Province of Brazil. **Chemical Geology**, v. 352, p. 47-62. 2013.