



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

ISAAC GOMES DE OLIVEIRA

**CARACTERIZAÇÃO E CORRELAÇÕES ÓPTICAS, CRISTALOQUÍMICAS E
ESPECTROSCÓPICAS DE GEMAS DO MUNICÍPIO DE QUIXERAMOBIM,
CE, BRASIL**

FORTALEZA
2024

ISAAC GOMES DE OLIVEIRA

CARACTERIZAÇÃO E CORRELAÇÕES ÓPTICAS, CRISTALOQUÍMICAS E
ESPECTROSCÓPICAS DE GEMAS DO MUNICÍPIO DE QUIXERAMOBIM, CE,
BRASIL

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

Orientadora: Prof. Dra. Lucilene Dos Santos.

Co-orientador: Prof. Dr. Carlos William de Araújo Paschoal.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

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

- O47c Oliveira, Isaac.
Caracterização e correlações ópticas, cristal químicas e espectroscópicas de gemas do município de Quixeramobim, CE, Brasil / Isaac Oliveira. – 2024.
330 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, 2024.
Orientação: Prof. Dr. Lucilene dos Santos .
Coorientação: Prof. Dr. Carlos William de Araújo Paschoal .
1. Polariscópio Gomes. 2. Gemas brasileiras. 3. Avaliação gemológica. 4. Propriedade mineral. I. Título.
CDD 551
-

ISAAC GOMES DE OLIVEIRA

CARACTERIZAÇÃO E CORRELAÇÕES ÓPTICAS, CRISTALOQUÍMICAS E
ESPECTROSCÓPICAS DE GEMAS DO MUNICÍPIO DE QUIXERAMOBIM, CE,
BRASIL

Tese apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Geologia do Departamento
de Geologia da Universidade Federal do
Ceará, como parte do requisito para
obtenção do título de Doutor em Geologia.
Área de concentração: Geodinâmica e
Recursos Minerais.

Aprovado em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

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

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

Profa. Dra. Gabriela Meireles Rosa
Intituto Federal do Piauí (IFPI)

Dra. Débora Macedo do Nascimento
Vale S.A

Dra. Monica Correa
Centro Gemológico da Bahia (CGB)

Dedico a Deus, a meus pais Antônio Valmir e Maria Fernanda, irmão e irmã, e a minha “mãe” geológica (Prof^a. Dr^a. 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 e doutorado; à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelo financiamento para a minha pesquisa e tese; ao laboratório de Gemologia TN da UFC que forneceu todo o apoio e oportunidades desde que entrei em 2015; ao laboratório de Geoquímica Ambiental que me permitiu utilizar o método Arquimedes para conferir dados; a Central Analítica da UFC; aos laboratórios do departamento de Física: Espectroscopia Raman e LabCres; a secretaria da graduação (Catarina) e do departamento (Saulo e Verônica) por todo o apoio durante o curso do doutorado (inclusive durante o mestrado e a graduação).

Muito tenho que agradecer a caríssima, ilustríssima, digníssima, excelentíssima Prof^ª. Dr^ª. Tereza Neri (considerada por mim e por outros como a “Rainha” da Gemologia do Brasil e “Imperadora” da Geologia do Ceará) minha orientadora da vida e “mãe” geológica que sempre esteve ao meu lado desde que ingressei no laboratório de Gemologia TN no segundo semestre de 2015; sempre me orientando, tirando minhas dúvidas de outras disciplinas, corrigindo meus artigos e demais trabalhos acadêmicos; pelas magníficas e confortantes conversas, conselhos, orientações e tantas outras coisas, que uma página inteira de agradecimentos ainda seria pouco. Sou eternamente grato!

A caríssima, ilustríssima e digníssima Prof^ª. Dr^ª. Lucilene dos Santos, minha orientadora, que se mostrou uma professora de um patamar altíssimo, me orientando, esclarecendo dúvidas, me auxiliando desde a graduação e agora no doutorado me aconselhando e orientando. Além de toda a ajuda, suporte e apoio que me concedeu durante esses anos, em especial 2020-2023; a Prof^ª. Lucilene se mostrou uma profissional muito dedicada e um exemplo de ser humano. Sou eternamente grato!

Ao meu caríssimo, ilustríssimo e digníssimo co-orientador Prof. Dr. Carlos William do departamento de Física, sempre me auxiliando e aconselhando, abrindo meus olhos para novas possibilidades e horizontes. Por toda a ajuda, dicas e conselhos durante estes anos (desde que nos conhecemos em 2020). Sou eternamente grato!

Ao caríssimo e ilustríssimo Prof. Dr. Clóvis Parente, que se mostrou um excelente, justo e competente professor, que muito me ajudou durante a minha carreira de estudante e como pesquisador, me aconselhando e tirando dúvidas acadêmicas, de pesquisa e da vida. Sou muito grato.

Ao sempre atencioso Prof. Dr. Ayala e ao Dr. Bruno por todo o suporte conferido nas análises realizadas em seu laboratório.

A caríssima Dra. Diolande Gomes (sempre irei chamá-la de professora Diolande) sempre se disponibilizou a me ajudar e tirar dúvidas desde a época da minha graduação, no mestrado e no doutorado não foi diferente.

A dois terços do corpo docente e a todos os funcionários (Sr. Júnior, Dona Mara, Dona Denise) 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.

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 sempre o melhor.

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

“O verdadeiro sinal de inteligência não é o conhecimento, mas a imaginação” (Albert Einstein)

“Pois sou jovem e inexperiente, não sei para onde este caminho irá me levar. Com uma cicatriz profunda ou me deixar sem ar. Eu tenho uma longa lista de dúvidas que me deixam insano. Mas eu tenho um espaço em branco, então vou continuar inventando.” (O autor).

RESUMO

Este estudo visou à caracterização gemológica de alguns espécimes de minerais, tais como: turmalina, água-marinha, granada e ametista da região de Quixeramobim (CE); além da qualidade gemológica; valor comercial; análise no instrumento patenteado, Polariscópio Gomes (Disposição Construtiva Introduzida em Polariscópio Para Estudo e Análise de Gemas); dados referentes à sua composição química; estrutura cristaloquímica; dados espectroscópicos e ópticos. Para o estudo destes quatro minerais gemológicos foram utilizados os equipamentos clássicos para a caracterização de gemas, com o adicional do Polariscópio Gomes, o “Boletim Referencial de Preços de Diamantes e Gemas de Cor”, e uma tabela de 384 cores e códigos hexadecimais; além do uso do microscópio eletrônico de varredura (MEV-EDS); do espectroscópio Raman; difração de raios-X (DRX) em monocristal e microscópio petrográfico. O município de Quixeramobim possui 6 cores de turmalina (azul, verde, rosa, vermelha, azul com verde e rosa com verde), todas da espécie elbaíta; a região também possui dois grupos de granadas, grossulárias e spessartitas. As turmalinas, águas-marinhas e granadas do município de Quixeramobim possuem qualidade gemológica e majoritariamente as mesmas características dos minerais de outras regiões, no entanto possuem correlações notáveis e lineares; além de algumas variações, peculiaridades e anomalias em algumas propriedades. As correlações, peculiaridades e anomalias dos minerais citados envolvem: cor; índice de refração; birrefringência; densidade; pleocroísmo; fluorescência; qualidade das figuras de interferência; mosaico de interferência; além das quantidades de FeO, NiO, Na₂O, CaO, Mn₂O₃ e PbO₂; também incluindo a dimensão e volume da célula unitária; peso molecular e bandas Raman. As ametistas da região de Quixeramobim possuem qualidade gemológica e essencialmente as mesmas características de ametistas de outras regiões do Brasil e do mundo; diferente dos outros minerais elencados acima, este quartzo não possui correlações ou peculiaridades, exceto por uma quantidade notável de Al₂O₃ em sua estrutura. Logo, por meio dos instrumentos listados e análises acuradas foi possível realizar a caracterização óptica/gemológica, cristaloquímica e espectroscópica. Portanto, este trabalho possui uma compilação dos dados destes minerais nesse município do Brasil, comprovando que as gemas do município de Quixeramobim são únicas. As notáveis correlações nestas gemas não ficam restritas a um único mineral, mas se relacionando com outros minerais da região, funcionando como uma assinatura mineral; este estudo também possui a qualidade de procedência mineral para estes espécimes. As correlações, peculiaridades e anomalias presentes nas turmalinas, águas-marinhas e

granadas (especialmente a grossulária) tornam estas gemas únicas não apenas em escala nacional, mas possivelmente em escala global.

Palavras-Chave: polariscópio Gomes; gemas brasileiras; avaliação gemológica; propriedade mineral.

ABSTRACT

This study aimed at the gemological characterization of some mineral specimens such as tourmaline, aquamarine, garnet, and amethyst from the Quixeramobim region (CE); in addition to gemological quality; commercial value; analysis using the patented instrument, Gomes polariscope (Constructive Arrangement Introduced in Polariscope for Gem Study and Analysis); data on their chemical composition; crystal-chemical structure; spectroscopic and optical data. For the study of these four gemological minerals, classical gem characterization equipment was used, with the addition of the Gomes polariscope, the “Diamond and Colored Gemstones Price Reference Bulletin,” and a table of 384 colors; as well as the use of the scanning electron microscope (SEM-EDS); Raman spectroscope; single-crystal X-ray diffraction (XRD); and petrographic microscope. The municipality of Quixeramobim has 6 colors of tourmaline (blue, green, pink, red, blue with green, and pink with green), all the elbaite species; the region also has two groups of garnets, grossular and spessartine. The tourmalines, aquamarines, and garnets from the municipality of Quixeramobim have gemological quality and mostly the same characteristics as minerals from other regions, however, they exhibit notable and linear correlations; in addition to some variations, peculiarities, and anomalies in certain properties. The correlations, peculiarities, and anomalies of the mentioned minerals involve: color; refractive index; birefringence; density; pleochroism; fluorescence; quality of interference figures; interference mosaic; as well as the amounts of FeO, NiO, Na₂O, CaO, Mn₂O₃, and PbO₂; also including unit cell dimension and volume; molecular weight, and Raman bands. The amethysts from the Quixeramobim region have gemological quality and essentially the same characteristics as amethysts from other regions of Brazil and the world; unlike the other minerals listed above, this quartz has no correlations or peculiarities, except for a notable amount of Al₂O₃ in its structure. Therefore, through the listed instruments and accurate analyses, it was possible to perform the optical/gemological, crystal-chemical, and spectroscopic characterization. Thus, this research provides a compilation of the data on these minerals in this municipality in Brazil, proving that the gems from the municipality of Quixeramobim are unique. The notable correlations in these gems are not restricted to a single mineral but are related to other minerals in the region, functioning as a mineral signature; this study also has the quality of mineral provenance for these specimens. The correlations, peculiarities, and anomalies present in tourmalines, aquamarines, and garnets (especially grossular) make these gems unique not only on a national scale but possibly on a global scale.

Keywords: polariscope Gomes; brazilian gems; gemological assessment; mineral property.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Área de Pesquisa, situada no interior no Ceará.....	28
Figura 2 - Localização das principais ocorrências de turmalinas gemológicas.....	33
Figura 3 - Localização das principais ocorrências de águas-marinhas gemológicas.....	42
Figura 4 - Principais ocorrências de granadas gemológicas.....	54
Figura 5 - Principais ocorrências de ametistas gemológicas.....	63
Figura 6 - Localização da Província Borborema no Brasil.....	67
Figura 7 - Subdivisão da Província Borborema (Trompette, 1994).....	68
Figura 8 - Domínio Ceará Central limitado a noroeste pelo Lineamento.....	70
Figura 9 - Turmalinas azuis do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim.....	81
Figura 10 - Turmalinas verdes do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim.....	82
Figura 11 - Turmalinas rosa do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim.....	83
Figura 12 - Turmalina do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim analisadas...	84
Figura 13 - Turmalina do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim analisadas...	85
Figura 14 - Águas-marinhas do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim.....	86
Figura 15 - Águas-marinhas do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim.....	87
Figura 16 - Águas-marinhas do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim.....	88
Figura 17 - Granadas analisadas do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobi.....	89
Figura 18 - Granadas analisadas do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim....	90
Figura 19 - Ametistas analisadas do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim...	91
Figura 20 - Tabela de figuras de interferência (caráter óptico).....	92
Figura 21 - Infográfico dos códigos das cores em HTML.....	93
Figura 22 - Representação dos quatro espectros mais comuns em turmalinas.....	106
Figura 23 - Inclusões nas amostras de turmalina estudadas.....	112
Figura 24 - Inclusões nas amostras de turmalina estudadas.....	113
Figura 25 - Inclusões nas amostras de turmalina (rosas e azuis) estudadas.....	114
Figura 26 - Inclusões nas amostras raras do Município de Quixeramobim.....	115
Figura 27 - Inclusões nas amostras raras do Município de Quixeramobim.....	117
Figura 28 - Organização cristalográfica molecular da turmalina rosa (Hot Pink 2).....	132
Figura 29 - Organização cristalográfica molecular da turmalina azul.....	136
Figura 30 - Organização cristalográfica molecular da turmalina verde (Green 3).....	137
Figura 31 - Organização cristalográfica molecular da turmalina vermelha (Red 3).....	137
Figura 32 - Representação dos três espectros mais comuns em águas-marinhas.....	154

Figura 33 - Inclusões nas amostras de águas-marinhas estudadas.....	156
Figura 34 - Inclusões nas amostras de águas-marinhas estudadas.....	160
Figura 35 - Inclusões nas amostras de águas-marinhas estudadas.....	162
Figura 36 - Organização cristalográfica molecular da água-marinha (Dodger Blue 1)..	177
Figura 37 - Organização cristalográfica molecular da água-marinha (Steel Blue 1)....	178
Figura 38 - Organização cristalográfica molecular da água-marinha (Cadet Blue 1)...	178
Figura 39A - Representação dos quatro espectros mais comuns.....	195
Figura 39B - Representação dos sete espectros mais comuns em granadas.....	195
Figura 40 - Inclusões nas amostras de granadas estudadas.....	200
Figura 41 - Inclusões nas amostras de granadas estudadas.....	201
Figura 42 - Inclusões nas amostras de granadas estudadas.....	202
Figura 43 - Organização cristalográfica molecular da granada grossulária Dark.....	218
Figura 44 - Organização cristalográfica molecular da granada grossulária Orange 2...	218
Figura 45 - Organização cristalográfica molecular da granada grossulária Golden.....	219
Figura 46 - Inclusões nas amostras de ametistas estudadas.....	237
Figura 47 - Inclusões nas amostras de ametistas estudadas.....	239
Figura 48 - Inclusões nas amostras de ametistas estudadas.....	240
Figura 49 - Organização cristalográfica molecular da ametista Dark Orchid 4.....	250

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 -	Correlação entre a densidade e a birrefringência nas turmalinas rosas.....	104
Gráfico 2 -	Distribuição da qualidade gemológica das turmalinas de Quixeramobim....	119
Gráfico 3 -	Distribuição das turmalinas analisadas conforme o grau de facilidade	124
Gráfico 4 -	Correlação entre a figura de interferência e o pleocroísmo nas turmalinas..	124
Gráfico 5 -	Correlação entre Na ₂ O e CaO nas turmalinas rosa.....	129
Gráfico 6 -	Espectroscopia Raman do vidro de suporte das amostras de turmalinas.....	140
Gráfico 7 -	Espectroscopia Raman de três cores das amostras de turmalinas.....	140
Gráfico 8 -	Espectroscopia Raman comparativo das seis cores das amostras.....	144
Gráfico 9 -	Correlação entre a densidade relativa e a cor nas águas-marinhas.....	153
Gráfico 10 -	Distribuição da qualidade das águas-marinhas de Quixeramobim,CE.....	165
Gráfico 11 -	Distribuição das águas-marinhas analisadas conforme o grau.....	169
Gráfico 12 -	Correlação entre densidade relativa e porcentagem do FeO + NiO.....	172
Gráfico 13 -	Espectroscopia Raman das águas marinhas.....	183
Gráfico 14 -	Correlação entre a cor e a média dos índices de refração nas granadas.....	191
Gráfico 15 -	Correlação entre a cor e a densidade relativa nas granadas.....	192
Gráfico 16 -	Correlação entre a densidade relativa e o índice de refração.....	193
Gráfico 17 -	Distribuição da qualidade gemológica das granadas de Quixeramobim....	206
Gráfico 18 -	Correlação entre a cor e a quantidade de FeO nas granadas.....	213
Gráfico 19 -	Espectroscopia Raman das granadas grossulárias.....	225
Gráfico 20 -	Distribuição da qualidade gemológica das ametistas de Quixeramobim....	242
Gráfico 21 -	Distribuição das ametistas analisadas conforme o grau de facilidade.....	245
Gráfico 22 -	Espectroscopia Raman da ametista Dark Orchid 4.....	253
Gráfico 23 -	Distribuição geral das gemas de Quixeramobim analisadas.....	264
Gráfico 24 -	Distribuição geral da qualidade gemológica das gemas.....	264

LISTA DE PRANCHAS

Prancha 1 - Equipamentos utilizados na pesquisa.....	101
Prancha 2 - Fotomicrografia A – Cor acastanhada da turmalina.....	148
Prancha 3 - Fotomicrografia A – Cor de soma em água-marinha.....	186
Prancha 4 - Fotomicrografia A – Ausência de cor na granada analisada.....	228
Prancha 5 - Fotomicrografia A – Cor de interferência cinza (300 nm) da amostra.....	257

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Características gemológicas dos cristais comuns de turmalina.....	107
Tabela 2 -	Características gemológicas dos cristais de turmalina vermelha.....	109
Tabela 3 -	Características gemológicas dos cristais bicolors rosa e azul.....	110
Tabela 4 -	Qualidade gemológica das turmalinas Quixeramobim e valor.....	123
Tabela 5 -	Qualidade das figuras de interferência das turmalinas.....	124
Tabela 6 -	Componentes químicos das amostras de turmalina de Quixeramobim.....	127
Tabela 7 -	Correlações presentes nas turmalinas rosa de Quixeramobim – CE.....	128
Tabela 8 -	Dados obtidos a partir de refinamento da difração de raios-X.....	134
Tabela 9 -	Dados obtidos a partir de refinamento da difração de raios-X.....	135
Tabela 10 -	Componentes químicos das amostras de turmalina de Quixeramobim.....	142
Tabela 11 -	Propriedades ópticas em lâmina delgada das turmalinas.....	149
Tabela 12 -	Características gemológicas dos cristais de água-marinha.....	155
Tabela 13 -	Qualidade gemológica das águas-marinhas de Quixeramobim.....	166
Tabela 14 -	Qualidade das figuras de interferência das águas-marinhas.....	168
Tabela 15 -	Componentes químicos das amostras de água-marinha.....	172
Tabela 16 -	Dados obtidos a partir de refinamento da difração de raios-X.....	179
Tabela 17 -	Componentes químicos das amostras de água-marinha.....	181
Tabela 18 -	Propriedades ópticas em lâmina delgada das águas-marinhas.....	187
Tabela 19 -	Características gemológicas das granadas de Quixeramobim – CE.....	196
Tabela 20 -	Qualidade gemológica das granadas de Quixeramobim e valor.....	207
Tabela 21 -	Componentes químicos das amostras de granada de Quixeramobim.....	214
Tabela 22 -	Dados obtidos a partir de refinamento da difração de raios-X.....	220
Tabela 23 -	Componentes químicos das amostras de granada.....	224
Tabela 24 -	Propriedades ópticas em lâmina delgada das granadas.....	228
Tabela 25 -	Características gemológicas dos cristais de ametista.....	233
Tabela 26 -	Qualidade gemológica das ametistas de Quixeramobim e valor.....	243
Tabela 27 -	Qualidade das figuras de interferência das ametistas.....	245
Tabela 28 -	Componentes químicos das amostras de ametista de Quixeramobim.....	247
Tabela 29 -	Dados obtidos a partir de refinamento da difração de raios-X.....	251
Tabela 30 -	Propriedades ópticas em lâmina delgada das ametistas.....	228
Tabela 31 -	Propriedades Gemológicas gerais (mínimas e máximas) dos minerais.....	260
Tabela 32 -	Propriedades Geoquímicas gerais (mínimas e máximas) dos minerais.....	262

Tabela 33 -	Propriedades Cristalográficas gerais (mínimas e máximas).....	263
Tabela 34 -	Propriedades (Valores) Raman gerais dos minerais.....	264

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
2	OBJETIVOS.....	27
2.1	Objetivo geral.....	27
2.2	Objetivos específicos.....	27
3	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA.....	28
4	ESTADO DA ARTE SOBRE AS GEMAS DE QUIXERAMOBIM...	29
4.1	TURMALINAS.....	29
4.1.1	<i>Paragênese.....</i>	<i>29</i>
4.1.2	<i>Cores.....</i>	<i>30</i>
4.1.3	<i>Aprimoramentos da cor.....</i>	<i>31</i>
4.1.4	<i>Ocorrência.....</i>	<i>31</i>
4.1.5	<i>Variedade e nomes comerciais.....</i>	<i>33</i>
4.1.6	<i>Propriedades Ópticas e Físicas.....</i>	<i>34</i>
4.1.7	<i>Inclusões.....</i>	<i>35</i>
4.1.8	<i>Espécies.....</i>	<i>35</i>
4.1.8.1	<i>Buergerita.....</i>	<i>35</i>
4.1.8.2	<i>Cromodravita.....</i>	<i>35</i>
4.1.8.3	<i>Dravita.....</i>	<i>36</i>
4.1.8.4	<i>Elbaíta.....</i>	<i>36</i>
4.1.8.5	<i>Feruvita.....</i>	<i>36</i>
4.1.8.6	<i>Foitita.....</i>	<i>36</i>
4.1.8.7	<i>Liddicoatita.....</i>	<i>37</i>
4.1.8.8	<i>Magnesiofoitita.....</i>	<i>37</i>
4.1.8.9	<i>Olenita.....</i>	<i>37</i>
4.1.8.10	<i>Povondraíta.....</i>	<i>37</i>
4.1.8.11	<i>Rossmanita.....</i>	<i>37</i>
4.1.8.12	<i>Schorlita.....</i>	<i>38</i>
4.1.8.13	<i>Tsiliaisita.....</i>	<i>38</i>
4.1.8.14	<i>Uvita.....</i>	<i>38</i>
4.1.8.15	<i>Vanadiumdravita.....</i>	<i>38</i>
4.1.9	<i>Turmalinas Brasileiras.....</i>	<i>39</i>

4.2	ÁGUA-MARINHA	40
4.2.1	<i>Paragênese</i>	40
4.2.2	<i>Cores</i>	41
4.2.3	<i>Aprimoramentos da cor</i>	41
4.2.4	<i>Ocorrência</i>	41
4.2.5	<i>Variedade e nomes comerciais</i>	43
4.2.6	<i>Propriedades Ópticas e Físicas</i>	43
4.2.7	<i>Inclusões</i>	44
4.2.8	<i>Água-marinha Maxixe</i>	44
4.2.9	<i>Águas-marinhas Brasileiras</i>	45
4.3	GRANADA	46
4.3.1	<i>Paragênese</i>	47
4.3.2	<i>Cores</i>	48
4.3.3	<i>Variedades de granadas</i>	48
4.3.4	<i>Granadas Sintéticas</i>	50
4.3.5	<i>Ocorrência</i>	51
4.3.6	<i>Propriedades Ópticas e Físicas</i>	54
4.3.7	<i>Características das granadas</i>	55
4.3.8	<i>Spessartita e Grossulária</i>	57
4.3.8.1	<i>Spessartita</i>	57
4.3.8.2	<i>Grossulária</i>	57
4.3.8.3	<i>Inclusões em Spessartita e Grossulária</i>	58
4.3.9	<i>Granadas Brasileiras</i>	59
4.4	AMETISTA	60
4.4.1	<i>Paragênese</i>	61
4.4.2	<i>Cores</i>	62
4.4.3	<i>Aprimoramentos da cor e ametistas sintéticas</i>	62
4.4.4	<i>Ocorrência</i>	62
4.4.5	<i>Valor da ametista e nomes comerciais</i>	63
4.4.6	<i>Propriedades Ópticas e Físicas</i>	64
4.4.7	<i>Ametista e Ametrino</i>	65
4.4.8	<i>Inclusões</i>	65
4.4.9	<i>Ametistas Brasileiras</i>	65
5	GEOLOGIA REGIONAL	66

5.1	Província Borborema.....	66
5.2	Domínio Ceará Central.....	68
5.3	Rochas do Arqueano.....	70
5.4	Rochas do Paleoproterozóico.....	71
5.5	Terrenos TTG.....	71
5.6	Terrenos gnaiss-migmatíticos.....	72
5.7	Rochas do Meso-Neoproterozóico.....	72
5.8	Complexo Tamboril-Santa Quitéria.....	73
5.9	Granitóides brasileiros.....	74
5.10	Rochas do Paleozóico.....	75
5.11	Pegmatitos.....	75
5.12	Distrito Pegmatítico de Solonópole Quixeramobim (DPSQ).....	76
5.13	Regiões da turmalina e água-marinha: Morro dos Tonhos.....	77
5.14	Região da granada: Trapiá - Quixeramobim (DPSQ).....	78
5.15	Região da ametista: Coque - Quixeramobim (DPSQ).....	79
6	MATERIAIS E MÉTODOS.....	80
6.1	Consulta Bibliográfica.....	94
6.2	Refratômetro.....	94
6.3	Dicroscópio.....	95
6.4	Lâmpada de Luz Ultravioleta.....	95
6.5	Balança Hidrostática.....	96
6.6	Espectroscópio.....	96
6.7	Microscópio Gemológico.....	97
6.8	Boletim Referencial de Preços de Diamantes e Gemas de Cor.....	97
6.8	Polariscópio Gomes.....	98
6.9	Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV-EDS)	98
6.10	Difratômetro de raios-X em monocristal.....	99
6.11	Espectroscópio Raman.....	99
6.13	Microscópio Petrográfico.....	100
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	102
7.1	Turmalina.....	102
7.1.1	<i>Propriedades gemológicas</i>	102
7.1.2	<i>Feições Internas</i>	111
7.1.3	<i>Diáfaneidade, Qualidade Gemológica e Valor Comercial</i>	118

7.1.4	<i>Polariscópio Gomes</i>	122
7.1.5	<i>Química Mineral</i>	125
7.1.6	<i>Organização Cristaloquímica</i>	130
7.1.7	<i>Espectroscopia Raman</i>	128
7.1.8	<i>Petrografia</i>	144
7.2	<i>Água-Marinha</i>	151
7.2.1	<i>Propriedades gemológicas</i>	151
7.2.2	<i>Feições Internas</i>	158
7.2.3	<i>Diafaneidade, Qualidade Gemológica e Valor Comercial</i>	164
7.2.4	<i>Polariscópio Gomes</i>	167
7.2.5	<i>Química Mineral</i>	170
7.2.6	<i>Organização Cristaloquímica</i>	174
7.2.7	<i>Espectroscopia Raman</i>	180
7.2.8	<i>Petrografia</i>	184
7.3	<i>Granadas</i>	189
7.3.1	<i>Propriedades gemológicas</i>	189
7.3.2	<i>Feições Internas</i>	199
7.3.3	<i>Diafaneidade, Qualidade Gemológica e Valor Comercial</i>	205
7.3.4	<i>Polariscópio Gomes</i>	208
7.3.5	<i>Química Mineral</i>	211
7.3.6	<i>Organização Cristaloquímica</i>	215
7.3.5	<i>Espectroscopia Raman</i>	222
7.3.6	<i>Petrografia</i>	226
7.4	<i>Ametista</i>	230
7.4.1	<i>Propriedades gemológicas</i>	230
7.4.2	<i>Feições Internas</i>	236
7.4.3	<i>Diafaneidade, Qualidade Gemológica e Valor Comercial</i>	241
7.4.4	<i>Polariscópio Gomes</i>	244
7.4.5	<i>Química Mineral</i>	246
7.4.6	<i>Organização Cristaloquímica</i>	248
7.4.7	<i>Espectroscopia Raman</i>	252
7.4.8	<i>Petrografia</i>	254
7.5	Propriedades Gemológicas Gerais das Gemas de Quixeramobim	260
8	CONCLUSÃO	265

9	REFERÊNCIAS.....	273
	APÊNDICE A - ÍNDICES DE REFRAÇÃO, TOTAIS.....	288
	APÊNDICE B - FIGURAS DE INTERFERÊNCIA.....	295
	APÊNDICE C - CARTA DE CORES DE INTERFERÊNCIA.....	298
	APÊNDICE D - ANTES E DEPOIS DAS AMOSTRAS BRUTAS.....	299
	APÊNDICE E - FIGURAS DO TIPO MOSAICO.....	300
	APÊNDICE F - CARTA PATENTE.....	301
	APÊNDICE G - ARTIGO 1.....	308
	APÊNDICE H - ARTIGO 2.....	318

1. INTRODUÇÃO

O Município de Quixeramobim (Ceará) possui minerais gemológicos tais como: turmalina, água-marinha, granada e ametista. Estes apresentam propriedades ópticas, cristal químicas e espectroscópicas, que pelas quais são possíveis de se obter um robusto suporte da caracterização gemológica. Por meio dos dados ópticos é possível obter uma caracterização gemológica que fornece informações como: a espécie analisada, se esta é natural ou sintética e em casos mais raros, a procedência (região/país de origem do mineral); a GIA (Gemological Institute of America) é a líder em estudos de procedência mineral, tendo catalogado 22 mil exemplares; os casos em que a procedência é essencial (devido ao valor econômico) envolvem: rubi da Birmânia, safira do Sri Lanka, esmeralda da Colômbia e turmalina Paraíba de origem brasileira (Vertriest & Renfro, 2019). As propriedades espectroscópicas e cristal químicas fornecem um suporte e embasamento para estas propriedades ópticas, além de fornecer outras informações que são uma extensão das propriedades gemológicas.

A caracterização gemológica é usada em todo o mundo em nações em que a exploração de gemas foi, ou ainda é, economicamente expressiva. Esta caracterização é um conjunto de técnicas que lida com os dados ópticos de matérias gemológicas, para essencialmente identificar o material ou mineral. Utilizando o índice de refração que é o desvio e retardo que a luz passa ao percorrer um cristal mono ou birrefringente; a birrefringência que é a diferença entre os raios ordinário (*no*) e extraordinário (*ne*) em minerais birrefringentes; o pleocroísmo que é a mudança no comportamento da luz ao atravessar um material, que gera mudança na compensação dos índices de refração *no* e *ne*; entres outras técnicas que juntas fazem a caracterização gemológica. Esta caracterização, utilizando os dados ópticos, também serve para identificar possíveis proveniências do mineral (interferindo diretamente no valor comercial) e também para casos de perícia e investigação criminal. Quando as propriedades ópticas de um mineral variam muito, é comum que esses países publiquem e organizem dados gemológicos de acordo com as regiões geográficas de proveniência de cada gema dentro do território nacional. Sem esta caracterização e atualização dos dados, o reconhecimento de gemas ficaria defasado, prejudicando o comércio e as pesquisas em geral. O Brasil é um dos principais fornecedores de gemas e, paradoxalmente, a gemologia científica brasileira ainda é iniciante (Terra, 2020). A ocorrência dessas variações em posições geográficas específicas pode ser usada como traçador de proveniência, situação comum para o caso do rubi, que possui peso específico

médio que varia entre 3.90 e 4.00 g/cm³, enquanto os rubis provenientes do Sri Lanka detêm uma densidade de 3.97 g/cm³ (Pehrson, 2017); esta variação das propriedades é consequência dos diferentes contextos e histórica geológica de cada país e região. A caracterização gemológica pode ainda ser utilizada como modo de diferenciação entre gemas e imitações, o termo imitações é usado para designar produtos que imitam as gemas naturais e que são usadas pelo homem no intuito de reproduzir efeito óptico, cor e aparência das gemas naturais (IBGM/DNPM, 2009). Essa análise utiliza, normalmente, técnicas não invasivas e não destrutivas que são capazes de fornecer informações confiáveis, rápidas e baratas quanto à classificação estrutural e mineralógica de minerais gemológicos (tipologia, defeitos etc.), bem como a procedência (Mazzoleniet *al.*, 2016) (Schumann, 2020).

Além dos instrumentos clássicos utilizados na caracterização gemológica, o trabalho utilizará o Polariscópio Gomes “Disposição construtiva introduzida em polariscópio para estudo e análise de gemas”. A máquina recém-inventada em 2016 permite ao seu observador a visualização do caráter e sinal óptico dos minerais em escala macroscópica desde que estes possuam, pelo menos, um grau regular de diáfaneidade, o que torna a identificação mais rápida e segura (Oliveira, 2018).

Além da caracterização gemológica, as técnicas de espectroscopia se fazem necessárias; esta é a designação para toda técnica de levantamento e análise de dados físico-químicos através da análise da radiação eletromagnética transmitida, absorvida ou refletida por uma amostra/substância, no domínio da frequência ou comprimento de onda da radiação. Cada tipo de energia eletromagnética irá interagir de maneira diferente com a matéria, podendo ser gerados fenômenos como absorção, emissão e espalhamento de energia. E para que cada fenômeno aconteça são necessárias energias bem definidas, em determinadas regiões, e que variam para cada substância. A espectrometria de massas é frequentemente aplicada no controle de poluição, controle de comida, física atômica, determinação de parâmetros termodinâmicos, e muitos outros ramos científicos (Hoffman & Stoobant, 2007). Os dados da espectroscopia e da caracterização gemológica podem se relacionar diretamente com os dados cristaloquímicos dos minerais.

Dentre os minerais gemológicos da região de Quixeramobim, o de maior complexidade é a turmalina. Este mineral é um tipo de borossilicato que possui composição química e estrutura cristalográfica extremamente complexa. Este grupo mineral é excelente para o uso como material gemológico, por possuir uma gama de cores única. Toda turmalina tem dureza entre 7 e 7,5 na escala de Mohs, ela se torna um exemplar muito adequado para produção de joias. Contudo, turmalinas com qualidade gemológica são relativamente raras

(Phichaikamjornwutet al., 2019). Jazidas de turmalina são encontradas comumente em pegmatitos e depósitos aluvionares. O país de maior importância no mundo para o fornecimento deste mineral é o Brasil, mais precisamente os estados de Minas Gerais e Paraíba (Schumann, 2020). A composição química deste mineral pode ser descrita como um borossilicato de alumínio contendo quantidades variáveis de MgO, FeO, CaO e metais alcalinos (Franco & Campos, 1971) (Anderson, 1984) (Hurlbut & Switzer, 1979) (Nassau, 1980).

As complexas variações composicionais e estruturais cristalinas deste mineral são responsáveis pela intensa variedade de cores e outras características ópticas da turmalina (Hawthorne & Dirlam, 2011). 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), Roberts *et al* (1990), Bosi *et al* (2005) e Deer *et al* (2010) explicam 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 Fe²⁺, Fe³⁺, Mn e Ti (Schumann, 2006) (IBGM/DNPM, 2009) (Bonewitz, 2013) (Schumann, 2020) (Arem & Clark, 2023).

No Município de Quixeramobim, o berilo azul (água-marinha) é o mineral de maior valor econômico. A água-marinha pertence, juntamente com a esmeralda, ao grupo do berilo. A sua cor mais apreciada é o azul-escuro. A substância cromófora é o ferro. As qualidades de cor inferior alcançam a desejada cor azul-marinho permanente, por meio de tratamento térmico com temperaturas em torno de 400 a 450°C. As suas cores também podem ser melhoradas através de tratamento com nêutrons e irradiação gama, contudo esses tratamentos não são duradouros. A água-marinha é quebradiça e sensível à pressão. Por causa de diferentes substâncias (metais de transição) que entram no sistema cristalino hexagonal do mineral, as propriedades podem variar (Franco & Campos, 1971) (Anderson, 1984) (Schumann, 2006) (IBGM/DNPM, 2009) (Bonewitz, 2013) (Schumann, 2020).

O berilo e a água-marinha, em particular, são conhecidos por possuir tubos longos e ocos internamente. Esta característica distintiva permite uma identificação de uma gema como um membro da família berilo. As águas-marinhas podem ter inclusões transparentes e/ou metálicas, como biotita, hematita, ilmenita, flogopita, pirita e rutilo em cristais esqueléticos. Eles também podem conter cristais de apatita, cassiterita, epídoto, granada, moscovita; quartzo e turmalina. Alguns minerais contêm gotículas de líquido de forma irregular em uma formação estelar. Se estes canais ocos são abundantes, é possível se conseguir o efeito do

acatassolamento ou o asterismo. Existem jazidas de água-marinha em todos os continentes, sendo as mais importantes as do Brasil (Minas Gerais, Bahia, Espírito Santo) (Hurlbut & Switzer, 1979) (Nassau, 1980) (Webster, 1981) (Bonewitz, 2013) (Schumann, 2020) (Arem, 2023).

O mineral granada cuja sua origem se dá em corpos metamórficos e ígneos, possui variações que são consequências da sua origem metamórfica ou ígnea; a região de Quixeramobim no estado do Ceará detém corpos rochosos com este mineral. O grupo granada também apresenta variâncias quanto a sua composição química (dividindo-se no grupo das granadas cálcicas e das aluminosas) que interferem em sua cor (Schumann, 2020). Em termos qualitativos e gemológicos existem seis principais grupos de granadas, são elas: Almandina, Piropo, Grossulária, Spessartita, Andradita e Uvarovita; contudo existem sete outros grupos gemológicos: Rodolita, Hessonita, Leucogranada, Hidrogrossulária, Demantóide, Melanita e Topazolita (Schumann, 2006) (IBGM/DNPM, 2009) (Bonewitz, 2013) (Schumann, 2020)

Suas condições de formação interferem diretamente em sua cor, características gemológicas, valor e importância comercial, características estas que permitem que estes minerais sejam utilizados como imitações de gemas de maior valor comercial (Oliveira, 2019). Granadas não são encontradas em sua forma pura na natureza; o mais puro piropo com qualidade de gema já descoberto continha cerca de 83% de piropo, 15% de almandina e cerca de 2% de outras granadas. O mesmo vale para almandina e grossularia; no entanto, granadas de andradita e spessartita foram encontradas em até 95% de pureza (^{2.1}Arem & Clark, 2023).

O contexto geológico da região de Quixeramobim proporcionou uma abundância de quartzos. Este grupo, apesar de ser um dos minerais mais comuns, é um dos mais atraentes. É constituído de sílica pura (óxido de silício: SiO₂), composto que formando os silicatos, constitui quase 60% da crosta terrestre. O quartzo é também um mineral de grande durabilidade, tanto química quanto fisicamente (Anderson, 1984). A composição química do quartzo é geralmente muito próxima de 100% de SiO₂. As pequenas quantidades de outros óxidos e elementos, que se apresentam nas análises químicas, devem-se geralmente a pequenas inclusões de outros minerais ou a líquidos e preenchem cavidades no interior do quartzo (Franco & Campos, 1971) (Hurlbut & Switzer, 1979) (Anderson, 1984) (Schumann, 2006) (IBGM/DNPM, 2009) (Schumann, 2020).

No entanto, considera-se que são mínimos nos cristais de quartzo de alto grau de qualidade e pureza. A substituição de Si⁴⁺ por Al³⁺ parece ser acompanhada pela introdução dos íons alcalinos Li⁺ ou Na⁺. Em 1900 produziram-se pela primeira vez cristais relativamente grandes de quartzo sintético, usando uma técnica baseada na maior solubilidade

do quartzo numa solução de metassilicato de sódio a temperaturas superiores a 300°C. As necessidades modernas de aplicação de quartzo de alta qualidade em usos piezoelétricos têm levado a intensos estudos para a sua produção sintética, e já se formam cristais com peso superior a 300g no espaço de um mês. As inclusões fluidas são frequentes no quartzo; as suas dimensões variam de <1 µm a vários milímetros na dimensão máxima, mas tipicamente têm 1-10 µm e podem ser abundantes (Anderson, 1984) (Roberts et al 1990) (Schumann, 2006) (Lameiras et al, 2009) (IBGM/DNPM, 2009) (Deer et al, 2010) (Schumann, 2020). A ametista pode possuir a geminação “Lei do Brasil” quando visualizada pelo polariscópio; o fato de que a maioria das ametistas naturais são repetidamente geminadas na lei brasileira, enquanto ametistas sintéticas são geralmente crescidas como cristais simples. Na luz polarizada, uma pedra geminada exhibe graus variados de interrupção no espectro em forma de anéis. Para confirmar a precisão do método, foram examinadas mais de 1100 ametistas naturais e 200 sintéticas (Crowningshield et al, 1986).

Em terras brasileiras há desatualização dos dados ópticos de gemas, contribuindo para o contrabando e golpes relacionados às gemas. Os materiais gemológicos podem ser utilizados para a quitação de dívidas no judiciário, as mais usuais são: o diamante, o rubi, a safira e a 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). Portanto, a caracterização gemológica se faz extremamente necessária para atualização dos dados ópticos das gemas, também servindo para evitar os casos comuns de fraudes que são recorrentes e as várias tentativas de golpes relacionadas às gemas.

Visando a avaliação do nível de facilidade ao visualizar o caráter e sinal óptico no Polariscópio Gomes “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.

As amostras cuja classificação é “excepcional” possuem uma figura de interferência extremamente nítida e com contornos bem definidos.

Os exemplares tidos como “excelente” são detentores de um caráter e sinal óptico de fácil interpretação, possuindo pouca dificuldade ao visualizá-lo.

As gemas cuja classificação foi “bom” detêm uma figura de interferência mais difícil de ser analisada, com uma figura não tão nítida.

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.

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 classificá-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).

Assim, dada à importância da caracterização gemológica supracitada, vale ressaltar, a importância; da caracterização e avaliação gemológica; espectroscopia e cristalquímica dos minerais gema do Município de Quixeramobim em escala regional, para a compilação dos dados acerca destas gemas cearenses.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo consistiu em realizar a caracterização gemológica dos minerais gemas (turmalinas, águas-marinhas, ametistas e granadas) do Município de Quixeramobim (Ceará, Brasil), utilizando os equipamentos que são de praxe para estudo das gemas coradas e analisá-las no Polariscópio Gomes “Disposição construtiva introduzida em polariscópio para estudo e análise de gemas”; realizou-se a análise do potencial gemológico, investigou suas propriedades espectroscópicas, químicas e a organização cristalográfica das dos minerais da região.

2.2 Objetivos específicos

Lapidar as amostras para que se faça a avaliação da qualidade gemológica.

Avaliar a facilidade ao visualizar o caráter e sinal óptico das gemas utilizando o Polariscópio Gomes (Disposição construtiva introduzida em polariscópio para estudo e análise de gemas) e detectar eventuais anomalias no retículo cristalino.

Adquirir dados referentes à composição química dos minerais.

Aferir qual o índice de refração, birrefringência e densidade relativa dos minerais adquiridos.

Analisar o espectro de absorção, a intensidade do pleocroísmo e fluorescência.

Caracterizar os minerais microscopicamente em lâmina delgada.

Avaliar a qualidade da cor, lapidação e inclusões em amostras lapidadas para constatação do potencial gemológico.

Averiguar se os minerais da região possuem características novas para serem incorporadas aos dados mundiais, ou identificar anomalias que caracterizem bem estes minerais.

Aferir a organização e posição dos elementos químicos dentro das estruturas cristalinas nos minerais.

Avaliar os espectros provenientes das espectroscopias vibracionais Raman.

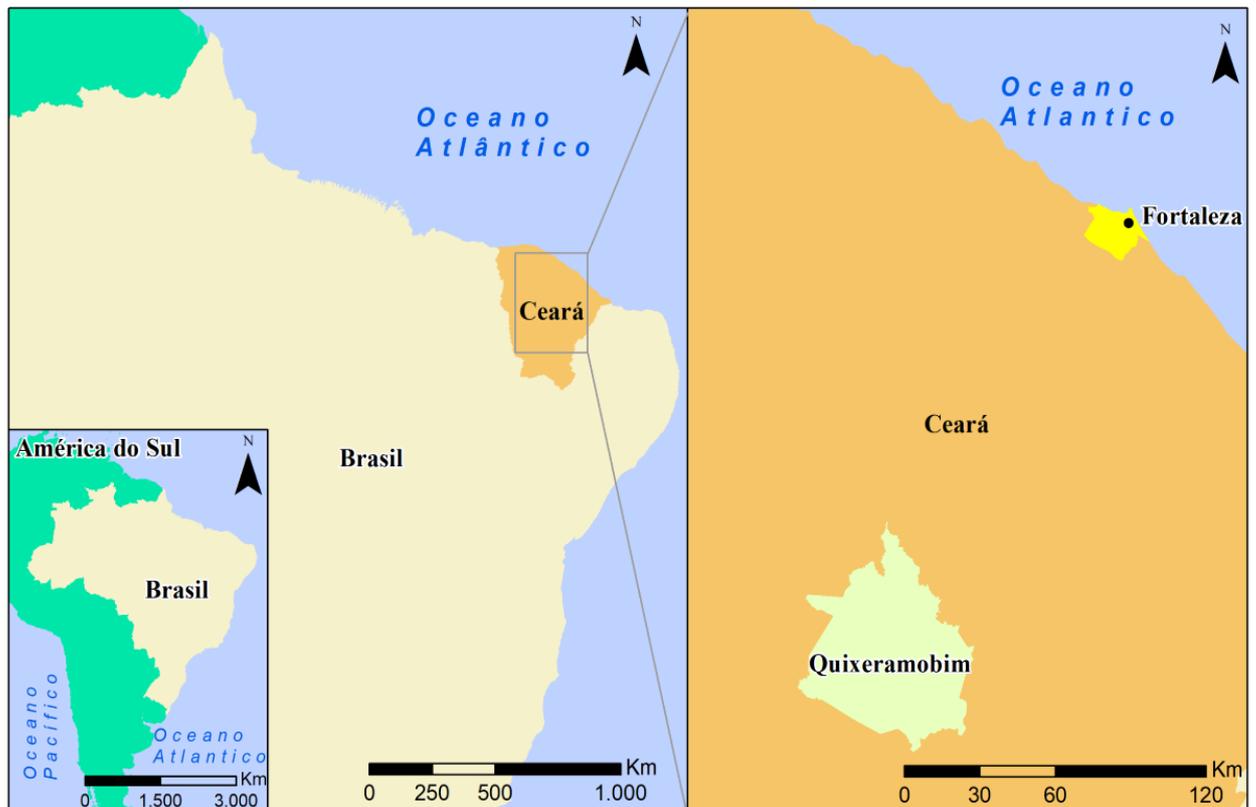
Correlacionar às propriedades ópticas com os dados químicos e de espectroscopia.

Correlacionar os dados cristalográficos com as informações obtidas por meio do Polariscópio Gomes.

3. 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. 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: Elaborado pelo autor.

4. ESTADO DA ARTE SOBRE AS GEMAS DE QUIXERAMOBIM

4.1 TURMALINAS

A turmalina é um borossilicato que se cristaliza no sistema trigonal. 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 oxigênio e (OH) dispostos octaedricamente; 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 oxigênio ou (OH), seus envoltentes, constituem, assim, um pequeno fragmento com forma trigonal de uma camada de brucita. Cada um dos seis átomos de Si está rodeado por quatro oxigênios, em disposição tetraédrica, e cada um dos seis tetraedros compartilha dois oxigênios 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 por que 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, e o Na (posição X) tem uma coordenação tetraédrica imediata com três oxigênios 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 $O_{27}(OH,F)_4$ (Anderson, 1984) (Roberts *et al* 1990) (Bosi *et al* 2005) (Deer *et al* 2010).

4.1.1 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 emanções 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 (Bosi *et al* 2005) (Deer et al 2010) (Arem & Clark, 2023).

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).

4.1.2 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). Existem 15 espécies gemológicas e cada espécie ocorre em várias cores. A espécie dravita é geralmente preto a marrom, podendo ser incolor. Uvita é preto, marrom e verde, geralmente cores escuras. Schorlita 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 elbaíta (de Madagascar), mas, quando investigada, acabou sendo uma elbaíta com cálcio. Chromodravita, como seria de esperar, é uma cor verde escura intensa da URSS (União das Repúblicas Socialistas Soviéticas) atual Rússia. Na Zâmbia, foi encontrada elbaíta

manganífera amarela brilhante, com composição próxima à tsilaisita. Certas variedades de cores da turmalina têm nomes amplamente usados, apesar destes nomes terem sido abolidos. Acroíta é incolor; rubelita refere-se a tons rosa e vermelho, e turmalina azul referida como indicolita. Diferentes elementos são responsáveis pela vasta gama de cores das turmalinas; como o Ti^{3+} que confere a cor amarela e laranja, Mn^{3+} e defeitos na estrutura causam a cor vermelha e rosa, Mn^{3+} e Mn^{2+} fornecem a cor violeta e lilás, Fe^{3+} e Fe^{2+} conferem as cores azul e verde, o Cu^{2+} é o principal e mais comum elemento cromóforo da turmalina Paraíba (Nassau, 1980) (Anderson, 1984) (Schumann, 2020) (Arem & Clark, 2023).

4.1.3 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, estáveis, indetectáveis; esta modificação é obtida entre temperaturas de 450-600 °C, no qual as pedras verdes adquirem tom esmeralda e as castanhas um vermelho luminoso. 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 ocos para impedir a entrada de sujeira, ocasionais, estáveis, detectam com ponto quente (Hurlbut & Switzer, 1979) (Webster, 1981) (Anderson, 1984) (Schumann, 2006) (IBGM/DNPM, 2009) (Arem & Clark, 2023).

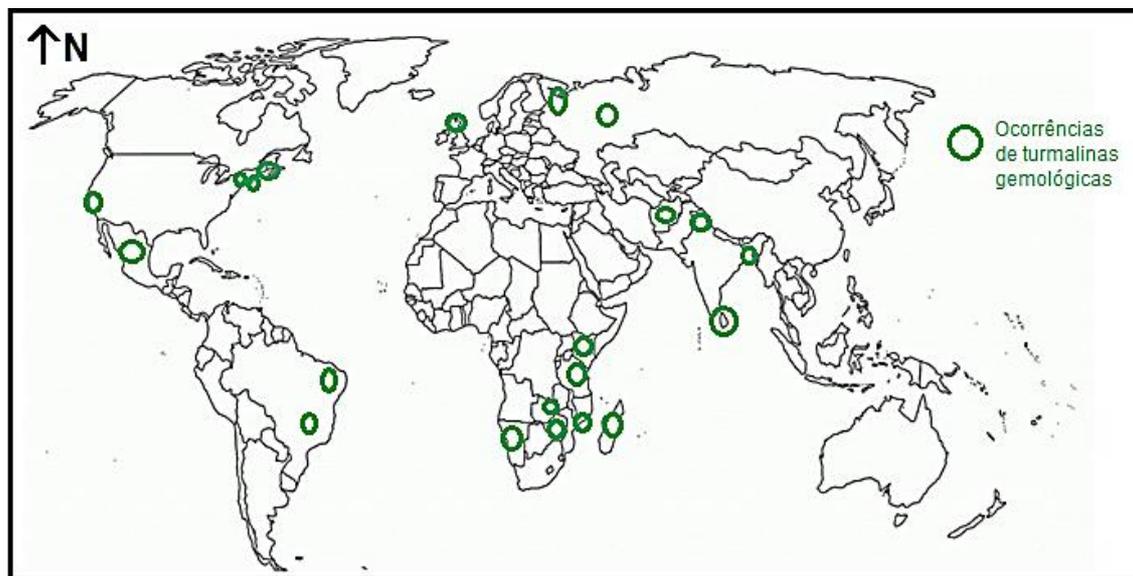
4.1.4 Ocorrência

- A turmalina ocorre em xistos cristalinos; em granitos e pegmatitos de granito (especialmente a elbaíta); 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 gemológica, agora conhecida por ser uvita e não dravita.
- *Birmânia*: A área de Mogok produz turmalinas vermelhas, também alguns elbaítas rosa e uvitas marrons.

- *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 elbaíta, 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 elbaíta (índices de refração (no)1.643, (ne)1.622; DR 3.05 g/cm³, birrefringência de 0,021).
- *Nuristão, Afeganistão*: elbaíta excelente em tons de azul, rosa, verde e até verde esmeralda.
- *Usakos, Namíbia*: Elbaíta de cor verde intensa (turmalina cromada).
- *Klein Spitzkopje, Otavi, Namíbia*: Turmalina em muitos tons de verde e outras cores (elbaíta).
- *Zimbábue*: Na área da floresta de Somabula, elbaíta gemológica.
- *Moçambique*: Em Alta Ligonha, elbaíta de cor pálida em vários tons; bicolores.
- *Madagascar*: Liddicoatita (anteriormente considerada elbaíta) 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*: Elbaíta contendo Cr e V, resultando em ricos tons de verde.
- *Quênia*: Vermelho escuro e outras cores (também tons de amarelo).
- *Glenbuchat, Aberdeenshire, Escócia*: elbaíta colorida até vários centímetros, adequada para a lapidação.
- *Califórnia (EUA)*: Elbaíta em abundância em Pala e em outras localidades. A elbaíta rosa possui uma tonalidade clara.
- *Maine (EUA)*: Em Newry, um enorme depósito de elbaíta gemológica, com material de gema nas cores verde, azul esverdeado, azul e rosa a vermelho.
- *Connecticut (EUA)*: Em Haddam, elbaíta em cristais pequenos e finos, com zonas de cores.
- *México*: Buergerita ocorre em riolito em San Luis Potosi.
- *Nova York (EUA)*: 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 de cor intensa com MnO até 9,2%, muito raro. Existem muitas outras localidades de turmalina, mas as anteriores (Figura 2) são as principais produtoras de gemas (Schumann, 2020) (¹Arem & Clark, 2023).

Figura 2: Localização das principais ocorrências de turmalinas gemológicas, além de incluir o estado do Ceará (CE).



Fonte: autor

4.1.5 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
- 13) Apesar destes nomes serem utilizados no comércio, não recomenda-se mais o seu uso no ambiente acadêmico (Schumann, 2006) (Schumann, 2020) (¹Arem & Clark, 2023).

4.1.6 Propriedades Ópticas e Físicas

Os índices de refração, a birrefringência e a densidade relativa da turmalina aumentam com o incremento do teor em ($\text{Fe}^{2+} \text{Fe}^{3+} \text{Mn} + \text{Ti}$). A intensidade do pleocroísmo é variável, mas é particularmente forte nas turmalinas que contêm ferro. A absorção é sempre no > ne ocorrendo a absorção máxima quando o eixo dos z está perpendicular à direção de vibração do polarizador (Anderson, 1984) (Fujimori & Ferreira, 1987) (Kerr, 1987) (Roberts *et al* 1990) (Bosi *et al* 2005) (Deer *et al* 2010) (Machado e Nardy, 2016).

O grupo mineral da turmalina possui características ópticas muito variáveis, como um índice de refração de 1,603-1,820 (o mais comum 1,610-1,660), com uma birrefringência igualmente mutável com 0,006-0,080 (o mais usual 0,012-0,032), densidade no valor de 2,82-3,90 g/cm³ (o mais comum 2,82-3,32 g/cm³), pleocroísmo 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 (Franco & Campos, 1971) (Hurlbut & Switzer, 1979) (Nassau, 1980) (Webster, 1981) (Anderson, 1984) (Schumann, 2006) (IBGM/DNPM, 2009) (Bonewitz, 2013) (Schumann, 2020). Informações da turmalina são tabeladas segundo informações da *International Gem Society* (¹Arem & Clark, 2023)

A Elbaíta é a espécie desta gema mais comum, seguida por schorlita, 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 (Hurlbut & Switzer, 1979) (Nassau, 1980) (Webster, 1981) (Anderson, 1984) (Schumann, 2006) (IBGM/DNPM, 2009) (Bonewitz, 2013) (Schumann, 2020), encontra-se uma gama limitada de propriedades gemológicas e que dizem respeito apenas aos intervalos mais comuns (com por exemplo: 0,012-0,032 de birrefringência) 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 (¹Arem & Clark, 2023).

4.1.7 Inclusões

A turmalina exibe 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 de 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 (Webster, 1981) (Anderson, 1984) (IBGM/DNPM, 2009) (¹Arem & Clark, 2023).

4.1.8 Espécies

A turmalina é um grupo de minerais que possuem a mesma estrutura cristalina, mas variam em composição química, cor e outras propriedades. Quinze são o número de espécies consideradas na gemologia, e ainda existem outros sendo considerados para novas espécies (¹Arem & Clark, 2023). Esta classificação leva em consideração principalmente as propriedades gemológicas e as propriedades químicas ficam em segundo plano.

4.1.8.1 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.

4.1.8.2 Cromodravita

Cristais verde a preto. A fonte primária rara é o centro da Carélia, na Rússia. Possui 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 (3.39-3.41 g/cm³) índice de refração (1.778-1.772) e baixa birrefringência (0.006). Detém um pleocroísmo que vai de um verde escuro até um amarelo esverdeado.

4.1.8.3 Dravita

Exemplares marrom, preto, preto esverdeado, vermelho escuro e verde azulado pálido a verde esmeralda. Possui muitas fontes de fornecimento. Com índices de refração (1.675-1.604) e birrefringência (0.016-0.032) considerados baixos quando comparados a outros grupos como a Buergerita, porém possui a maior densidade relativa do grupo da Turmalina (3.90-3.10 g/cm³). Sua fórmula química é dada por NaMg₃Al₆B₃Si₆O₂₇(OH)₃(OH,F). O pleocroísmo é bastante variável.

4.1.8.4 Elbaíta

Sua composição é Na(Li,Al)₃Al₆B₃Si₆O₂₇(OH)₃(OH, F). Sendo a turmalina mais comum, com muitas fontes de fornecimento. Ocorre em todas as cores. Possui densidade relativa moderada a baixíssima (3.10-2.82 g/cm³), birrefringência (0.013-0.024) e índice de refrações (1.648-1.603) comumente encontradas como as propriedades médias das turmalinas, talvez por serem as mais usuais no mercado. As cores do pleocroísmo são diversas.

4.1.8.5 Feruvita

Cristais marrom escuro a preto. Fonte primária rara, Cuvier Island, Nova Zelândia. Sua estrutura química é (Na,K)(Mg,Fe⁺²)₃Fe⁺³(BO₃)₃Si₆O₁₈(O,OH)₄. As propriedades gemológicas incluem elevada densidade relativa (3.20 g/cm³) índice de refração (1.687-1.669) e birrefringência (0.018). Possui um pleocroísmo que vai de marrom escuro/verde-oliva a verde azeitona claro/marrom claro

4.1.8.6 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.

4.1.8.7 Liddicoatita

Conhecida por seu complexo zoneamento multicolorido; incomum, encontrada principalmente em Madagascar. Sua estrutura química é $\text{Ca}(\text{Li},\text{Al})_3\text{Al}_6\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH})_3(\text{OH}, \text{F})$. As propriedades gemológicas incluem elevado índice de refração (1.737-1.621), birrefringência baixa (0.016) e densidade relativa (3.02 g/cm^3) baixa. Assim como a elbaíta as cores do pleocroísmo são diversas.

4.1.8.8 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/cm^3), a menor DR do grupo da turmalina. Sua fórmula química não é bem definida e o pleocroísmo idem.

4.1.8.9 Olenita

Cristais rosa pálido. Raro, encontrado principalmente na Península de Kola, na Rússia. Sua estrutura química não é 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/cm^3) baixa.

4.1.8.10 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 ($3.33\text{-}3.18 \text{ g/cm}^3$).

4.1.8.11 Rossmanita

Minerais na cor rosa a marrom. Fonte primária rara, Strázek 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.

4.1.8.12 Schorlita

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).

4.1.8.13 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.

4.1.8.14 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 $\text{CaMg}_3(\text{Al}_5\text{Mg})\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH})_3(\text{OH}, \text{F})$

4.1.8.15 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).

4.1.9 Turmalinas Brasileiras

As turmalinas rosas 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 (Schumann, 2020) (Arem & Clark, 2023).

Na região Nordeste do país, macrorregião do estado do Ceará, foram realizados estudos por Carrino *et al* (2019), Soares (2004), Nogueira Neto *et al* (2019), Trumbull *et al* (2013), Leal Neto (2005), e Soares *et al* (2004 e 2011), envolvendo as propriedades e as rochas hospedeiras de turmalinas de algumas localidades; também havendo uma classificação das mesmas por Soares (2004). No Ceará houveram estudos acerca das propriedades gemológicas e geoquímicas por Oliveira *et al* (2020 e 2021) e Oliveira (2020). Os estudos sobre as turmalinas Paraíba, a mais valiosa no mercado, envolvem propriedades ópticas, físicas, causas de cor, composição química, rocha hospedeira e espectroscopia Raman e foram desenvolvidas por autores como Abduriyim *et al* (2006), Beurlen *et al* (2011) e Beurlen *et al* (2009).

4.2 ÁGUA-MARINHA

A água-marinha, parte do grupo do berilo, é um mineral de cor azul que pode ser utilizado como gema (o segundo mais valorizado da espécie berilo). O berilo é um silicato de alumínio e berílio que se cristaliza no sistema hexagonal, considera-se a fórmula geral $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$, no qual possui 14% de BeO , 19% de Al_2O_3 e 67% de SiO_2 (Franco, 1967) (Roberts *et al* 1990) (Deer *et al*, 2010) (Shiyuan *et al*, 2023). Os berilos estão entre os minerais com os maiores teores de inclusões fluidas; esmeralda, água-marinha, goshenita, berilo-dourado, heliodoro e morganita são as variações deste mineral e seu teor de inclusões também sofre variações de acordo com sua cor. Esta gema (água-marinha) têm sua coloração devido à vestígios de Fe^{3+} (Arem, 2023).

As características dominantes da estrutura do berilo são os anéis hexagonais de seis tetraedros Si-O, formando anéis colunas paralelas ao eixo dos z do cristal. No interior dos anéis, dois dos átomos de oxigênio de cada grupo SiO, são compartilhados por grupos SiO, em qualquer dos lados fornecendo, a razão metassilicato. Os átomos de Al e Be localizam-se entre os anéis, sendo cada Al coordenado por um grupo octaédrico de seis átomos de oxigênio e cada Be rodeado de quatro átomos de oxigênio que se agrupam segundo um tetraedro distorcido. Nestas posições, ligam os oxigênios dos anéis Si_6O_{18} vizinhos, tanto lateral como verticalmente. Nenhum centro de qualquer átomo está mais próximo que $2,55\text{Å}$ dos centros dos canais abertos. No entanto, conhecem-se berilos alcalinos com quantidades apreciáveis de Na e Cs; estes íons de maior raio iônico vão ocupar, evidentemente, canais que de outro modo estariam vazios, e as cargas positivas deles resultantes são compensadas, por substituições de outros cátions em qualquer outro local da estrutura. A água a que geralmente se referem às análises químicas dos berilos também está localizada nestes canais. O berilo, embora normalmente considerado como sendo $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$, contém alguns álcalis e, em certas variedades, o teor total de álcalis pode atingir cerca de 5-7%. Além do Na e Li, também se encontram os íons alcalinos de maior raio iônico, K e Cs, mas o Rb é menos usual (Anderson, 1984) (Deer *et al* 2010) (Shiyuan *et al*, 2023).

4.2.1 Paragênese

O berilo e a água-marinha ocorrem, de modo característico, em drusas em granitos e pegmatitos graníticos; os minerais associados podem englobar quartzo, feldspato, moscovita, lepidolita, topázio, turmalina, espodumênio, cassiterita, columbita e tantalita. A ocorrência de berilo nos pegmatitos graníticos está relacionada com o tamanho do íon Be (berílio), o qual,

sendo pequeno para substituir íons na maioria das estruturas dos silicatos, fica concentrado nos fluidos magmáticos residuais. O berilo ocorre em rochas ricas em alumínio, enquanto a helvita, $(\text{Mn,Fe,Zn})_8\text{Be}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}$, é encontrada em rochas pobres em alumínio. O berilo também ocorre em alguns sienitos e em micaxistos e mármore. As esmeraldas, ao contrário das águas-marinhas, estão quase restritas a uma paragênese metamórfica, tipicamente em xistos biotíticos, embora a principal fonte atual de esmeraldas, em Muso, Colômbia, esteja situada em filões de calcita que cortam calcários betuminosos (Deer *et al* 2010).

4.2.2 Cores

A água-marinha recebe sua coloração a partir de vestígios de Fe^{3+} . Sua gama de tons pode variar de azul esverdeado a azul profundo, e seus tons podem variar de muito claro a moderadamente escuro. Raramente são encontradas águas-marinhas mais escuras que um topázio azul suíço (London Blue Topaz). Quando isto ocorre, a cor geralmente é aprimorada pela lapidação (Nassau, 1980) (Anderson, 1984) (Diamond News, 2006) (Schumann, 2020) (Arem, 2023).

4.2.3 Aprimoramentos da cor

A maioria das águas-marinhas ocorre com um tom esverdeado. No entanto, isso desaparece após o aquecimento a 375°C , o que deixa uma cor azul pura. A remoção da coloração verde da água-marinha através do tratamento térmico é muito comum. No passado, isso era feito rotineiramente. Atualmente, um público mais sofisticado começou a apreciar águas-marinhas ligeiramente verdes e não tratadas. No entanto, distinguir esse processo de aquecimento é impossível. Portanto, as classificadoras de gemas devem descrever qualquer água-marinha azul pura como "provavelmente tratada termicamente" (IBGM/DNPM, 2009) (Schumann, 2020) (Arem, 2023).

4.2.4 Ocorrência

Existem jazidas de água-marinha em todos os continentes; as mais importantes são as do Brasil (Minas Gerais, Bahia, Espírito Santo). O Brasil é a principal fonte mundial de gemas de excelente qualidade de água-marinha. As localidades incluem Minas Gerais, Rio Grande do Norte, Ceará e outros; apenas no Ceará houve uma produção de berilo entre os anos de 1956 e 1959 totalizando 148 toneladas (Franco, 1967). Cristais grandes no Brasil são relativamente frequentes; a maior água-marinha com qualidade para ser lapidada foi

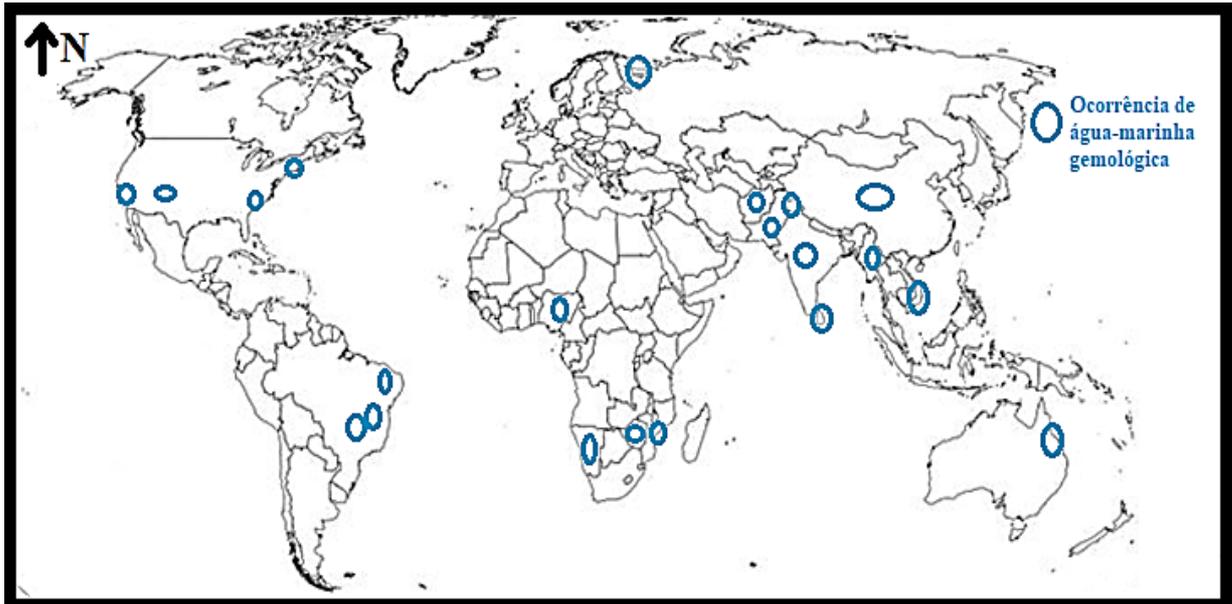
encontrada em Minas Gerais (Brasil); pesava 110,5 kg (Schumann, 2020).

Madagascar tem mais de 50 localidades específicas que produzem materiais com qualidade gemológica. Outras fontes notáveis incluem:

- Estados Unidos: Condado de San Diego, Califórnia; Mt. Antero, Colorado; Connecticut; Maine; Carolina do Norte.
- Austrália: Mt. Surpresa, North Queensland (pequena).
- Índia: Karur, Madras e Caxemira (cor azul médio).
- Namíbia: Rossing (em pegmatitos).
- Nigéria: Jos (material abundante).
- Rússia: Mursinsk Mine (e outras localidades).
- Afeganistão; China; Moçambique; Myanmar; Paquistão; Sri Lanka; Vietnã; Zimbábue.

Existem muitas outras localidades de água-marinha, mas as anteriores (Figura 3) são as principais produtoras de gemas (Arem, 2023).

Figura 3: Localização das principais ocorrências de águas-marinhas gemológicas, além de incluir o estado do Ceará (CE).



Fonte: autor

4.2.5 Variedade e nomes comerciais

- Água-marinha brasileira: verde azulado, (também um nome impróprio para topázio verde azulado).
- Água-marinha de Madagascar: azul médio.
- Berilo maxixe: berilo tratado com excelente azul marinho, conhecido por desbotamento. Também chamado de halbanita.

Não se deve assumir que as águas-marinhas vendidas como "brasileiras" ou "Madagascar" sejam realmente dessas fontes, tal como de outros países. Esses termos podem se referir apenas à cor. Deve-se verificar a documentação e as propriedades para certificar a origem de uma gema (Arem, 2023).

4.2.6 Propriedades Ópticas e Físicas

O fator principal que influencia as propriedades ópticas do berilo é o seu teor de álcalis. Um acréscimo no teor dos elementos alcalinos é acompanhado por um aumento dos índices de refração e birrefringência. O valor do índice de refração pode estar relacionado com a variação da densidade do berilo, assim como com a percentagem de BeO. A cor do berilo é variável, apresentando com maior frequência a cor branca a verde pálida ou amarela. Na gemologia foi sugerido que nenhum de berilo cor verde e que não tenha crômio possa ser classificado como esmeralda. A coloração da água-marinha desde a límpida cor azul pálida até ao azul-céu vivo é devida à variação do teor em Fe^{3+} entre 0,1 e 0,3% (Hurlbut & Switzer, 1979) (Nassau, 1983) (Anderson, 1984) (Deer et al 2010).

O mineral berilo possui características ópticas pouco variáveis, em especial a variedade água-marinha detém uma variabilidade ainda menor. O índice de refração deste berilo azul é 1,567-1,590, com uma birrefringência baixa e pouco variável com 0,005-0,007, densidade no valor de 2,66-2,80 g/cm³, pleocroísmo usualmente fraco, fluorescência inerte, os espectros de absorção são comumente 537, 456 e 427 nm (nanômetros), apenas o caráter e sinal óptico são constantes sendo sempre uniaxial negativo (Hurlbut & Switzer, 1979) (Nassau, 1980) (Webster, 1981) (Anderson, 1984) (Schumann, 2006) (IBGM/DNPM, 2009) (Bonewitz, 2013) (Schumann, 2020). Informações da água-marinha são tabelados segundo informações da *International Gem Society* (Arem, 2023).

4.2.7 Inclusões

As inclusões são características interessantes desta pedra preciosa. O berilo e a água-marinha, em particular, são conhecidos por possuir tubos longos e ocos. Esta característica distintiva identificará uma gema como um berilo. As águas-marinhas podem ter inclusões transparentes e metálicas, como biotita, hematita, ilmenita, flogopita, pirita e rutilo em cristais esqueléticos. Eles também podem conter cristais de outros minerais como: apatita, cassiterita, epídoto, granada, moscovita, quartzo e turmalina.

Algumas gemas contêm "estrelas da neve", gotículas de líquido de forma irregular em uma formação estelar (IBGM/DNPM, 2009) (Arem, 2023).

Com inclusões de tubos ocos suficientes e lapidação adequada, as águas-marinhas podem mostrar acatassolamento e até asterismo. Os colecionadores valorizam muito as águas-marinhas de olhos de gato. Seus preços são muito próximos dos das gemas de mais alta qualidade. As águas-marinhas estreladas (com asterismo) são ainda mais raras que os olhos de gato e podem obter preços mais altos (Schumann, 2020) (Arem, 2023).

4.2.8 Água-marinha Maxixe

Na década de 1970, o termo "Maxixe", era dado a uma água-marinha azul muito escura. No entanto, a cor deste produto irradiado não é estável, deste modo estas gemas com tratamento desapareceram do mercado.

Pode-se distinguir o berilo Maxixe de uma água-marinha natural por sua falta de pleocroísmo. As águas-marinhas naturais têm dicroísmo azul e incolor distinto. Por outro lado, o Maxixe não possui pleocroísmo (Schumann, 2020). O espectro de absorção da água-marinha natural e do Maxixe também difere. Com um espectroscópio, na água-marinha maxixe terá uma linha estreita em 695 nm, uma linha forte em 654 e linhas fracas em 628, 615, 550 e 581. Isso difere consideravelmente do espectro de água-marinha, com uma banda larga em 427 e uma faixa difusa. Também é possível distinguir uma água-marinha Maxixe de uma gema natural com um dicroscópio. Ambas as janelas do instrumento permanecem azuis ao visualizar um Maxixe. Por outro lado, uma janela deve ser incolor ou amarelada pálida ao visualizar uma amostra não tratada (Arem, 2023).

4.2.9 Águas-marinhas Brasileiras

No Estado de Minas Gerais, região Sudeste do Brasil, foram realizados estudos por Viana *et al* (2001 e 2002), Proctor (1984) e Ferreira (2005) envolvendo diversas propriedades e as rochas hospedeiras de águas-marinhas. No Ceará o pesquisador Marques Jr. (1992) realizou uma pesquisa com os pegmatitos portadores de gemas, incluindo água-marinha, do Estado. Foram efetuados estudos mais abrangentes por autores como Adamo *et al* (2008), Graziani *et al* (1979), Keller (1990) e Beurlen *et al* (2001 e 2008), Cesar Mendes *et al* (2001 e 1992), Bello *et al* (1997 e 1996).

4.3 GRANADA

A granada é um termo usual e genérico para um super grupo de minerais que se cristaliza (predominantemente) no sistema cúbico, cuja suas origens são provenientes de corpos metamórficos e ígneos, possui variações que são consequências da sua origem metamórfica ou ígnea. Além de possuir mudanças visíveis, estas granadas também apresentam variâncias quanto a sua composição química (dividindo-se no grupo das granadas cálcicas e das aluminosas) que interferem em sua cor. Suas condições de formação interferem diretamente em sua cor, características gemológicas, valor e importância comercial. Ao contrário de minerais como o coríndon que são uma única espécie com variedades coloridas criadas por oligoelementos, as granadas vêm em diferentes grupos e nunca são encontradas em seu estado puro. Estão sempre acompanhadas com outras espécies de granada. As granadas são chamadas de série de estado sólido. Alguns desses grupos têm características distintas. Combinando os grupos de granadas três a três e as propriedades físicas duas a duas resultam em 30 diagramas triangulares distintos. O que as torna todas granadas é a mesma estrutura cristalina e propriedades semelhantes (Filho & Camargo, 1974) (Schumann, 2020) (²⁻¹Arem & Clark, 2023).

Os minerais do supergrupo das granadas são característicos das rochas metamórficas, mas podem também ocorrer em alguns tipos de rochas ígneas e também como grãos detríticos, em sedimentos. Piropo, almandina, spessartita, grossulária, andradita e uvarovita podem apresentar birrefringência anômala, combinando alguns elementos como: Ca, Mg, Fe e Mn com um dos quatro metais Al, Fe, Mn e Cr (em todos os grupos há o domínio do Si na posição tetraédrica) (Anderson, 1984) (Roberts *et al* 1990) (Hofmeister *et al*, 1998) (Laurs *et al*, 2001) (Shtukenberg *et al*, 2001) (Shtukenberg *et al*, 2005) (Deer *et al*, 2010) (Klein & Dutrow, 2012) (Urosevic *et al*, 2018). As granadas podem ser divididas principalmente em duas séries; pirlspitas (piropo, almandina, spessartita) e ugrandita (uvarovita, grossulária e andradita). Em cada uma das séries referidas verifica-se uma variação contínua e bastante completa na composição química (Anderson, 1960) (Anderson, 1984) (Roberts *et al* 1990) (Deer *et al* 2010) (Klein & Dutrow, 2012) (Urosevic *et al*, 2018). O mineral granada se cristaliza (principalmente) no sistema cúbico (com exceção das granadas Henritermierita e Holtstamita), ao todo existem 33 grupos de granadas (classificação mineralógica) (Grew *et al*, 2013).

A malha unitária das granadas contém oito unidades de fórmulas compostas $X_3Y_2Z_3O_{12}$. A estrutura consiste em tetraedros ZO_4 alternantes com octaedros YO_6 ,

partilhando vértices de modo a formar uma rede tridimensional. No interior da rede existem interstícios que podem ser utilizados como cubos distorcidos, tendo em cada vértice um oxigênio e albergando no seu interior os íons X.

4.3.1 Paragênese

A granada é um mineral especialmente característico de uma vasta variedade de rochas metamórficas, bem como de alguns granitos e pegmatitos, rochas vulcânicas ácidas e kimberlitos. Como é bastante resistente à abrasão e ao ataque químico, encontra-se frequentemente em sedimentos detríticos; estas variedades mais comuns são a granada almandina e o piropo, refletindo a preponderância dessas espécies nas rochas metamórficas (e ígneas). A granada piropo ocorre em algumas rochas ultrabásicas, tais como peridotitos micáceos ou kimberlitos e serpentinitos associados, e pode ser encontrada nas areias e cascalhos derivados dessas rochas ultrabásicas. As granadas da Boêmia (República Tcheca), com qualidade gemológica, são piropos e ocorrem nos detritos de uma brecha basáltica derivada de um peridotito. O piropo é um dos minerais com as melhores características de diagnóstico para a prospecção de kimberlitos. Conforme as granadas ocorrem, não como minerais primários dos kimberlitos, mas como megacristais na matriz do kimberlito e em blocos ou xenólitos de peridotitos e piroxenitos com granadas e eclogitos. Nos eclogitos, em que a granada ocorre como constituinte mineral essencial, o teor da molécula de piropo foi utilizado como característica para a distinção de três grupos. Inclusões do eclogito contendo piropo ocorrem nas chaminés (pipes) com brecha nefelínica básica, considerando-se que cristalizaram no intervalo 7 - 15 kbar, 700 - 1200 ° C, logo, no manto superior ou na parte mais inferior da crosta (Deer *et al*, 2010).

Tem-se observado piropo com Cr em kimberlitos e xenólitos peridotíticos em peridotitos, e é também um dos dois tipos característicos de granadas encontradas como inclusões em diamantes, permitindo o reconhecimento de uma relação paragenética entre os diamantes e entre os kimberlitos e seus xenólitos peridotíticos (Deer et al 2010).

O metamorfismo regional, em condições de fácies granulítica, nas formações de ferro bandeadas Pré-câmbricas originam diversas associações de silicatos ricos em ferro. Uma formação bandeada de ferro com quartzitos de almandina-hedembergita e rochas com granadas está associada a um jazigo metalífero de Pb-Zn em Broken Hill, Austrália. Verificam-se as variações composicionais acentuadas de um cristal para o seguinte, em escalas de 1-2 mm, nas granadas originais, considerando-se que estas granadas preservaram durante 1800 milhões de anos um padrão químico original. Em muitos xistos azuis, como

granadas que acompanham a glaucofana, epídoto, lausonita, etc, são claramente almandina-piropo cálcicas (Deer *et al*, 2010).

4.3.2 Cores

As granadas de cor amarela são coloridas pelo Mn^{2+} e Fe^{2+} ; o Fe^{2+} e Fe^{3+} conferem as cores laranja, vermelha e lilás; Fe^{2+} fornece a cor rosa; o cromo (Cr^{3+}) é o responsável pela cor verde juntamente com o Fe^{3+} . Devido à sua enorme variedade de cores, as granadas não podem ser identificadas apenas com base na cor. Estas informações são apenas para referência (Nassau, 1983) (Anderson, 1984).

Almandina: vermelho profundo, vermelho acastanhado, preto acastanhado, vermelho violeta.

Andradita: verde-amarelo, verde, marrom esverdeado, amarelo alaranjado, marrom, preto acinzentado, preto. A cor está relacionada ao conteúdo de Ti e Mn.

Spessartita: vermelha, laranja avermelhada, laranja, marrom-amarelada, marrom-avermelhada, marrom-escura.

Grossulária: incolor, branco, cinza, amarelo, alaranjado, verde amarelado, verde (vários tons), marrom, rosa, avermelhado, preto.

Malaia: vários tons de laranja, vermelho-laranja, pêssego e rosa.

Piropo: vermelho purpúreo, vermelho rosado, vermelho alaranjado, vermelho escuro. O piropo puro seria incolor; as cores vermelhas são derivadas de Fe + Cr.

Rodolita: geralmente tem uma cor purpúrea distinta.

Uvarovita: verde escuro (Nassau, 1983) (Anderson, 1984) (Schumann, 2020) (²⁻¹Arem & Clark, 2023).

4.3.3 Variedades de granadas

O supergrupo das granadas constitui 33 grupos, mas gemologicamente são divididas nos seguintes grupos:

- **Almandina:** A gema mais comum na família da granada vem em uma ampla gama de cores. A mistura de almandina-piropo é a variedade vermelho-escura popularmente associada às granadas. Possui índice de refração que vai de 1,75 – 1,83. Densidade relativa mais alta para o grupo, com valores que vão de 3,95 – 4,30 g/cm³. Espectro de absorção amplo, com valores em 617, 576, 526, 505 e 426 nm. Com a seguinte fórmula química $Fe_3Al_2Si_3O_{12}$.

- **Andradita**: Uma das granadas mais raras. Essas gemas têm a maior dispersão de todas as granadas e têm ainda mais fogo do que diamante. O demantóide verde é especialmente valorizado. Com índice de refração mais alto dentro do grupo, que vai de 1.855-1.95, pode ter birrefringência anômala. Densidade relativa alta para o grupo, com valores que vão de 3,70-4,10 g/cm³. Espectro de absorção amplo, com valores em 701, 693, 640, 622 e 443 nm. Com a fórmula química Ca₃Fe₂Si₃O₁₂.
- **Grossulária**: ao contrário de outras granadas, essas gemas raramente são vermelhas ou de tom escuro. Eles podem ser encontrados em todas as cores, mesmo incolores, exceto azul. Seus tons claros a médios e cores vibrantes as tornam excelentes para joias. O índice de refração vai de 1.720-1.800, pode ter birrefringência anômala. Densidade baixa para o grupo, com valores que vão de 3,4-3,71 g/cm³. Espectro de absorção variável com valores em 697, 630, 605, 505, 461, 407 e 403 nm. Pode ter fluorescência. Com a seguinte fórmula química Ca₃Al₂Si₃O₁₂.
- **Piropo**: Piropo granada cromífera é um vermelho que rivaliza com o rubi. No entanto, eles têm um tom muito escuro, piropos são normalmente vermelhos com um tom acastanhado. Possui índice de refração mais baixo para o grupo 1,73-1,766. Densidade relativa de 3,65-3,87 g/cm³. Espectro de absorção com valores em 686, 671, 650 e 570 nm. Com a seguinte fórmula química Mg₃Al₂Si₃O₁₂.
- **Spessartita**: Esta granada um tanto rara vem em uma variedade de cores laranja. As granadas Mandarin são muito procuradas. Com índice de refração que vai de 1,79-1,83. Densidade relativa alta para o grupo, com valores que vão de 3,80-4,25 g/cm³. Espectro de absorção amplo, com valores em 495, 485, 462, 432, 424 e 412 nm. Com a fórmula química Mn₃Al₂Si₃O₁₂.
- **Uvarovita**: a pedra mais rara da família da granada é um verde escuro e rico que rivaliza com a esmeralda. O material facetável é sempre pequeno e extremamente raro. O índice de refração vai de 1,74-1,87, pode possuir birrefringência anômala. A presença de um grande átomo de Ca (cálcio) na uvarovita pode tornar alguns espécimes birrefringentes. Isso pode ser devido à deformação ou redução da simetria; simetria monoclinica, ortorrômbica e triclinica ocorre em uvarovitas naturais. Densidade baixa para o grupo, com valores que vão de 3,40-3,80 g/cm³. Com a seguinte fórmula química Ca₃Cr₂Si₃O₁₂ (Webster, 1981) (Anderson, 1984) (Schumann, 2006) (IBGM/DNPM, 2009) (Bonewitz, 2013) (Schumann, 2020) (Arem & Clark, 2023).

As seguintes misturas são consideradas grupos de granada e não subgrupos dos grupos acima.

- **Rodolita**: Uma mistura de piropo e almandina com uma cor púrpura distinta ou rosa notável. O índice de refração é baixo para as granadas, vai de 1.745-1.761, pode ter birrefringência anômala. Densidade relativa bem definida 3,79-3,80 (Tanzânia); 3,83-3,89 (Zimbábue) e 3,84-3,89 g/cm³ (Carolina do Norte). As rodolitas apresentam um espectro de absorção da almandina. Possui a seguinte fórmula química (Fe, Mg)₃Al₂Si₃O₁₂.
- **Malaita**: Um termo originalmente usado para descrever granadas que não se encaixavam nas categorias padrão. É agora reconhecido como uma mistura de piropo e spessartita. Com índice de refração que vai de 1,74-1,78. Densidade relativa com valores que vão de 3,75-4,00 g/cm³. Espectro de absorção muito amplo, com valores em 537, 520, 504, 480, 460, 430, 421 e 410 nm. Com a fórmula química A₃B₂Si₃O₁₂ (A = Mn, Mg, Fe. B = Al, Fe, V, Cr).
- **Granadas com mudança de cor**: Nas últimas décadas, foram descobertas granadas que ficam azuis com a luz artificial. No final dos anos 1990, granadas azuis que são vermelhas com flashes roxos sob luz incandescente foram descobertas em Madagascar. Essas gemas que mudam de cor são uma mistura piropo-spessartita. Algumas granadas de *Idaho* (região dos Estados Unidos) mostram uma forte mudança de cor do vermelho para o vermelho arroxado. Trata-se de uma mistura de almandina-piropo (^{2.1}Arem & Clark, 2023).

4.3.4 Granadas Sintéticas

As granadas sintéticas tiveram um efeito no mundo das gemas. Antes do advento da zircônia cúbica (ZC) no final dos anos 1970, a granada sintética era o principal simulador de diamante. Embora possam ter uma presença menor no mercado de hoje, ainda existem estas gemas sintéticas.

YAG (granada de ítrio-alumínio) foi a primeira granada sintética disponível no mercado de joias. Em seu estado puro, o YAG é incolor. No entanto, pode ser criado em quase todas as cores. Os elementos químicos usados para colorir também são responsáveis pela ampla faixa de índice de refração e densidade relativa. No entanto, sua dispersão é um pouco baixa para um substituto do diamante. GGG (granada de gálio de gadolínio), tem uma alta dispersão (0,038). O gadolínio e o gálio são muito mais caros do que o ítrio. No entanto,

com uma dispersão próxima ao diamante (0,044), GGG é um excelente substituto. Tal como acontece com o YAG, os elementos usados como cromóforos também são responsáveis pela ampla faixa de índice de refração e densidade reativa. Estes materiais artificiais estão disponíveis em várias cores (IBGM/DNPM, 2009) (^{2.1}Arem & Clark, 2023).

4.3.5 Ocorrência

As principais fontes das granadas (como grupo mineral) são (Figura 5) Birmânia, China, Sri Lanka, África do Sul, Tanzânia, Estados Unidos, Brasil, Índia, República do Malgaxe, República Tcheca, Áustria, Quênia, Namíbia, Canadá, Paquistão, Rússia, Coreia do Sul, Zaire, Zâmbia, Alemanha, França, Itália, Suíça, Finlândia e Polônia (Schumann, 2006) (Schumann, 2020).

Fontes notáveis de granada **almandina** incluem:

- *Índia: Jaipur* (em mica xisto); também *Rajasthan* e *Hyderabad*; granadas com asterismo (estrela) também são encontradas nessas localidades.
- *Madagascar*: exemplares com tamanhos grandes.
- *Sri Lanka*: cor excelente e tamanho grande.
- *Estados Unidos: Fort Wrangell, Alasca* (cristais bem formados); *Colorado; Connecticut; Idaho* (granadas estreladas); *Maine; Michigan; Nova York; Pensilvânia; Dakota do Sul*.
- *Afeganistão; Áustria; Brasil: Minas Gerais, Bahia; Canadá: Baffin Island, British Columbia; República Checa; Etiópia; Groelândia; Japão; Quênia; Moçambique; Mianmar; Noruega; Paquistão; Rússia; Ilhas Salomão; Suécia; Tanzânia; Uruguai; Vietnã; Zâmbia*.

Existem muitas fontes de **andradita** em todo o mundo, mas os suprimentos de qualidade destas gemas são limitados. Em 2009, uma mina perto de *Antetezambato, Madagascar*, surgiu como uma fonte notável de demantóide. Também são notáveis os países: Rússia, Itália e Estados Unidos.

- ❖ *A Rússia* produziu demantóide de excelente qualidade, bem como topazolitas e algumas (pequenas) andraditas marrons.
- ❖ *A Itália* produz muitas variedades de andradita. *Ala, Piemonte*, produz demantóides verde-maçã escuros e topazolitas amarelos a verdes amarelados. *Val Malenco, província*

de *Sondrio*, também é uma fonte notável de demantóide. *Monte Somma*, *Vesúvio* e *Trentino* produzem melanita.

- ❖ Nos *Estados Unidos*, o condado de *San Benito*, na *Califórnia*, produziu uma variedade de andraditas com qualidade de gema: topazolita, demantóide, melanita e um material com acatassolamento (olho de gato) incomum. Outras fontes dos EUA incluem o seguinte: *Arizona*; *Arkansas*; *Colorado*; *Nova Jersey*; *Novo México* (em calcários metamórficos e depósitos de minério); *Pensilvânia*.

Outras fontes notáveis incluem o seguinte:

- ❖ Afeganistão; Austrália; Canadá; China; Groenlândia; Irã; Japão; Mali; México; Namíbi; Noruega; Paquistão; Peru; África do Sul; Coreia do Sul; Sri Lanka; Suécia; Peru; Uganda; Iémen; Zimbábue e República Democrática do Congo (^{2.1}Arem & Clark, 2023).

As **spessartitas** fazem-se presentes no condado de San Diego, Califórnia, especialmente em Ramona. Outras fontes notáveis nos Estados Unidos são:

- *Colorado*; *Nevada*; *Novo México*; *Carolina do Norte*; *Pensilvânia*; *Amelia Court House*, *Virgínia* (material de cor laranja intenso a marrom-escuro).
- Namíbia, Nigéria e Tanzânia são as principais fontes de spessartitas, incluindo mandarins.
- *Ceará e Minas Gerais, Brasil*: cristais grandes (até vários quilos).
- *Sri Lanka e Mianmar*: em cascalhos de gemas.
- ❖ *Afeganistão*; *Austrália*; *China*; *Alemanha*; *Itália*; *Quênia*; *Madagáscar*; *México*; *Moçambique*; *Noruega*; *Paquistão*; *África do Sul* (^{2.1}Arem & Clark, 2023).

Numerosas localidades produzem **grossulárias** com qualidade de gema em todo o mundo. Algumas fontes notáveis incluem:

- *Estados Unidos*: *Califórnia* (muitas localidades); *Região da Nova Inglaterra* (muitas localidades); *Eden Mills, Vermont* (cristais laranja); *Washington*.
- *Amianto, Quebec, Canadá*: cristais de qualidade de laranja a rosado na mina Jeffrey, com até 5 centímetros de diâmetro. Também incolor.
- *México*: grandes cristais rosados, brancos e esverdeados, coloridos em zonas concêntricas, geralmente opacos; cristais de até cerca de 5 polegadas de diâmetro.
- *Sri Lanka*: grossulárias (hessonita) encontradas em depósitos aluviais.
- *Austrália*: *Cordilheira Harts, Território do Norte* (hessonita).

- *Quênia e Tanzânia*: grossulária em várias cores (especialmente tsavorita).
- *Rússia*: cristais verdes opacos com idocrásio (versuvianitas).
- *Paquistão*: algumas gemas verdes facetadas, também grossulária verde, também em vários tons.
- ❖ *Brasil; Itália; Mianmar; África do Sul e Suíça* (^{2.1}Arem & Clark, 2023).

A área próxima a *Třebenice (Trebnitz)*, na República Tcheca, produz as **piropos** mais conhecidas, as chamadas granadas da Boêmia, que ocorrem em brechas vulcânicas, tufos e conglomerados. Essas granadas foram de grande importância para a indústria local no século XIX. Hoje, a produção continua, mas em menor escala. Uma enorme quantidade de piropo dessas minas foi vendida ao longo dos anos.

A *África do Sul* produz piropos com excelente cor vermelho sangue, mas em tamanhos pequenos. Essas granadas ocorrem em kimberlito e eclogito associado a diamantes. Piropos não ocorrem apenas com diamantes, mas às vezes também se formam como inclusões de cristal dentro dos diamantes.

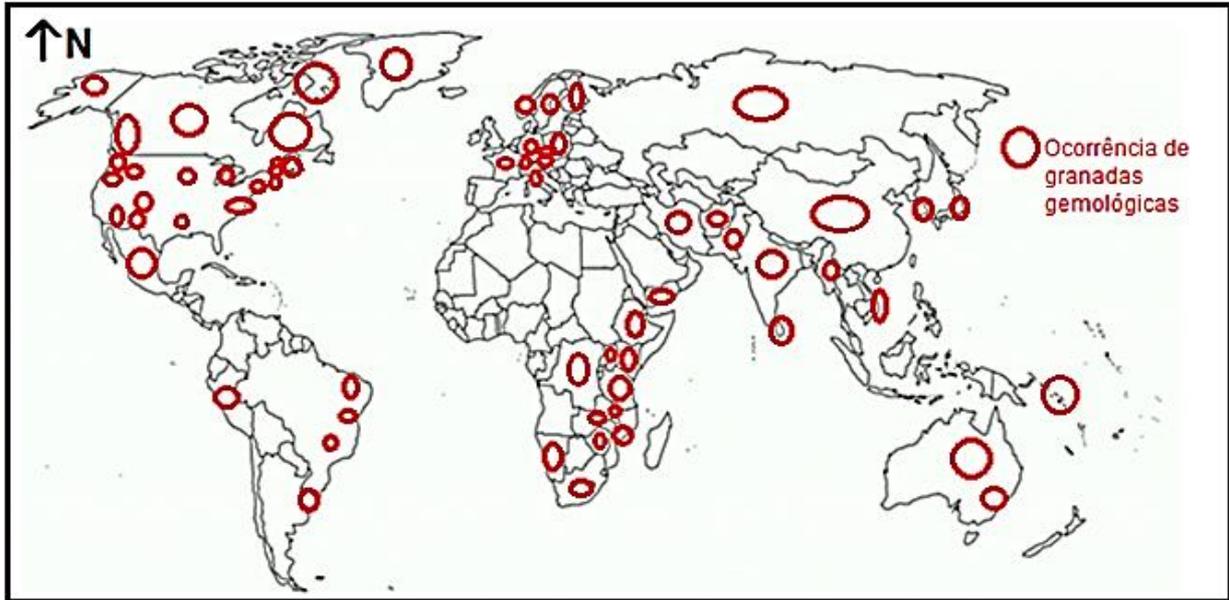
Outras fontes notáveis de qualidade de gema incluem as seguintes localidades:

- *Austrália*: *Bingara, New South Wales; Anakie, Queensland*.
- *Estados Unidos*: *Arizona; Arkansas; Novo México; Carolina do Norte; Utah*.
- *Argentina; Brasil; China; Congo; Índia; Quênia; Madagascar; Malawi; Moçambique Ott ery, Noruega; Transbaikal, Rússia; Sri Lanka; Tanzânia; Vietnã* (^{2.1}Arem & Clark, 2023).

A fonte mais conhecida de **uvarovitas** com qualidade de gema, *Outokumpu*, Finlândia, produz cristais verdes e grandes. Outras fontes notáveis incluem:

- Estados Unidos: Norte da Califórnia (em depósitos de cromita); Oregon.
- Afeganistão; Thetford, Quebec, Canadá; China; Noruega; Rússia; África do Sul (^{2.1}Arem & Clark, 2023).

Figura 4: Principais ocorrências de granadas gemológicas, incluindo o estado do Ceará (CE).



Fonte: autor

4.3.6 Propriedades Ópticas e Físicas

As propriedades ópticas dependem muito da química. Piropo, almandina e spessartita são geralmente isotrópicos. No entanto, a presença do átomo de cálcio na uvarovita, grossulária e andradita os torna birrefringentes. Grossulária e andradita são quase sempre zoneadas, frequentemente geminadas e distintamente não isotrópicas ao microscópio. Em 1960, o índice de refração das granadas era entre 1,75-1,89 (dependendo do grupo), a densidade das granadas era considerada entre 3,51-4,13 g/cm³ (Anderson, 1960). Atualmente, o índice de refração também varia por grupo, oscilando entre 1,72-1,95 (²⁻¹Arem & Clark, 2023). A densidade relativa pode variar de 3,40 a 4,30 g/cm³ (²⁻¹Arem & Clark, 2023) dependendo do grupo. A fluorescência da maioria das variedades é inerte; grossulárias podem mostrar uma variedade de fluorescência. Não possuem caráter e sinal óptico, bem como pleocroísmo. O espectro de absorção é muito variável (consultar item 3.4.3) (Hurlbut & Switzer, 1979) (Nassau, 1980) (Webster, 1981) (Anderson, 1984) (Schumann, 2006) (IBGM/DNPM, 2009) (Bonewitz, 2013) (Schumann, 2020). Informações das granadas são tabeladas segundo informações da *International Gem Society* (IGS) (²⁻¹Arem & Clark, 2023).

A síntese das composições dos termos extremos das granadas principais tornou-se possível pela determinação dos índices de refração, da densidade e das dimensões das arestas das células unitárias, tendo sido construídos diversos diagramas relacionando a variação das propriedades físicas com a mudança da composição química do grupo das granadas

(Anderson, 1984). Das entidades físicas mais comuns, é a densidade a menos fiável, devido a ser frequente a ocorrência nas granadas de inclusões de quartzo e outros minerais. A utilização de tais diagramas baseia-se na hipótese de que as propriedades físicas representadas são funções aditivas das proporções moleculares dos membros finais e que os outros componentes, para além das cinco moléculas comuns nas granadas de termos extremos, são relativamente insignificantes. Adicionalmente, outros dados como o teor em MnO ou FeO, ou o conhecimento das associações do mineral ou da sua paragênese, podem ser combinados para determinar de modo mais preciso a composição da granada. O método mais eficiente para determinar uma composição de uma granada é o de análise por microsonda (Deer et al, 2010) (Klein & Dutrow, 2012).

A granada é muitas vezes admitida como o mineral isotrópico, mas, e embora a granada almandina e o piropo sejam em geral completamente isotrópicos, a spessartita pode ser anisotrópica e a série ugrandita (uvarovita, andradita e grossulária) pode apresentar um evidente anisotropismo. Pequenos cristais de andradita, grossulária e uvarovita podem ser isotrópicos, mas é bastante característica a ocorrência de fraca birrefringência em grandes cristais destes grupos, podendo apresentar todas elas uma complexa série de maclas devido, provavelmente, à deformação interna dos cristais. O tipo de macla é variável, aparecendo muitas vezes como setores de maclas compostas por 6, 12 ou 24 pirâmides com os vértices unidos no centro do cristal; estes setores são, muitas vezes, ligeiramente biaxiais. Nas séries da ugrandita pode também ser visível um certo zoneamento e gemação, estes são bem visíveis em andraditas que ocorrem em algumas zonas de depósitos escarníticos de metamorfismo de contato, exemplos como birrefringência de 0,008 (Shtukenberg *et al*, 2001) (Shtukenberg *et al*, 2005) (Deer et al, 2010).

4.3.7 Características das granadas

A identificação das granadas é complexa, quando se aprofunda na química mineral. Nos últimos cinquenta anos, várias novas misturas foram descobertas na África Oriental. Não há razão para acreditar que todas as combinações possíveis foram descobertas. As granadas compartilham propriedades comuns no nível molecular, apesar das variações consideráveis. Um modelo comparativo e simplório pode ser explicado como: uma mão fosse um modelo de uma molécula de granada, todas as granadas compartilhariam o arranjo de átomos representado pela palma. No entanto, os átomos representados pelos dedos são intercambiáveis. Em outras palavras, diferentes átomos podem residir nos dedos, enquanto a

palma da mão permanece a mesma. Alterando os átomos de um dedo e terá um grupo diferente, embora a estrutura e as propriedades relacionadas permaneçam as mesmas (^{2.1}Arem & Clark, 2023).

A química das granadas é bastante oscilante. Abaixo está a composição química dos principais grupos de gemas granadas.

- Almandina: $\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$
- Andradita: $\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$
- Spessartita: $\text{Mn}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$
- Grossulária: $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$
- Piropo: $\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$
- Uvarovita: $\text{Ca}_3\text{Cr}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$

Existem várias mudanças na química. No entanto, todos estes mantêm a mesma estrutura básica, são silicatos. As granadas cristalizam no sistema isométrico (a maioria, 31 dos 33).

Durante décadas, a rodolita foi descrita como uma parte almandina e duas partes piropo. No entanto, as granadas não são tão simples. As gemas de rodolita, assim como todas as outras granadas, também possuem algumas das outras espécies na mistura. Podem estar presentes em quantidades muito pequenas, mas as granadas nunca são tão simples como apenas dois ingredientes. Além disso, uma série de estado sólido como uma mistura de almandina-piropo não significa que é uma mistura de dois tipos de moléculas, $\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ (almandina) e $\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ (piropo). Em vez disso, significa que a estrutura contém Fe e Mg.

As granadas não são encontradas em sua forma pura na natureza. O piropo de qualidade de gema mais puro já descoberto continha cerca de 83% piropos, 15% almandina e cerca de 2% de outras granadas. O mesmo é verdadeiro para almandina e grossulária; 80% é o mais puro já encontrado. No entanto, granadas de andradita e spessartita foram encontradas com até 95% de pureza. Granadas incolores não gemológicas 97% puras foram encontradas. As granadas conhecidas hoje apresentam variedades consideráveis em suas misturas (^{2.1}Arem & Clark, 2023).

No passado, as granadas eram agrupadas de acordo com a composição química e ainda são referidas dessa maneira. Nos seis grupos principais as granadas que contêm Al (alumínio) na posição B em sua fórmula química são conhecidas como pirlspitas (para piropo, almandina e spessartita). As granadas com Ca (cálcio) na posição A são conhecidas como ugranditas (uvarovita, grossulária e andradita) (Deer *et al*, 2010).

4.3.8 Spessartita e Grossulária

4.3.8.1 *Spessartita*

Como todas as granadas, a spessartita com predominância de manganês (Mn) ocorre quase sempre em série com outras espécies de granadas geralmente laranja a marrom avermelhado, spessartita ou granada de qualidade gema são um tanto raras. No entanto, como misturas com outras espécies de granadas, elas incluem as populares granadas mandarim e malaia, bem como gemas que mudam de cor. Spessartitas são gemas de joalheria muito duráveis (Hurlbut & Switzer, 1979) (IBGM/DNPM, 2009) (Bonewitz, 2013) (Schumann, 2020) (^{2,3}Arem & Clark, 2023).

Antes da descoberta das granadas mandarim na década de 1990, os vermelhos alaranjados brilhantes eram as cores de spessartita mais valiosas. Estes vieram mais famosos de Ramona, Califórnia e Amelia County, Virgínia, nos Estados Unidos. Essas spessartitas permanecem muito raras e valiosas. A spessartita geralmente ocorre em uma série de estado sólido ou misturada com outros grupos de granada, como almandina e piropo. As gemas mais próximas de um conteúdo puro de spessartita têm uma cor laranja clara. Aqueles com uma tonalidade avermelhada a marrom-avermelhada têm um teor de almandina mais alto, bem como um índice de refração mais alto. A spessartita faz parte da composição de muitas granadas que mudam de cor. A maioria dessas gemas são misturas de piropo-spessartita. Granadas de mudança de cor incomum com grandes quantidades de vanádio (V) e cromo (Cr) foram relatadas a partir de fontes da África Oriental. Estes são principalmente spessartita com componentes extraordinariamente grandes de grossulária. Não há tratamentos ou aprimoramentos de gemas conhecidos para as spessartitas (IBGM/DNPM, 2009) (^{2,3}Arem & Clark, 2023).

4.3.8.2 *Grossulária*

A cor das grossulárias depende do teor de ferro (Fe) e manganês (Mn). Se uma peça tiver menos de 2% de Fe, ela apresentará cores claras ou nenhuma cor. Quantidades maiores de Fe produzem cores marrons e verdes. O cromo (Cr) produz uma tonalidade verde rica. (As tsavoritas recebem sua apreciada cor verde-esmeralda principalmente do vanádio). As grossulárias têm uma aparência de redemoinho, este aspecto mineral vem

de inclusões de cristais de diopsídio e listras irregulares nos contornos dos grãos. Algumas grossulárias também têm inclusões de zircão. O material da Tanzânia também pode ter inclusões de actinolita e apatita. As duas gemas grossulária mais conhecidas são a hessonita e a tsavorita (Hurlbut & Switzer, 1979) (Nassau, 1980) (Anderson, 1984) (IBGM/DNPM, 2009) (Schumann, 2020) (Arem & Clark, 2023).

As grossulárias incolores ocorrem na Califórnia, Canadá, México, Mianmar e Tanzânia. O material de Georgetown, Califórnia, tem índice de refração de 1,737 e densidade relativa de 3,506 g/cm³. O chamado *Jade Transvaal* é uma hidrogrossulária maciça verde da África do Sul. A hidrogrossulária do Paquistão tem um índice de refração $N = 1,738-1,742$ e uma densidade relativa de 3,63 g/cm³; material semelhante da Tanzânia tem $N = 1,742-1,744$ e uma densidade de 3,68 g/cm³ (Arem & Clark, 2023).

Embora as granadas tenham a reputação de normalmente não receberem tratamento, isso ocorre. As grossulárias receberam algumas melhorias incomuns. Em um caso peculiar, uma rara grossulária incolor foi tingido para parecer um rubi. Em um experimento de 1992, os pesquisadores descobriram que a radiação gama pode induzir uma cor amarelo-esverdeada instável em grossulárias incolores e em tons claros da África Oriental. À luz do sol, a cor desvanece dentro de horas ou dias; sem a incidência da radiação solar, em uma semana. Assim, este processo não tem viabilidade comercial. No entanto, é aconselhável examinar grossulárias verdes-amarelos à luz do sol (Arem & Clark, 2023).

4.3.8.3 *Inclusões em Spessartita e Grossulária*

Normalmente, as spessartitas e grossulárias lapidadas e sem inclusões visíveis a vista desarmada ainda podem conter diversas inclusões:

- Inclusões líquidas tipo penas onduladas e irregulares
- Inclusões bifásicas
- Cristais negativos,
- Fraturas
- Linhas de crescimento
- ✓ Cristais de manganês, ferro, magnetita, diopsídio e zircão curto e arredondado
- ✓ Agulhas de cristais longos
- ✓ Tubos de crescimento

- ✓ Fratura e fraturas cicatrizadas (impressões digitais)
- ✓ Inclusões de duas fases
- ✓ Linhas de crescimento (Franco, 1961) (IBGM, 2009) ^(2.2, 2.3) Arem & Clark, 2023).

4.3.9 Granadas Brasileiras

No Brasil, foram realizados estudos por Bitner *et al* (2011), Ferreira *et al* (2006 e 2007), Hoover *et al* (2015), Esperança *et al* (1995), Svisero (1979), Lima *et al* (1995), Resende *et al* (2005), Hofmeister *et al* (1998), Oliveira *et al* (1986) e Krambrock *et al* (2013), Eeckhout *et al* (2002), Koivula *et al* (1991), Francesco *et al* (2018) e White (2010), envolvendo propriedades, como químicas, cristalográficas, petrográficas, gemológicas, potencial de mineralização, elementos traços e das rochas hospedeiras de granadas. Foram efetuados estudos acerca das propriedades magnéticas por Oliveira *et al* (1989). Embora na maioria dos casos das granadas brasileiras sejam estudadas do ponto de vista geológico (principalmente as condições de formação) e geoquímico (principalmente os oligoelementos), e sua gemologia raramente é estudada.

4.4 AMETISTA

A ametista é um quartzo cristalino em cores que variam do lilás claro ao roxo avermelhado profundo e que se cristaliza no sistema trigonal. Com uma dureza relativamente alta de 7 na escala de Mohs. Ametistas de baixa qualidade gemológica podem ser esculpidas e transformadas em uma grande variedade de outros objetos ornamentais (Hurlbut & Switzer, 1979) (Nassau, 1980) (Webster, 1981) (Anderson, 1984) (Schumann, 2006) (IBGM/DNPM, 2009) (Bonewitz, 2013) (Schumann, 2020) (Arem & Clark, 2023).

O quartzo é um dos minerais mais abundantes e ocorre como constituinte principal de muitas rochas ígneas, sedimentares e metamórficas. Encontra-se também como mineral acessório, e como mineral secundário em jazigos metassomáticos. Os polimorfos de SiO₂, mais importantes e os seus intervalos de estabilidade de temperatura são:

Quartzo alfa: estável à temperatura atmosférica de até 573° C.

Quartzo-beta: estável de 573° a 870° C. Pode existir, em forma metaestável, acima dos 870°C.

Tridimita-alfa: pode existir à temperatura atmosférica e até 117° C, mas não é a forma estável neste intervalo.

Tridimita-beta: pode existir acima dos 117° C e é a forma estável de 870° C a 1470° C. Pode existir acima dos 1470°C, mas é instável; funde a 1670°C.

Cristobalita-alfa: pode existir à temperatura atmosférica e até 200-275°C, mas não é a forma estável neste intervalo.

Cristobalita-beta: pode existir acima de 200-275°C e é estável desde 1470°C até ao seu ponto de fusão, 1713°C.

Coesito: fase de elevada pressão, produzida a 450-800°C e à pressão de 38 kbar. Encontrada em rochas sujeitas ao impacto de grandes meteoritos e em xenólitos em kimberlitos.

Stishovita: forma de sílica de elevada densidade (4,3 g/cm³) sintetizada a 130 kbar e > 1200C. Ocorre na Cratera "Meteor", Arizona, Estados Unidos.

Vidro de sílica: pode existir à temperatura ambiente e até 1000° C, altura em que a sua velocidade de cristalização aumenta rapidamente, É um vidro instável a qualquer temperatura abaixo dos 1713°C (Franco & Campos, 1971) (Deer et al 2010).

4.4.1 Paragênese

O quartzo é o mineral mais abundante na crosta terrestre. É um constituinte frequente em muitas rochas ígneas, sedimentares e metamórficas, e também ocorre como material secundário, formando muitas vezes a cimentação dos sedimentos. O quartzo é também um constituinte frequente dos filões hidrotermais. Em granitos, microgranitos, tonalitos, etc. O quartzo ocorre de uma maneira típica sob a forma de grãos anédricos, mas pode apresentar contornos euédricos em riolitos de grão fino arrefecidos rapidamente, embora em algumas destas rochas os fenocristais de quartzo possam sofrer uma corrosão magmática tardia. Nas rochas ígneas de acidez intermédia a quantidade de quartzo é menor do que nas de composição granítica e, nas rochas básicas, ocorre geralmente em quantidades inferiores a cinco por cento. O quartzo é quimicamente incompatível com a nefelina e com os outros feldspatóides estando, portanto, ausente nas rochas ígneas subsaturadas (Hurlbut & Switzer, 1979) (Anderson, 1984) (Deer et al 2010).

Em virtude da sua resistência química e física à corrosão, o quartzo é um mineral detrítico abundante e sofre concentração durante os processos sedimentares dando origem a areias e arenitos de vários tipos. Quartzo secundário deposita-se frequentemente em torno de grãos pré-existentes (de quartzo ou de outros minerais) e é um material de cimentação frequente nos sedimentos. Em alguns arenitos relativamente porosos o quartzo secundário pode depositar-se em continuidade cristalográfica com o quartzo detrítico, sendo o limite entre as duas gerações de sílica apenas visível pela presença ocasional de uma auréola de pigmentação ferruginosa sobre os grãos detríticos. O quartzo autigênico ocorre por vezes em calcários, onde pode formar cristais bem desenvolvidos, tendo sido encontrados pequenos cristais de quartzo bipiramidado. O quartzo é um mineral frequente em muitas rochas metamórficas, ocorrendo equivalentes metamorfizados de sedimentos com quartzo e de rochas ígneas ricas quartzo. Embora nos graus baixos de metamorfismo o quartzo possa sobreviver sem ter sofrido alterações, nos graus mais elevados sofre recristalização com aumento concomitante na dimensão do mineral (Deer et al 2010).

Os intercrescimentos de quartzo com outros minerais são frequentes, especialmente os de quartzo e feldspato potássico como no granito gráfico ou micrográfico, e quartzo e plagioclásio em associação com o feldspato potássico. Tais intercrescimentos são frequentes em muitos tipos de rochas ígneas ácidas e metamórficas: deve fazer-se uma menção especial ao intercrescimento de quartzo e feldspato típico de muitos granófiros (Deer et al 2010).

4.4.2 Cores

A ametista existe nas cores violeta, roxo e lilás. Este mineral recebe sua cor da presença de ferro (Fe^{3+} e Fe^{4+}) e outros oligoelementos em quantidades muito pequenas e inferiores a 0,03 %, bem como da irradiação natural. As ametistas podem mostrar zoneamento de cores (Nassau, 1983) (Deer *et al.*, 2010) (Arem & Clark, 2023).

4.4.3 Aprimoramentos da cor e ametistas sintéticas

Uma variedade de tratamentos pode alterar a cor das ametistas. No entanto, de forma simplória, apenas as gemas com cores lilás a roxo profundo permanecem como ametistas. Todos os outros simplesmente se tornam variedades de quartzo de cores diferentes. Por exemplo, a ametista aquecida às cores amarela ou laranja-avermelhado são, por definição, citrinos. Os tratamentos térmicos podem clarear a ametista, tornando-a verde, azul ou amarelo-laranja. Este tratamento indetectável tem excelente estabilidade. Quando aquecidas a 400-500 °C, as ametistas podem ficar marrons, avermelhadas e, às vezes, verdes. Essas gemas de quartzo verde são conhecidas como prasiolita. A irradiação mais aquecimento também pode produzir tons de marrom, laranja e amarelo (IBGM/DNPM, 2009) (Schumann, 2020) (Arem & Clark, 2023).

As ametistas podem ser fabricadas hidrotermicamente em laboratórios, e os fabricantes também podem criá-las bombardeando quartzo fumê com raios gama. Uma vez que a ametista natural é tão abundante e barata, existe pouco incentivo para comprar produtos sintéticos. No entanto, o material bruto sintético às vezes é vendido como bruto natural (IBGM/DNPM, 2009) (Arem & Clark, 2023).

4.4.4 Ocorrência

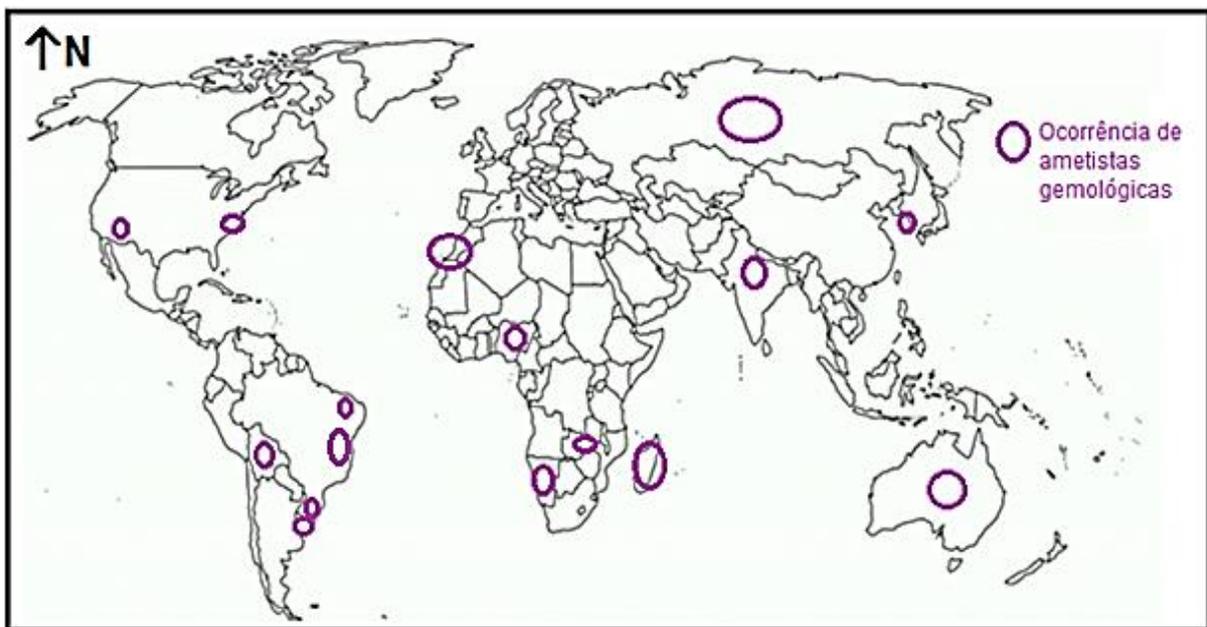
As principais fontes (Figura 6) de ametistas são Brasil (Rio Grande do Sul), Bolívia, Uruguai e Zâmbia (Schumann, 2020). O Brasil pode produzir exemplares de tamanho grande, mas geralmente de cor moderada; além de espécimes pequenos e de cor muito intensa como as ametistas do Rio Grande do Sul, Bahia e de Santa Quitéria (Ceará) (Correa, 2007 e 2010) (Oliveira *et al.*, 2020). Muitos colecionadores e comerciantes de gemas preferem as gemas

geralmente menores, mas com cores mais ricas e evidentes, da Zâmbia, bem como, mais recentemente, do Uruguai. *Four Peaks* no Arizona (Estados Unidos) produz ametista de alta qualidade (Schumann, 2020).

Outras fontes notáveis de qualidade de gema incluem o seguinte:

- Austrália; Índia; Madagáscar; México; Marrocos; Namíbia; Nigéria; Rússia; Coreia do Sul.
- Estados Unidos: Geórgia; Carolina do Norte (Schumann, 2020) (Arem & Clark, 2023).

Figura 5: Principais ocorrências de ametistas gemológicas, incluindo o estado do Ceará (CE).



Fonte: autor

4.4.5 Valor da ametista e nomes comerciais

O valor para as ametistas depende quase inteiramente da cor, fator este responsável por 50% da qualidade gemológica de um material. As minas da Sibéria já produziram as melhores pedras do mundo. Os exemplares provenientes desta região apresentavam cor púrpura intensa que brilhava com flashes vermelhos e azuis. Hoje, o termo "siberiano" não se refere mais às origens geográficas da gema, em vez disso, agora é um termo comercial e de classificação que se refere a cores semelhantes às das ametistas extraídas na Sibéria. As ametistas podem mostrar zoneamento, distribuição e faixas de cores (Arem & Clark, 2023).

Embora cores mais escuras reinem no topo da lista de valores, a ametista de cor clara

teve um ressurgimento em popularidade. Os tons de violeta rosado mais claros são chamados de “Rosa da França”. Como a ametista está disponível em tamanhos grandes, seu valor por quilate aumenta gradualmente, não exponencialmente como em outras gemas, como o rubi. Como este mineral é abundante, há poucos motivos para pagar caro por peças com inclusões visíveis (³Arem & Clark, 2023).

As ametistas podem receber estes nomes no comércio (³Arem & Clark, 2023):

- *Ametista siberiana*: cor púrpura escura com lampejos de vermelho e / ou azul.
- *Ametista dourada*: ametrino

4.4.6 Propriedades Ópticas e Físicas

Os índices de refração apresentam pequena variação relativamente aos valores 1,544, e 1,553, com birrefringência em torno de 0,009 e densidade relativa constante de 2,65 g/cm³. Medições rigorosas usando quartzo de pureza conhecida deram valores de a 1,544258, e 1,553380, à temperatura de 18°C (Deer et al, 2010). A fluorescência é geralmente inerte, mas pode se manifestar com baixa intensidade. O pleocroísmo é usualmente fraco, mas pode ser moderado. O carácter e sinal óptico é constante, uniaxial positivo. O espectro de absorção quando presente varia de 550-520 nm (Hurlbut & Switzer, 1979) (Nassau, 1980) (Webster, 1981) (Anderson, 1984) (Schumann, 2006) (IBGM/DNPM, 2009) (Bonewitz, 2013) (Schumann, 2020). Informações da ametista são tabeladas segundo informações da *International Gem Society* (IGS) (³Arem & Clark, 2023).

O enantiomorfismo do quartzo faz com que ele seja "ópticamente ativo"; o plano de polarização da luz que passa ao longo do eixo óptico apresenta uma rotação quer em sentido direto ou em sentido retrógrado, dependendo da simetria do cristal. Esta polarização rotatória pode afetar a figura de interferência vista em luz convergente de tal modo que para seções mais espessas, a parte central ad cruz das isóginas não é tão nítida ou está ausente. Em algumas rochas metamórficas e ígneas o quartzo apresenta extinção ondulante devido à deformação. A extinção ondulante foi produzida experimentalmente a pressões de cerca de 138 kbar, sendo o eixo óptico deslocado de 2-7°. Em alguns casos o quartzo pode apresentar um carácter distintamente biaxial, com valores de 2V tão elevados como 8 ou 10°. Estes fenômenos de deformação são geralmente eliminados quando ocorre uma recristalização posterior (Kerr, 1987) (Deer et al, 2010) (Schumann, 2020) (³Arem & Clark, 2023).

4.4.7 Ametista e Ametrino

Ametrino é uma variedade de quartzo com duas zonas de cores distintas, roxa e amarela. Essas camadas resultam do crescimento que para e recomeça durante a formação do cristal, um processo conhecido como geminação. Como o quartzo roxo é ametista e o quartzo amarelo é citrino, isso significa que essa gema consiste em zonas de ametista e citrino, daí o nome. Normalmente, os lapidários cortam ametrinos em formas retangulares de corte esmeralda para destacar as duas cores. No entanto, alguns cortadores de gemas podem optar por designs que combinem as zonas, criando flashes de cores (Anderson, 1984) (Schumann, 2006) (IBGM/DNPM, 2009) (Bonewitz, 2013) (Schumann, 2020) (Arem & Clark, 2023).

4.4.8 Inclusões

As Inclusões mais frequentes encontradas no quartzo são de rutilo, turmalina, manganês, goethita, hematita, calcita, pirita, clorita, mica, magnetita, ouro, enxofre, fluorita, zircão e granada. Nas ametistas, são mais comuns cristais prismáticos e cavidades negativas, marcas de impressão digital (*finger prints*), as chamadas fraturas onduladas e linhas de geminação, os minerais mais comuns encontrados como inclusões em ametistas são hematita e goethita em formas de agulhas (IBGM/DNPM, 2009) (Arem & Clark, 2023).

4.4.9 Ametistas Brasileiras

No Brasil, foram realizados estudos por Juchem (1994), Juchem *et al* (1994 e 2001) Gilg *et al* (2002), Dotto & Satani (2006), Guttler & Kohigashi (2006), Proust & Fountaine (2007), Fisher *et al* (2010), Hartmann *et al* (2010), Baggio *et al* (2015), Hartmann (2015) envolvendo diversas propriedades, como químicas, petrográficas, pesquisas acerca dos fluidos em quartzos, das rochas hospedeiras e geodos de ametistas. Foram efetuados estudos mais voltados para a gemologia e mineralogia acerca das ametistas por autores como Correa (2007 e 2010), Tononi *et al* (2019) e Tononi (2019). No Ceará, houveram pesquisas acerca das propriedades gemológicas por Oliveira *et al* (2020 e 2021).

5. 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 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 (Brito Neves, 1975) (Trompette, 1994). Os primeiros modelos são os de Santos & Brito Neves (1984) e Jardim de Sá (1994). A configuração atual, em quase sua totalidade, é herdada do ciclo Tecto-orogênético brasileiro que foi processada no final do proterozoico superior.

5.1 Província Borborema

Geologicamente, a área de Quixeramobim está inserida no Domínio Ceará Central (Figura 7) (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.

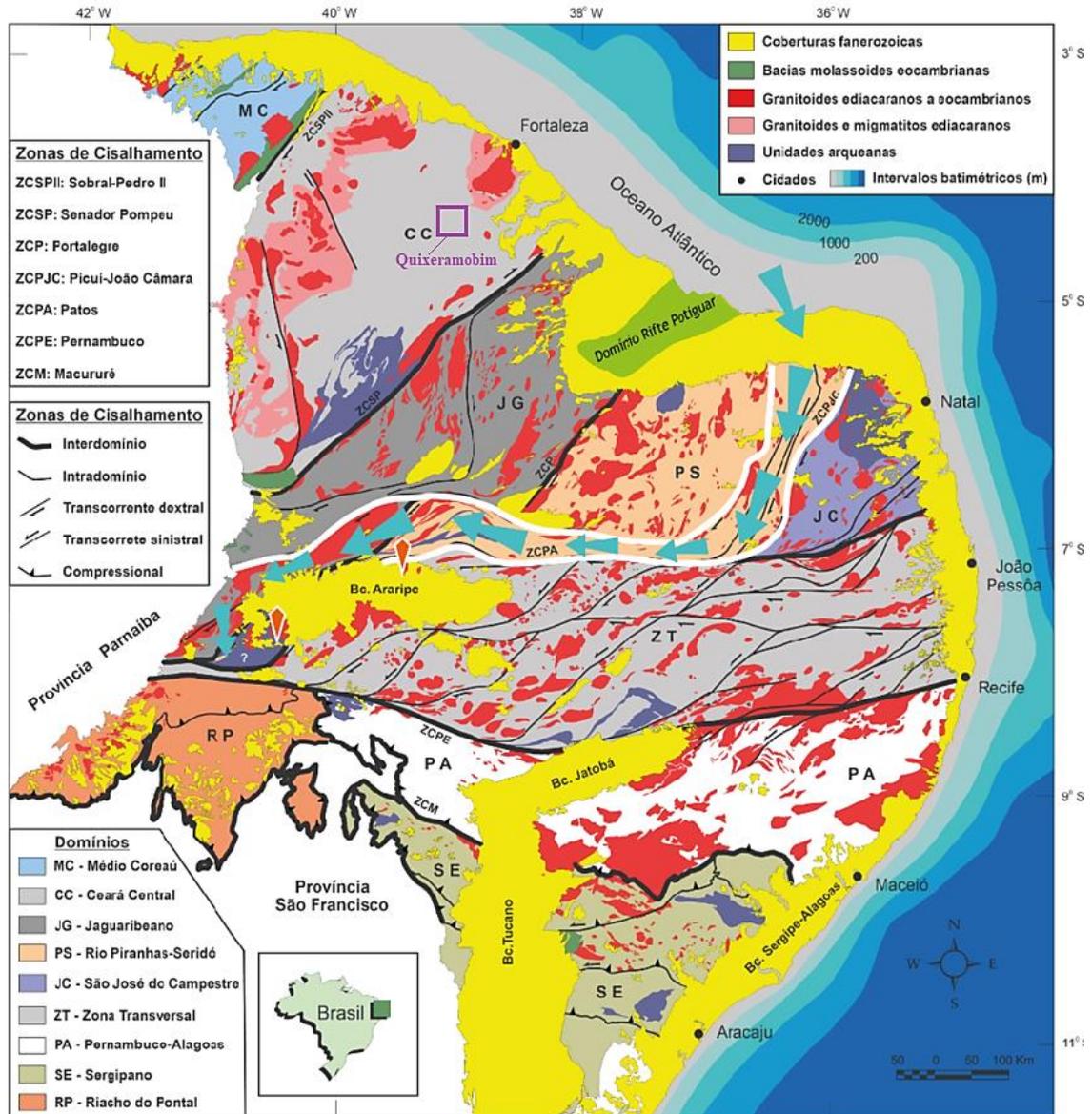


Figura 6: Província Borborema (Lúcio, 2022).

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, Arthaud, 2008) (Figura 7).

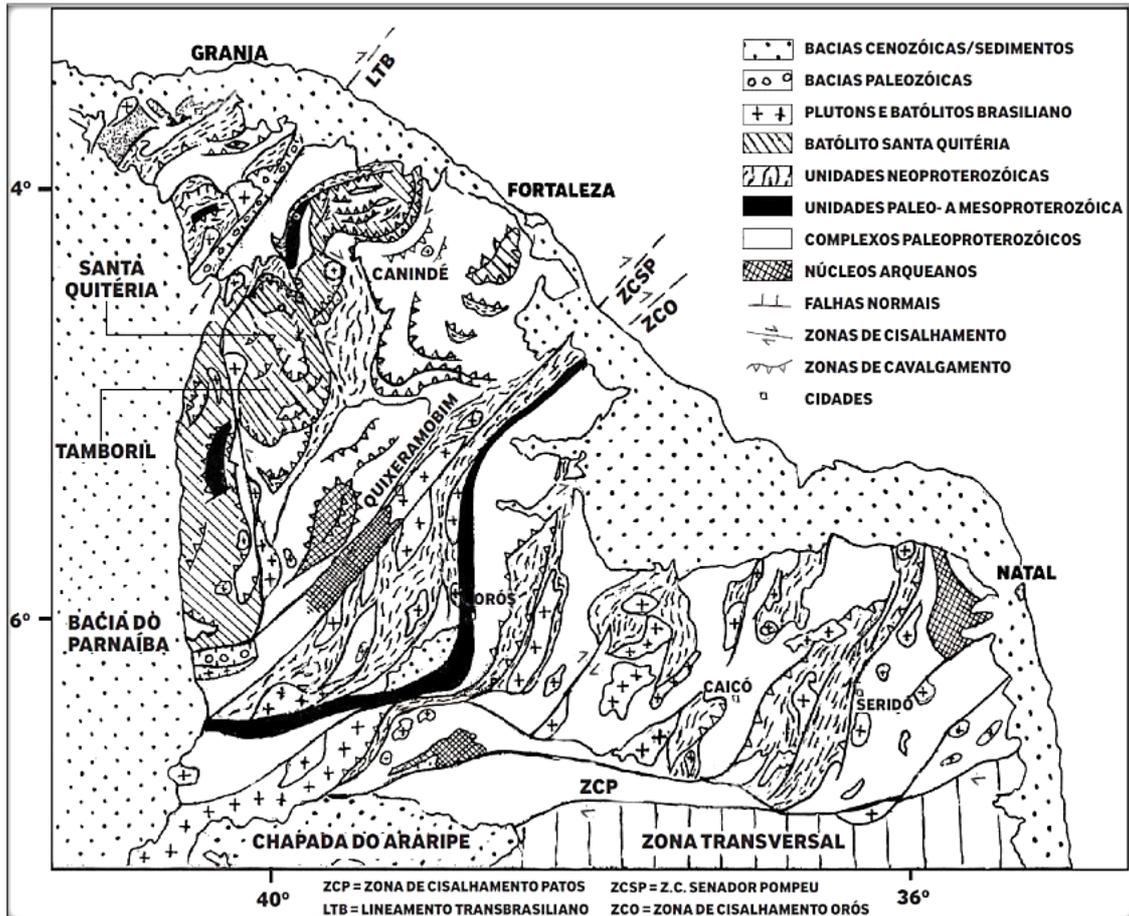


Figura 7: Mapa geológico simplificado da porção norte da Província Borborema. Modificado de Arthaud (2008).

5.2 Domínio Ceará Central

O Domínio Ceará Central (DCC) compreende um arco magmático e cinturão dobrado metamorfisado em condições de alta pressão, com paragêneses que atingem a fácies eclogito, situado entre o Lineamento Transbrasiliano, a NW, e a zona de cisalhamento transcorrente Senador Pompeu, a SE (Santos *et al*, 2003). Em termos tectono-estratigráficos apresenta a seguinte organização: i) sequência metassedimentar neoproterozóica do Complexo Ceará (Cavalcante 2003, Castro 2004, Arthaud 2008) com idades U-Pb convencionais entre 740 Ma e 634 Ma, interpretadas como depósitos de margem passiva e que posteriormente foram envolvidas em uma tectônica do tipo fore-arc (Castro, 2004). 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. ii) o complexo granítico-

migmatítico Neoproterozoico Tamboril-Santa Quitéria, datado pelo método U-Pb, com idades no intervalo entre 657 Ma – 591 Ma (Fetter, 2003; Castro, 2004) iii) granitoides Neoproterozoicos/Cambrianos, com idades de cristalização variando de 523Ma a 460Ma iv) molassas Paleozoicas associadas às mega transcorrências brasileiras; e v) magmatismo básico cretáceo representado pelo enxame de diques básicos Rio Ceará- Mirim, relacionado ao rifteamento em escala global e à atividade de hotspot durante a abertura do Atlântico Sul e Equatorial, com idades U-Pb em torno de 130 Ma (Hollanda et al, 2010).

As feições geológicas atuais do domínio (Figura 8) (Fetter, 1999) foram obtidas no final do Ciclo Brasileiro/Pan Africano (final 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.

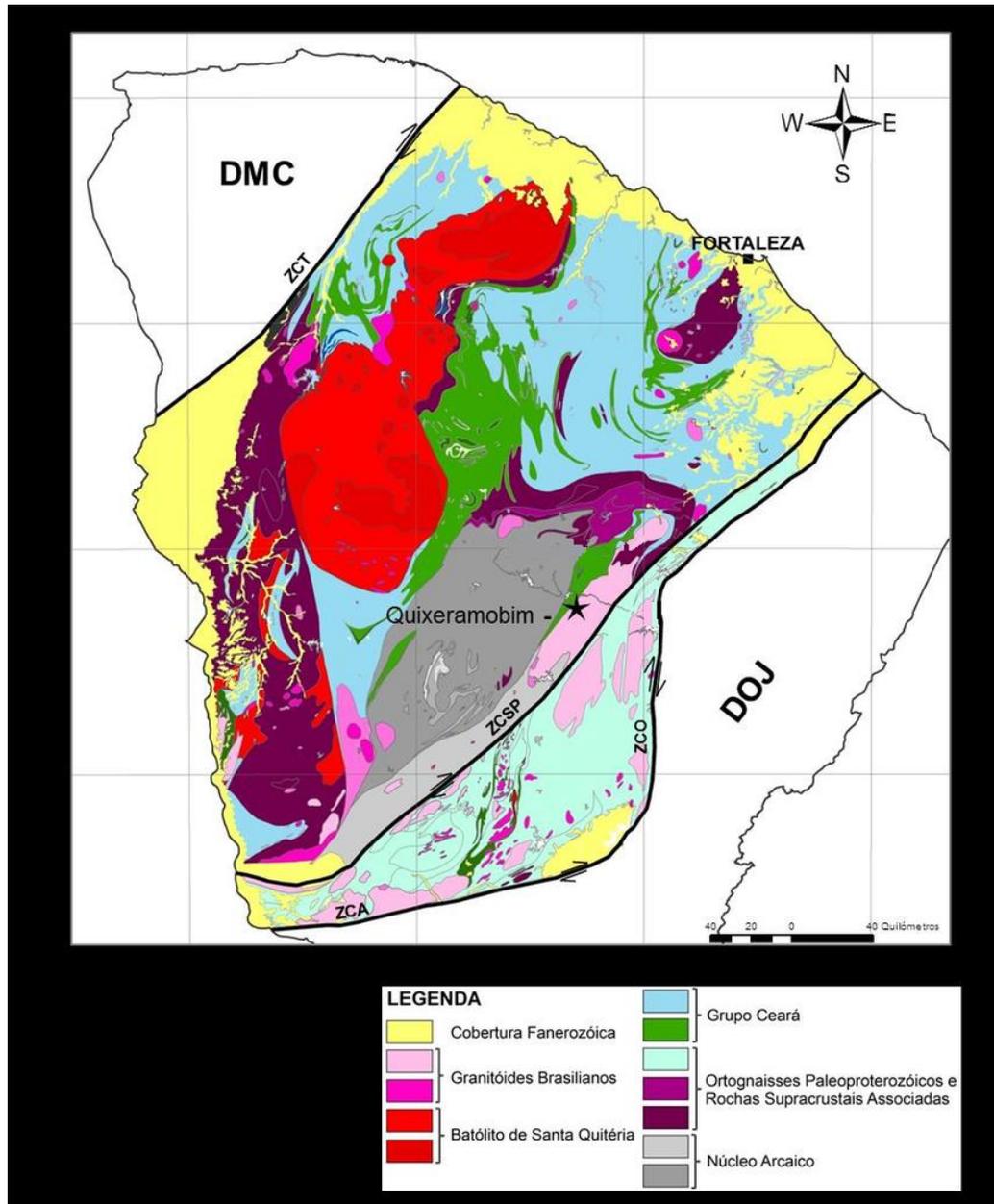


Figura 8: Domínio Ceará Central limitado a noroeste pelo Lineamento Transbrasiliano e a sudeste pela Zona de Cisalhamento de Orós (Marques, 2014).

5.3 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 9) 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.

5.4 Rochas do Paleoproterozoico

Rochas de idade Paleoproterozoica 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, 2003) e os terrenos granito gnaisses.

5.5 Terrenos TTG

Os terrenos TTG 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 (Sequência Algodões – Arthaud & Landim, 1995 e 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 & 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.

5.6 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).

5.7 Rochas do Meso-Neoproterozóico

O Meso-Neoproterozóico é caracterizado por coberturas metassedimentares que podem ser reunidas no Complexo Ceará (Arthaud *et al.*, 2008).

Boa parte do Domínio Ceará Central está coberta por rochas metassedimentares e foram subdivididas, 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 metarriolito 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. Entretanto, boa parte dos valores TDM disponíveis para estas sequências (Fetter, 1999; Santos, 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.* (2003), no Mapa Geológico do Ceará, 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 paragnaisse da região de Itatira (Santos *et al.*, 2003).

5.8 Complexo Tamboril-Santa Quitéria

Tal complexo está representado desde os mapeamentos efetuados pela CPRM nos anos setenta, aparecendo bem delimitada no Mapa Geológico do Ceará publicado em 1983 (Cavalcante, 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 anfíbolitos e rochas calciossilicáticas.

Fetter (2003) chegou 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 sequência, 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.

5.9 Granitóides brasileiros

As fases sucessivas da colisão estão marcadas 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 tangenciais, 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 (Cavalcante *et al.*, 1983) (Parente *et al.*, 2004) (Leal Neto, 2005).

5.10 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).

5.11 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, 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).

5.12 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 e Condado, 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 turmalinas, água-marinha, ametista e granadas estudadas neste trabalho 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).

5.13 Regiões da turmalina e água-marinha: Morro dos Tonhos e Condados - Quixeramobim (DPSQ)

Os pegmatitos do DPQ são de natureza granítica e estão orientados preferencialmente nas direções NE e E-W, apresentando formas preferencialmente tabulares e dimensões variáveis, ocorrendo de dezenas a centenas de metros, com mergulhos verticais a subverticais, sendo discordantes em relação às suas encaixantes (biotita-gnaisses e muscovita-xistos) Vidal & Nogueira Neto, 2005). Quanto à estruturação interna, esses pegmatitos podem ser classificados como heterogêneos simples (pegmatitos zonados sem corpos de substituição), heterogêneos complexos (pegmatitos zonados com corpos de substituição) e homogêneos (sem estrutura interna zonada), sendo que as mineralizações econômicas são encontradas geralmente nos pegmatitos heterogêneos (Marques Júnior, 1992).

Mineralogicamente, esses pegmatitos são compostos essencialmente por quartzo, feldspato, muscovita, contendo quantidades menores de minerais de interesse econômico, mostrando mineralizações em lítio, nióbio e tântalo. São marcados ainda por uma assembleia de minerais acessórios representados por turmalina colorida, ambligonita, lepidolita, berilo, espodumênio, cassiterita e columbita-tantalita (Marques Júnior, 1992; Almeida & Ulbrich, 2001; Vidal & Nogueira Neto, 2005; Moreira & Da Silva, 2017). Os pegmatitos do DPQ são do tipo LCT, apresentando mineralizações de Li, Ta, Nb, assim como feldspato, quartzo e turmalina (Leal Neto, 2005)

Para Souza (1985) o DPQ 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; (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 (Morro dos Tonhos e Condado) e água-marinha (Condado) estudados, detêm 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.

5.14 Região da granada: Trapiá - Quixeramobim (DPSQ)

Esta região está inserida no Distrito Pegmatítico de Solonópole-Quixeramobim, que está englobado na Sub-Provincia Pegmatítica do Ceará. Esse distrito é considerado o maior em relevância econômica, conhecido por ser fonte de águas-marinhas e turmalinas de qualidade gemológica (Marques Júnior, 1992).

Os pegmatitos da região possuem idade de cristalização do período Ordoviciano, durante o final do Ciclo Brasileiro. São representantes do Magmatismo Sertão Central. Possuem forte influência estrutural das zonas de cisalhamento Senador Pompeu e Orós, que as delimitam. Marques Junior, (1992). Os pegmatitos de Solonópole-Quixeramobim possuem uma composição granítica, são em sua maioria heterogêneos, tipicamente com formato tabular, e dimensões variáveis de dezenas de metros, Vidal & Nogueira Neto (2005). Além disso, apresenta uma grande variedade de minerais gemas (turmalina, água marinha e granada) incluindo quartzo, feldspatos e micas. Também apresenta outros minerais de potencial econômico: berilo, cassiterita, ambliogonita, tantalita - columbita, lepidolita e espodumênio. O Distrito Pegmatítico de Solonópole-Quixeramobim é dividido em cinco campos de acordo com os minerais acessórios presentes em cada um: (1) Nova Floresta – Feiticeiro (cassiterita e tantalita); (2) Nordeste de Solonópole (ambliogonita, espodumênio, berilo, tantalita e fluorita); (3) Oeste e Noroeste de Solonópole (ambliogonita, espodumênio, berilo e tantalita); (4) Berilândia – Caranubinha (berilo e turmalinas gemológicas); (5) Rinaré – Banabuiú (berilo e turmalinas gemológicas), Sousa (1985).

O pegmatito da região de Trapiá, possui formato tabular, caracterizado como um pegmatito heterogêneo, possui como minerais acessórios apatita, afrisita e pouco berilo industrial. Possui um metassomatismo bem acentuado, caracterizado por grandes massas de albita com uma granulação extremamente fina (Marques Júnior, 1992).

5.15 Região da ametista: Coque - Quixeramobim (DPSQ)

Esta região que integra o Distrito Pegmatítico de Solonópole-Banabuiú (DPSB). Espacialmente, O DPSB, limitado pelas zonas de cisalhamento Senador Pompeu e Orós, abrange um recorte de litotipos do Complexo Acopiara e corpos graníticos da suíte intrusiva Banabuiú, principalmente O Complexo Acopiara é composto por metatexitos, gnaisses aluminosos, diatexitos, biotita xistos, leucogranitos, pegmatitos, entre outras rochas metassedimentares (Pinéo, 2020). Esse complexo corresponde a uma bacia Neoproterozoico com deposição iniciada no Toniano (929 Ma) e inversão tectônica brasileira (620 Ma), concomitante a plutonismo sincolisional materializado nos leucogranitos tipo S da suíte Banabuiú. Transcorrências instaladas em 585 Ma são associadas à colocação dos corpos da suíte Rio Quixeramobim e de pegmatitos mineralizados (Palheta 2017).

Os corpos pegmatíticos são intrusivos, em maior quantidade, em xistos, gnaisses, migmatitos e, em menor quantidade, granitos. Segundo Parente et al. (2008) esses corpos possuem geometria tabular, ora lenticular, desde centimétricos a decamétricos e ocorrem preenchendo descontinuidades como fraturas e falhas, refletindo um controle estrutural para as mineralizações; adicionalmente, são orientados obliquamente à foliação regional, com mergulho subvertical. Idades entre 470 e 530 Ma (Almeida et al. 1977) são aceitas para o alojamento dos pegmatitos do Domínio Ceará Central.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram selecionadas de modo aleatório dezoito amostras de turmalina sendo quatro azuis (Figuras 9A, 9B, 9C e 9D), quatro verdes (Figuras 10D, 10E, 10F e 10G) e quatro rosas (Figura 11H, 11I, 11J e 11L); quatro vermelhas (Figuras 12A, 12B, 12C e 12D) e duas bicolores (Figuras 13E e 13F).

Foram selecionadas treze amostras de água-marinha (Figuras 14A – 14D)(Figuras 15E – 15G)(Figuras 16H e 16I). Além de onze exemplares de granadas (Figuras 17A – 17D) (Figuras 18E – 18G). Assim como de dez gemas ametistas (Figuras 19A – 20E).

Estas 52 gemas foram escolhidas de um montante de exemplares já separados previamente por possuírem uma cor relativamente forte. Ressaltando que o objetivo foi de adquirir uma amostragem representativa das gemas do município de Quixeramobim. A pesquisa foi dividida em cinco etapas.

Na primeira etapa o método de trabalho proposto para análise das cinquenta e duas amostras de materiais gemológicos, incluiu a utilização de diversos instrumentos gemológicos, sendo aplicado o uso de refratômetro, balança hidrostática, dicróscópio, espectroscópio, lâmpada fluorescente e microscópio gemológico; além do uso do microscópio petrográfico em lâminas delgadas feitas a partir de fragmentos das gemas para análises ópticas.

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 (2023) 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 21) 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 22).

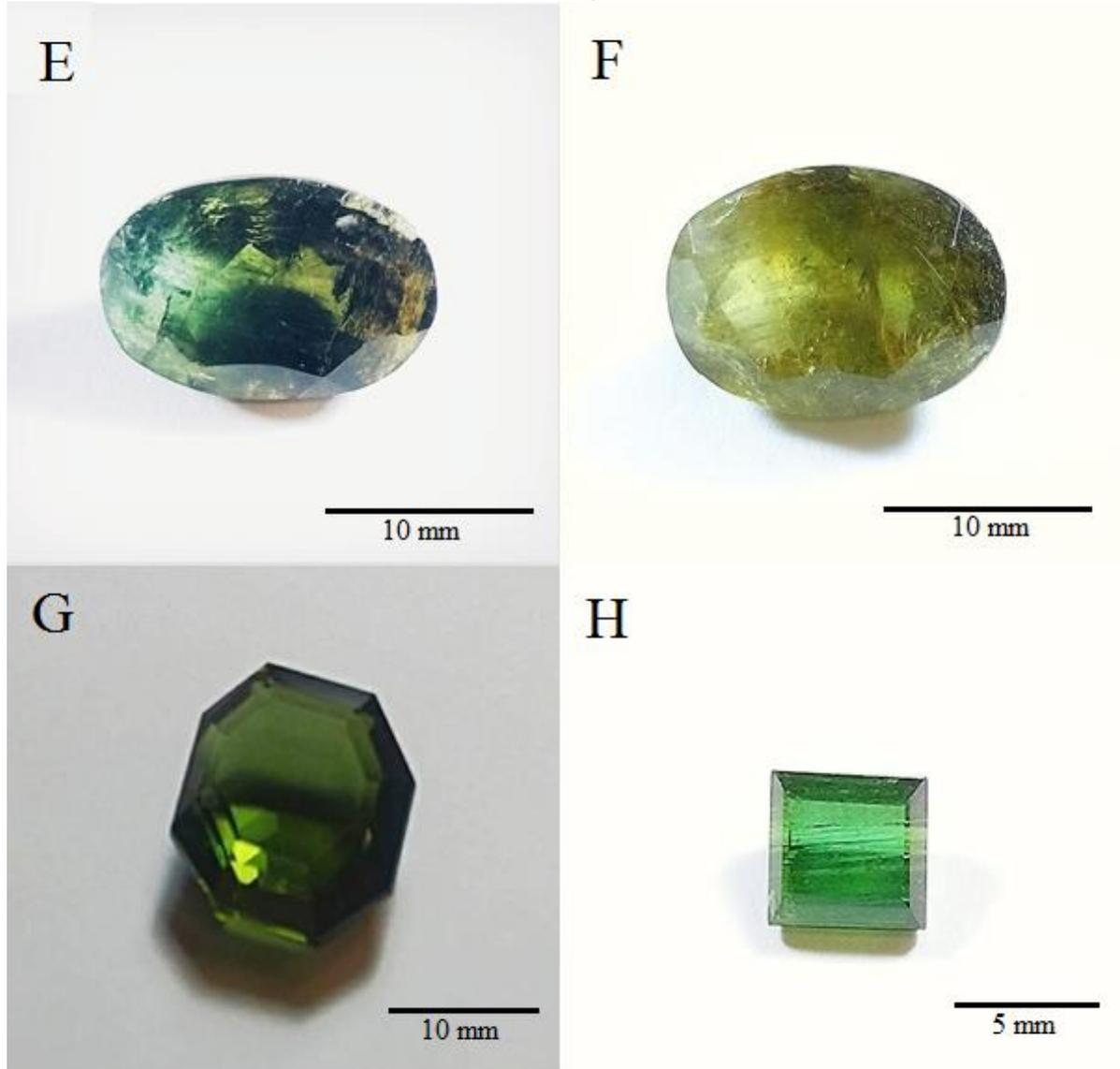
Na quarta etapa, foram analisados os aspectos vibracionais, a organização cristalográfica e a interpretação dos dados geoquímicos, o que permitiu perceber a correlação entre a composição química das amostras e aspectos ópticos nos minerais.

Figura 9: 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 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.
D) Turmalina azul (Turquoise) com as seguintes dimensões: 11.48 x 7.02 x 3.98 mm.



Fonte: Autor

Figura 10: Turmalinas verdes do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim analisadas. E) Turmalina verde clara (Chartreuse 4), com as seguintes dimensões: 15.32 x 10.02 x 7.07 mm. F) Turmalina verde escura (Olive Drab), com as seguintes dimensões: 16.30 x 12.56 x 8.37 mm. G) Turmalina verde clara (Green 3), com as seguintes dimensões: 14.20 x 13.96 x 6.37 mm. H) Turmalina verde intensa (Chartreuse 3), com as seguintes dimensões: 5.85 x 5.84 x 4.65 mm.



Fonte: Autor e Oliveira, 2020

Figura 11: Turmalinas rosa do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim analisadas.
I) Turmalina rosa (Hot Pink 2) analisada, com as seguintes dimensões: 14.30 x 10.07 x 4.61 mm.
J) Turmalina rosa (Deep Pink 1) analisada, com as seguintes dimensões: 15.99 x 12.12 x 5.98 mm.
K) Turmalina rosa (Deep Pink 2) analisada, com as seguintes dimensões: 7.20 x 4.93 x 3.38 mm.
L) Turmalina rosa (Deep Pink 3) com as seguintes dimensões: 7.90 x 7.78 x 4.70 mm.



Fonte: Oliveira, 2020

Figura 12: Turmalina do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim analisadas.

A) Turmalina vermelha (Dark Red), com as seguintes dimensões: 13.24 x 10.44 x 4.67 mm.

B) Turmalina vermelha (Red 3), com as seguintes dimensões: 9.83 x 7.22 x 4.23 mm.

C) Turmalina vermelha (Red 3), com as seguintes dimensões: 13,00 x 12,50 x 6.19 mm.

D) Turmalina vermelha (Dark Red), com as seguintes dimensões: 11.27 x 6.88 x 4.23 mm.

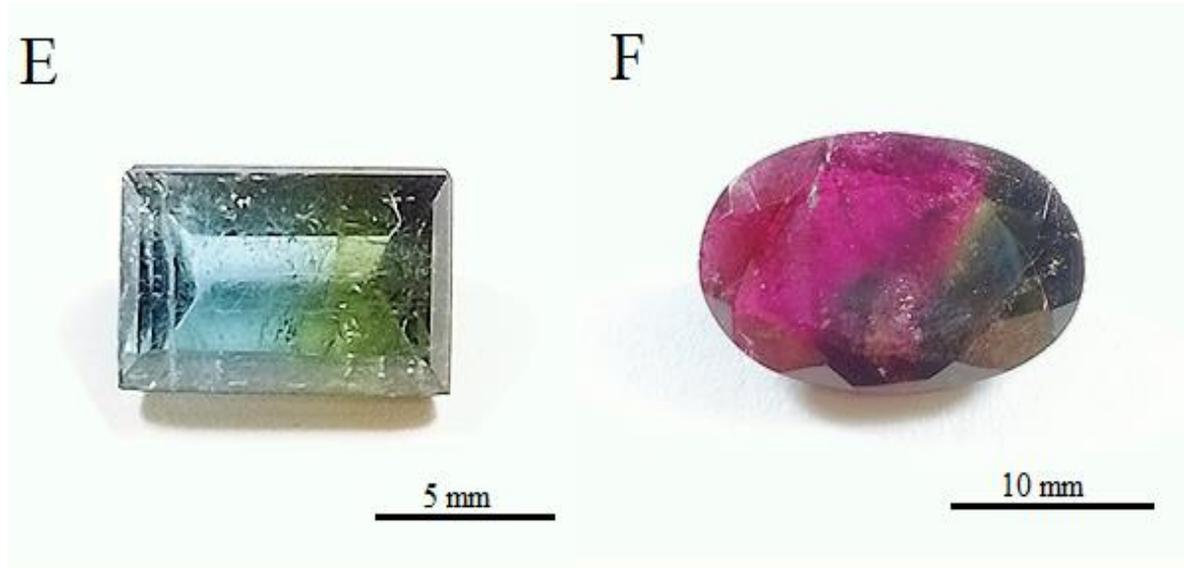


Fonte: autor

Figura 13: Turmalina do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim analisadas.

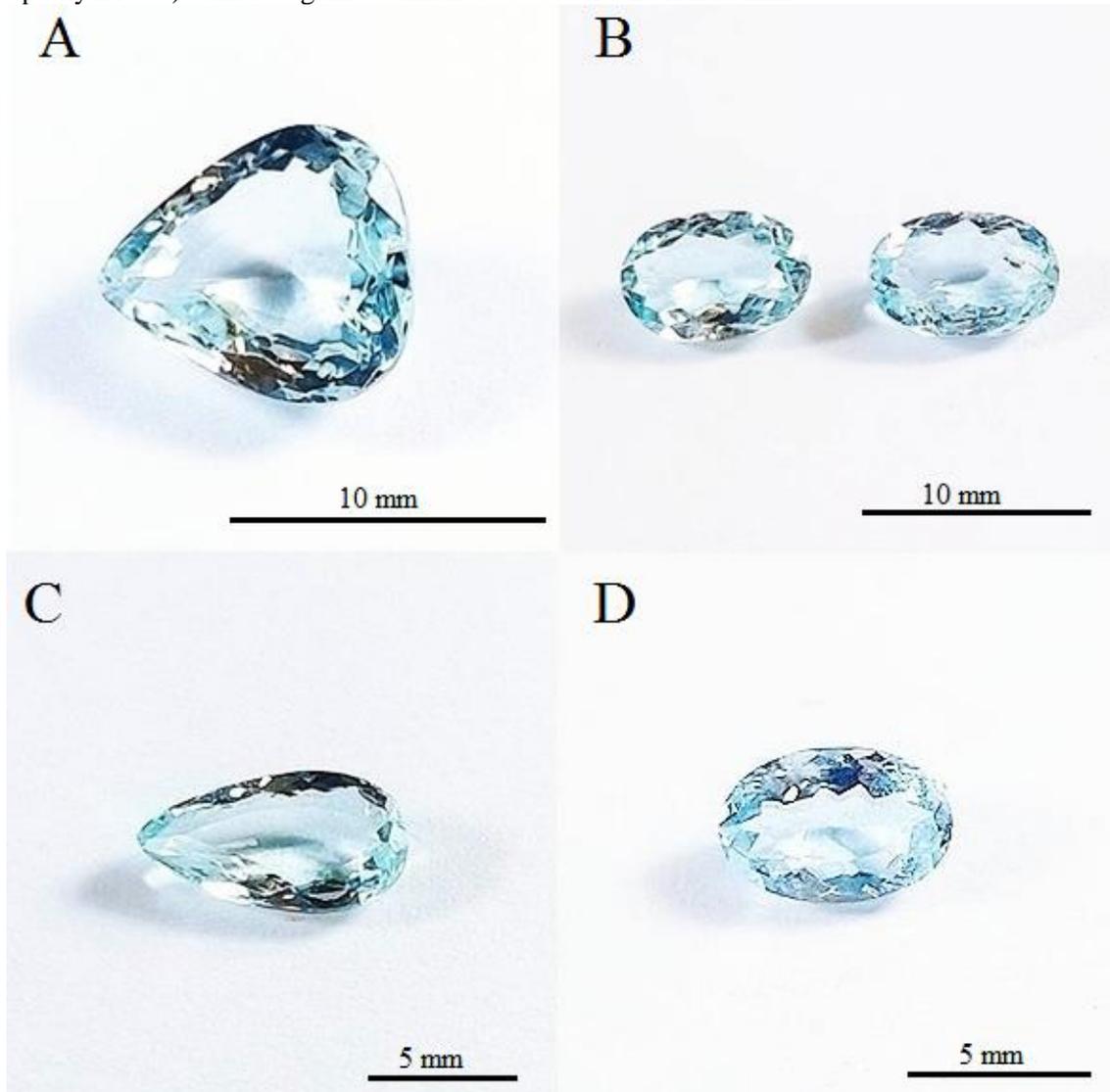
E) Turmalina bicolor (Azul e Verde) (Deep Sky Blue 3 /Chartreuse 3), com as dimensões: 8.11 x 5.06 x 3.68 mm.

F) Turmalina bicolor (Rosa e Verde) (Deep Pink 4/ Chartreuse 4) analisada, com as dimensões: 14.46 x 10.17 x 4.99 mm.



Fonte: autor

Figura 14: Águas-marinhas do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim analisadas (amostras da esquerda para a direita). A) Água-marinha (Cyan 2) com as seguintes dimensões: 10.00 x 8.99 x 5.04 mm. B) Água-marinha (Deep Sky Blue 2), com as seguintes dimensões: 8.10 x 5.52 x 3.41 mm e Água-marinha (Deep Sky Blue 1) com as seguintes dimensões: 8.14 x 5.52 x 3.11 mm. C) Água-marinha (Deep Sky Blue 1) com as seguintes dimensões: 8.78 x 4.49 x 2.61 mm. D) Água-marinha (Deep Sky Blue 3) com as seguintes dimensões: 6.38 x 4.20 x 2.65 mm.



Fonte: autor

Figura 15: Águas-marinhas do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim analisadas (amostras da esquerda para a direita).

E) Água-marinha (Cyan 2) com as seguintes dimensões: 6.10 x 4.00 x 2.66 mm; Água-marinha (Cyan 2) com as seguintes dimensões: 8.58 x 4.70 x 2.80 mm e Água-marinha (Deep Sky Blue 2) com as seguintes dimensões: 6.50 x 4.34 x 3.13 mm.

F) Água-marinha (Cyan 1) com as seguintes dimensões: 14.48 x 11.58 x 5.61 mm.

G) Água-marinha (Dodger Blue 1) com as seguintes dimensões: 10.35 x 6.80 x 3.96 mm.



Fonte: autor

Figura 16: Águas-marinhas do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim analisadas (amostras da esquerda para a direita).

H) Água-marinha (Cadet Blue 1) com as seguintes dimensões: 23.15 x 14.70 x 9.69 mm.

I) Água-marinha (Deep Sky Blue 1) com as seguintes dimensões: 20.42 x 12.10 x 7.67 mm e Água-marinha (Deep Sky Blue 1) com as seguintes dimensões: 20.05 x 12.89 x 6.80 mm.



Fonte: autor

Figura 17: Granadas analisadas do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim (amostras da esquerda para a direita).

A1) Granada spessartita (Red 4) com as seguintes dimensões: 6.32 x 6.32 x 3.67 mm.

A2) Granada spessartita (Violet Red 4) com as seguintes dimensões: 10,85 x 10,51 x 4,59 mm.

B) Granada (Orange Red 3) com as seguintes dimensões: 8.21 x 8.19 x 5.15 mm.; e Granada (Orange Red 3) com as seguintes dimensões: 9.02 x 8.78 x 5.20 mm.

C) Granada (Dark Orange 3) com as seguintes dimensões: 10.47 x 5.20 x 3.63 mm.

D) Granada (Dark Golden Rod 2) com as seguintes dimensões: 8.47 x 5.50 x 3.42 mm.

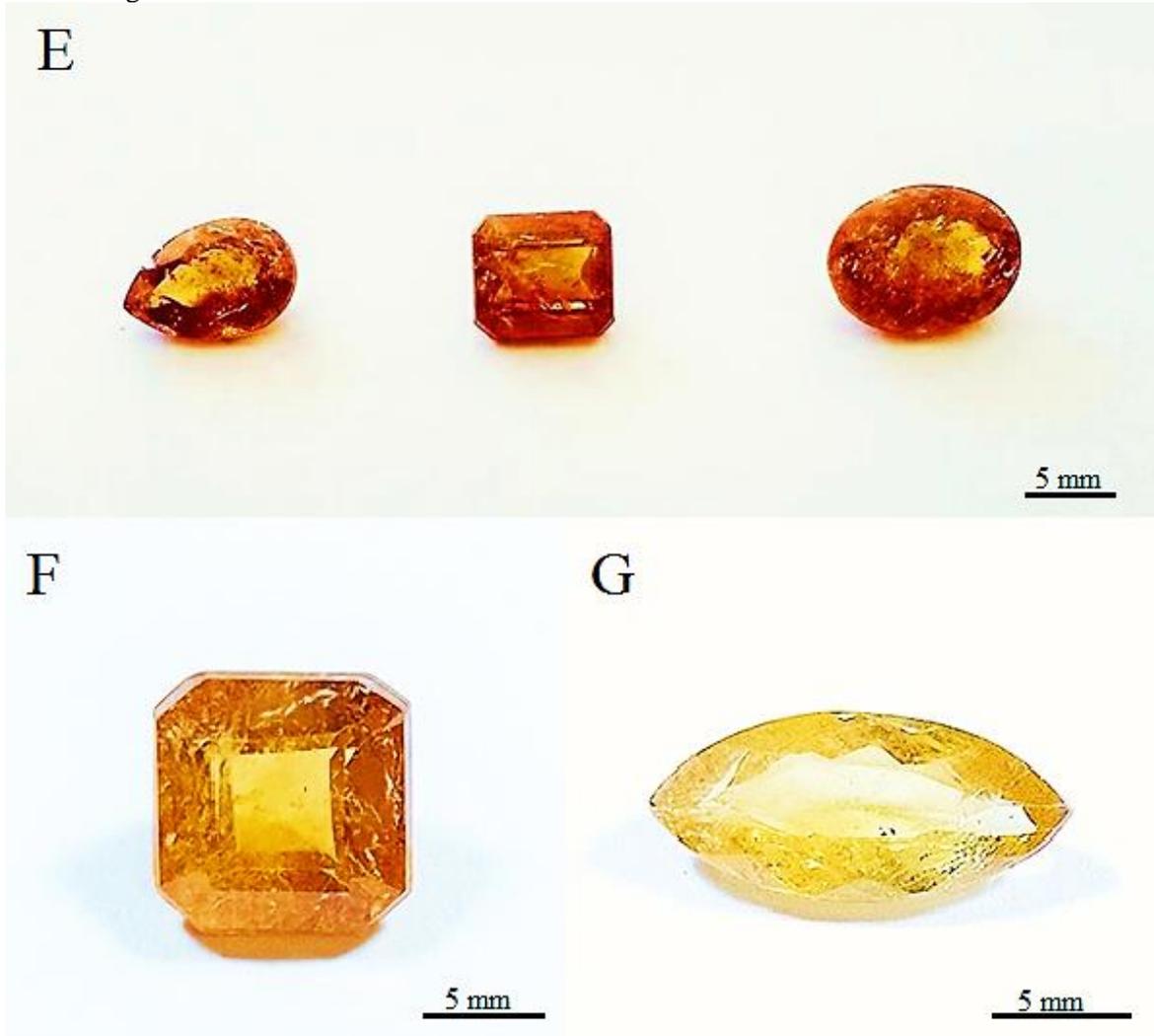


Fonte: autor

Figura 18: Granadas analisadas do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim (amostras da esquerda para a direita).

E) Granada (Chocolate 2) com as seguintes dimensões: 10.68 x 7.04 x 4.25 mm; Granada (Chocolate 2) com as seguintes dimensões: 8.52 x 7.56 x 4.54 mm; e Granada (Chocolate 2) com as seguintes dimensões: 10.60 x 8.86 x 5.20 mm.

F) Granada (Orange 2) com as seguintes dimensões: 6.22 x 6.17 x 3.75 mm. G) Granada (Golden Rod 1) com as seguintes dimensões: 12.58 x 6.08 x 3.83 mm.

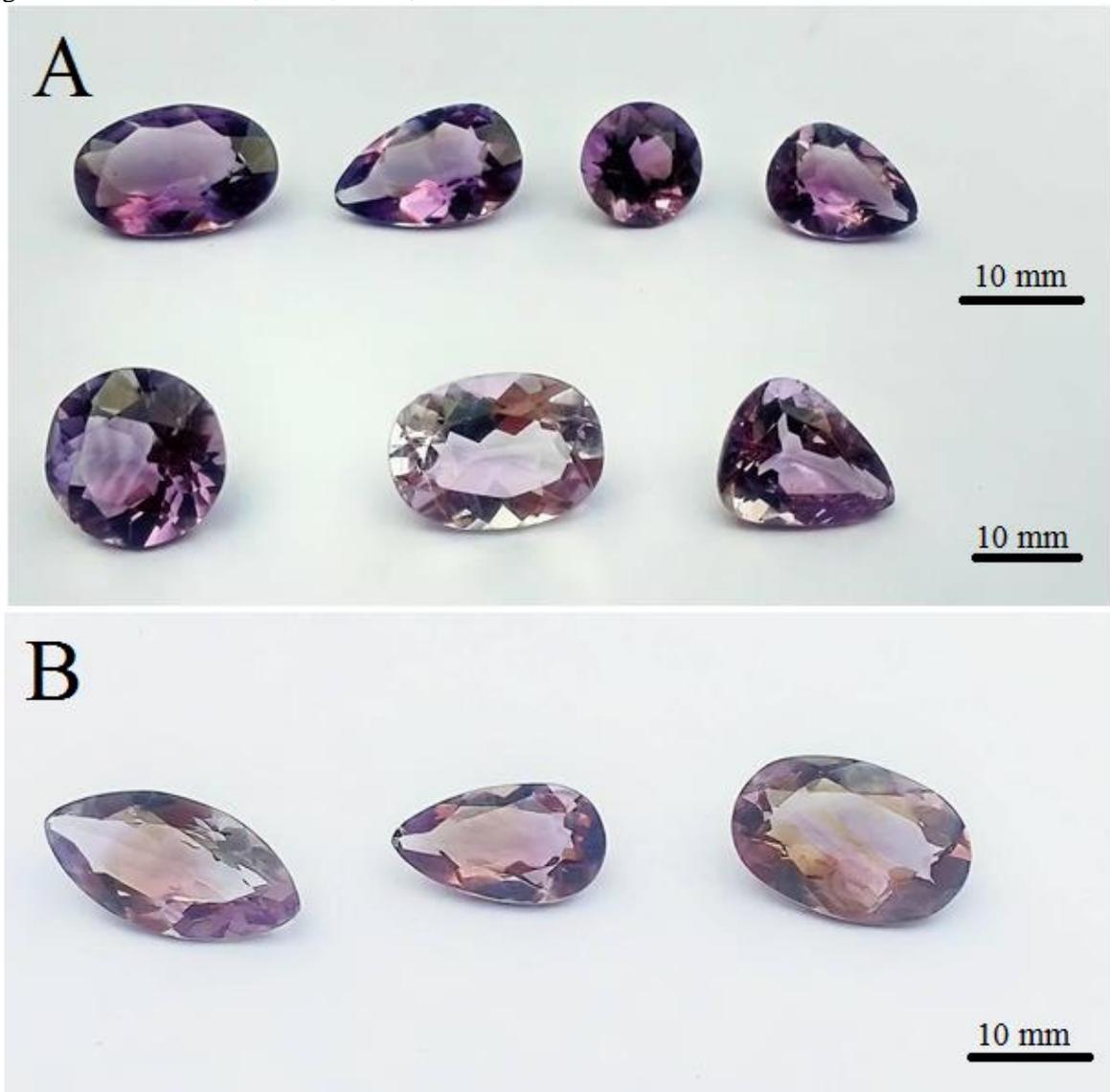


Fonte: autor

Figura 19: Ametistas analisadas do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim (amostras da esquerda para a direita).

A) Ametista (Dark Orchid 4) com as seguintes dimensões: 15,90 x 10,58 x 6,22 mm. Ametista (Medium Orchid 4) com as seguintes dimensões: 15,64 x 9,86 x 6,23 mm. Ametista (Dark Orchid 4) com as seguintes dimensões: 10,07 x 9,93 x 7,27 mm. Ametista (Medium Orchid 4) com as seguintes dimensões: 12,61 x 9,20 x 5,51 mm. (*Gemas na parte superior*) Ametista (Medium Orchid 4) com as seguintes dimensões: 11,80 x 11,63 x 7,50 mm. Ametista (Plum 3) com as seguintes dimensões: 14,24 x 10,60 x 7,05 mm. Ametista (Dark Orchid 3) com as seguintes dimensões: 12,25 x 10,10 x 6,53 mm. (*Gemas na parte inferior*)

B) Ametista (Dark Orchid 2) com as seguintes dimensões: 16,72 x 8,37 x 5,18 mm. Ametista (Dark Orchid 2) com as seguintes dimensões: 13,40 x 7,58 x 4,80 mm. Ametista (Dark Orchid 2) com as seguintes dimensões: 14,99 x 9,80 x 5,99 mm.



Fonte: autor

Figura 20: 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: Adaptado de Fujimori & Ferreira (1987).

Figura 21: Infográfico dos códigos das cores em HTML

LightSteelBlue1	#CAE1FF	Brown1	#FF4040	SeaGreen3	#43CD80	LightSteelBlue	#B0C4DE	Seashell3	#F0DC8C	Azure3	#C7CDDC	Pink4	#8B639C	Goldenrod4	#8B6394
LightSteelBlue2	#BCD2EE	Brown2	#EE3B3B	SeaGreen4	#2E8B57	LightBlue	#ADD8E6	Seashell4	#8B6882	Azure4	#638B8B	LightPink1	#8B639C	DarkGoldenrod1	#FFB90F
LightSteelBlue3	#42B5CD	Brown3	#CD3333	PaleGreen1	#90EE90	PowderBlue	#ADD8E6	AntiqueWhite1	#FFDAB9	StateBlue1	#4682B4	LightPink2	#FFA07A	DarkGoldenrod2	#EAD95D
LightSteelBlue4	#87CEEB	Brown4	#8B2323	PaleGreen2	#90EE90	PaleTurquoise	#AFEEEE	AntiqueWhite2	#FFDAB9	StateBlue2	#76B82A	LightPink3	#CD853F	DarkGoldenrod3	#CD950C
LightBlue1	#87CEEB	Salmon1	#FF6347	PaleGreen3	#70C07C	DarkTurquoise	#00CED1	AntiqueWhite3	#C0C0C0	StateBlue3	#4682B4	LightPink4	#8B639C	DarkGoldenrod4	#8B639B
LightBlue2	#87CEEB	Salmon2	#E9967A	PaleGreen4	#90EE90	MediumTurquoise	#48BFD8	AntiqueWhite4	#808080	StateBlue4	#4682B4	PaleVioletRed1	#FF8247	RosyBrown1	#FFC0CB
LightBlue3	#90EE90	Salmon3	#CD7070	SpringGreen1	#00FF00	Turquoise	#40E0D0	Bisque1	#FFDAB9	RoyalBlue1	#4169E1	PaleVioletRed2	#EE739F	RosyBrown2	#E9967A
LightBlue4	#66CDAA	Salmon4	#FF4500	SpringGreen2	#00FF00	LightCyan	#00FFFF	Bisque2	#FFDAB9	RoyalBlue2	#4169E1	PaleVioletRed3	#EE739F	RosyBrown3	#E9967A
LightCyan1	#00FFFF	LightSalmon1	#FFA07A	SpringGreen3	#00FF00	CadetBlue	#98FB98	Bisque3	#FFDAB9	RoyalBlue3	#4169E1	PaleVioletRed4	#8B639C	RosyBrown4	#8B639B
LightCyan2	#00FFFF	LightSalmon2	#EE9877	SpringGreen4	#00FF00	MediumSeaGreen	#66CDAA	Bisque4	#FFDAB9	RoyalBlue4	#4169E1	Maroon1	#8B639C	IndianRed1	#FF6347
LightCyan3	#66CDAA	LightSalmon3	#CD853F	Green1	#00FF00	MediumAquamarine	#70E0E0	PeachPuff1	#FFDAB9	Blue1	#0000FF	Maroon2	#8B639C	IndianRed2	#8B639C
LightCyan4	#70E0E0	LightSalmon4	#8B5742	Green2	#00E000	Aquamarine	#70E0E0	PeachPuff2	#FFDAB9	Blue2	#0000FF	Maroon3	#CD2990	IndianRed3	#CD5555
PaleTurquoise1	#B0E0E6	Orange1	#FF4500	Green3	#00CD00	DarkGreen	#006400	PeachPuff3	#FFDAB9	Blue3	#0000FF	Maroon4	#8B639C	IndianRed4	#8B639C
PaleTurquoise2	#90EE90	Orange2	#EE5A00	Green4	#008000	DarkOliveGreen	#556B2F	PeachPuff4	#8B786E	Blue4	#0000FF	VioletRed1	#8B639C	Stemna1	#8B639C
PaleTurquoise3	#90EE90	Orange3	#CD853F	Chartreuse1	#7FFFD0	DarkSeaGreen	#8FBC8F	NavajoWhite1	#FFDAB9	DodgerBlue1	#1E90FF	VioletRed2	#8B639C	Stemna2	#8B639C
PaleTurquoise4	#66CDAA	Orange4	#8B5A00	Chartreuse2	#76EE00	SeaGreen	#8FBC8F	NavajoWhite2	#FFDAB9	DodgerBlue2	#1E90FF	VioletRed3	#8B639C	Stemna3	#8B639C
CadetBlue1	#98FB98	DarkOrange1	#FF7F00	Chartreuse3	#66CD00	MediumSeaGreen	#3CB371	NavajoWhite3	#C0C0C0	DodgerBlue3	#1E90FF	VioletRed4	#8B639C	Stemna4	#8B639C
CadetBlue2	#8B5742	DarkOrange2	#EE7800	Chartreuse4	#458B00	LightSeaGreen	#20B2AA	NavajoWhite4	#8B786E	DodgerBlue4	#1E90FF	Magenta1	#8B639C	Burlywood1	#FFDAB9
CadetBlue3	#5CB8A8	DarkOrange3	#CD853F	OliveDrab1	#00FF00	PaleGreen	#90EE90	LemonChiffon1	#FFFACD	SteelBlue1	#4682B4	Magenta2	#8B639C	Burlywood2	#FFDAB9
CadetBlue4	#4682B4	DarkOrange4	#8B4513	OliveDrab2	#3CB371	SpringGreen	#00FF00	LemonChiffon2	#FFFACD	SteelBlue2	#4682B4	Magenta3	#8B639C	Burlywood3	#FFDAB9
Turquoise1	#00CED1	Coral1	#FF7F50	OliveDrab3	#9ACD32	LawnGreen	#7CFC00	LemonChiffon3	#FFFACD	SteelBlue3	#4682B4	Magenta4	#8B639C	Burlywood4	#FFDAB9
Turquoise2	#00CED1	Coral2	#EE5A00	OliveDrab4	#8B4513	Green	#3CB371	LemonChiffon4	#FFFACD	SteelBlue4	#4682B4	Orchid1	#8B639C	Wheat1	#FFDAB9
Turquoise3	#00CED1	Coral3	#CD5C5C	DarkOliveGreen1	#8B4513	Chartreuse	#7FFFD0	Cornsilk1	#FFFACD	DeepSkyBlue1	#00BFFF	Orchid2	#8B639C	Wheat2	#FFDAB9
Turquoise4	#00CED1	Coral4	#8B4513	DarkOliveGreen2	#66CDAA	MedSpringGreen	#00FA9A	Cornsilk2	#FFFACD	DeepSkyBlue2	#00BFFF	Orchid3	#8B639C	Wheat3	#FFDAB9
Cyan1	#00FFFF	Tomato1	#FF6347	DarkOliveGreen3	#420D5A	GreenYellow	#ADFF2F	Cornsilk3	#FFFACD	DeepSkyBlue3	#00BFFF	Orchid4	#8B639C	Wheat4	#8B639C
Cyan2	#00FFFF	Tomato2	#EE5A00	DarkOliveGreen4	#8B4513	LightGreen	#9ACD32	Cornsilk4	#FFFACD	DeepSkyBlue4	#00BFFF	Plum1	#8B639C	Wheat5	#FFDAB9
Cyan3	#00FFFF	Tomato3	#CD4F53	Khaki1	#FFD700	YellowGreen	#9ACD32	ivory1	#FFFACD	SkyBlue1	#87CEEB	Plum2	#8B639C	Tan1	#FFDAB9
Cyan4	#00FFFF	Tomato4	#8B382E	Khaki2	#EE685E	ForestGreen	#228B22	ivory2	#FFFACD	SkyBlue2	#87CEEB	Plum3	#8B639C	Purple3	#8B639C
DarkSlateGray1	#2F4F4F	OrangeRed1	#FF4500	Khaki3	#CD0C73	OliveDrab	#8B4513	ivory3	#FFFACD	SkyBlue3	#87CEEB	Plum4	#8B639C	Purple4	#8B639C
DarkSlateGray2	#483D8B	OrangeRed2	#EE4000	Khaki4	#8B639C	DarkKhaki	#8B639C	ivory4	#FFFACD	SkyBlue4	#87CEEB	MediumOrchid1	#8B639C	MediumPurple1	#8B639C
DarkSlateGray3	#7030A0	OrangeRed3	#CD3700	LightGoldenrod1	#FFD700	PaleGoldenrod	#EE685E	Honeydew1	#FFFACD	LightSkyBlue1	#ADD8E6	MediumOrchid2	#8B639C	MediumPurple2	#8B639C
DarkSlateGray4	#528B8B	OrangeRed4	#8B2323	LightGoldenrod2	#EEDC8C	LightGoldenrod1	#FFD700	Honeydew2	#FFFACD	LightSkyBlue2	#ADD8E6	MediumOrchid3	#8B639C	MediumPurple3	#8B639C
Aquamarine1	#7FFFD4	Red1	#FF0000	LightGoldenrod3	#CDBE70	LightYellow	#FFFFE0	Honeydew3	#FFFACD	LightSkyBlue3	#ADD8E6	MediumOrchid4	#8B639C	MediumPurple4	#8B639C
Aquamarine2	#70E0E0	Red2	#EE0000	LightGoldenrod4	#8B5742	Yellow	#FFFF00	Honeydew4	#FFFACD	LightSkyBlue4	#ADD8E6	DarkOrchid1	#8B639C	Thistle1	#8B639C
Aquamarine3	#66CDAA	Red3	#CD0000	LightYellow1	#FFFF00	Gold	#FFD700	LavenderBlush1	#FFFACD	StateGray1	#808080	DarkOrchid2	#8B639C	Thistle2	#8B639C
Aquamarine4	#4682B4	Red4	#8B0000	LightYellow2	#EEDC8C	LightGoldenrod	#EEDC8C	LavenderBlush2	#FFFACD	StateGray2	#808080	DarkOrchid3	#8B639C	Thistle3	#8B639C
DarkSeaGreen1	#2E8B57	DeepPink1	#FF1493	LightYellow3	#C0C080	goldenrod	#DAA520	LavenderBlush3	#C0C0C0	StateGray3	#808080	DarkOrchid4	#8B639C	Thistle4	#8B639C
DarkSeaGreen2	#4682B4	DeepPink2	#EE128B	LightYellow4	#8B639C	DarkGoldenrod	#8B639C	LavenderBlush4	#8B639C	Chocolate3	#8B639C	DarkOrchid4	#8B639C	grey11	#8B639C
DarkSeaGreen3	#8B639C	DeepPink3	#CD0770	Yellow1	#FFD700	DarkGoldenrod1	#8B639C	Chocolate4	#8B639C	Chocolate4	#8B639C	DarkOrchid4	#8B639C	grey21	#8B639C
DarkSeaGreen4	#66CDAA	DeepPink4	#8B0000	Yellow2	#EE685E	DarkGoldenrod2	#8B639C	Chocolate5	#8B639C	Chocolate5	#8B639C	DarkOrchid4	#8B639C	grey31	#8B639C
SeaGreen1	#5499C7	HotPink1	#FF69B4	Yellow3	#C0C000	DarkGoldenrod3	#8B639C	Tan3	#8B639C	Chocolate6	#8B639C	DarkOrchid4	#8B639C	grey41	#8B639C
SeaGreen2	#4682B4	HotPink2	#EE6AA7	Yellow4	#8B639C	DarkGoldenrod4	#8B639C	Tan4	#8B639C	Chocolate7	#8B639C	DarkOrchid4	#8B639C	grey51	#8B639C
MistyRose1	#F5E7E5	Gold1	#FFD700	Gold1	#FFD700	RosyBrown1	#8B639C	Chocolate1	#8B639C	Chocolate8	#8B639C	DarkOrchid4	#8B639C	grey61	#8B639C
MistyRose2	#E0D0D0	Gold2	#FFD700	Gold3	#FFD700	RosyBrown2	#8B639C	Chocolate2	#8B639C	Chocolate9	#8B639C	DarkOrchid4	#8B639C	grey71	#8B639C
MistyRose3	#C0C0C0	HotPink3	#FF69B4	Gold4	#FFD700	RosyBrown3	#8B639C	Chocolate3	#8B639C	Chocolate10	#8B639C	DarkOrchid4	#8B639C	grey81	#8B639C
MistyRose4	#8B639C	HotPink4	#8B0000	Gold5	#8B639C	RosyBrown4	#8B639C	Chocolate4	#8B639C	Chocolate11	#8B639C	DarkOrchid4	#8B639C	grey91	#8B639C
Azure1	#00FFFF	Pink1	#FFB6C1	Goldenrod1	#FFD700	RosyBrown4	#8B639C	IndianRed1	#8B639C	Stemna1	#8B639C	Goldenrod1	#8B639C	grey125	#8B639C
Azure2	#00FFFF	Pink2	#FFB6C1	Goldenrod2	#EEDC8C	LightGreen	#90EE90	IndianRed2	#8B639C	Stemna2	#8B639C	Goldenrod2	#8B639C	grey126	#8B639C
Azure3	#00FFFF	Pink3	#FFB6C1	Goldenrod3	#CDBE70	DarkCyan	#008B8B	IndianRed3	#8B639C	Stemna3	#8B639C	Goldenrod3	#8B639C	grey127	#8B639C
Azure4	#00FFFF	Pink4	#FFB6C1	Goldenrod4	#8B639C	DarkCyan	#008B8B	IndianRed4	#8B639C	Stemna4	#8B639C	Goldenrod4	#8B639C	grey128	#8B639C

Fonte: Código de Cor (2013).

6.1 Consulta Bibliográfica

Para comparar e classificar os espectros Raman das amostras minerais analisadas foram consultados os espectros destes minerais fornecidos pela RRUFF (RRUFF, acesso em 15/03/2022); em razão de ser uma plataforma *on-line* referência nos estudos envolvendo Raman. Os espectros das gemas de Quixeramobim tiveram suas bandas comparadas aos da plataforma.

6.2 Refratômetro

Este instrumento (Prancha 1) 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, neste caso o raio incidente de luz se desdobra em dois raios refratados; se o mineral for 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 (Camargo, 1961) (Anderson, 1984) (Schumann, 2020).

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, água-marinha e ametista) são anisotrópicas (uniaxial) e isotrópica (granada). Foram utilizados dois refratômetros da marca *Rayner Dialdex* com fonte de luz acoplada (filtro monocromático incluso), seis leituras foram realizadas em cada um dos refratômetros utilizando as gemas desta pesquisa a fim de garantir máxima precisão. Ademais, foi utilizado um quartzo (cristal

de rocha) com índices de refração e birrefringência conhecidos para testar a calibragem dos refratômetros.

6.3 Dicroscópio

Com este instrumento (Prancha 1) 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, 2020). 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 através do dicroscópio 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. Foi utilizado um dicroscópio portátil da GIA (Gemological Institute of America).

6.4 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, 2020), 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. Foi utilizada uma lâmpada fluorescente (Prancha 1) de ondas curtas da GIA (Gemological Institute of America), o instrumento possui 110 volts.

6.5 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, 2020). Foram utilizadas duas balanças, uma hidrostática Marte AD5002 e outra analítica AND HR200 para garantir máxima precisão no peso das amostras (Prancha 1).

6.6 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 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 transmitir a luz (Schumann, 2020). Foi utilizado um espectroscópio portátil da GIA (Prancha 1) sem fonte de

luz acoplada.

6.7 Microscópio Gemológico

O Microscópio Gemológico é um aparelho destinado a aumentar a imagem dos objetos através de uma melhora na visualização por meio de lentes ópticas, 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 (mono, bi ou trifásicas), linhas de crescimento, faixas de cor, e bolhas de ar, torna-se possível identificar substâncias de origem natural ou sintética (Anderson, 1984) (Oliveira, 1967) (Franco, 1961). As amostras do município de Quixeramobim 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. Foi usado um microscópio binocular gemológico (Prancha 1) Meiji EMZ 75339 em fundo branco e com fonte de luz acoplada, pode servir também para utilização de campo escuro com duas pinças de sustentação de gemas, com objetivas de aumento definidos (0,7X, 1X, 1,5X, 2X, 2.5X, 3X, 3,5X, 4X 4,5X), oculares de aumento 16X.

6.8 Boletim Referencial de Preços de Diamantes e Gemas de Cor

Este boletim criado a partir de um convênio entre a ANM (Agência Nacional de Mineração) antigo DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral) e o IBGM (Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos), ambos os órgãos do Governo Federal, 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 diafanidade transparente; inclusões invisíveis a vista desarmada e vistas com dificuldade com uma lupa de 10 vezes; análise do acabamento e proporções da lapidação. Todas as etapas da avaliação deste boletim devem ser realizados minuciosamente, com grande

atenção e critério. Os valores do boletim são fornecidos em dólar (2009), como a inflação vigente do ano precisa ser levada em consideração, o uso de sites que calculam o valor da inflação do ano e mês vigente podem e devem ser utilizados.

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

Este dispositivo gemológico inédito (Prancha 1), 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 diafanidade (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, de forma paralela as placas de polarização, no suporte adequado e selecionar qual acessório (quartzo-gipso que confere um retardo da luz em 530 nm ou de mica que confere um retardo de 137,4 nm), rotaciona-se o material no suporte para determinação do tipo de figura de interferência e em seguida visualizar e identificar o sinal óptico. Sendo muito útil para uma identificação rápida; além de ser muito eficiente para distinção de imitações, vidros, plásticos e resinas (Oliveira, 2018), pois estes apresentaram uma configuração completamente diferente no equipamento. Este instrumento também permite identificar anomalias ou defeitos na estrutura de minerais, porém de maneira apenas qualitativa e não quantitativa. Mais informações referentes ao referido instrumento estão presentes no apêndice (Apêndice 5).

6.10 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 e utilizado (Prancha 1) nesta pesquisa pertencem a Central Analítica da UFC (Quanta 450 FEG - FEI) é acoplado a um espectrômetro dispersivo de energia (EDS) e tem resolução nominal de 1 nm. 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). Como preparação as

gemas foram colocadas em um *stub* e fixadas com uma fita de carbono, foi utilizada uma intensidade de feixe de 10 mil elétron volt (KeV) em que foi utilizado o alto vácuo para as análises, o feixe é aplicado em toda amostra.

6.11 Difratômetro 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., 1985). 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 (Klein & Dutrow, 2012). A difratometria de raios X em monocristal foram realizadas no LabCres (UFC) através do difratômetro (Prancha 1) modelo XPert Pro MPD (Panalytical); utilizando radiação MoK α monocromática (0.71073 Å) em temperatura ambiente, além do uso do software Vesta para visualizar as estruturas. As análises foram realizadas em amostras dos quatros minerais estudados (fragmentos milimétricos), turmalina, água-marinha, granada e ametista.

6.12 Espectroscopia 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, ocorre a dispersão (ou a mudança de direção da propagação da luz) e 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

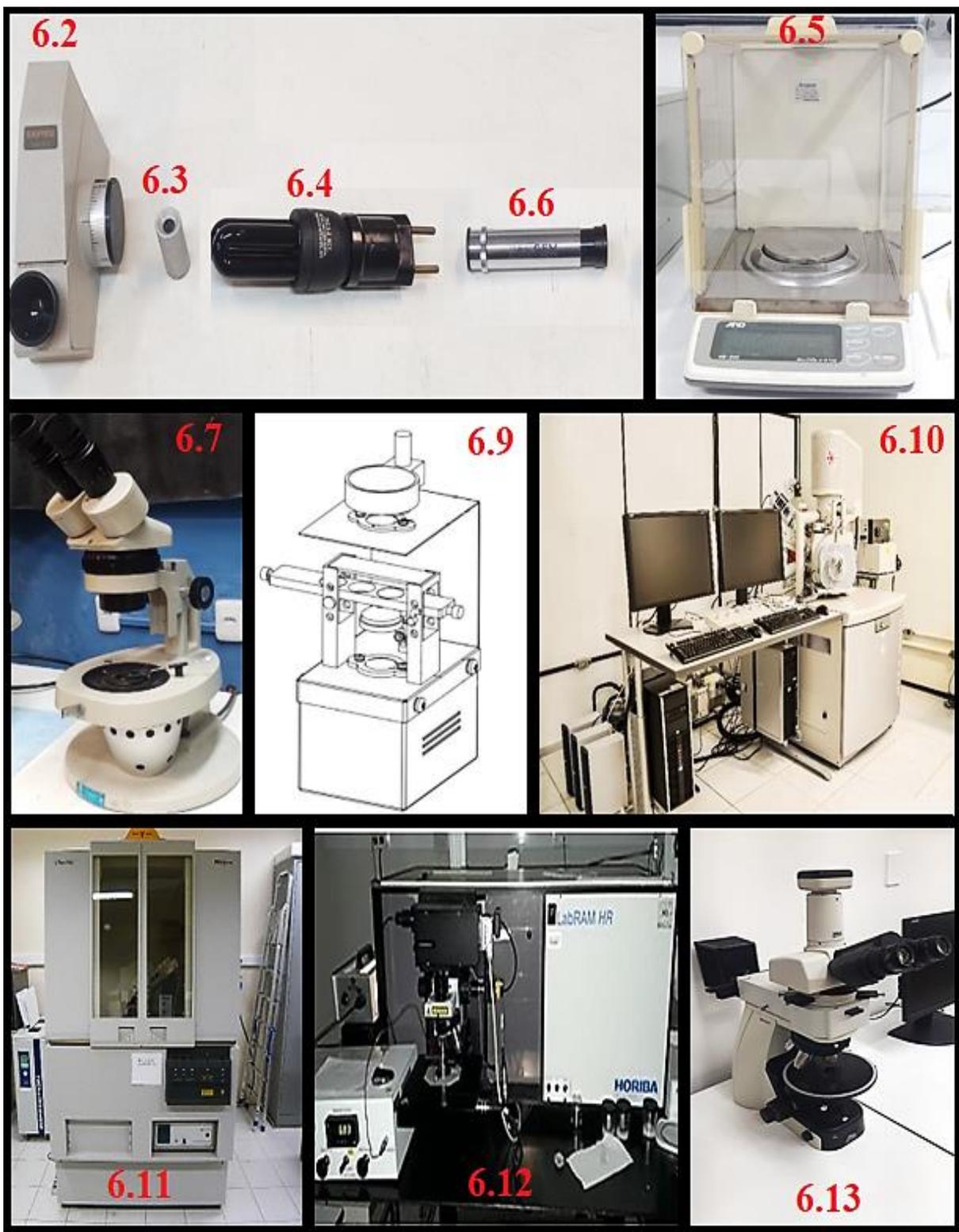
dessas linhas informa sobre o tipo de átomos ligados e sobre as ligações na molécula (de um cristal), cuja intensidade é diretamente proporcional à concentração de um determinado componente na amostra (Hutchings *et al* 2008). Este espectro adquirido torna-se mais uma característica de identificação das gemas de Quixeramobim, utilizando-se das bandas resultantes.

As medidas de espectroscopia Raman foram realizadas através do espectrômetro (Prancha 1) 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 laser com comprimento de onda 514.5 nm; no intervalo de 0 – 1800 cm^{-1} e com tempo de exposição de 45 segundos. 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 50x NIR (abertura numérica 0.8 e distância de trabalho de 0.5 nm).

6.13 Microscópio Petrográfico

O microscópio petrográfico é o instrumento usado na observação de rochas e minerais, possibilitando ampliações de imagem que atingem 400x ou valores superiores mais raramente. Com o microscópio petrográfico é possível adquirir diversas informações sobre a óptica dos objetos de estudo. Existem dois tipos principais: os de luz transmitida e os de luz refletida (em certos modelos, o mesmo aparelho permite estas duas possibilidades). Nos primeiros, a fonte de luz polarizada encontra-se na parte inferior do microscópio, sendo a luz conduzida por um sistema de lentes que desta forma são observadas as características dos minerais quando atravessados pela luz. As observações em luz transmitida são possíveis, apenas, com amostras que sejam quase transparentes, ou seja, que deixam atravessar parte da luz. Nos microscópios de luz refletida a fonte de luz encontra-se sobre a amostra e o que é observado é o resultado da reflexão da luz sobre a amostra. Os minerais opacos são estudados com o microscópio de luz refletida (Zukov, 1967) (Kerr, 1987) (Fujimori & Ferreira, 1987) (Machado e Nardy, 2016). Foi utilizado um microscópio petrográfico (Prancha 1) binocular OLYMPUS BX41, com quatro objetivas de aumentos distintos (4X, 10X, 40X e 100X), oculares de aumento 10X, platina móvel e acessórios de mica e quartzo, polarizador, analisador e lente de Amice Bertrand. Para verificação da direção da polarização da luz, foi utilizada uma biotita com clivagem visível; foram colocadas as clivagens paralelas aos planos de vibração do microscópio e em ambas as direções a biotita ficou completamente escura (extinta). Estes processos foram realizados nos sistemas de luz natural e ortoscópica

Prancha 1 – Equipamentos utilizados na pesquisa. Numeração referente aos equipamentos acima.



7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 TURMALINA

7.1.1 Propriedades gemológicas

Após a caracterização gemológica das turmalinas das regiões do Condado e Morro dos Tonhos (Município de Quixeramobim), os dados adquiridos foram comparados com a base de dados mundial da International Gem Society (IGS) (¹Arem & Clark, 2023) e em diversas obras de grande reconhecimento e credibilidade mundial, obras desde 1971 até 2020 (Franco & Campos, 1971) (Hurlbut & Switzer, 1979) (Nassau, 1980) (Webster, 1981) (Anderson, 1984) (Schumann, 2006) (IBGM/DNPM, 2009) (Bonewitz, 2013) (Schumann, 2020). Para averiguar se as turmalinas da região possuem características novas para serem incorporadas aos dados mundiais, ou a fim de embasar melhor estes dados, ou aumentar a gama de possíveis características para este mineral, ou identificar anomalias que caracterizem bem estes minerais como sendo provenientes de Quixeramobim (Ceará). Informações da turmalina são tabelados segundo informações da *International Gem Society* (¹Arem & Clark, 2023), enfatizando que cada uma das 15 espécies gemológicas deste mineral possui valores mais exatos e pouco variáveis (conforme detalhado no Capítulo 3, subitem 3.9).

Foram analisadas doze amostras de ocorrência comum para a região de Quixeramobim, gemas nas cores azul, verde e rosa. Assim como seis gemas de ocorrência rara para o Município, estas são vermelhas e bicolores. As dezoito 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, dada a sua importância foram utilizados dois refratômetros (*Rayner Dialdex*) e realizadas seis leituras com cada uma das gemas; todas as 12 medições (seis em cada refratômetro) para cada uma das 18 turmalinas foram as mesmas (Apêndice – 1 anexo). Além disto, ambos os instrumentos estavam devidamente calibrados após o uso de um quartzo (cristal de rocha) com índices de refração conhecidos. Por meio dos refratômetros constatou-se que as gemas são uniaxiais negativas. Minerais que se cristalizam no sistema tetragonal, hexagonal e trigonal são uniaxiais. Possuem o 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 n_o nas turmalinas analisadas sempre são maiores que os valores de n_e , razão esta que torna o sinal óptico destas como negativo; valor de n_o maior que n_e . Com n_o e n_e 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). Com n_o e n_e das gemas vermelhas e bicolores apresentando valores dentro da normalidade, com os maiores valores do raio ordinário (1,640) ocorrendo tanto nos exemplares vermelhos como em um bicolor (verde e rosa), bem como os menores valores do raio extraordinário (1.605) para uma amostra vermelha e uma bicolor (verde e rosa). Conforme ilustrado nas tabelas 1, 2, 3 e 4. O índice de refração das 15 espécies gemológicas da turmalina oscila entre 1,603-1,820 (¹Arem & Clark, 2023). Na maior parte das bibliografias existentes (por estarem desatualizadas) os intervalos para a dupla refração são 1,610-1,670 (Nassau, 1980) (Anderson, 1984) (IBGM/DNPM, 2009) (Bonewitz, 2013) (Schumann, 2020).

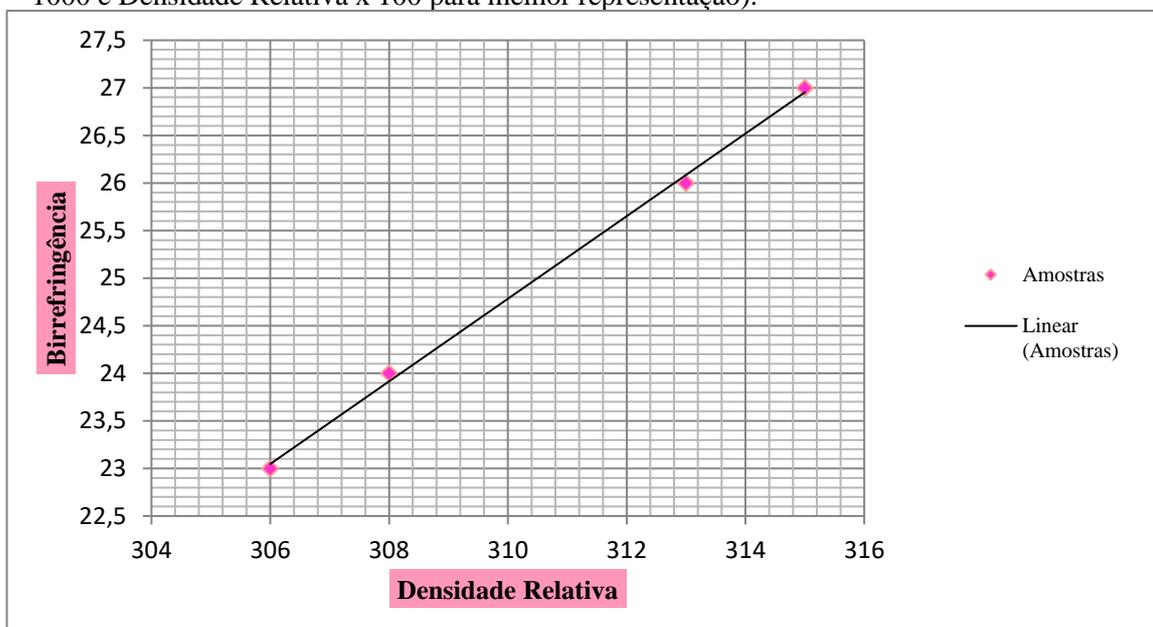
As gemas azuis analisadas possuem uma birrefringência muito elevada, duas possuem valores de 0,036 e 0,035, estes são acima da média máxima (0,032); enquanto as amostras de cor verde e rosa possuem valores médios de 0,016-0,022 para as verdes e 0,023-0,026 para a rosa. As gemas vermelhas e bicolores analisadas possuem uma birrefringência elevada, possuindo valores (0.029-0.035) muito próximos da média máxima (0.032) da espécie (Schumann, 2020); enquanto que uma amostra bicolor (azul e verde) possui um valor de 0.021 que é considerado mediano (¹Arem & Clark, 2023). 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 *et al*, 2010). Os valores de birrefringência das dez gemas analisadas podem ser consultados e comparados nas tabelas 1, 2, 3 e 4. A birrefringência mutável das turmalinas oscila entre 0,006-0,080 (¹Arem & Clark, 2023). Embora o mais comum e usual seja 0,012-0,036 (Hurlbut & Switzer, 1979) (Webster, 1981) (Anderson, 1984) (IBGM/DNPM, 2009) (Schumann, 2020).

As medidas utilizando a balança apresentaram 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 g/cm³ para a azul escura (London blue topaz). As amostras verdes detêm uma densidade de 3,23 g/cm³ para o exemplar mais denso (Chartreuse 4) e 3,07 g/cm³ para o menos denso (Chartreuse 3), já a turmalina rosa possui 3,13 g/cm³ para o mineral de maior densidade (Deep Pink 2) e 3,06 g/cm³ para o de menor densidade (Hot Pink 2). As gemas vermelhas detêm uma densidade de 3.13 g/cm³ para o exemplar mais denso (Red 3) e

3.02 g/cm³ para o menos denso (Red 3), já as turmalinas bicolores possuem 3.10 g/cm³ para o mineral de maior densidade (verde e rosa) e 3.07 g/cm³ para o de menor densidade (azul e rosa). Conforme ilustrado nas tabelas 1, 2, 3 e 4. A densidade no valor de 2,82-3,90 g/cm³ para as 15 espécies (gemológicas) da turmalina (¹Arem & Clark, 2023). Na maior parte das bibliografias existentes (por estarem desatualizadas) os intervalos para densidade relativa das turmalinas são 2,82-3,40 g/cm³ (Anderson, 1984) (Schumann, 2006) (IBGM/DNPM, 2009) (Bonewitz, 2013) (Schumann, 2020).

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 para melhor representação).



Fonte: autor

O pleocroísmo é classificado como forte em sete amostras e moderado em uma das gemas de cores comuns de Quixeramobim. A amostra azul, Dark Turquoise, e a rosa, Deep Pink 2 possuem pleocroísmo classificado com fraco, sendo esta uma característica incomum nas turmalinas. Esta característica é presente e classificada como forte em três amostras de ocorrência baixa em Quixeramobim (Red 3, Red 3 e (Deep Sky Blue 3 /Chartreuse 3), como moderada em uma bicolor (Deep Pink 4/ Chartreuse 4) e fraca em uma vermelha (Dark Red), que possui pleocroísmo classificado com fraco em detrimento da baixa absorção, conforme

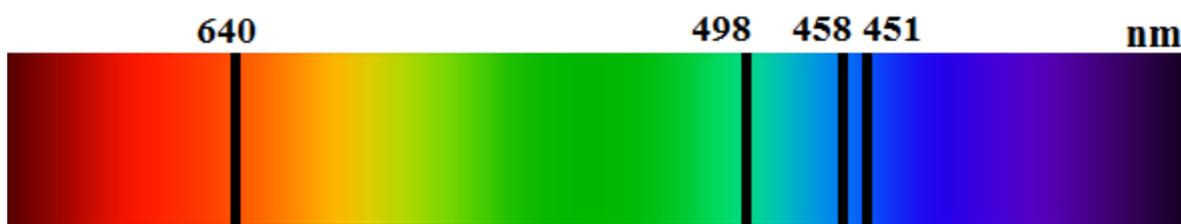
ilustrado nas tabelas 1, 2, 3, 4 e 5. Isto ocorre em detrimento da baixa absorção, no qual um dos raios está sendo mais refletido e menos absorvido que a normalidade devido aos aspectos estruturais e composicionais das amostras, diminuindo a compensação dos raios ordinário (no) e extraordinário (ne), quanto menor esta compensação (diferença) menor será a absorção observada (pleocroísmo). Conforme ambas as turmalinas exibiram pleocroísmo, descartou-se a possibilidade de a visualização desta característica ter sido através do eixo óptico nas turmalinas; caso isto aconteça o dicróísmo não será visualizado por na região do eixo óptico (paralelo ao eixo C) a elevada simetria na área faz com que os raios possuam a mesma velocidade de propagação (Flint, 1965) (Fujimori & Ferreira, 1987) (Machado & Nardy, 2016). O pleocroísmo das turmalinas a nível mundial varia de fraco a forte, geralmente detém alta absorção (Anderson, 1984) (IBGM/DNPM, 2009) (Bonewitz, 2013) (Schumann, 2020) (¹Arem & Clark, 2023).

Todas as turmalinas (dezoito) 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 da turmalina; os exemplares rosas 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). É extremamente esperada a ausência da fluorescência na espécie turmalina, porém alguns destes minerais na cor rosa podem apresentar fluorescência de baixa intensidade (¹Arem & Clark, 2023). O usual é ausência de fluorescência nas turmalinas (Franco & Campos, 1971) (Hurlbut & Switzer, 1979) (Anderson, 1984) (Bonewitz, 2013) (Schumann, 2020).

O espectro de absorção (Figura 22) (esquema ilustrativo representativo dado a difícil visualização e aquisição de fotografias) captado pelo espectroscópio se aproxima muito da característica padrão da turmalina; devido a dificuldade de visualização no espectroscópio somado ao fato da dificuldade extrema de ser obter fotografias visíveis das linhas de absorção, foi elaborado um espectro representativo (Figura 22). 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. Para as amostras vermelhas foram aferidos valores de 490-492 e 460 nm; enquanto que a turmalina bicolor (azul e verde) apresentou 500 nm, valor próximo de uma das bandas dos exemplares vermelhos; já a outra bicolor (rosa e verde) possui três faixas no

espectro, 480, 440 e 420 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 apud Nogueira Neto *et al*, 2019). 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 bandas 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, 3 e 4. Os espectros de absorção das turmalinas são comumente 640, 498, 458 e 451 nm (Franco & Campos, 1971) (Anderson, 1984) (IBGM/DNPM, 2009) (Schumann, 2020) (Arem & Clark, 2023).

Figura 22: Representação dos quatro espectros mais comuns em turmalinas.



Fonte: adaptado de Schumann (2020).

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).

Tabela 1: Características gemológicas dos cristais comuns de turmalina (azul, verde e rosa) de Quixeramobim – CE.

Amostra/ Propriedades	Diafaneidade	Índice de refração e Birrefringência	Caráter e sinal óptico	Pleocroísmo	Espectro de absorção	Fluorescência	Densidade Relativa	Inclusões e aspectos internos
Azul (Dark Turquoise)	Semitransparente	1,640 – 1,608; 0,032	Uniaxial negativo	Presente: Fraco	700 nm	Ausente	3,39 g/cm ³	Fraturas; estrias, linhas de crescimento; inclusões sólidas e fluidas
Azul (London Blue Topaz)	Semitranslúcido	1,641–1,605; 0,036	Uniaxial negativo	Presente: Forte	670 e 498 nm	Ausente	3,28 g/cm ³	Fraturas; inclusões sólidas e fluidas (orientadas)
Azul (Deep Sky Blue 4)	Semitranslúcido	1,646 – 1,611; 0,035	Uniaxial negativo	Presente: Forte	670 e 490 nm	Ausente	3,20 g/cm ³	Fraturas, estrias, abundantes inclusões sólidas (raramente orientadas) e fluidas
Azul (Turquoise)	Translúcido	1,645-1,613; 0,032	Uniaxial negativo	Presente: Forte	675 e 485 nm	Ausente	3,22 g/cm ³	Fraturas; linhas de crescimento; inclusões sólidas e fluidas; raramente líquidos orientados perpendicularmente as linhas de crescimento; sólidos em conjunto com fluidos com leve orientação; além de líquidos ocasionalmente orientados.
Verde (Green 3)	Transparente	1,642 – 1,620; 0,022	Uniaxial negativo	Presente: Forte	660 nm	Ausente	3,12 g/cm ³	Fraturas em pequena quantidade; raras inclusões fluidas e sólidas possuindo leve orientação
Verde (Chartruse 3)	Transparente	1,637 – 1,621; 0,016	Uniaxial negativo	Presente: Forte	650 e 498 nm	Ausente	3,07 g/cm ³	Fraturas em pequena quantidade; fissuras, inclusões sólidas e fluidas
Verde (Chartruse 4)	Translúcido	1,638 – 1,620; 0,018	Uniaxial negativo	Presente: Forte	650 nm	Ausente	3,18 g/cm ³	Fraturas; inclusões sólidas (às vezes orientadas) e fluidas; muito ocasionalmente bifásicas (sólida + líquida)

Verde (Olive Drab)	Semitransparente	1,640 – 1,620; 0,020	Uniaxial negativo	Presente: Forte	498 nm	Ausente	3,23 g/cm ³	Fraturas; inclusões fluidas, por vezes orientadas preenchendo fraturas; inclusões sólidas; minúsculas inclusões gasosas agrupadas
Rosa (Hot Pink 2)	Semitransparente	1,633 – 1,610; 0,023	Uniaxial negativo	Presente: Forte	410 nm	Ausente	3,06 g/cm ³	Fraturas; inclusões fluidas, por vezes orientadas preenchendo fraturas; minúsculas e ocasionais inclusões gasosas
Rosa (Deep Pink 1)	Translúcida	1,636 – 1,612; 0,024	Uniaxial negativo	Presente: Moderado	408 nm	Ausente	3,08 g/cm ³	Fraturas, fissuras, iridescência em decorrência de uma fratura, poucas inclusões fluidas e por vezes estão preenchendo cavidades
Rosa (Deep Pink 2)	Transparente	1,634 – 1,608; 0,026	Uniaxial negativo	Presente: Fraco	408 nm	Ausente	3,13 g/cm ³	Fraturas; inclusões fluidas (raramente exibindo uma leve orientação) e raras inclusões sólidas
Rosa (Deep Pink 3)	Translúcida	1,638 – 1,609; 0,026	Uniaxial negativo	Presente: Fraco	410 nm	Ausente	3,15 g/cm ³	Fraturas; raras inclusões aciculares, fluidas, muito ocasionalmente líquidos preenchendo cavidades; poucas inclusões sólidas escuras

Fonte: Oliveira, 2020 e autor

Tabela 2: Características gemológicas dos cristais de turmalina vermelha de Quixeramobim - CE.

Amostra/ Propriedades	Diafaneidade	Índice de refração e Birrefringência	Caráter e sinal óptico	Pleocroísmo	Espectro de absorção	Fluorescência	Densidade Relativa	Inclusões e aspectos internos
Vermelho (Dark Red)	Semitransparente	1,640 – 1,608; 0,032	Uniaxial negativo	Presente: Fraco	490 e 460 nm	Ausente	3,06 g/cm ³	Fraturas; linhas de crescimento; inclusões sólidas e fluidas; inclusões bifásicas (sólido e líquido).
Vermelho (Red 3)	Transparente	1,639– 1,610; 0,029	Uniaxial negativo	Presente: Forte	490 e 460 nm	Ausente	3,02 g/cm ³	Fraturas; inclusões sólidas e fluidas (monofásicas).
Vermelho (Red 3)	Transparente	1,640 – 1,610; 0,030	Uniaxial negativo	Presente: Forte	492 e 460 nm	Ausente	3,13 g/cm ³	Fraturas; inclusões sólidas (raras) e fluidas que ocasionalmente exibem uma pseudo-orientação.
Vermelho (Dark Red)	Transparente	1,640- 1,608; 0,032	Uniaxial negativo	Presente: Moderado	490 e 460 nm	Ausente	3,10 g/cm ³	Fraturas; linhas de crescimento; inclusões sólidas escuras e fluidas, líquidos por vezes exibindo orientação; raramente encontra-se sólidos com líquidos possuindo leve orientação; raramente fluidos orientados e paralelos entre si e as linhas de crescimento.

Fonte: autor

Tabela 3: Características gemológicas dos cristais bicolors, rosa e azul de turmalina de Quixeramobim - CE.

Amostra/ Propriedades	Diafaneidade	Índice de refração e Birrefringência	Caráter e sinal óptico	Pleocroísmo	Espectro de absorção	Fluorescência	Densidade Relativa	Inclusões e aspectos internos
Bicolor (Azul e Verde) (Deep Sky Blue 3 /Chartrouse 3)	Transparente	1,640 – 1,619; 0,021	Uniaxial negativo	Presente: Forte	500 nm	Ausente	3,07 g/cm ³	Fraturas; inclusões fluidas; inclusões sólidas orientadas e por vezes com leve orientação, ocasionalmente perpendicular as estrias do mineral.
Bicolor (Verde e Rosa) (Deep Pink 4/ Chartreuse 4)	Translúcida	1,638– 1,609; 0,029	Uniaxial negativo	Presente: Moderado	480, 440 e 420 nm	Ausente	3,10 g/cm ³	Fraturas; abundantes inclusões sólidas e fluidas em menor quantidade.

Fonte: autor

7.1.2 Feições Internas

Ao microscópio gemológico, os cristais de turmalina estudados são caracterizados por fraturas, inclusões sólidas e fluidas (Figura 23A – London Blue Topaz), para que estas feições auxiliem quando necessário nos casos de proveniência mineral. 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 de 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 (¹Arem & Clark, 2023).

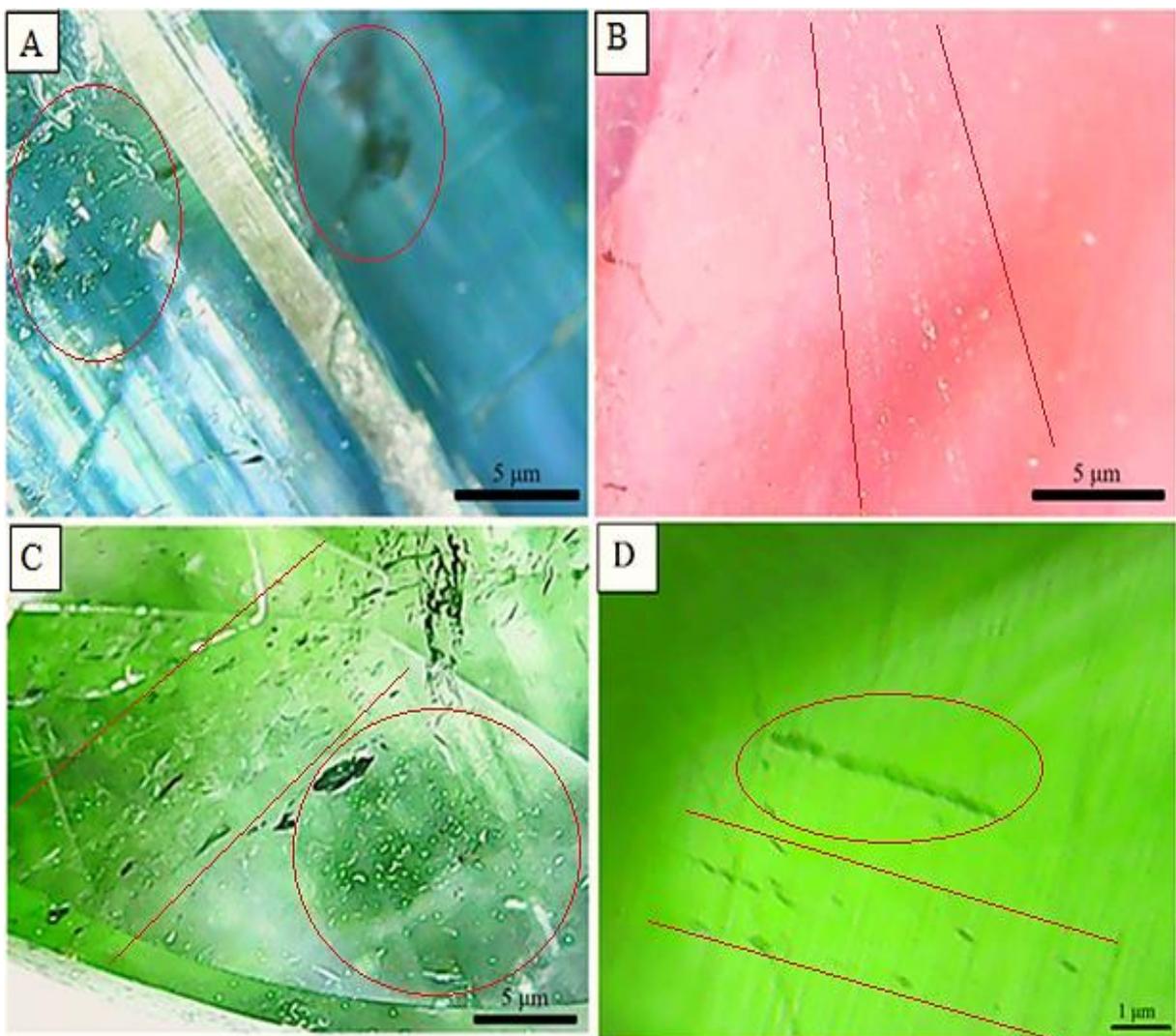
Foram visualizadas inclusões fluidas orientadas quase que paralelamente na gema rosa (Figura 23B – Hot Pink 2). Foram identificadas inclusões bifásicas (sólido + líquido) na amostra verde (Chartreuse 4) e inclusões fluidas orientadas e semi opacas com leve orientação (Figura 23C e 22D). Também foram constatadas estrias profundas e bem contrastantes com a cor dos minerais, além de inclusões sólidas (Figura 24E e 24F – Turmalina Dark Turquoise); estas inclusões são comuns nos exemplares verdes, como ilustrado na amostra verde (Figura 24G – Turmalina Olive Drab).

As inclusões sólidas se apresentam em diferentes tipos de formas e coloração, podendo ser da mesma natureza que o mineral hospedeiro ou de outra espécie mineral. Por vezes, podem ser facilmente reconhecidas por seu hábito, cor, brilho e outras características ópticas visualizadas ao microscópio gemológico. Estas inclusões podem ser formadas 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) (Franco & Campos, 1971) (Hughes, 2017) As linhas de crescimento são uma “marca” do crescimento mineral e as fraturas internas uma consequência de algum regime compressivo que os cristais foram submetidos após a cristalização.

Em um mineral rosa foi identificado uma forte iridescência (Figura 24H – Turmalina Hot Pink 1), esta forma-se devido à entrada da luz através das microfaturas, que propagam os raios em diferentes comprimentos de ondas, dentro do espectro da luz visível, cujos valores

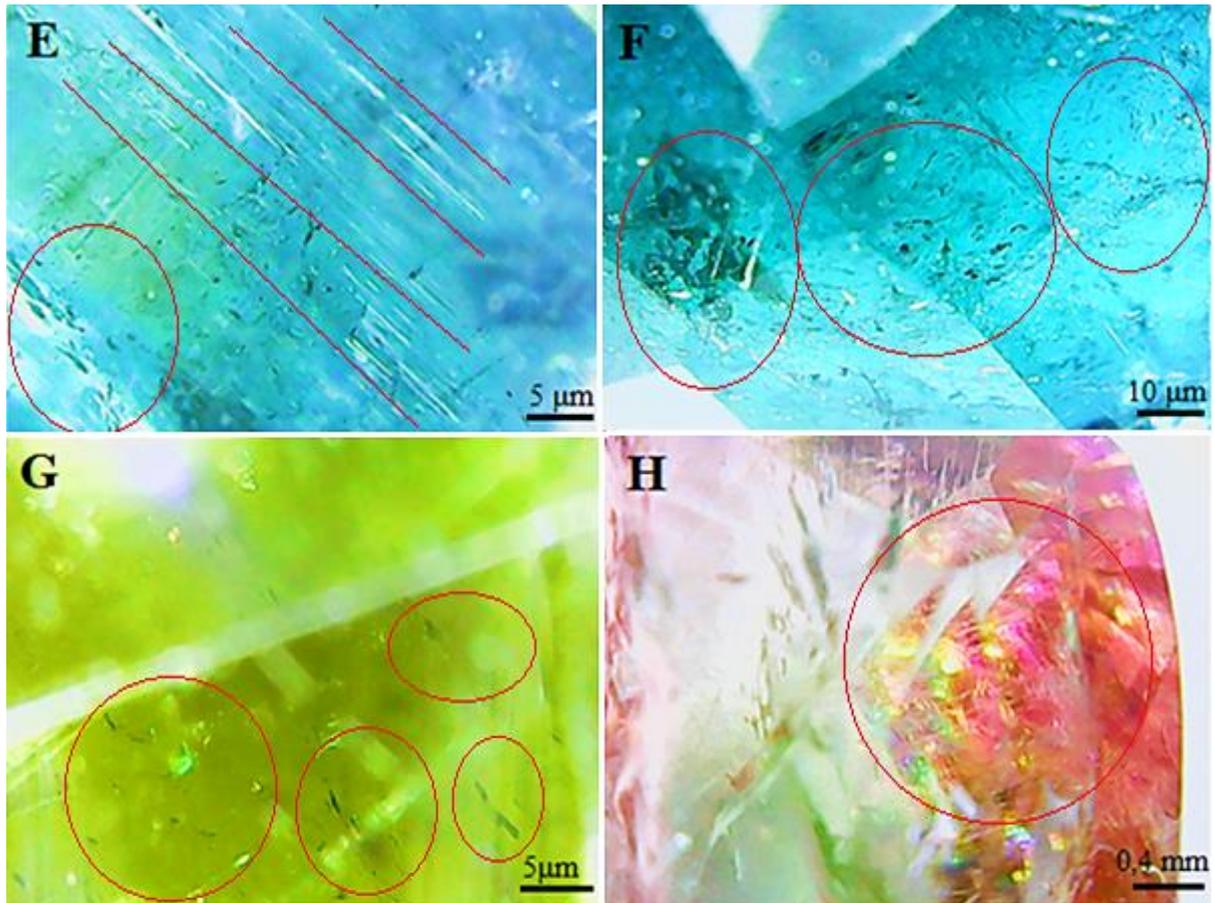
representam várias cores. Em dois exemplares foram encontradas pequenas inclusões aciculares que são indicativas de mudanças na temperatura do ambiente em que os minerais se encontravam.

Figura 23: 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: Oliveira, 2020

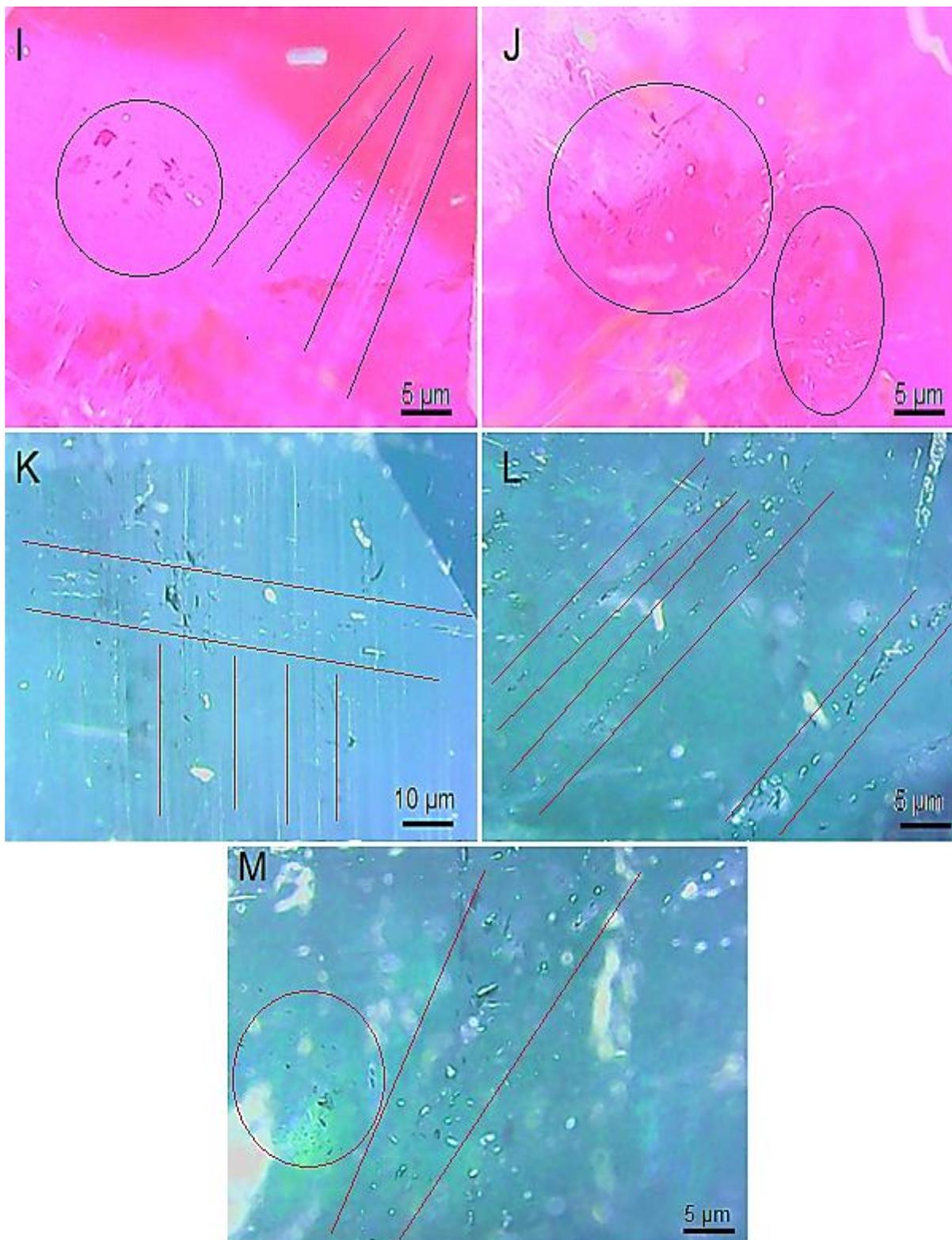
Figura 24: Inclusões nas amostras de turmalina estudadas do Município de Quixeramobim. E) Inclusões sólidas e estrias notáveis na turmalina azul clara (Dark Turquoise); F) Inclusões fluidas (transparentes) pseudo-orientadas e inclusões sólidas. G) Inclusões sólidas típicas das amostras verdes, em particular (Olive Drab). H) Iridescência marcante (jogo de cores) na amostra (Deep Pink 1).



Fonte: autor

É possível observar inclusões sólidas e fluidas anastomosadas e sem orientação (Figura 25I e J - Deep Pink 2). Também se fazem presentes inclusões fluidas orientadas e perpendiculares as linhas de crescimento da gema (Figura 25K – Turquoise), e inclusões fluidas monofásicas e paralelas entre si (Figura 25L – Turquoise), estas podem ser classificadas como singenéticas; além de fluidos com leve orientação e perpendiculares entre si (Figura 25M – Turquoise). Com estes dados pode-se posteriormente efetuar um estudo, mais detalhado, para investigar os processos de formações destas gemas.

Figura 25: Inclusões nas amostras de turmalina (rosas e azuis) estudadas do Município de Quixeramobim. I) Inclusões sólidas e fluidas anastomosadas e sem orientação (Deep Pink 2). J) Fluidos agrupados (Deep pink 3). K) Inclusões fluidas orientadas e perpendiculares as linhas de crescimento da gema (Turquoise). L) Fluidos monofásicos e paralelos entre si (Turquoise). M) Fluidos com leve orientação e perpendiculares entre si (Turquoise).

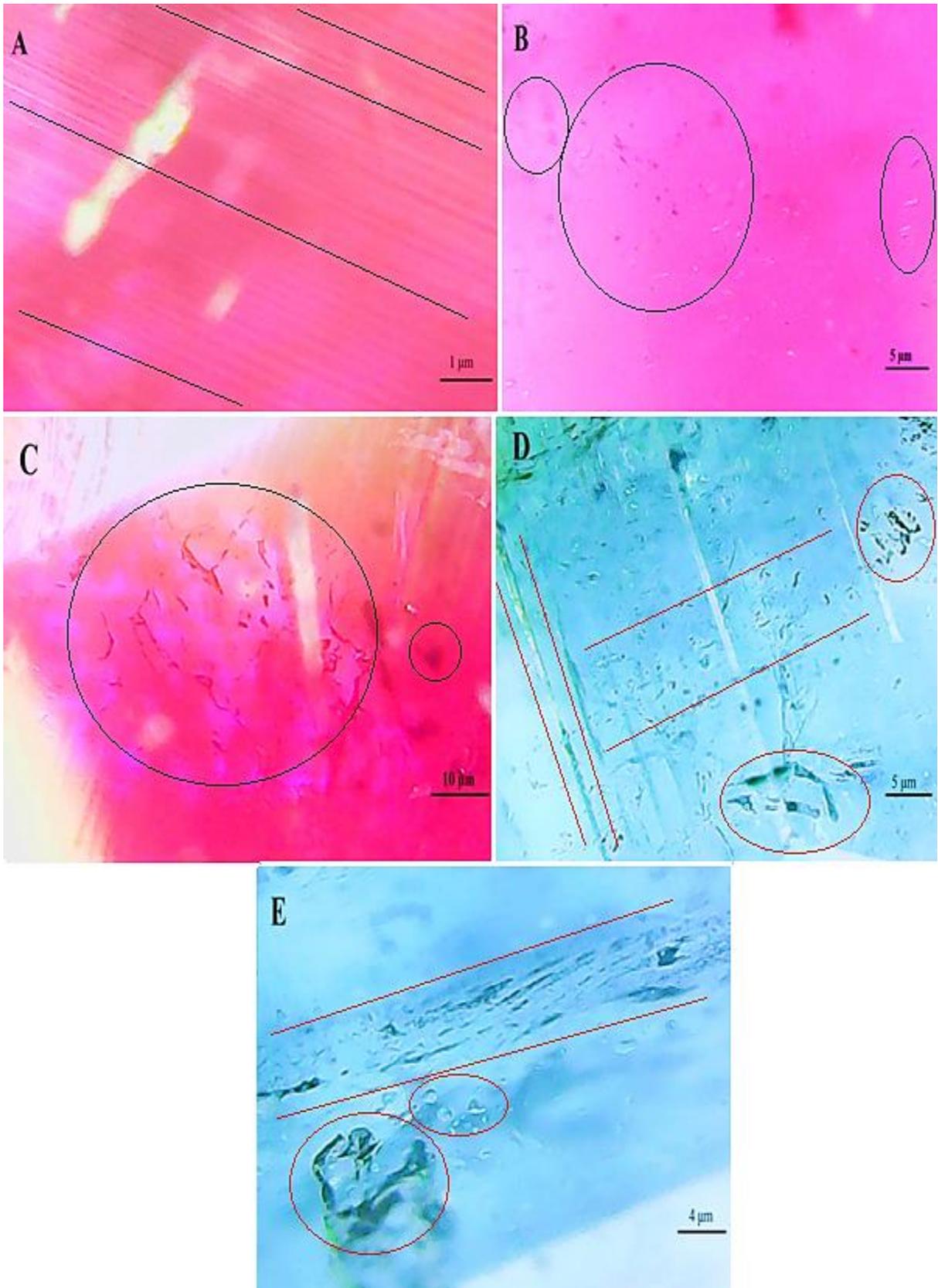


Os cristais de turmalinas vermelhas estudados são caracterizados por fraturas sem preenchimento, linhas de crescimento concentradas e bem marcadas, além de inclusões. Na figura 26 foram visualizadas fraturas, inclusões bifásicas (sólido e líquido), monofásicas e linhas de crescimento na amostra *Dark Red* (Figura 26A). Na gema *Red 3* foram identificadas fraturas, inclusões sólidas e líquidas (Figura 26B) anastomosadas e com uma leve orientação; no outro exemplar *Red 3* visualizou-se fraturas; inclusões sólidas raramente, fluidas que ocasionalmente exibem uma pseudo-orientação (possuem uma orientação curta e que se interrompe mudando de ângulo) (Figura 26C). O exemplar bicolor (azul e verde) exibiu fraturas; inclusões fluidas agrupadas (sugerindo uma origem protogenética); inclusões sólidas orientadas perpendiculares as estrias do mineral (Figura 26D); também foram identificadas inclusões fluidas (agrupadas) perpendicular as inclusões sólidas com orientação (Figura 26E).

As gemas vermelhas de Quixeramobim também possuem inclusões sólidas anastomosadas e sem orientação, provavelmente ilmenita (Figura 27F – *Dark Red*); também se fazem presentes estreitas inclusões sólidas escuras com leve orientação (Figura 27G – *Dark Red*). No mesmo exemplar foram visualizados fluidos com pseudo-orientação de forma quase que perpendicular às linhas de crescimento da gema (Figura 27H – *Dark Red*); além de inclusões fluidas orientadas, paralelas entre si e paralelas as linhas de crescimento da gema (Figura 27I – *Dark Red*). Todas estas feições exibindo orientação encontradas nas turmalinas de várias cores; possuem características de materiais singenéticos, formados ao mesmo tempo que a gema hospedeira.

Figura 26: Inclusões nas amostras raras do Município de Quixeramobim.

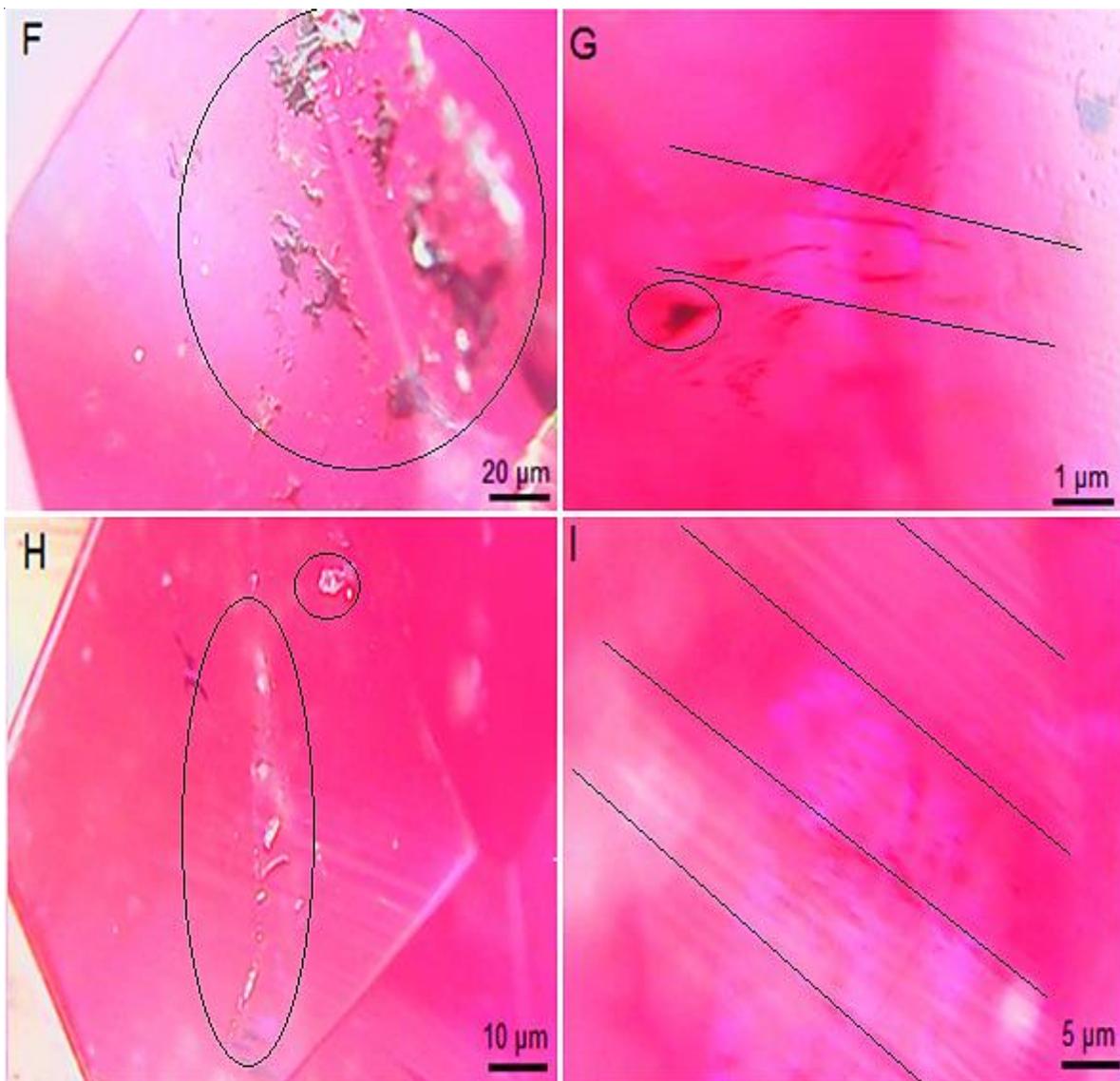
A) Linhas de crescimento e inclusão bifásica (sólido e líquido) na amostra vermelha (*Dark Red*). B) Inclusões sólidas (escuras) e fluidas (transparentes) no exemplar vermelho (*Red 3*). C) Inclusões fluidas pseudo-orientadas (transparentes e anastomosadas) na amostra vermelha (*Red 3*). D) Inclusões sólidas (escuras) orientadas e perpendiculares às estrias do mineral na amostra bicolor (azul e verde). E) Inclusões sólidas (escuras) bem orientadas, inclusões fluidas agrupadas na amostra bicolor (azul e verde).



Fonte: autor

Figura 27: Inclusões nas amostras raras do Município de Quixeramobim.

F) Inclusões sólidas anastomosadas e sem orientação, provavelmente ilmenita (Dark Red). G) Sólidos escuros com leve orientação (Dark Red). H) Fluidos com pseudo-orientação de forma quase que perpendicular às linhas de crescimento da gema (Dark Red). I) Inclusões fluidas orientadas, paralelas entre si e paralelas as linhas de crescimento (Dark Red).



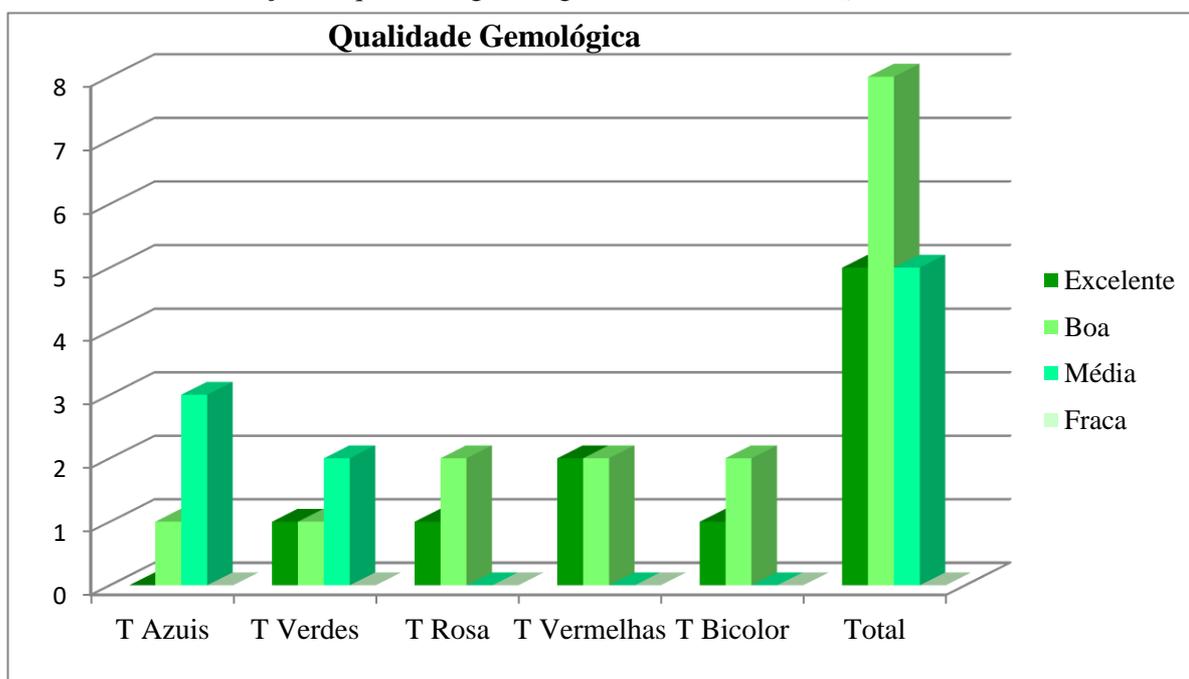
Fonte: autor

7.1.3 Diafaneidade, Qualidade Gemológica e Valor Comercial

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 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”, posteriormente o valor em dólar das amostras foi reajustado para dezembro de 2020 de acordo com a inflação. Com cinco amostras possuindo “excelente” qualidade gemológica, oito sendo classificadas como “boas” e cinco como “médias”. As turmalinas vermelhas possuem a melhor média de qualidade gemológica, com metade possuindo “excelente” qualidade e outra metade com “boa”; em razão da elevada cor e baixo teor de inclusões. As turmalinas rosa e as bicolores vêm em seguida possuindo as segundas melhores notas gemológicas em relação às outras cores (verde e azul), em parte devido ao baixo de teor de inclusões nestas amostras; ressaltando que a amostra de melhor qualidade possui o menor valor de mercado em decorrência de seu pequeno tamanho. As gemas verdes possuem melhor qualidade média que as azuis, grande parte deste fato se deve a cor muito escura na maioria das amostras azuis.

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



Fonte: autor

Os dados da qualidade gemológica e os valores de mercado foram compilados em uma tabela (Tabela 4), sendo notável o elevado preço que duas amostras azuis (Dark Turquoise e Deep Sky Blue 4) e uma vermelha 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 turmalina vermelha (Red 3) possui tamanho considerável e uma boa qualidade fatores essenciais para seu elevado valor. A gema rosa com nota gemológica mais alta (Deep Pink 2) 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; esta mesma gema possui quase o triplo do peso e do valor do espécime London Blue Topaz, isto ocorre pois ambas possuem qualidades (notas gemológicas) muito próximas. A gema vermelha Dark Red é apenas 1 ct mais que leve que a turmalina Red 3, porém possui apenas metade do valor econômico da mais pesada; isto é decorrente da melhor qualidade da gema Red 3. Importante salientar que estes valores correpodem aos preços que chegam no consumidor final, já em joalherias e as gemas já em peças montadas (jóias).

Tabela 4: Qualidade gemológica das turmalinas Quixeramobim e valor de mercado.

Cor da Amostra	Peso (ct)	Nota Gemológica	Qualidade Gemológica	Preço em dólar (2022)
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
Vermelho (Dark Red)	5	6,25	Boa	540,02
Vermelho (Red 3)	2,5	8,00	Excelente	243,51
Vermelho (Red 3)	6	7,50	Boa	1032,26
Vermelho (Dark Red)	2,5	8,00	Excelente	243,51
Bicolor (Azul e Verde) (Deep Sky Blue 3 /Chartreuse 3)	1	8,25	Excelente	47,75
Azul (Turquoise 4)	3	5,75	Média	193,89

Bicolor (Verde e Rosa) (Deep Pink 4/ Chartreuse 4)	5	6,00	Boa	210,73
Rosa (Deep Pink 3)	1,5	7,75	Boa	58,80

Fonte: autor

7.1.4 Polariscópio Gomes

Após serem analisadas 18 amostras no laboratório de Gemologia TN utilizando o Polariscópio Gomes, O grau de qualidade das figuras de interferência foi inserido em uma tabela (Tabela 5), 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 desta pesquisa) 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” (quatro exemplares) detêm uma figura de interferência mais difícil de ser analisada, com uma figura não tão nítida. As amostras classificadas como “regular” (oito minerais) 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. Estima-se que minerais com qualidade de figura de interferência “regular” e “ruim” tenham seu eixo óptico paralelo ou quase paralelo aos planos de polarização.

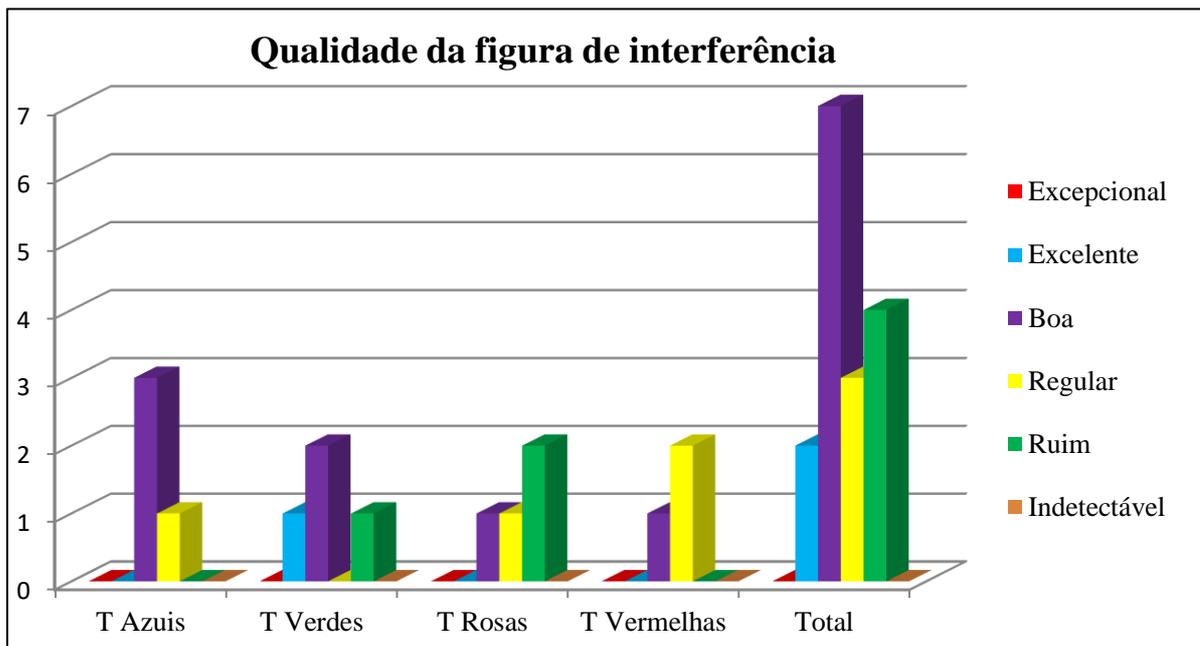
Nas turmalinas rosa, foi percebida uma correlação entre a facilidade de visualizar a figura de interferência e pleocroísmo das amostras; no qual quanto mais perceptível era o dicroísmo maior era a facilidade de identificar o caráter e sinal óptico, conforme ilustrado no gráfico (Gráfico 4). As amostras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

Tabela 5: 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
11	Vermelho (Dark Red)	5	Regular
12	Vermelho (Red 3)	2,5	Boa
13	Vermelho (Red 3)	6	Regular
14	Vermelho (Dark Red)	2,5	Boa
15	Bicolor (Azul e Verde) (Deep Sky Blue 3 /Chartreuse 3)	1	Boa
16	Bicolor (Verde e Rosa) (Deep Pink 4/ Chartreuse 4)	5,0	Regular
17	Azul (Turquoise)	3	Regular
18	Rosa (Deep Pink 3)	1,5	Ruim

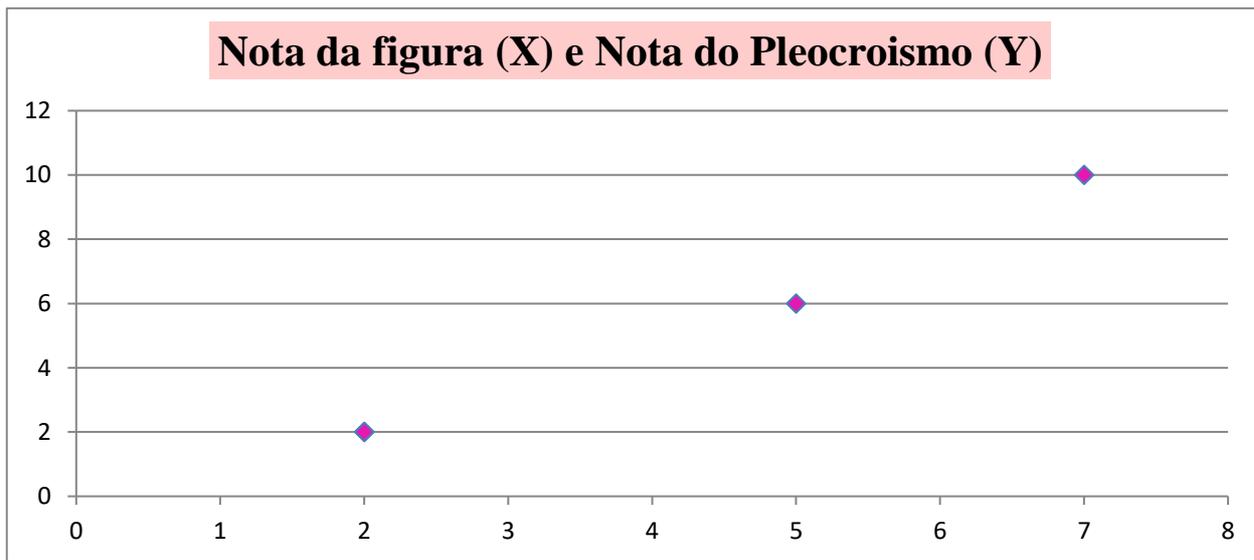
Fonte: autor

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 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: Oliveira, 2020

7.1.5 Química Mineral

A química mineral das turmalinas da região do distrito pegmatítico Solonópole-Quixeramobim permite compreender e explicar as correlações existentes nas propriedades gemológicas; além de justificar os valores aferidos no índice de refração, birrefringência, densidade relativa, espectro de absorção e a intensidade do pleocroísmo e fluorescência. A química mineral é a principal responsável pela intensidade das bandas de intensidade Raman, com as quantidades dos elementos sendo as agentes causadoras. Em relação à cristalquímica, os dados da química mineral permitem a quantificação dos elementos identificados pelo difratômetro de raios-X em monocristal; além de justificar e explicar alguns valores captados gemologicamente (índice de refração, birrefringência, densidade relativa, espectro de absorção e pleocroísmo).

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 rosa. As quantidades dos elementos como B_2O_3 (10,8%), Al_2O_3 (40-42%), CaO (0,5-0,7%) e Na_2O (2,1-2,7%) das amostras condiz com a normalidade. Porém os teores de SiO_2 (41-44%), FeO (1,5-2,7%) são levemente divergentes dos presentes na literatura (Roberts *et al* 1990, Bosi *et al* 2005, Deer *et al* 2010, Carrino *et al* 2019). Estes dados estão organizados na tabela 3. Os valores citados nesta última tabela não chegam a 100%, em razão de fatores como voláteis, água e limitação na máquina de detecção.

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 *et al*, 2010). Os minerais verdes possuem peso específico e dupla refração menores que as amostras azuis, condições que ocorrem em reposta ao teor de FeO maior nas gemas azuis, uma vez que o Fe é o elemento mais denso presente nas gemas estudadas. Conforme ilustrado nas tabelas 1, 3, 4 e 5.

A turmalina rosa não possui FeO em sua estrutura, sua birrefringência é maior que os exemplares verdes, mas sua densidade é a menor entre todos os exemplares estudados, mas detêm MnO em sua composição diferentemente dos outros minerais. Isto acontece, pois Fe e Mn são elementos compatíveis de raio atômico e densidade praticamente igual, deste modo, possivelmente todo o espaço disponível no sistema das turmalinas rosa foi ocupado pelo Mn e não pelo Fe , em razão da compatibilidade geoquímica destes elementos principalmente do raio atômico e estado de oxidação; esta troca ocorreu por causa de disponibilidade MnO no

líquido magmático gerador das turmalinas. As gemas possuem uma quantidade considerável de CaO, em especial a Hot Pink 2, isto pode ter ocorrido em razão do fluido formador ser cálcio-alcálico.

A composição química obtida para a turmalina vermelha foi $\text{NaMn}_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_4$. As quantidades de Na_2O (6,37%), Al_2O_3 (43,84%), SiO_2 (34,64%), B_2O_3 (11%) são condizentes com os dados tabelados mundialmente (Roberts *et al.* 1990, Bosi *et al.* 2005, Deer *et al.* 2010); assim como as turmalinas de demais cores de Quixeramobim estas também possuem CaO (0,71%) em sua composição, o MnO (2,93%) ocorre em razão muito inferior para a média mundial. Assim como ocorre nas turmalinas de cor rosa, as vermelhas não possuem FeO em sua composição. Estes estão organizados na tabela 6.

As gemas bicolores (azul com verde, rosa com verde) possuem a composição $\text{NaAl}_3\text{Al}_6\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH})_3(\text{F})$. Estas gemas possuem Na_2O (3,54 – 4,97%), Al_2O_3 (40,40–40,38%), SiO_2 (36,98 – 35,69%), B_2O_3 (10,92 – 10,95%) são condizentes com os dados tabelados mundialmente (Roberts *et al.* 1990, Bosi *et al.* 2005, Deer *et al.* 2010); o CaO (0,78 – 0,24%) também se faz presente nestas amostras, o FeO (1,04 - 0,49%) ocorre em baixas quantidades, o MnO (0,75 - 0,78%) apresenta-se em quantidades quatro vezes menores em comparação as turmalinas vermelhas. As turmalinas bicolores são as únicas a possuírem FeO e MnO em sua composição, e em quantidades muito próximas, isto ocorre, pois durante a sua formação sugere-se que havia Fe e Mn disponível no líquido magmático, e por serem elementos de praticamente igual raio atômico e densidade, ambos entraram no sistema das turmalinas bicolores. Destacam-se as quantidades notáveis de OF_2 (5,08 – 6,17%) nas amostras, sendo o quinto elemento mais abundante nos minerais bicolores estudados. Estes estão organizados na tabela 3.

A partir dos dados geoquímicos das amostras analisadas as turmalinas azul, rosa, verde, vermelha e bicolores são elbaítas, a azul é elbaíta com uma alta quantidade de FeO em relação as demais cores (Roberts *et al.*, 1990) (Bosi *et al.*, 2005) (Henry *et al.*, 2011) (Arem & Clark, 2023). Fica evidenciado a rica complexidade das turmalinas, pois em uma mesma região geográfica existem seis cores combináveis (azul, verde, rosa, vermelha, azul e verde, rosa e verde) de ocorrência deste mineral e uma única espécie (elbaíta) de turmalina. Estes estão organizados na tabela 6.

Tabela 6: Componentes químicos das amostras de turmalina de Quixeramobim - CE.

Amostras/ Espécie/ Teores químicos médios em % (óxidos)	B ₂ O ₃	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO	MnO	CaO	OF ₂	
Turmalina Azul (Elbaíta) 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	0	
Turmalina Verde (Elbaíta) 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	0	
Turmalina Rosa (Elbaíta) (Na,Ca)(Al,Mn) ₃ Al ₆ (BO ₃) ₃ Si ₆ O ₁₈ (OH) ₄	10,81	2,20	40,39	42,73	0	2,43	1,47	0	
Turmalina Vermelha (Elbaíta) NaMn ₃ Al ₆ (BO ₃) ₃ Si ₆ O ₁₈ (OH) ₄	11,00	6,37	43,84	34,64	0	2,93	0,71	0	
Turmalina Bicolor Azul (Elbaíta) NaAl ₃ Al ₆ B ₃ Si ₆ O ₂₇ (OH) ₃ (F)	10,92	3,54	40,40	36,98	1,04	0,75	0,78	5,08	
Turmalina Bicolor Rosa (Elbaíta) NaAl ₃ Al ₆ B ₃ Si ₆ O ₂₇ (OH) ₃ (F)	10,95	4,97	40,38	35,69	0,49	0,78	0,24	6,17	
Amostras/ Espécie/ Teores químicos médios em % (elementos)	B	Na	Al	Si	Fe	Mn	Ca	F	O
Turmalina Azul (Elbaíta) NaFe ₃ Al ₆ (BO ₃) ₃ Si ₆ O ₁₈ (OH) ₄	3,123	1,974	18,360	15,667	0,992	0	0	0	59,884
Turmalina Verde (Elbaíta) NaAl ₃ Al ₆ (BO ₃) ₃ Si ₆ O ₁₈ (OH) ₄	3,512	1,536	18,231	18,737	0,443	0	0,227	0	59,314
Turmalina Rosa (Elbaíta) (Na,Ca)(Al,Mn) ₃ Al ₆ (BO ₃) ₃ Si ₆ O ₁₈ (OH) ₄	3,550	1,602	17,841	18,325	0	0,689	0,431	0	57,562
Turmalina Vermelha (Elbaíta) NaMn ₃ Al ₆ (BO ₃) ₃ Si ₆ O ₁₈ (OH) ₄	3,497	2,821	19,404	15,24	0	1,308	0,315	0	56,51
Turmalina Bicolor Azul (Elbaíta) NaAl ₃ Al ₆ (BO ₃) ₃ Si ₆ O ₁₈ (OH) ₄	3,551	1,599	18,121	17,48	0,472	0,340	0,353	2,285	55,80
Turmalina Bicolor Rosa (Elbaíta) NaAl ₃ Al ₆ (BO ₃) ₃ Si ₆ O ₁₈ (OH) ₄	3,46	2,189	18,114	15,561	0,229	0,352	0,115	2,77	57,21

Fonte: autor

Foi notado que existe uma correlação, no qual os valores da birrefringência e da densidade relativa das quatro turmalinas rosa, da turmalina azul e verde, assim como da rosa e verde aumentam juntamente com a quantidade de Na₂O presente nas amostras; em contra partida, a intensidade do pleocroísmo diminui conforme a quantidade de Na₂O cresce nas gemas analisadas.

Nas turmalinas rosa os teores de B₂O₃ em 10,8%, Al₂O₃ em 40 a 42%, CaO em 0,7 a

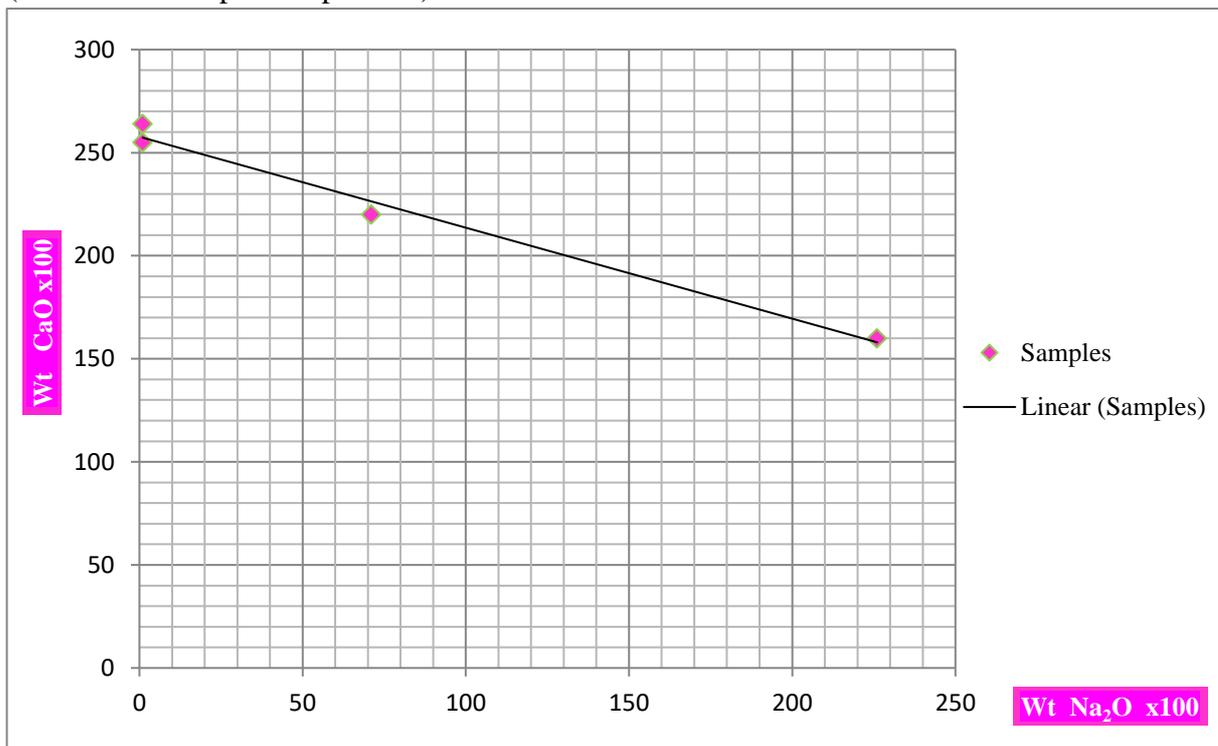
2,2% e Na₂O 1,6 a 2,6% nas amostras estão de acordo com a normalidade. Embora o teor de 0,41% de MnO (média) de três gemas seja diferente dos presentes na literatura, uma turmalina (Deep Pink 3) possui 3,4% de MnO, valor dentro da normalidade (Deer *et al*, 2010, Carrino *et al*, 2019). Estes estão organizados na Tabela 1. A turmalina rosa não tem FeO em sua estrutura, mas contém MnO em sua composição. Estas gemas têm uma quantidade considerável de CaO, especialmente Hot Pink 2; a quantidade de CaO está de forma inversamente proporcional ao Na₂O (Gráfico 5), o CaO se faz menos presente a medida que a birrefringência e a densidade relativa das quatro turmalinas rosa aumentam (Tabela 7). Isso pode ter ocorrido porque o fluido formador é cálcio-alcalino. Por outro lado, a intensidade do pleocroísmo diminui à medida que a quantidade de Na₂O aumenta nas gemas analisadas.

Tabela 7: Correlações presentes nas turmalinas rosa de Quixeramobim – CE, teores químicos com correlação estão grifados de vermelho.

Cor	Rosa		Rosa		Rosa		Rosa	
Amostra	(Hot Pink 2)		(Deep Pink 1)		(Deep Pink 2)		(Deep Pink 3)	
Birrefringência	0,023		0,024		0,026		0,027	
Pleocroísmo	Presente: Forte		Presente: Moderado		Presente: Fraco		Presente: Fraco	
Densidade relativa	3,06 g/cm ³		3,08 g/cm ³		3,13 g/cm ³		3,15 g/cm ³	
Teores químicos (%)	B ₂ O ₃	10,804	B ₂ O ₃	10,812	B ₂ O ₃	10,780	B ₂ O ₃	10,761
	Na ₂ O	1,602	Na ₂ O	2,203	Na ₂ O	2,550	Na ₂ O	2,641
	Al ₂ O ₃	42,203	Al ₂ O ₃	40,806	Al ₂ O ₃	42,078	Al ₂ O ₃	40,953
	SiO ₂	42,732	SiO ₂	45,096	SiO ₂	44,172	SiO ₂	42,156
	MnO	0,403	MnO	0,391	MnO	0,498	MnO	3,489
	CaO	2,260	CaO	0,712				

Fonte: autor

Gráfico 5: Correlação entre Na_2O e CaO nas turmalinas rosa de Quixeramobim – CE. (Peso total multiplicado por 100).



Fonte: autor

7.1.6 Organização Cristalológica

As informações cristalográficas obtidas pelo difratômetro de raios-X em monocristal das gemas analisadas estão ligadas e correlacionadas com as densidades das gemas e o índice de refração (o raio ordinário, n_o) das amostras. Os dados obtidos ajudam a embasar e permitem a visualização das ligações obtidas com o espectroscópio Raman; tornando possível contextualizar e melhorar a compreensão das ligações. A química mineral obtida pelo método EDS permite a quantificação dos elementos captados pelo difratômetro; além de justificar e explicar os valores dos pesos moleculares, densidade relativa e volumes das células unitárias mensurados pelo difratômetro. Deste modo, os dados obtidos pelo Raman e difratômetro em monocristal estão estritamente ligados aos obtidos pelo EDS e que por sua vez se relacionam e justificam várias das características gemológicas (índice de refração, birrefringência, densidade relativa, espectro de absorção e pleocroísmo).

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 das turmalinas azul, verde, rosa e vermelha de Quixeramobim.

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 O, seus envolventes, constituem, assim, uma forma trigonal. Cada um dos seis átomos de Si está rodeado por quatro oxigênios, em disposição tetraédrica. Os íons de B têm coordenação tetraédrica e compartilham um vértice com um tetraedro (SiO_4). Este fato explica a razão por que 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 *et al*, 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 estão representadas pela figura 28, da turmalina azul Deep Sky Blue 4 ilustradas na figura 29, turmalina verde Green 3 na figura 31 e na turmalina vermelha representada na figura 32; no

qual nota-se que o elemento Na está quase sempre interligado com o Al. Nas Figuras 28, 29 e 31, fica visível que as turmalinas são ciclossilicatos com tetraedros de boro e sílica formando estes “anéis”, o elemento sódio ocupando o espaço intersticial e se ligando ao alumínio em configuração octogonal. A fórmula química obtida é coerente com as fórmulas postuladas em Anderson (1984), Roberts *et al* (1990), Bosi *et al* (2005), Deer *et al* (2010), Bosi *et al* (2013) Koralay (2013), ¹Arem & Clark (2023).

O peso molecular é diretamente relacionado aos teores químicos das amostras. A turmalina Hot Pink 2 possui os seguintes teores químicos em porcentagem, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 42,07$; $\text{SiO}_2 = 44,47$; $\text{BO} = 10,80$; $\text{MnO} = 0,49$; $\text{Na}_2\text{O} = 1,60$ e $\text{CaO} = 2,26$. O exemplar Deep Pink 1 detém: $\text{Al}_2\text{O}_3 = 42,80$; $\text{SiO}_2 = 45,09$; $\text{BO} = 10,80$; $\text{MnO} = 0,39$; $\text{Na}_2\text{O} = 2,20$ e $\text{CaO} = 0,71$. A gema Deep Pink 2 possui: $\text{Al}_2\text{O}_3 = 42,078$; $\text{SiO}_2 = 44,472$; $\text{BO} = 10,804$; $\text{MnO} = 0,498$. 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: Al_2O_3 (42,078%), SiO_2 (44,472%) e MnO (0,498%). A gema Hot Pink 2 possui 937,36 u e 85,338% ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 42,203$; $\text{SiO}_2 = 42,203$; $\text{MnO} = 0,403$). A turmalina Deep Pink 1 têm respectivamente, 939,17 u e 86,28% ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 40,80$; $\text{SiO}_2 = 45,09$; $\text{MnO} = 0,39$) de soma destes mesmos óxidos. Por possuírem as maiores massas dentre os óxidos presentes nas amostras; ficou constatado que quanto maior a presença destes três elementos (Al, Si e Mn), maior é o peso molecular do mineral.

A turmalina azul Deep Sky Blue 4 possui os seguintes teores químicos em porcentagem, $\text{B}_2\text{O}_3 = 10,80$, $\text{Na}_2\text{O} = 2,76$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 42,25$, $\text{SiO}_2 = 41,49$, $\text{FeO} = 2,70$, $\text{MnO} = 0$, $\text{CaO} = 0$, $\text{OF}_2 = 0$. A gema Green 3 detém: $\text{B}_2\text{O}_3 = 10,89$, $\text{Na}_2\text{O} = 2,15$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 42,02$, $\text{SiO}_2 = 42,86$, $\text{FeO} = 1,50$, $\text{MnO} = 0$, $\text{CaO} = 0,57$, $\text{OF}_2 = 0$. O exemplar Red 3 possui: $\text{B}_2\text{O}_3 = 11$, $\text{Na}_2\text{O} = 6,37$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 43,84$, $\text{SiO}_2 = 34,64$, $\text{FeO} = 0$, $\text{MnO} = 2,93$, $\text{CaO} = 0,71$, $\text{OF} = 0$. A amostra com maior peso (Deep Sky Blue 4), possui o peso molecular de 974,62 em massa molecular (u), além de 19,3% de soma dos elementos (metais) de maior peso/densidade atômica como: Al e Fe. A gema Green 3 possui 962,78 u e 18,6%; utilizando os mesmos elementos Al e Fe. A turmalina vermelha Red 3 têm respectivamente, 967,55 e 20,7% de soma dos elementos Al e Mn (não possui Fe). Por possuírem as maiores massas dentre os elementos presentes nas amostras; ficou constatado que quanto maior a presença destes elementos (Al, Fe e Mn), maior é o peso molecular do mineral.

Em relação às dimensões da célula unitária *a* e *b* das 4 amostras de cores das turmalinas são as mesmas, pois se trata de um mineral cristalizado no sistema trigonal. Os valores obtidos em Angstrom 15,8474-15,8520 (turmalina rosa); 15,9259 para turmalina azul,

15,8859 da turmalina verde e 15,8795 da turmalina vermelha para os eixos cristalográficos “a”; 7,1059-7,1147Å das gemas rosa, 7,1736, 7,1200 e 7,1121 dos minerais azul, verde e vermelho respectivamente condizem com Roberts *et al* (1990), Bosi *et al* (2005), Deer *et al* (2010) e Bosi *et al* (2013). Com base nos valores obtidos por estes parâmetros de rede é possível classificá-las (rosa, verde e vermelha) como sendo da espécie elbaíta, em razão dos valores estarem de acordo com o que é tabelado para a espécie (a – 15,838 Å; b – 15,838 Å; c – 7,103 Å). Com base nos valores obtidos por estes parâmetros de rede é possível classificar a gema azul como sendo da espécie elbaíta, em razão dos valores estarem de acordo e muito próximos com o que é tabelado para a espécie (a – 15,99 Å; b – 15,99 Å; c – 7,19 Å). Importante salientar que as dimensões do eixo “a” estão diretamente ligadas aos índices de refração (raio ordinário, no) das turmalinas; no qual os maiores valores pertencem as gemas com maiores índices de refração (no). Como no caso do mineral Deep Pink 1 que têm os maiores valores de dimensões da célula unitária e o maior raio ordinário entre as turmalinas rosa; o mesmo ocorre com a gema Hot Pink 2, mas esta possui os menores valores; dentre as 4 cores de turmalina analisadas os maiores índices de refração e dimensões do eixo *a* são respectivamente azul (1,646 e 15,925), verde (1,642 e 15,885), vermelho (1,639 e 15,879) e rosa (1,636 e 15,875).

O volume da célula unitária está diretamente ligado com as dimensões das células unitárias, os maiores valores das células unitárias 15,8757 Å e 7,1147 Å e do volume 1552,9 ocorrem no mesmo mineral de cor rosa (Deep pink 2); 15,9259 Å e 7,1736 Å e do volume 1586,92 dentre todas as turmalinas analisadas ocorrendo na gema de cor azul (Deep Sky Blue 4). Quanto maior o valor da célula, maior será o volume ocupado; pois o cálculo do volume vem da multiplicação dos 3 eixos. 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 (¹Arem & Clark, 2022). Estas alternâncias e substituições têm impacto direto na organização das células unitárias e seus respectivos volumes, conferindo diferentes valores mesmo que as três das quatro gemas pertençam à mesma espécie mineral (turmalina) (Klein & Dutrow, 2012); estas gemas (verde, rosa e vermelha e azul) pertencem a espécie elbaíta em razão dos valores das células unitárias, características gemológicas e composição química Anderson (1984), Roberts *et al* (1990), Bosi *et al* (2005), Deer *et al* (2010), Bosi *et al* (2013), Koralay (2013), ¹Arem & Clark (2023).

A densidade das amostras também mostra correlação com os teores químicos,

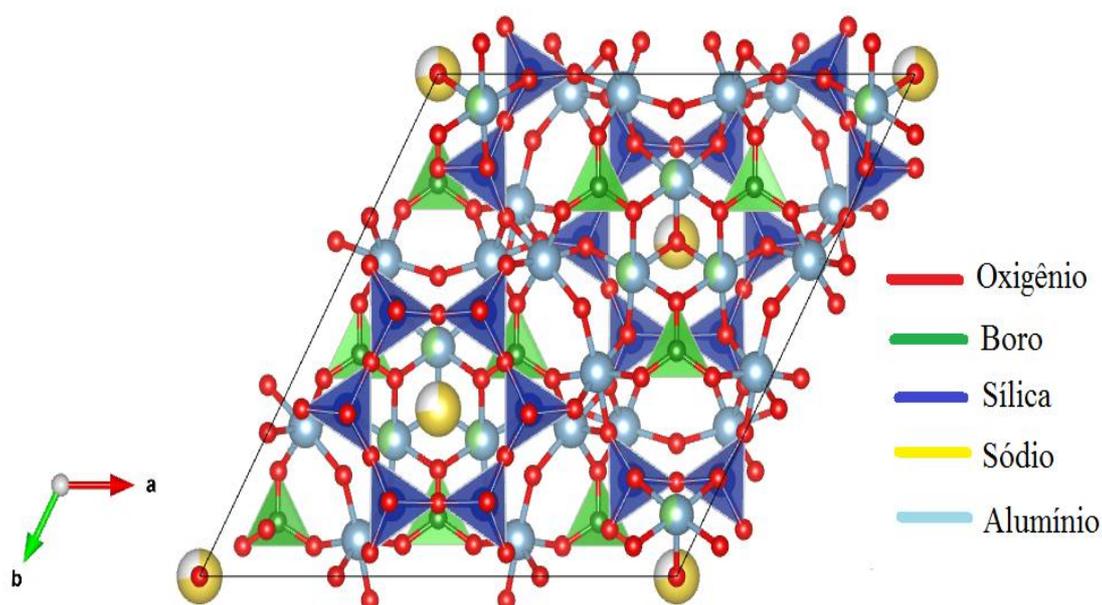
consequentemente com o peso molecular, no qual a gema de maior densidade (Deep Pink 2) possui $3,077 \text{ g/cm}^3$, peso de 937,36 e detém como soma dos elementos mais densos o valor de 87,048%; sendo os maiores valores dentre os três minerais de cor rosa, ressaltando também a correlação destes fatores nas outras amostras. A amostra Deep Pink 1 possui peso de 947,92, densidade de $3,050 \text{ g/cm}^3$ e soma dos elementos (Al_2O_3 , SiO_2 e MnO) de maior peso é 86,293%; sendo que a Hot Pink 2 possui peso de 937,36, densidade de $3,041 \text{ g/cm}^3$ e soma dos elementos mais pesados 85,338%.

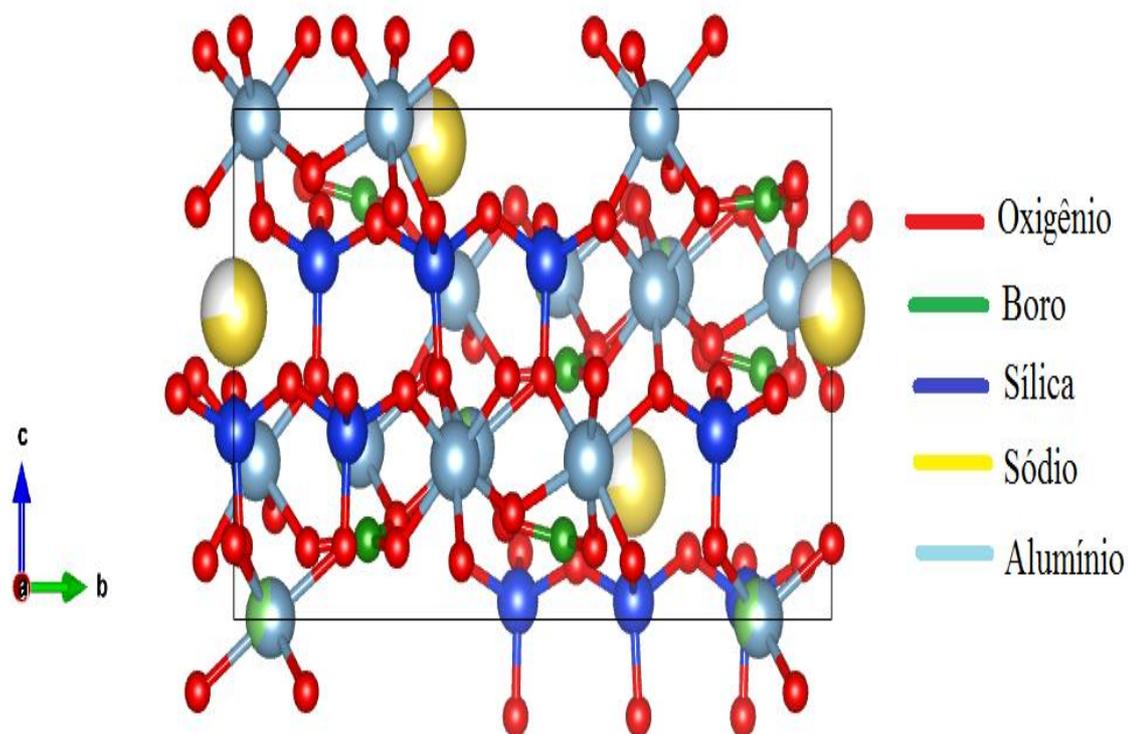
A amostra Deep Sky Blue detém peso de 974,62, densidade de $3,20 \text{ g/cm}^3$ e soma dos elementos (Al_2O_3 e FeO) é 44,95%; o mineral de cor verde Green 3 possui peso de 962,78, densidade de $3,098 \text{ g/cm}^3$ e soma dos elementos mais pesados 43,52%; a gema vermelha (Red 3) tem peso de 967,55, densidade de $3,10 \text{ g/cm}^3$ e soma dos elementos (Al e Mn) é 46,77%.

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 respectivamente 3,06, 3,08 e 3,13. Desta mesma forma, nas turmalinas azul, verde e vermelha que possuem respectivamente 3,20, 3,098 e 3,10 pelo método de raios-X em monocristal e 3,20, 3,12 e 3,07 g/cm^3 pelo método gemológico.

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/cm^3) foram agrupados nas tabelas 8 e 9 como parte das análises cristalográficas.

Figura 28: Organização cristalográfica molecular da turmalina rosa (Hot Pink 2), orientação a (oxigênio) e b (boro).





Fonte: Oliveira, 2020

Tabela 8: Dados obtidos a partir de refinamento da difração de raios-X em monocristal, para amostras de turmalina rosa.

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

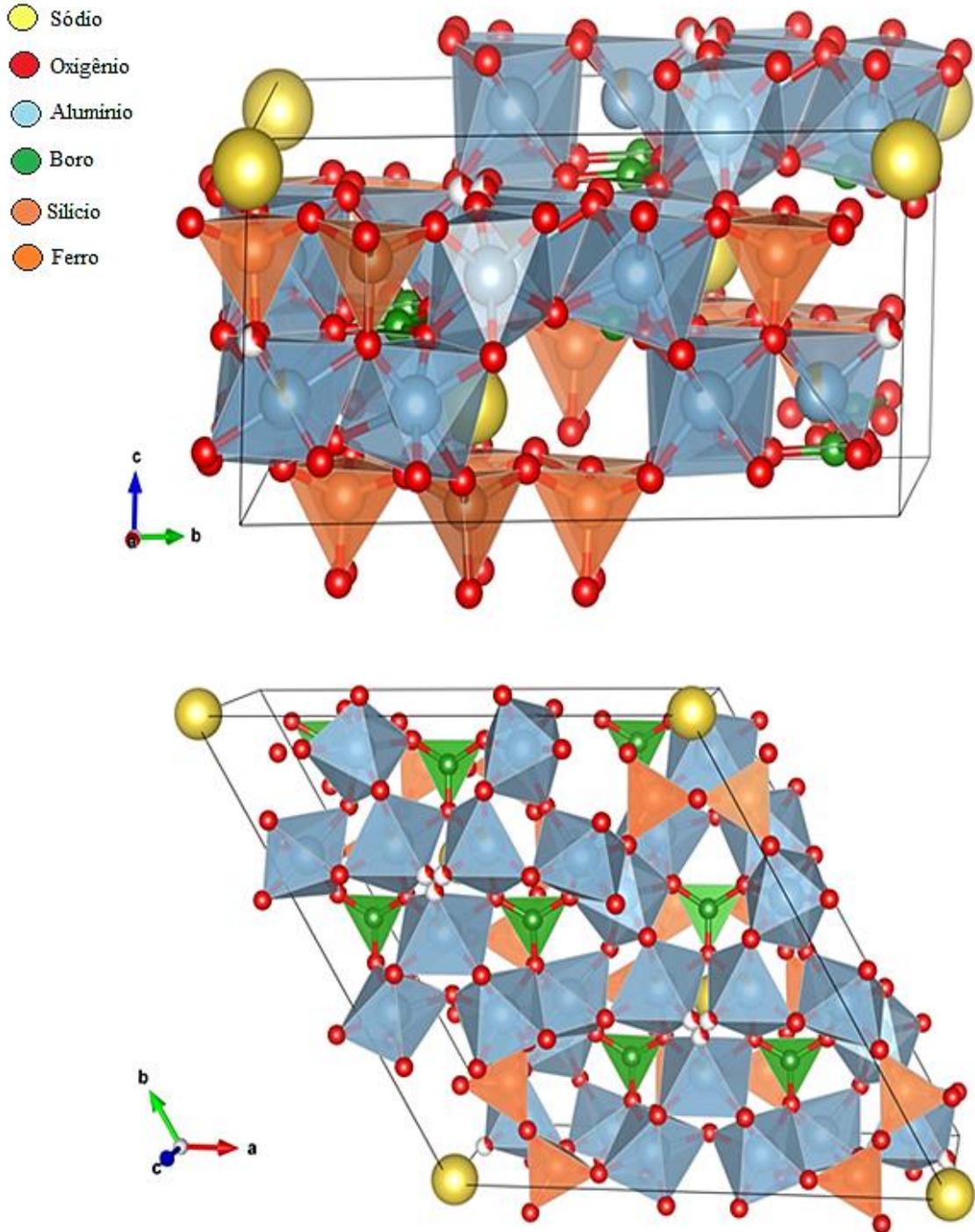
Fonte: Oliveira, 2020

Tabela 9: Dados obtidos a partir de refinamento da difração de raios-X em monocristal, para amostras de turmalina azul, verde e vermelha.

Amostra	Azul (Deep Sky Blue 4)	Verde (Green 3)	Vermelha (Dark Red)
Fórmula química	$\text{NaFe}_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_4$	$\text{NaAl}_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_4$	$\text{NaMg}_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_4$
Peso molecular	974,62	962,78	967,55
Dimensões da célula unitária Eixo a (Å)	15,9259(8)	15,8859(2)	15,8795(5)
Dimensões da célula unitária Eixo b (Å)	15,9259(8)	15,8859(2)	15,8795(5)
Dimensões da célula unitária Eixo c (Å)	7,1736(5)	7,1200(2)	7,1121(6)
Volume da célula unitária	1586,92(19)	1556,09(6)	1555,45(6)
Densidade (g/cm ³)	3,20	3,098	3,10

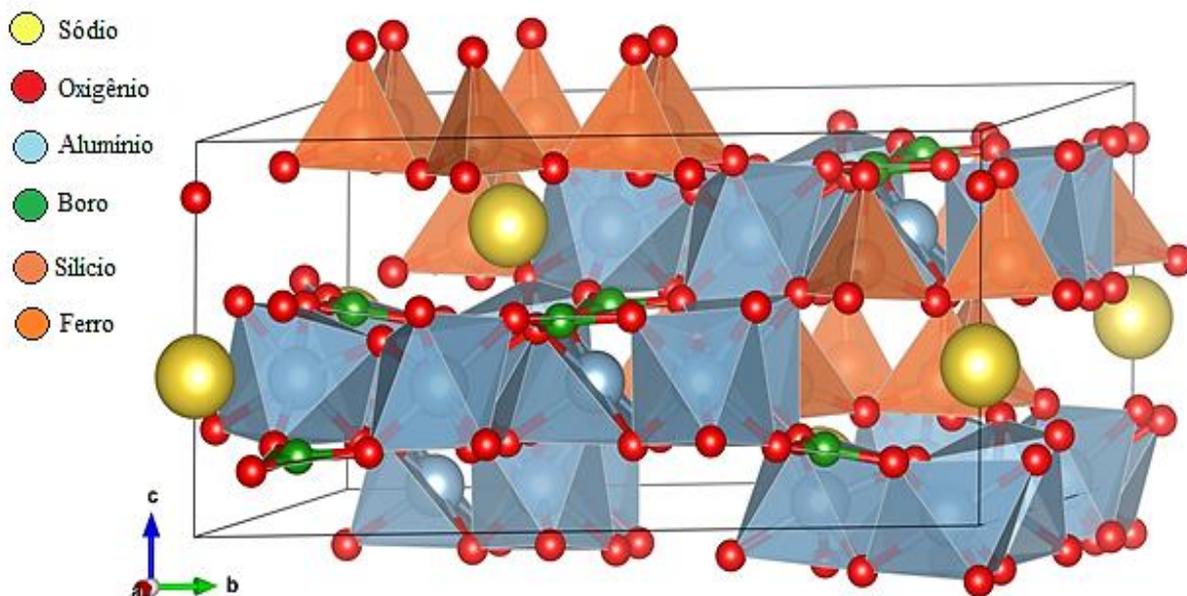
Fonte: autor

Figura 29: Organização cristalográfica molecular da turmalina azul (Deep Sky Blue 4).



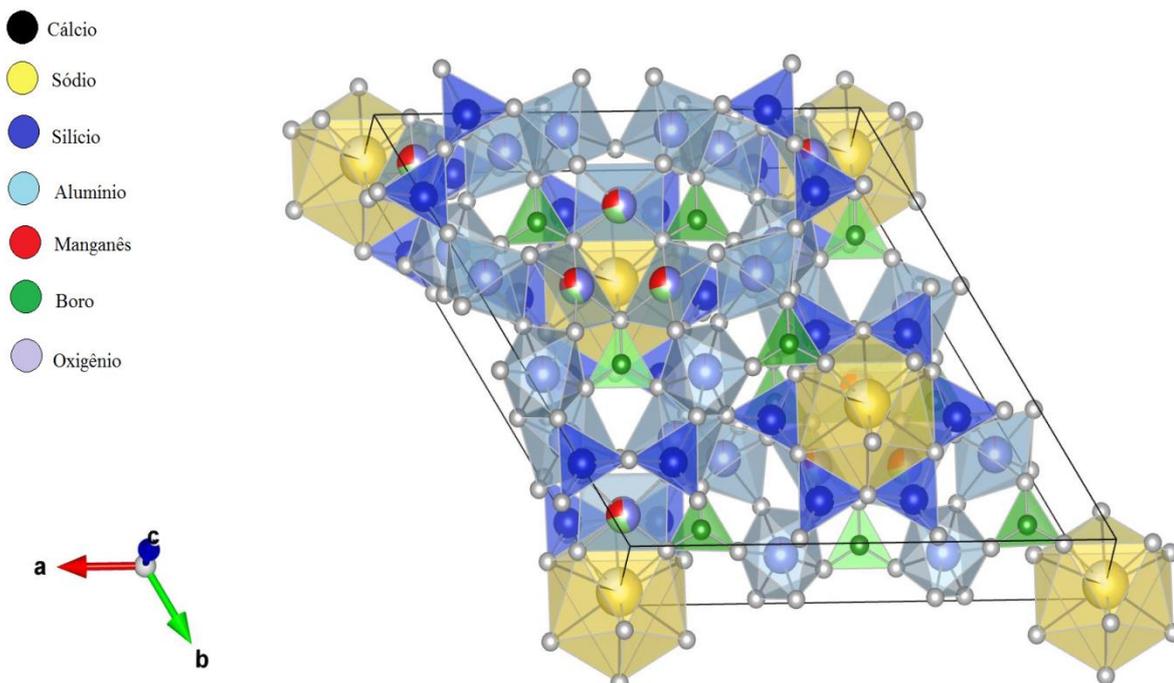
Fonte: autor

Figura 30: Organização cristalográfica molecular da turmalina verde (Green 3).



Fonte: autor

Figura 31: Organização cristalográfica molecular da turmalina vermelha (Red 3).



Fonte: autor

7.1.7 Espectroscopia Raman

O espectro Raman apresenta correlações com algumas propriedades gemológicas, como os dados dos espectros de absorção (captados pelo espectroscópio gemológico) e informações dos aspectos internos das turmalinas. As bandas e módulos captados pelo Raman que se referem as ligações químicas podem ser vistos nas imagens obtidas pelo difratômetro de raios-X em monocristal. Existem interligações dos dados cristalográficos juntamente das bandas Raman, os módulos tornam ainda maior a evidência das ligações captadas pelo difratômetro de monocristal. A química mineral também se faz presente e é a principal responsável pela intensidade das bandas Raman, com as quantidades dos elementos sendo as intencionalmente.

A espectroscopia 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.

Inicialmente, foram analisadas três amostras lapidadas (1 azul, 1 verde e 1 rosa), depois foram estudadas 6 cores (azul, verde, rosa, azul e verde, rosa e verde, vermelha) na forma de pó, obtidos a partir dos fragmentos que restaram da lapidação das amostras.

As posições das bandas e suas intensidades integradas estão relacionadas à ocupação à composição das amostras e a intensidade da banda Raman depende fortemente da geometria de espalhamento no caso das amostras lapidadas. Quando um raio de luz atravessa um meio qualquer, uma certa parte é absorvida, uma outra atravessa o meio e uma terceira é espalhada. O espalhamento Raman exhibe os modos de vibração cuja regra de seleção está atrelada à variação da polarizabilidade (Hutchings *et al* 2008).

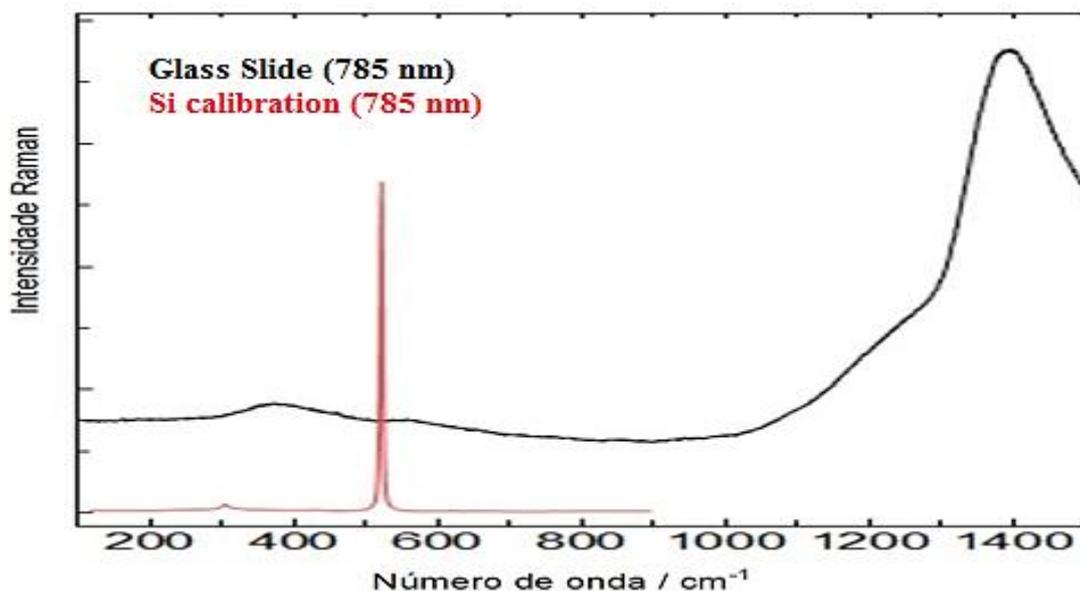
No conjunto de amostras lapidadas (3 amostras lapidadas), observamos as bandas nas amostras de turmalinas (Gráfico 6) e no substrato (vidro (Gráfico 5)) em que foram colocadas, estas bandas são em aproximadamente 221, 398, 500, 630 (ausente na azul), 705, 726 (presente apenas na verde), 1073 e 1254 cm^{-1} (presente na rosa e levemente acentuada na azul) As bandas foram comparadas aos dados das turmalinas da RRUFF (GIA-09, 2023) (GIA-30855, 2023) (GIA-14, 2023) (Origlieri, 2023) (Pinch, 2023) e de Carrino *et al* (2019), os quais indicam as vibrações das principais ligações químicas desses minerais. Na tabela de bandas Raman de Koralay (2013) não há um único valor de espectro para cada ligação, existem vários (uma “margem de variabilidade”). No qual a banda em 221 cm^{-1} evidencia a

ligação O-Al-O; e as bandas 398, 500, 630, 705, 726 e 1073 cm^{-1} representam respectivamente: Al-O, Si-O, vibração de balanço, B-O, B-O e Si-O (Koralay, 2013). Estes espectros podem ser visualizados nos gráficos (6 e 7).

Os exemplares possuem as bandas regulares para este padrão mineral, pois foram comparados com o banco de dados *online* da *RRUFF* (GIA-09, 2023) (GIA-30855, 2023) (GIA-14, 2023) (Origlieri, 2023) (Pinch, 2023). Diante das condições de análises na espectroscopia Raman obtida na presente pesquisa, não foram encontradas as anomalias e correlações que fossem condizentes com as anomalias encontradas na caracterização gemológica.

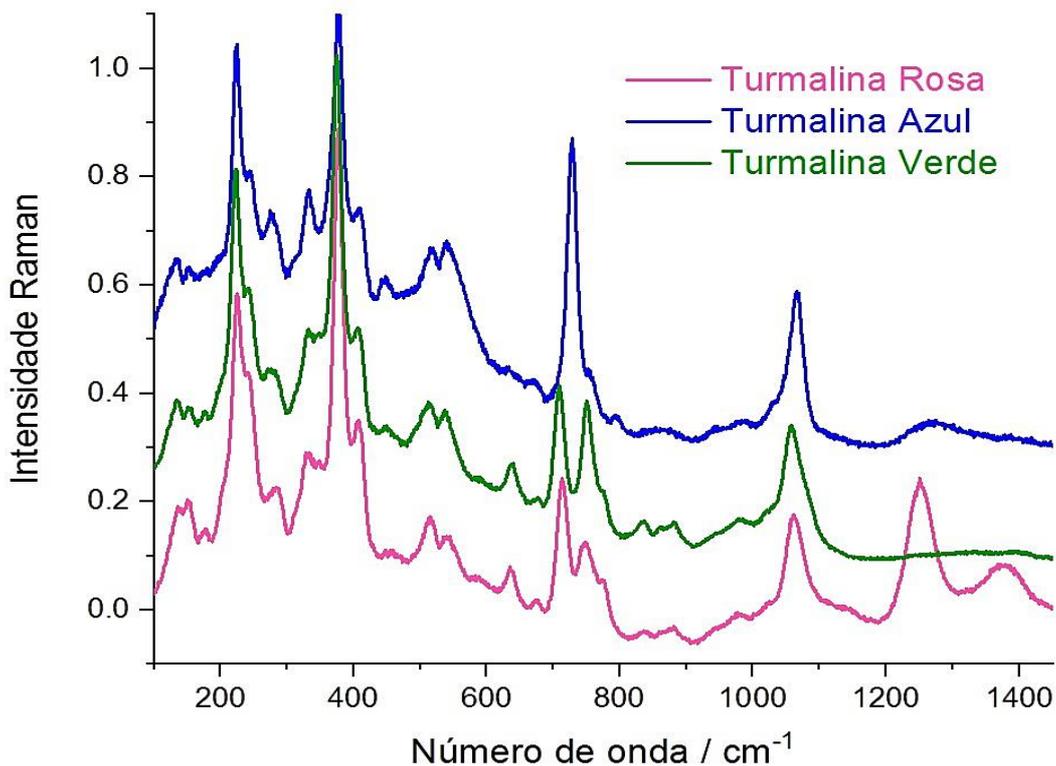
De modo geral, as bandas encontradas até 1200 cm^{-1} são basicamente as mesmas nas três cores das amostras (Gráfico 7). Porém, a amostra rosa possui melhor diafanidade (transparência), menor espessura e ausência de ferro; esta gema possui uma banda em 1254 cm^{-1} e uma banda pouca intensa em 1376 cm^{-1} . Esta primeira banda indica processos luminescentes do substrato (vidro), no qual a amostra rosa e as demais foram colocadas. O vidro (Gráfico 6) possui uma banda mais evidente (~ 1260) em razão da sua homogeneidade composicional e estrutural, quando comparado a complexidade (química e organização estrutural) das turmalinas, fornecendo uma banda mais intensa. 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 nas bandas aconteça são necessárias energias bem definidas, e que variam para cada substância (Hutchings *et al* 2008). A segunda banda das amostras que é da ordem de ~ 1400 cm^{-1} está associada a moléculas de água na estrutura (Carrino *et al* 2019), estes espectros podem ser visualizados nos gráficos (6 e 7).

Gráfico 6: Espectroscopia Raman do vidro de suporte das amostras de turmalinas do Município de Quixeramobim



Fonte: Oliveira, 2020

Gráfico 7: Espectroscopia Raman de três cores das amostras de turmalinas (azul, verde e rosa) do Município de Quixeramobim



Fonte: Oliveira, 2020

Outras amostras de turmalina (azuis e verdes) analisadas por Carrino *et al* (2019), provenientes da Província Borborema não foram observadas bandas em torno de 1400 cm^{-1} . As características de absorção centralizadas a $\sim 1400\text{ cm}^{-1}$ são ausentes 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 duas bandas extras (1254 e 1376 cm^{-1}), pois era mais transparente e não disponha de tantas inclusões e microfissuras, quando comparada aos outros exemplares. Isto intensificou esta banda em 1254 cm^{-1} ; a amostra azul detém uma leve acentuação em 1254 , mas possui menor diafaneidade e maior número de inclusões e de fraturas internas; a turmalina verde é bem menos transparente que as outras duas e com elevado teor de inclusões e fraturas, esta não apresenta nada na ordem de 1250 cm^{-1} . A gema rosa não apresenta FeO em sua estrutura, logo a acentuação em 1376 cm^{-1} pode ser visualizada.

Quando comparados, os espectros obtidos das amostras verdes e rosas apresentam similaridades, sendo o azul o mais diferenciado; seja por ausência (de duas bandas) ou presença de outra banda mais acentuada no exemplar azul. Essa diferenciação com azul é coerente, em razão da composição química e a organização dos elementos dentro no retículo cristalino das turmalinas, diferenças consideradas pouco expressivas, mas que impactam nas propriedades.

Os diferentes aspectos na organização cristalográfica (célula unitária), os teores, elementos químicos, até mesmo a diafaneidade (que inclui as inclusões e microfissuras) que podem gerar falhas na estrutura cristalina ou até mesmo na célula, impactam na acentuação das bandas do espectro Raman; conforme ilustrado nos gráficos (7 e 8). Na tabela das bandas Raman de Koralay (2013) não há um único valor de espectro para cada ligação, existem vários, pois em um mesmo mineral ocorrem variações na composição química (substituições nos íons e oscilações nas quantidades) (Deer *et al*, 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 (¹Arem & Clark, 2023).

Para as amostras em pó, os resultados estão dispostos no Gráfico 8, em detrimento da complexa e diversa composição química das 6 gemas que apesar de serem turmalinas possuem diferenças notáveis em sua composição química (Tabela 10).

Tabela 10: Componentes químicos das amostras de turmalina de Quixeramobim - CE.

Amostras/ Espécie/ Teores químicos médios em % (óxidos)	B ₂ O ₃	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO	MnO	CaO	OF ₂
Turmalina Azul (Elbaíta) 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	0
Turmalina Verde (Elbaíta) 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	0
Turmalina Rosa (Elbaíta) (Na,Ca)(Al,Mn) ₃ Al ₆ (BO ₃) ₃ Si ₆ O ₁₈ (OH) ₄	10,81	2,20	40,39	42,73	0	2,43	1,47	0
Turmalina Vermelha (Elbaíta) NaMn ₃ Al ₆ (BO ₃) ₃ Si ₆ O ₁₈ (OH) ₄	11,00	6,37	43,84	34,64	0	2,93	0,71	0
Turmalina Bicolor Azul (Elbaíta) NaAl ₃ Al ₆ B ₃ Si ₆ O ₂₇ (OH) ₃ (F)	10,92	3,54	40,40	36,98	1,04	0,75	0,78	5,08
Turmalina Bicolor Rosa (Elbaíta) NaAl ₃ Al ₆ B ₃ Si ₆ O ₂₇ (OH) ₃ (F)	10,95	4,97	40,38	35,69	0,49	0,78	0,24	6,17

Fonte: autor

Intrinsecamente e conforme o esperado as amostras em pó das cores azul, verde e rosa mostraram os mesmos padrões e resultados das suas versões lapidadas (Gráfico 8). Entretanto, a intensidade das bandas foi menor que as suas versões facetadas, pois a intensidade da banda depende fortemente da geometria de espalhamento. A intensidade da ordem de 1073 corresponde a ligação Si-O, a banda em 1254 cm⁻¹ foi causada pelo substrato (vidro) de apoio das amostras e a banda de ~1400 está relacionada a moléculas de água na estrutura. A banda em 1254 cm⁻¹ foi automaticamente eliminada por se tratar de uma banda “artificial” e a banda em 1376 cm⁻¹ está ausente pois os fragmentos não possuem fluidos (água), diferente de suas versões lapidadas que detinham líquidos abundantes.

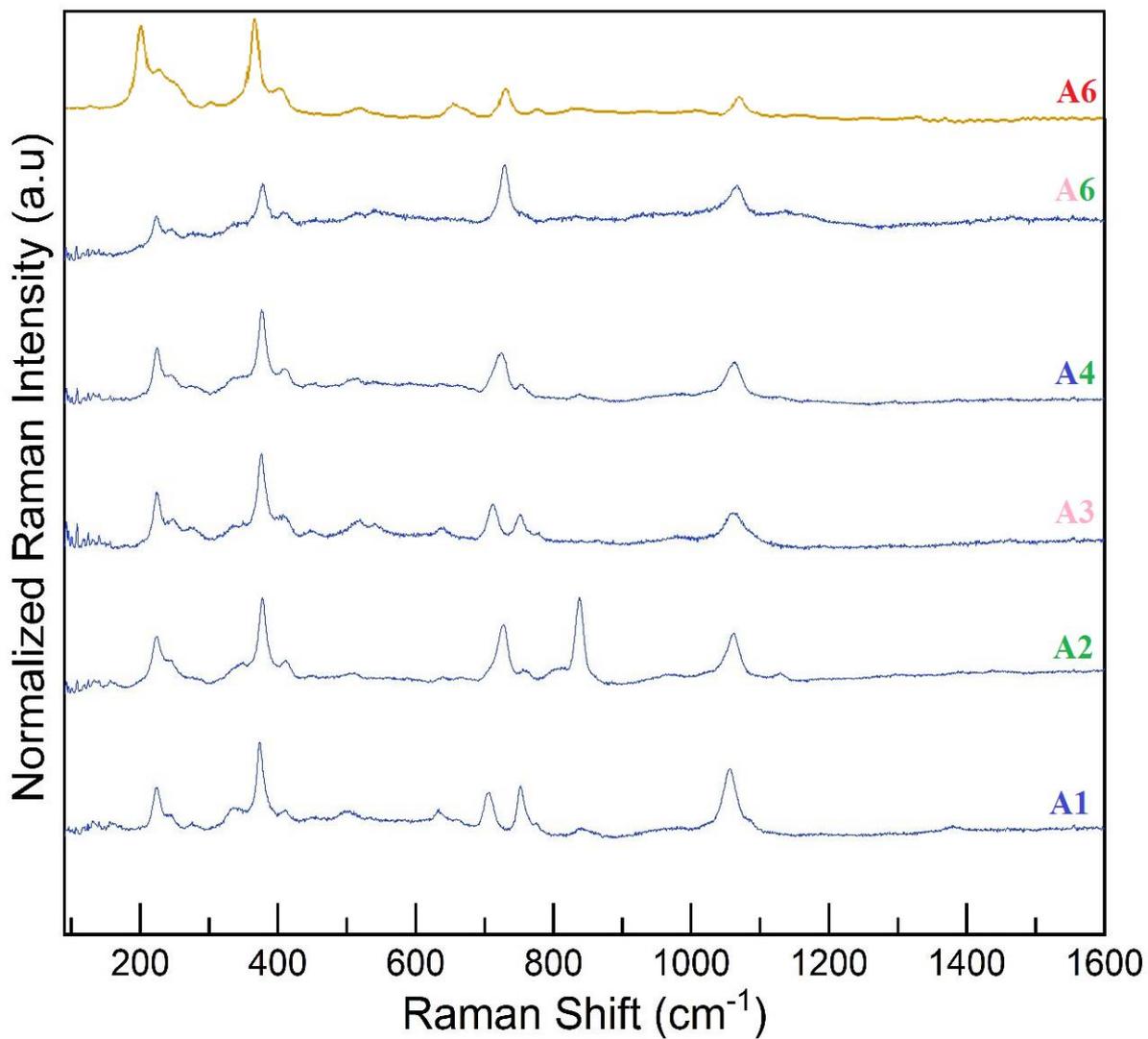
As gemas azul e verde (A4), rosa e verde (A5) possuem intensidades muito semelhantes; ademais a turmalina vermelha (A6) também apresenta valores muito semelhantes e próximos aos das turmalinas bicolors. Estes bandas e acentuações são em aproximadamente 184, 221, 379, 423, 511, 650 (ausente na azul e verde), 710 (ausente na azul e verde), 724 (apenas na azul e verde) e 760 (ausente na azul e verde) cm⁻¹; as bandas foram comparados aos dados das turmalinas da RRUFF (GIA-09, 2023) (GIA-30855, 2023) (GIA-14, 2023) (Origlieri, 2023) (Pinch, 2023) e de Carrino *et al* (2019), estes indicam as vibrações das principais ligações químicas desses minerais; todos valores encontrados são normais para

as turmalinas analisadas, apenas a ausência na região de 1070 cm^{-1} foi a única anormalidade encontrada, este modo corresponde a ligação Si-O. É evidente que as distintas bandas Raman do mineral turmalina estão em torno de 379 e 185; no entanto, as bandas mais fracas (de maneira geral) da turmalina estão em 710 e 1050 (Koralay, 2013). Nos exemplares analisados a acentuação 180 e 220 está ligada a Fe-O e Mg-O respectivamente, a banda 221 evidencia a ligação O-Al-O; e as bandas 380, 420, 511, 650, 710-720 e 760 representam respectivamente: ligação de Al-O, transição de Mn^{3+} , Si-O, vibração de balanço, Fe^{2+} - Fe^{3+} , transição de Mn^{3+} , (Carrino, *et al* 2019) (Koralay, 2013). Comparativamente as 3 amostras (A4, A5 e A6) são muito semelhantes no campo do espectro; apesar de serem bicolors, a turmalina vermelha e a rosa com verde são mais parecidas entre si do que a gema azul com verde. No qual a gema vermelha possui as mesmas bandas e acentuações que a gema rosa com verde, porém com intensidade maior nas bandas. A turmalina vermelha apresenta (dentre as 3 cores citadas) as maiores quantidades de Na_2O , Al_2O_3 e MnO .

Geoquimicamente, as turmalinas vermelhas e a rosa com verde possuem quantidades parecidas de Na_2O , SiO_2 , FeO , quando comparadas com a gema azul com verde (Tabela 3). Gemologicamente, as gemas bicolors são diferentes entre si no índice de refração (diferença pequena), na birrefringência e nos espectros de absorção (Tabela 5). Os exemplares vermelhos (Tabela 4) estão mais próximos gemologicamente da turmalina rosa com verde; embora todos os valores sejam muito próximos entre si, a birrefringência destes exemplares se aproxima bastante da turmalina rosa com verde e estão ligeiramente distantes do exemplar azul com verde.

Logo, o espectro Raman (Gráfico 8) apresentou os padrões e regularidades quando comparadas com os dados da RRUFF (GIA-09, 2023) (GIA-30855, 2023) (GIA-14, 2023) (Origlieri, 2023) (Pinch, 2023), diferente dos dados obtidos por meio da caracterização gemológica, geoquímica e cristal química que mostraram algumas propriedades não comuns para esta espécie mineral, bem como uma correlação entre algumas propriedades como: densidade relativa, birrefringência, pleocroísmo, qualidade da figura de interferência, teores químicos e padrões cristalográficos.

Grafico 8: Espectroscopia Raman comparativo das seis cores das amostras de turmalinas (azul (A1), verde (A2), rosa (A3), azul e verde (A4), rosa e verde (A5), vermelha (A6)) do Município de Quixeramobim.



Fonte: Autor

7.1.8 Petrografia

As informações ópticas adquiridas pelo microscópio petrográfico se correlacionam e reforçam os dados obtidos através da caracterização gemológica. Principalmente, as características aferidas de ordem quantitativa, como a birrefringência, em que os dados ópticos microscópicos são os mesmos dos dados ópticos/gemológicos microscópicos. Outras informações microscopiamente, de ordem qualitativa, obtidas são da mesma ordem que os dados macroscópicos. Ademais, da mesma forma que os dados ópticos/gemológicos se correlacionam com os dados geoquímicos, cristalográficos e espectroscópicos; os dados ópticos microscópicos também se correlacionam.

Uma lâmina de secção delgada (0,03 mm) foi confeccionada para aferir as propriedades ópticas em escala microscópica das turmalinas de Quixeramobim. Foi selecionada uma amostra de turmalina verde (espécie elbaíta) para a confecção e análise microscópica; pois dentre as seis cores presentes na região (azul, verde, rosa, vermelha, azul com verde, rosa com verde) as turmalinas verdes são as mais comuns da região de estudo.

No sistema de luz natural, a amostra analisada em lâmina delgada apresentou a cor acastanhada em escala micrométrica apesar de macroscopicamente ser da cor verde. Ao apresentar a cor acastanhada isto significa que este exemplar absorve determinados comprimentos de onda (entre 800-390 nm) e transmite comprimentos de onda entre 620 (faixa do final do vermelho e início do laranja) e 585 (faixa do laranja) nm que são percebidos pelos órgãos visuais como a cor marrom/acastanhado. Dada à intensidade da cor, a turmalina analisada apresenta moderada absorção e também apresenta pleocroísmo em intensidade moderada. Cor, absorção e pleocroísmo são três características que frequentemente estão interligadas e em conjunto. A absorção é o resultado direto da intensidade da transmissão (cor percebida pelos órgãos visuais). Na direção de vibração para a qual se verifica a maior absorção, a turmalina analisada fica escura (castanho) e na absorção menor a amostra fica clara (castanho claro); dado a isto o pleocroísmo da amostra é moderado (Flint, 1965) (Zukov, 1967) (Wahlstrom, 1969) (Heinrich, 1980) (Fujimori & Ferreira, 1987).

O exemplar não apresentou clivagem, o que já era esperado, e microfaturas se fazem presente. A amostra possui hábito euhedral em razão das quatro fácies bem definidas. A linha de Becke é maior que o meio (balsámo do Canadá), em razão do índice de refração da turmaliana (~1,630) ser superior ao líquido (1,520) que está em contato com as suas bordas. O relevo deste minearal é moderado, pois o índice de refração da turmalina é relativamente superior ao do meio circundante, deste modo o contorno do grão se torna espesso e de fácil

visualização. Quanto maior esta diferença, mais visível será a borda do mineral. O grão de turmalina analisado não apresenta alterações ou inclusões (Fujimori & Ferreira, 1987) (Bloss, 1999) (Nesse, 2004) (Klein & Dutrov, 2012) (Machado e Nardy, 2016).

As características elencadas acima, pertencentes ao sistema de luz natural, são condizentes e dentro da normalidade do mineral turmalina (Kerr, 1987) (Frank, 2018).

No sistema ortoscópico, em que se faz necessário cruzar os nicóis, foram obtidos mais dados deste exemplar. A diferença entre os índices de refração (n_o e n_e) ao atravessarem o mineral resultam em uma diferença de encaminhamento que é dada pela espessura multiplicada pela birrefringência do mineral analisado. Cada um destes raios ao atravessar o analisador se decompõe em dois componentes ($(w - e)$ e $(n - s)$) no plano do polarizador estes raios vibram no mesmo plano, mas com velocidades diferentes. Logo, em condições de se interferirem. A cor de interferência deste grão é o amarelo de primeira ordem, o que corresponde ao comprimento de onda em 460 nm na tabela de cores de interferência de Michel Levy, a tabela e cores de birrefringência de Michel Levy pode ser vista no Apêndice 3. A cor de interferência é o resultado da espessura do mineral em lâmina delgada multiplicado pela birrefringência. A birrefringência, diferença entre os raios n_o e n_e da amostra, obtida por meio da constatação da cor de interferência e com o auxílio do acessório de quartzo-gipso é de 0,016. A extinção é paralela à forma do mineral, o que é algo comum, pois a turmalina pertence ao sistema trigonal. Utilizando o acessório de quartzo-gipso e colocando a forma de maior comprimento paralela ao raio lento do acessório, constatou-se que o raio rápido da turmalina (n_e) está paralelo ao maior comprimento e o raio lento (n_o) está perpendicular ao maior comprimento do cristal; com o raio rápido (n_e) paralelo a forma o sinal de alongação da turmalina é negativo. O mineral analisado não apresenta geminação, tampouco nenhum dos 3 tipos de zoneamento (alteração, composição e inclusão) (Zukov, 1967) (Wahlstrom, 1969) (Heinrich, 1980) (Fujimori & Ferreira, 1987) (Bloss, 1999) (Machado e Nardy, 2016).

As características elencadas acima, pertencentes ao sistema ortoscópico, são condizentes e dentro da normalidade do mineral turmalina (Kerr, 1987) (Frank, 2018).

No sistema conoscópico, com os aditivos da lente de Amici-Berttand e da lente condensadora, somado a maior objetiva do microscópio permitiram a visualização da figura de interferência da turmalina; neste sistema, os raios de luz incidentes (provenientes do polarizador) sobre a turmalina não são paralelos como nos outros sistemas, mas divergentes. Ao visualizar a figura de interferência do cristal analisado constatou-se que seu eixo óptico estava perpendicular a platina do microscópio, pois foi gerada uma figura uniaxial de eixo

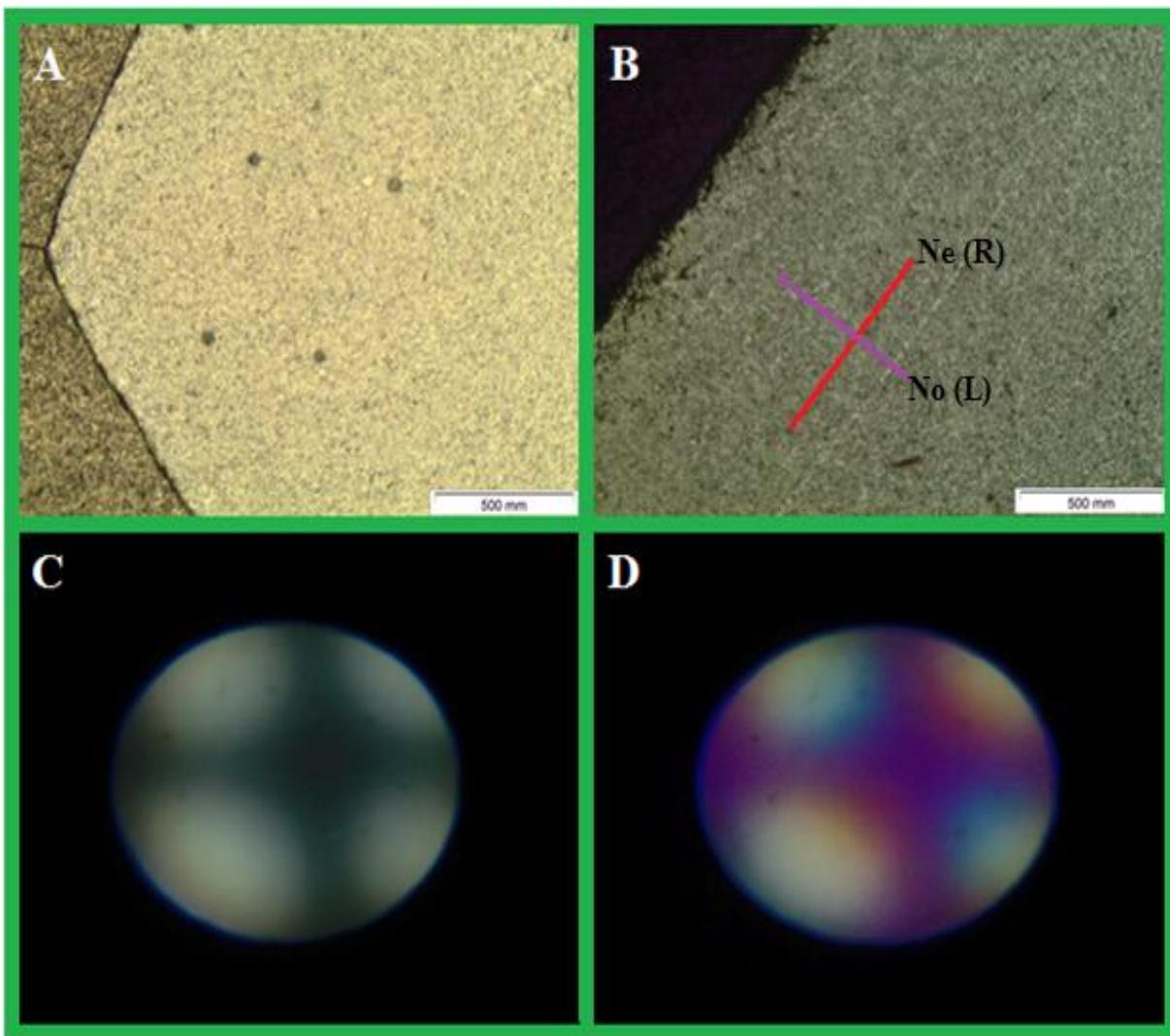
óptico centrada. Com o aditivo do acessório de quartzo-gipso e os fatores de soma e subtração das cores resultante dos raios ordinário e extraordinário em cada um dos quadrantes, constatou-se que o mineral é opticamente negativo, devido a disposição da cor amarela no 1º e 3º quadrante, e da cor azul no 2º e 4º quadrante. A turmalina analisada não apresenta isocromáticas (Flint, 1965) (Zukov, 1967) (Wahlstrom, 1969) (Heinrich, 1980) (Fujimori & Ferreira, 1987).

As características citadas acima, pertencentes ao sistema conoscópico, são condizentes e dentro da normalidade do mineral turmalina (Kerr, 1987) (Frank, 2018).

Algumas características obtidas microscopicamente, tais como: relevo (índice de refração), pleocroísmo, birrefringência, caráter e sinal óptico; também foram obtidas macroscopicamente por meio da caracterização gemológica e através do polariscópio Gomes. Estes dados macros e microscópicos coincidiram completamente.

Todos os dados obtidos, e mencionados acima, por meio da caracterização óptica petrográfica foram organizados na tabela 11. Ademais foi confeccionada uma prancha (Prancha 2) contendo fotografias de algumas características mencionadas nos parágrafos acima.

Prancha 2: Fotomicrografia A – Cor acastanhada da turmalina, no sist. de luz natural, evidenciando o relevo moderado e duas fácies bem definidas; Foto B – Cor de subtração (cinza) na turmalina, juntamente com a posição do no (raio lento) e ne (raio rápido), por meio do acessório de quartzo-gipso (530 nm); Fotomicrografia C – Figura de interferência uniaxial de eixo centrado; Fotomicrografia D – Figura de interferência uniaxial negativa.



Fonte: autor

Tabela 11: Propriedades ópticas em lâmina delgada das turmalinas de Quixeramobim – CE.

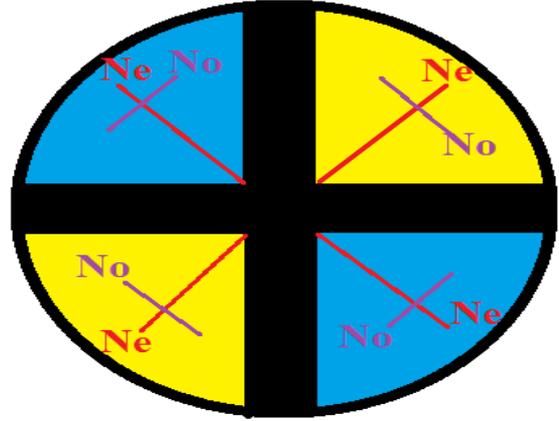
MINERAL		PROPRIEDADES ÓPTICAS
L U Z N A T U R A L	Cor	Acastanhado
	Pleocroísmo	Moderado
	Absorção	Moderada
	Clivagem	Ausente
	Fratura	Presente
	Hábito	Euhedral
	Linha de Becke	Maior que o meio
	Relevo	Moderado
	Alterações	Ausente
	Inclusões	Ausente
S. O R T O S C Ó P I C O	Cor de Interferência	Amarelo Primeira Ordem, 460nm
	Birrefringência	0,016
	Tipo de Extinção	Paralelo a Forma
	Posição dos Raios Lento e Rápido	Raio Rápido Paralelo a Forma
	Sinal de Elongação	Negativo
	Posição dos Raios Ordinário (No) e Extraordinário (Ne)	No perpendicular a forma Ne paralelo a forma
	Geminação	Ausente
	Zoneamento	Ausente
S.	Caráter	Uniaxial
	Sinal Óptico	Negativo

C
O
N
O
S
C
E
P
T
O

Isocromática

Ausente

Ilustração



Fonte: autor

7.2 ÁGUA-MARINHA

7.2.1 Propriedades gemológicas

Após a caracterização gemológica das águas-marinhas da região do Condado (Município de Quixeramobim), os dados adquiridos foram comparados com a base de dados mundial da International Gem Society (IGS) (Arem, 2023) e em diversas obras de grande reconhecimento e credibilidade mundial, obras desde 1971 até 2020 (Franco & Campos, 1971) (Hurlbut & Switzer, 1979) (Nassau, 1980) (Webster, 1981) (Anderson, 1984) (Schumann, 2006) (IBGM/DNPM, 2009) (Bonewitz, 2013) (Schumann, 2020). Para averiguar se as águas-marinhas da região possuem características novas para serem incorporadas aos dados mundiais, ou a fim de embasar melhor estes dados, ou aumentar a gama de possíveis características para este mineral, ou identificar anomalias que caracterizem bem estes minerais como sendo provenientes de Quixeramobim (Ceará). Além disto, estas gemas tiveram seus dados comparados aos minerais de uma região vizinha, distrito de Berilândia, (por Cavalcanti, 2017), também do Estado do Ceará, pois em um mesmo Estado podem ter algumas ocorrências do mesmo mineral, mas com propriedades e características divergentes. Logo, é importante caracterizar as ocorrências em nível pontual, não apenas estadual; pois o ambiente de formação interfere nas propriedades dos minerais.

Para a caracterização óptica destes minerais, o refratômetro teve um papel fundamental, dada a sua importância foram utilizados dois refratômetros (*Rayner Dialdex*) e realizadas seis leituras com cada uma das gemas; todas as 12 medições (seis em cada refratômetro) para cada uma das 13 águas-marinhas foram as mesmas (Apêndice – 1 anexo). Além disto, ambos os instrumentos estavam devidamente calibrados após o uso de um quartzo (cristal de rocha) com índices de refração conhecidos. Com estes equipamentos foi provado que os minerais são uniaxiais negativos. Minerais que se cristalizam no sistema tetragonal, hexagonal e trigonal são uniaxiais. Possuem o raio ordinário (*no*) e extraordinário (*ne*), o primeiro é sempre invariável e possui valor fixo que não muda quando se realiza novas leituras, o segundo (*ne*) apresenta valores que se alteram em uma ou algumas casas decimais a cada nova leitura. Os valores de *no* nas águas-marinhas 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 do mineral, com as medidas do raio extraordinário são 1,566 – 1,574; e os valores do raio ordinário sendo 1,580 – 1,590; os índices destas gemas são parecidos com os da região de Berilândia. Os valores dos índices de refração das águas-marinhas de Quixeramobim estão ilustrados na tabela 12. O mineral do

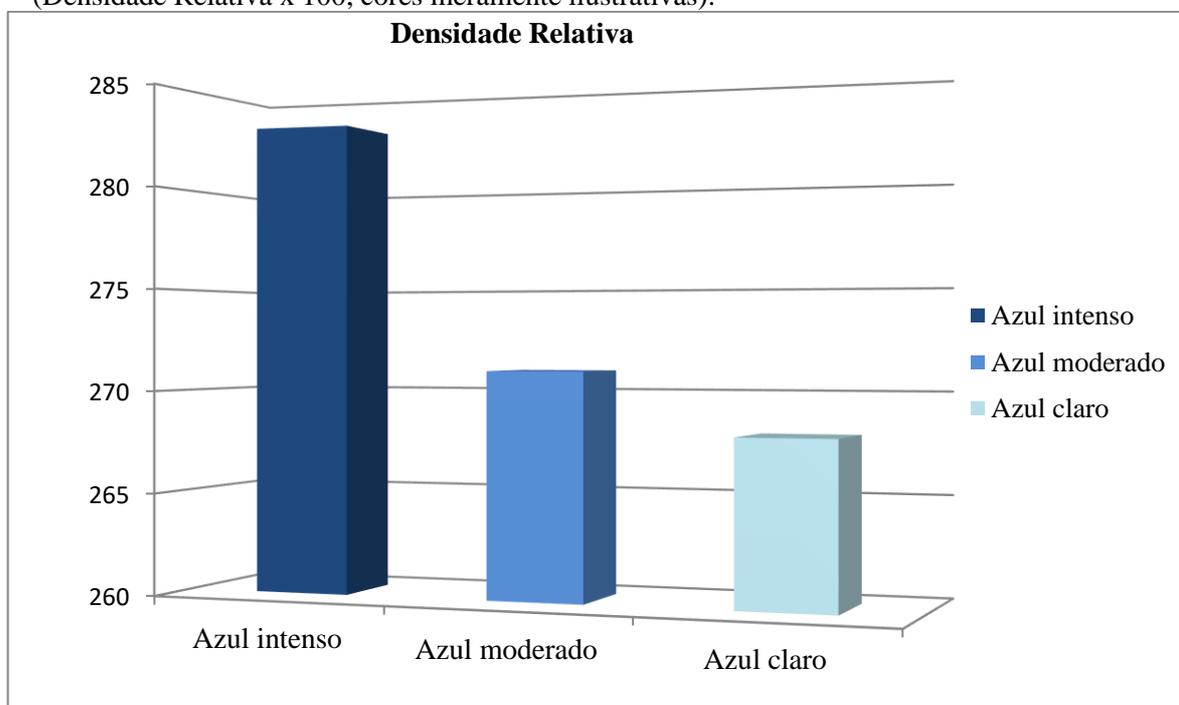
berilo possui características ópticas pouco variáveis, em especial a variedade água-marinha detém uma variabilidade ainda menor. O índice de refração deste berilo azul é 1,567-1,590 (Hurlbut & Switzer, 1979) (Nassau, 1980) (Webster, 1981) (IBGM/DNPM, 2009) (Bonewitz, 2013) (Schumann, 2020) (Arem, 2023).

Uma peculiaridade destas gemas azuis de Quixeramobim é uma birrefringência muito elevada para o mineral. Águas-marinhas possuem uma dupla refração entre 0,005 e 0,007 (Hurlbut & Switzer, 1979) (Nassau, 1980) (Anderson, 1984) ((IBGM/DNPM, 2009) (Schumann, 2020) (Arem, 2023), os valores dos exemplares analisados são sempre superiores a 0,011, com valores que vão de 0,012 a 0,018. A birrefringência anômala nas gemas pode ocorrer devido a uma possível deformação na rede cristalina dos cristais, a qual pode interferir nos encaminhamentos, e conseqüentemente nas velocidades, dos raios ordinário (*no*) e extraordinário (*ne*) dos cristais modificando e aumentando desta forma a dupla refração (birrefringência), sem necessariamente comprometer a qualidade gemológica. Enquanto que as gemas de Quixeramobim possuem uma dupla refração acima da média; as águas-marinhas de Berilândia (também do Estado do Ceará) têm uma birrefringência dentro da média de 0,005 a 0,007 (Cavalcanti, 2017). As ametistas do Município de Santa Quitéria (Ceará) também possuem birrefringência acima da média conforme mostrado por Oliveira *et al* (2020); as turmalinas azuis do Município de Quixeramobim também possuem uma dupla refração elevada segundo Oliveira *et al* (2020). Não existe nenhuma correlação entre a birrefringência das amostras de água-marinha e os valores dos índices de refração. Os valores da dupla refração das treze águas-marinhas analisadas podem ser consultados e comparados na tabela 13.

As gemas de Quixeramobim possuem uma grande variabilidade na densidade e não um valor único para todas as amostras; com os menores valores indo de 2,67 g/cm³ (Cyan 2 e Cadet Blue 1) a 2,83 g/cm³ (Dodger Blue 1). Com o uso da balança hidrostática obteu-se resultados dentro do esperado, exceto na amostra Dodger Blue 1, que possui densidade relativa de 2,83 g/cm³; pois a densidade da água-marinha oscila entre 2,66-2,80 g/cm³ (Webster, 1981) (Anderson, 1984) (IBGM/DNPM, 2009) (Bonewitz, 2013) (Schumann, 2020) (Arem, 2023). As águas-marinhas da região de Berilândia (também do Estado do Ceará) têm uma densidade relativa entre 2,71 e 2,72 g/cm³ (Cavalcanti, 2017); possuindo uma constância nesta característica, diferente das gemas de Quixeramobim. Os dados mostram que existe uma correlação, causada pelo ferro, entre a densidade relativa e a cor nas águas-marinhas de Quixeramobim, na medida em que a cor é mais intensa e saturada para o azul ocorre um aumento no valor da densidade relativa, conforme caracterizado no gráfico 9.

Para melhorar a visualização do gráfico 9, o valor da densidade relativa foi multiplicado por 100; e as cores utilizadas não correspondem a realidade das gemas, sendo utilizadas cores mais distintas entre si uma vez que as cores das amostras são muito semelhantes. Para a coluna “Azul intenso” foi utilizado o valor da gema Dodger Blue 1, já para a “Azul Moderado” foi utilizada uma média da densidade relativa de oito gemas (Deep Sky Blue 1, Deep Sky Blue 1, Deep Sky Blue 1, Deep Sky Blue 2, Cyan 2, Deep Sky Blue 2, Steel Blue 1 e Steel Blue 2), para a coluna “Azul Claro” foi usada uma média de 4 águas-marinhas (Cyan 2, Deep Sky Blue 1, Cyan 1 e Cadet Blue 1); seleção esta baseada na intensidade da cor azul das gemas.

Gráfico 9: Correlação entre a densidade relativa e a cor nas águas-marinhas de Quixeramobim. (Densidade Relativa x 100, cores meramente ilustrativas).



Fonte: autor

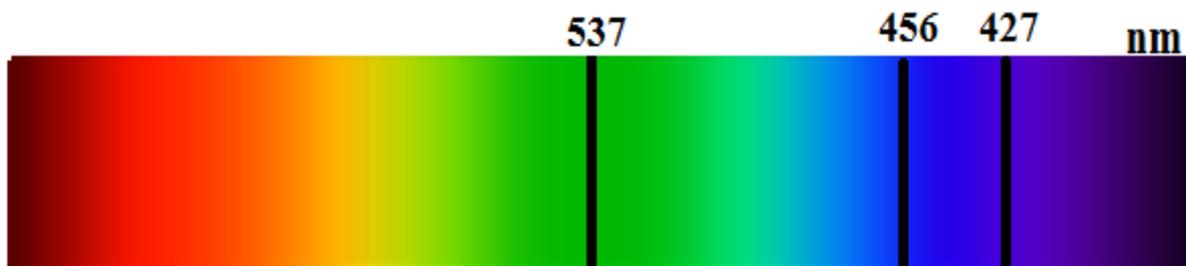
O pleocroísmo é classificado como moderado em oito amostras e fraco em cinco das gemas de Quixeramobim. Os exemplares Cyan 2, Deep Sky Blue 2, Steel Blue 1, Steel Blue 2 e Cadet Blue 1 possuem pleocroísmo classificado com fraco, sendo esta uma característica comum em águas-marinhas, as gemas com pleocroísmo moderado também tem comportamento padrão, neste caso é apenas mais raro um dicróismo médio em águas-marinhas. Em termos gerais, o pleocroísmo classificado como fraco é resultado de uma baixa absorção, no qual um dos raios está sendo mais refletido devido aos aspectos estruturais e composicionais das gemas, diminuindo a compensação dos raios ordinário (*no*) e

extraordinário (*ne*), quanto menor esta compensação (diferença) menor será a absorção observada (pleocroísmo). O pleocroísmo da água-marinha é comumente fraco, porém relativamente diagnóstico e de fácil reconhecimento (Franco & Campos, 1971) (Schumann, 2006) (IBGM/DNPM, 2009) (Bonewitz, 2013) (Schumann, 2020) (Arem, 2023).

Doze gemas, das treze, analisadas por meio da incidência de luz ultravioleta não apresentaram fluorescência. Este dado mostra que os exemplares não possuem elementos ativadores de fluorescência ou fosforescência, como cromo e elementos terras raras. Um espécime, Cadet Blue 1 apresenta fluorescência quando exposto à luz ultravioleta, esta gema apresenta apenas 0,9% de FeO em sua estrutura (dado adquirido com o MEV-EDS); o Fe inibe a fluorescência, mas em quantidade tão pequena que não inibe completamente a reação causada pelos elementos de terras raras (ETR). Elementos de terras raras não foram detectados na amostra Cadet Blue 1, ocorrem em baixas quantidades (< 1%) no berilo. Este elemento (ETR), quando na presença de uma lâmpada UV, é energizado e salta para a próxima camada de sua valência, retornando após um período de tempo e repetindo este ciclo enquanto durar a exposição à luz UV (ultravioleta); ao ser energizado e retornar à sua camada de valência normal e estável, o elemento libera a energia acumulada na forma de luz. Geralmente a água-marinha não possui fluorescência (Franco & Campos, 1971) (Hurlbut & Switzer, 1979) (Schumann, 2006) (IBGM/DNPM, 2009) (Schumann, 2020) (Arem, 2023).

O espectro de absorção (Figura 32) (esquema ilustrativo representativo dado a difícil visualização e aquisição de fotografias) captado pelo espectroscópio se aproxima muito da característica padrão das águas-marinhas; o valor obtido em comum para este mineral é 537, 456 e 427 nm (nanômetros) (Hurlbut & Switzer, 1979) (Webster, 1981) (Anderson, 1984) (Schumann, 2006) (Schumann, 2020) (Arem, 2023). Os valores comumente adquiridos para as amostras foram da ordem de 520, visualizado apenas na gema Cadet Blue 1, 480, 460 e 420 nm visualizados nas demais gemas. Sabe-se que os intervalos 370 e 427 nm são indicativos da presença do íon Fe^{3+} ; 580 e 610 nm são para os íons de cobre e ferro respectivamente; além dos intervalos em 475, 540 e 568 nm que têm relação com o Mn^{3+} segundo Adamo *et al* (2008). Os valores das amostras citadas estão inseridos na tabela 13.

Figura 32: Representação dos três espectros mais comuns em águas-marinhas.



Fonte: adaptado de Schumann (2020).

As treze amostras analisadas da região do município de Quixeramobim possuem as propriedades ópticas dentro dos limites da água-marinha, exceto por duas peculiaridades, são elas: birrefringência nos treze exemplares e fluorescência em uma amostra.

Tabela 12: Características gemológicas dos cristais de água-marinha de Quixeramobim – CE.

Amostra/Propriedades	Diafanidade	Índice de refração e Birrefringência	Caráter e sinal óptico	Pleocroísmo	Espectro de absorção	Fluorescência	Densidade e Relativa	Inclusões e aspectos internos
Azul (Cyan 2)	Transparente	1,585 – 1,575; 0,010	Uniaxial negativo	Presente: Fraco	460 e 420 nm	Ausente	2,67 g/cm ³	Inclusões sólidas e fluidas, raramente orientadas; líquidos por vezes agrupados, inclusões de outros minerais (possivelmente apatita e/ou quartzo); linhas de crescimento; cristais esqueléticos de rutilo
Azul (Deep Sky Blue 1)	Transparente	1,585 – 1,572; 0,013	Uniaxial negativo	Presente: Moderado	460 e 420 nm	Ausente	2,70 g/cm ³	Inclusões sólidas e fluidas; pequenos tubos orientados e por vezes paralelos uns aos outros;
Azul (Deep Sky Blue 1)	Transparente	1,585 – 1,572; 0,013	Uniaxial negativo	Presente: Moderado	460 e 420 nm	Ausente	2,70 g/cm ³	Inclusões sólidas e fluidas; pequenos tubos orientados; fluidos raramente agrupados;
Azul (Deep Sky Blue 1)	Transparente	1,588 – 1,578; 0,010	Uniaxial negativo	Presente: Moderado	460 e 420 nm	Ausente	2,69 g/cm ³	Inclusões sólidas e fluidas; fluidos raramente agrupados; linhas

								de crescimento
Azul (Deep Sky Blue 2)	Transparente	1,588 – 1,574; 0,014	Uniaxial negativo	Presente: Moderado	460 e 420 nm	Ausente	2,74 g/cm ³	Inclusões sólidas e fluidas; sólidos por vezes agrupados;
Azul (Cyan 2)	Transparente	1,585 – 1,574; 0,011	Uniaxial negativo	Presente: Moderado	460 e 420 nm	Ausente	2,71 g/cm ³	Inclusões sólidas e fluidas; pequenos tubos orientados e levemente paralelos; fluidos e sólidos agrupados; diversas inclusões bifásicas (líquido e gás) agrupadas; um tubo oco em meio as inclusões bifásicas;
Azul (Cyan 2)	Transparente	1,585 – 1,573; 0,012	Uniaxial negativo	Presente: Moderado	460 e 420 nm	Ausente	2,71 g/cm ³	Inclusões sólidas e fluidas;
Azul (Deep Sky Blue 2)	Transparente	1,590 – 1,576; 0,014	Uniaxial negativo	Presente: Fraco	460 e 420 nm	Ausente	2,74 g/cm ³	Inclusões sólidas e fluidas;
Azul (Cyan 1)	Translúcida	1,580 – 1,570; 0,010	Uniaxial negativo	Presente: Moderado	460 e 420 nm	Ausente	2,69 g/cm ³	Inclusões fluidas muito raramente orientadas e com possível configuração singenética; tubos ocos e alongados ocasionalmente com preenchimento; inclusões sólidas; outros cristais de minerais como de granada; tubos perpendiculares aos líquidos orientados; inclusões bifásicas
Azul (Steel Blue 1)	Transparente	1,582 – 1,570; 0,012	Uniaxial negativo	Presente: Fraco	460 e 420 nm	Ausente	2,70 g/cm ³	Fraturas; Inclusões fluidas muito raramente orientadas; tubos ocos e alongados ocasionalmente com preenchimento;

								inclusões sólidas; outros cristais de minerais como de granada; tubos orientados paralelamente aos líquidos orientados;
Azul (Steel Blue 2)	Semitransparente	1,582 – 1,570; 0,012	Uniaxial negativo	Presente: Fraco	460 e 420 nm	Ausente	2,70 g/cm ³	Fraturas; Inclusões fluidas muito raramente orientadas; tubos ocos e alongados ocasionalmente com preenchimento; inclusões sólidas; outros cristais de minerais como de granada; tubos orientados paralelamente;
Azul (Dodger Blue 1)	Semitransparente	1,580 – 1,567; 0,013	Uniaxial negativo	Presente: Moderado	480 e 420 nm	Ausente	2,83 g/cm ³	Inclusões fluidas muito orientadas, raramente, e com possível configuração sin genética; inclusões sólidas; tubo oco com algumas inclusões fluidas orientadas; inclusões sólidas (possivelmente granadas) em meio a inclusões fluidas.
Azul (Cadet Blue 1)	Semitransparente	1,582 – 1,570; 0,012	Uniaxial negativo	Presente: Fraco	520 e 420 nm	Presente Fraquíssima	2,67 g/cm ³	Inclusões fluidas muito raramente orientadas e com possível configuração sin genética; tubos ocos e alongados ocasionalmente com preenchimento; inclusões sólidas; outros cristais de minerais como de granada; tubos perpendiculares aos líquidos orientados; inclusões bifásicas

Fonte: autor

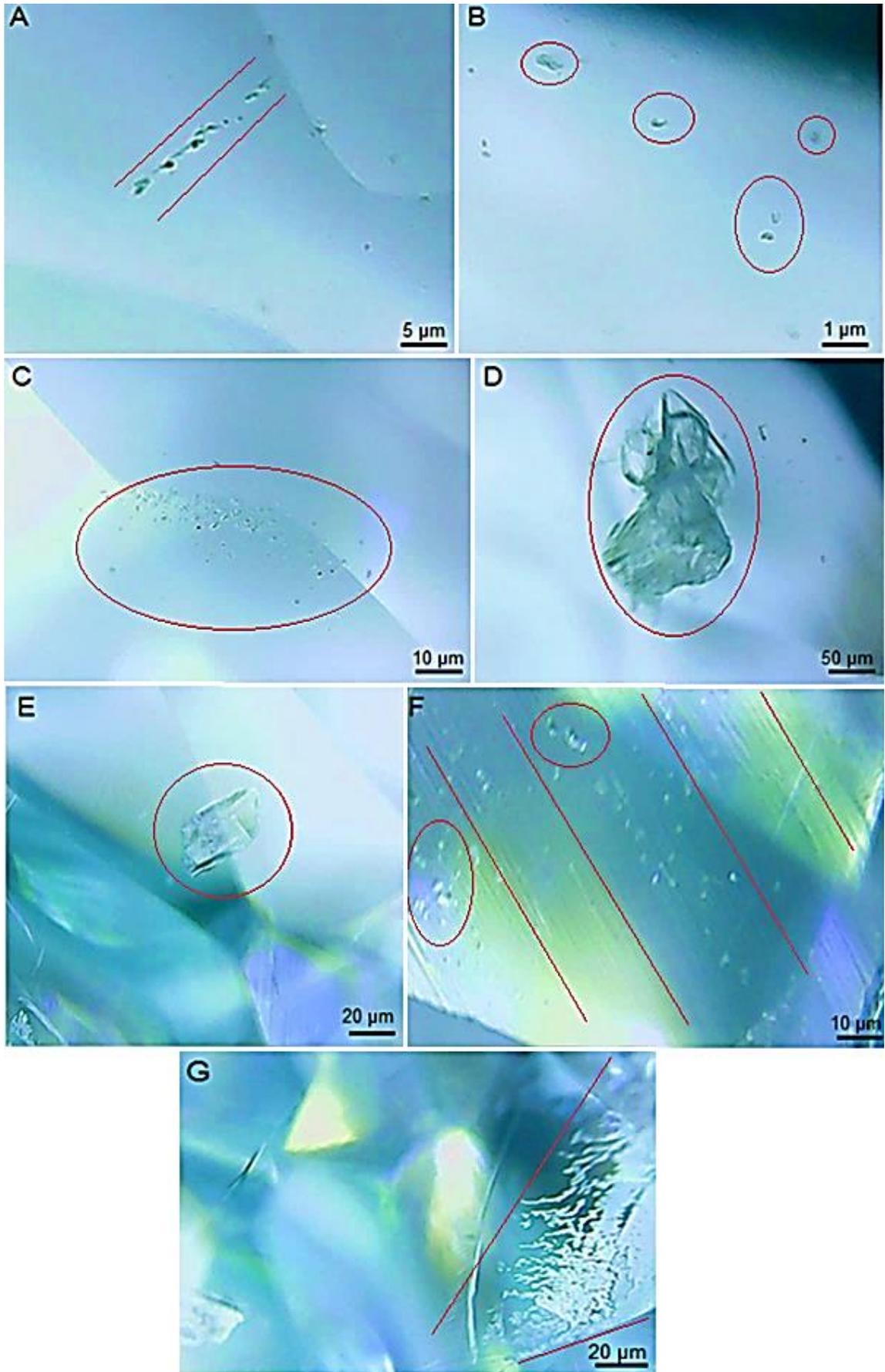
7.2.2 Feições Internas

No microscópio gemológico, os cristais de água-marinha estudados são caracterizados por fraturas, inclusões sólidas e fluidas (Figura 33A a 33C – Água-marinha Cyan 2), para que estas feições auxiliem quando necessário nos casos de proveniência mineral. Foram visualizadas inclusões de outros minerais em algumas gemas, como na Cyan 1, estas inclusões são provavelmente granada (Figura 33D – Cyan 1) e apatita (Figura 33E – Deep Sky Blue 1). Foram identificadas inclusões fluidas orientadas e paralelas as linhas de crescimento da gema (Figura 33F – Deep Sky Blue 1) e inclusões sólidas esqueléticas de rutilo (Figura 33G – Deep Sky Blue 1), estes líquidos e inclusões sólidas possuem composição variável e são formadas antes, ao mesmo tempo ou posteriores aos minerais hospedeiros.

As inclusões sólidas se apresentam em diferentes tipos de formas e coloração, podendo ser da mesma natureza que o mineral hospedeiro ou de outro mineral. Por vezes, podem ser facilmente reconhecidas por seu hábito, cor, brilho e outras características ópticas visualizadas ao microscópio gemológico. As inclusões fluidas presentes mostram que durante o resfriamento e cristalização, alguns fluidos contendo voláteis (e talvez sais) foram aprisionados na estrutura da água-marinha, 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) (Franco & Campos, 1971) (Hughes, 2017) As linhas de crescimento são uma “marca” do crescimento mineral e as fraturas internas uma consequência de algum regime compressivo que os cristais foram submetidos após a cristalização.

Figura 33: Inclusões nas amostras de águas-marinhas estudadas do Município de Quixeramobim.

A) Inclusões sólidas com leve orientação (coloração mais escura) (Cyan 2). B) Inclusões fluidas (transparentes) sem orientação (Cyan 2). C) Inclusões sólidas agrupadas (coloração escura) (Cyan 2). D) Inclusões sólidas de cor cinza com relevo alto e com leve alteração (Cyan 1). E) Inclusão de outro mineral (transparentes) e com relevo moderado (Steel Blue 1). F) Inclusões fluidas orientadas e paralelas às linhas de crescimento do mineral (Steel Blue 1). G) Cristais esqueléticos de rutilo, coloração mais esbranquiçada (Steel Blue 1).

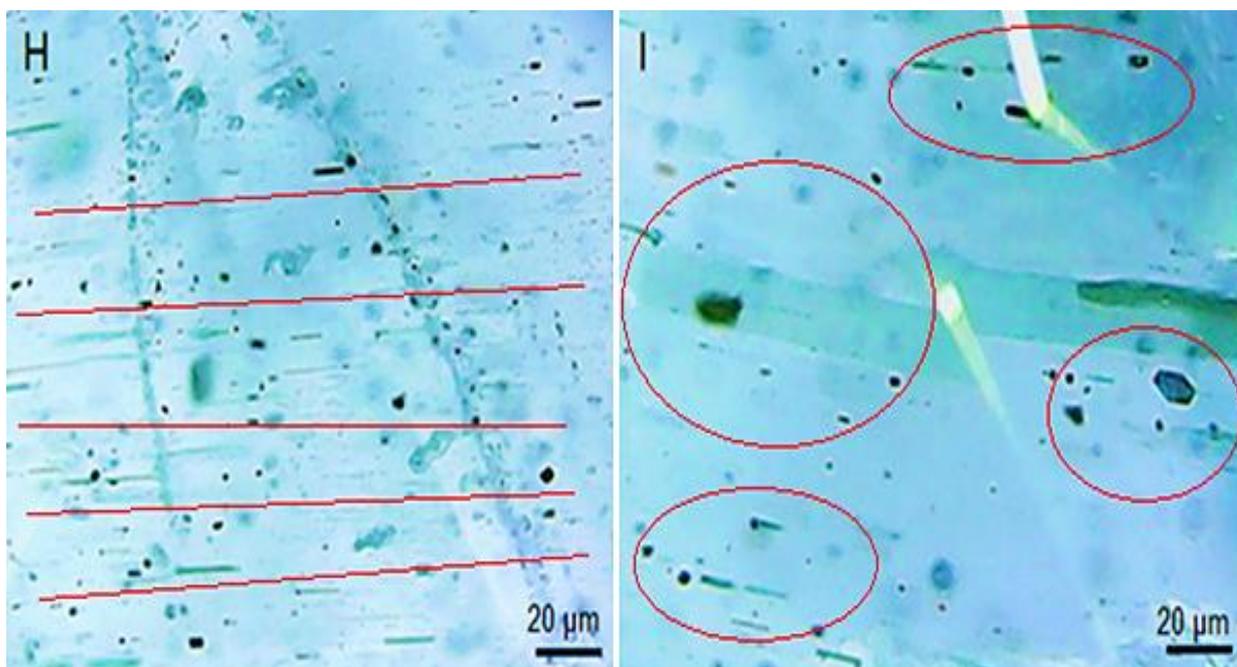


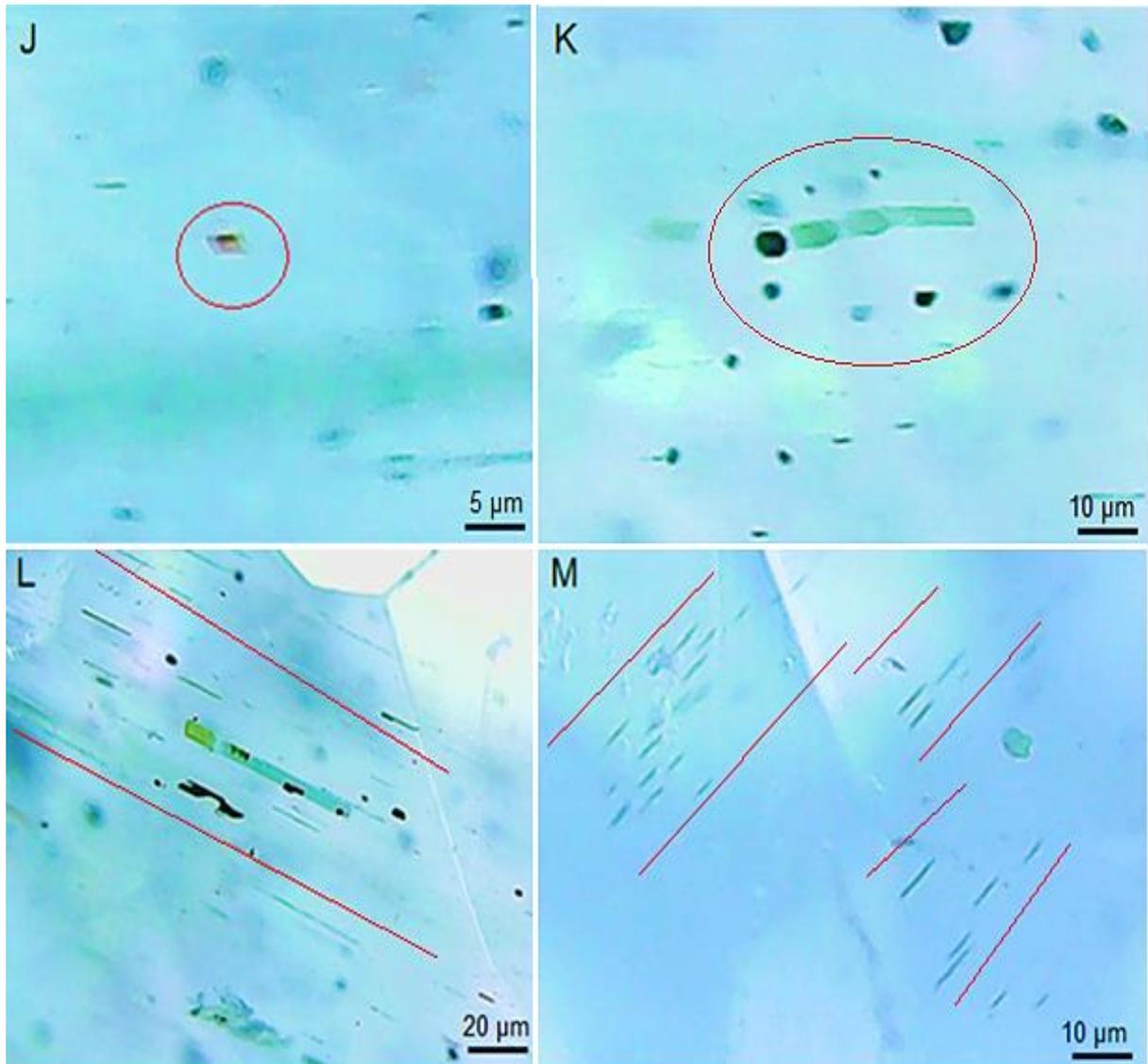
Fonte: autor

Também foram constatados tubos ocos com orientação (característica comum em berilos) e perpendiculares a fluidos orientados (Figura 34H – Cadet Blue 1); e estes mesmos tubos com orientação menos evidente (Figura 34I – Cadet Blue 1). Também se fazem presentes inclusões de outros minerais, provavelmente uma granada com boa formação (Figura 34J – Cadet Blue 1); além de tubos preenchidos por líquidos (Figura 34K – Cadet Blue 1) e inclusões bifásicas (por vezes) que são comuns em berilos (Franco, 1959). Além disto, foram observadas inclusões sólidas paralelas entre si e paralelas a um tubo preenchido por líquidos (Figura 34L – Cadet Blue 1) e com nítida orientação; na mesma gema também foram visualizadas sólidos em menor quantidade, mas com orientação (Figura 33M – Cadet Blue 1).

Estes mesmos tubos ocos ou preenchidos por líquidos são encontrados também nas amostras de água-marinha Berilândia (Cavalcanti, 2017). Estas feições exibindo orientação possuem características de materiais singenéticos, formados ao mesmo tempo que a gema hospedeira.

Figura 34: Inclusões nas amostras de águas-marinhas estudadas do Município de Quixeramobim. H) Inclusões sólidas com orientação bem definida (coloração mais escura) (Cyan 1). I) Inclusões fluidas (transparentes) sem orientação (Cyan 1). J) Inclusões sólidas agrupadas (coloração escura) (Cyan 1). K) Inclusões sólidas de cor cinza com relevo alto e com leve alteração (Cyan 1). L) Inclusões sólidas com orientação e paralelas entre si juntamente com tubo preenchido por líquidos (Steel Blue 1). M) Inclusões sólidas orientadas e paralelas entre si (Steel Blue 1).



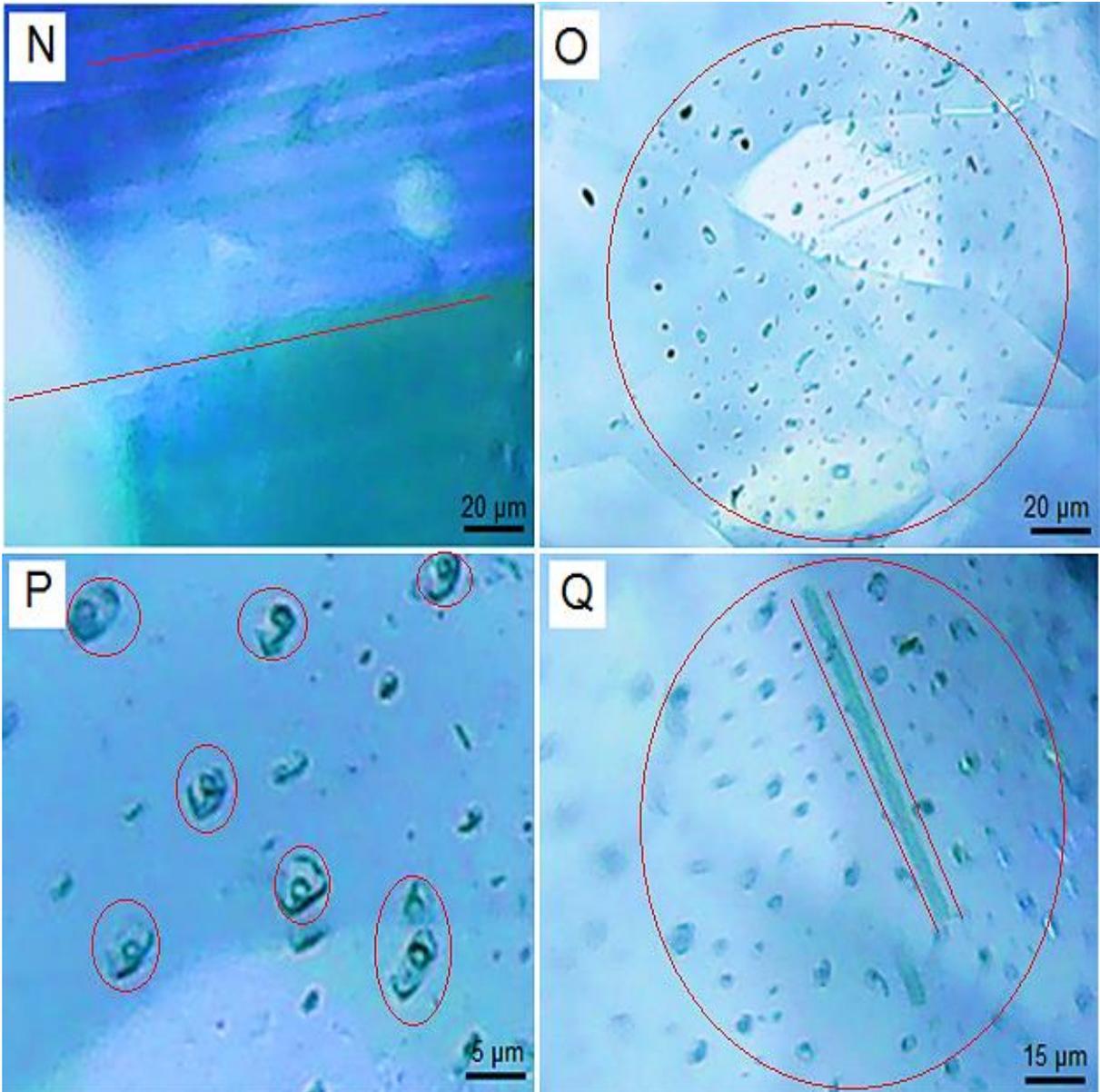


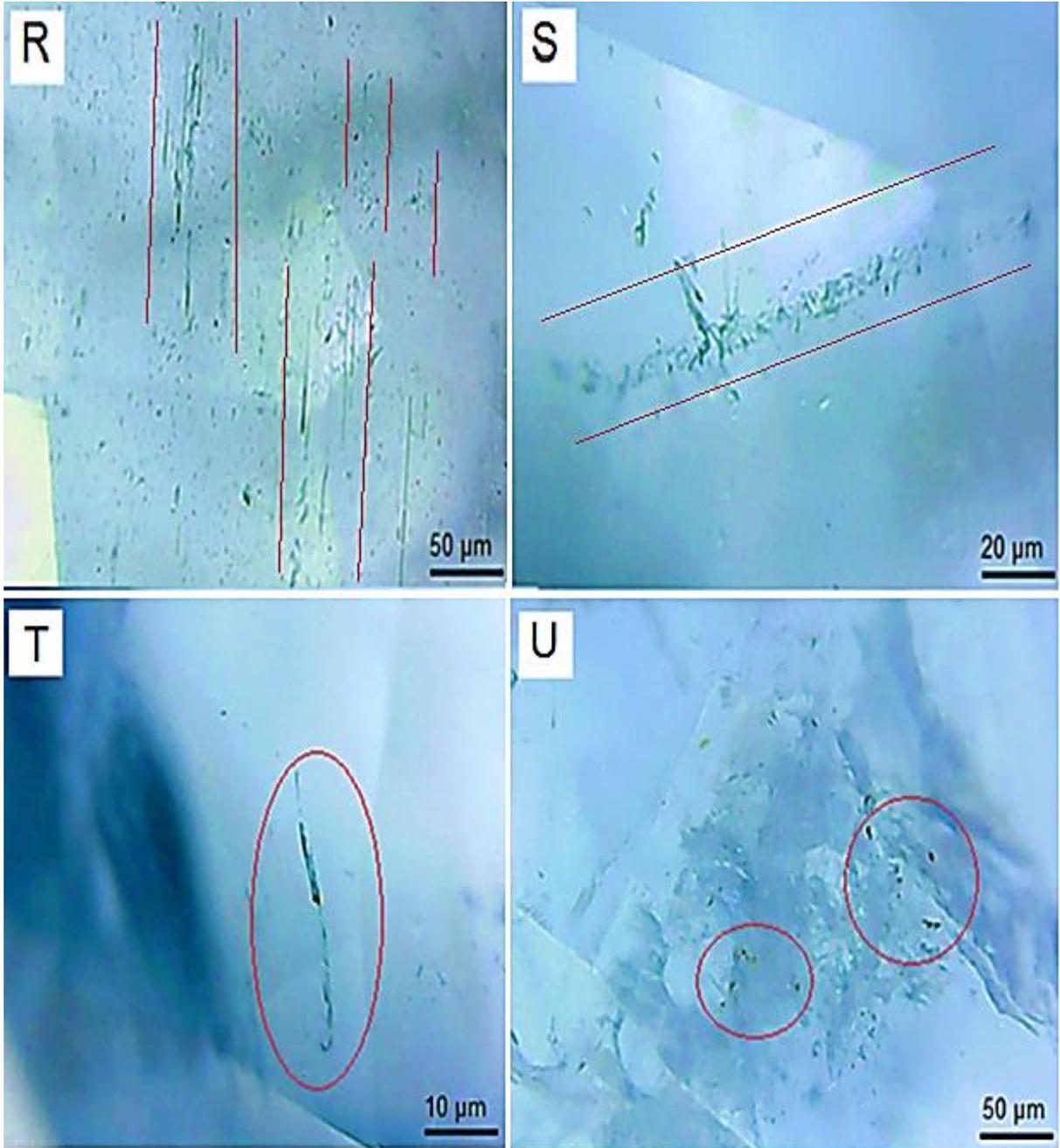
Fonte: autor

Também foram constatadas linhas de crescimento em outras amostras, como na Deep Sky Blue 1 (Figura 35), além de inclusões fluidas monofásicas e sólidas em formação circular (Figura 35O – Deep Sky Blue 1). Também se fazem presentes inclusões bifásicas (gás e líquido) sem orientação (Figura 35P – Deep Sky Blue 1); além de inclusões com estas características em meio a tubos ocos (Figura 35Q – Deep Sky Blue 1). Além disto, foram observadas inclusões sólidas juntamente com tubos paralelos entre si e com orientação (Figura 35R – Dodger Blue 1); em outra gema também foram visualizados líquidos com perceptível orientação (Figura 35S – Steel Blue 1), além de uma fratura cicatrizada (preenchida) (Figura 35T – Steel Blue 1), e inclusões sólidas de outros minerais sem orientação (Figura 35U – Steel Blue 1).

A maioria destas feições e aspectos internos possuem características de materiais protogenéticas, formados anteriormente a gema hospedeira. Com todos estes dados citados pode-se posteriormente efetuar um estudo, mais detalhado, para investigar os processos de formações destas gemas.

Figura 35: Inclusões nas amostras de águas-marinhas estudadas do Município de Quixeramobim. N) Linhas de crescimento na gema Deep Sky Blue 1. O) Inclusões fluidas (transparentes) e sólidas (escuras) com configuração circular (Deep Sky Blue 1). P) Inclusões bifásicas (gás e líquido) sem orientação (Deep Sky Blue 1). Q) Fluidos juntamente com tubos ocos, sem orientação (Deep Sky Blue 1). R) Tubos orientados e paralelos entre si, juntamente com inclusões sem orientação (Dodger Blue 1) S) Líquidos com perceptível orientação (Steel Blue 1). T) Fratura preenchida (Steel Blue 1). U) Inclusões de outros minerais, sem orientação (Steel Blue 1).





Fonte: autor

7.2.3 Diafaneidade, Qualidade Gemológica e Valor Comercial

A análise da diafaneidade dos exemplares se deu por meio da visualização de um objeto (ponta de uma caneta) através das águas-marinhas. Por definição as amostras transparentes possuem a imagem com contorno e nitidez bem definida, nas semitransparentes a nitidez não é tão visível, enquanto que nas translúcidas o contorno é definido e a nitidez é quase ausente, nas 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 águas-marinhas, interferindo na visualização das imagens e em alguns casos na saturação ou tonalidade da gema.

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 10). 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”, posteriormente o valor em dólar das amostras foi reajustado para Dezembro de 2022 de acordo com a inflação. Entre as treze gemas analisadas, nove são transparentes, três são semitransparentes e uma semitranslúcida. Em minerais com elevado teor de inclusões fluidas (Cadet Blue 1), estas podem reduzir a propagação da luz deixando a gema com a cor menos acentuada ou até mesmo intensificar determinados comprimentos de onda mudando a saturação e tonalidade, isto pode ser visto na gema Cadet Blue 1 (Apêndice 4), que ao ser lapidada teve um aumento na sua saturação.

De uma amostra em estado bruto foram lapidadas duas amostras (Apêndice 4) com dimensões muito próximas, as “gêmeas” “Steel Blue 1 e 2”; uma tem baixíssimo teor em inclusões fluidas, a outra tem abundância neste aspecto e fraturas quando comparado a sua “gêmea”. Os minerais “Steel Blue 1 e 2” tiveram uma redução na saturação após a lapidação. A gema mais limpa (Steel Blue 2) recebeu um 8,50 de nota gemológica enquanto a com elevado teor de fluidos (Steel Blue 1) recebeu 6,25; ambas possuem a mesma matiz, tonalidade e saturação, mas uma teve uma nota muito inferior em razão do teor de fluidos ser muito superior ao da primeira. Neste caso os fluidos não interferiam na cor, apenas na qualidade gemológica, pois os fluidos não eram abundantes como na gema Cadet Blue 1.

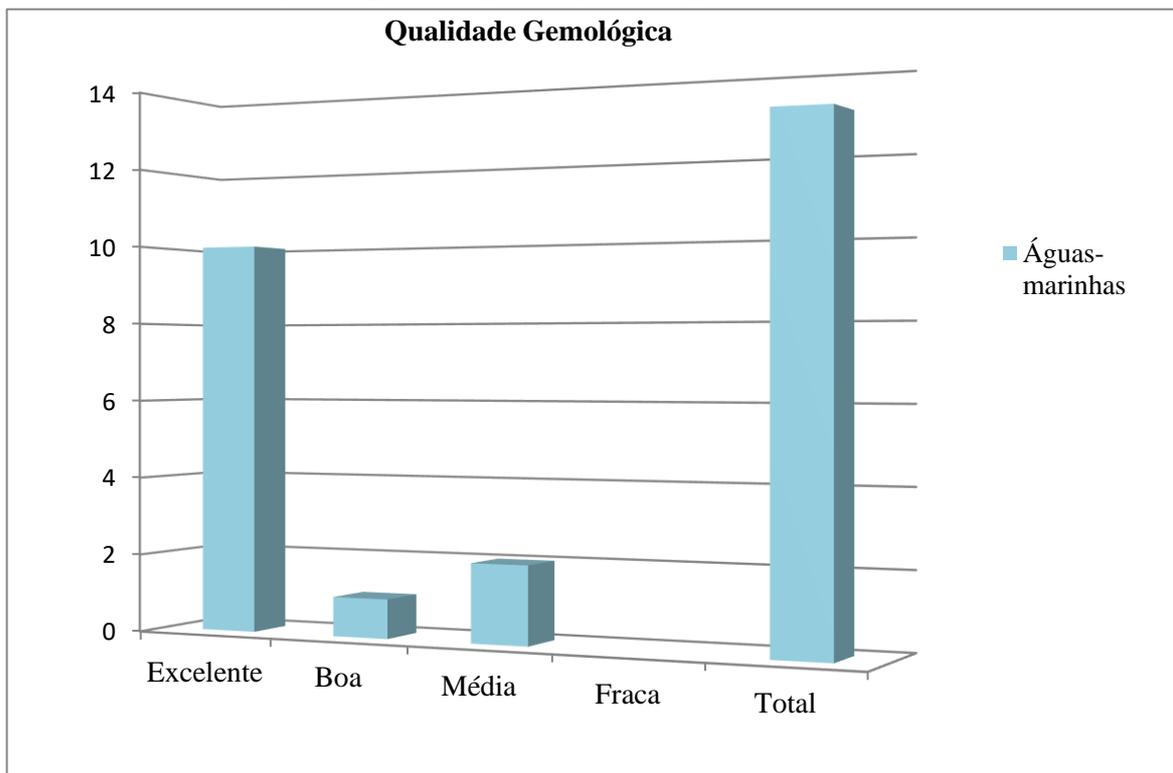
Com dez amostras possuindo “excelente” qualidade gemológica, uma sendo classificadas como “média” e duas como “boa”. As águas-marinhas entre 1 quilate e 0,5 ct possuem as melhores notas gemológicas em relação às demais, isto ocorre em razão destas

possuírem uma matiz (cor) mais “pura” sendo azul; enquanto que as demais têm uma matiz azul mas com um pequeno desvio para a cor verde. Um exemplar de 0,25 ct possui uma inclusão fluida visível em relação a das outras gemas, recebendo um “oito” como nota gemológica; uma redução de 0,25 na nota. A amostra de pior qualidade possui o quinto maior valor de mercado em decorrência de seu tamanho, o maior entre as amostras.

O exemplar Steel Blue 1 de 10 quilates (ct) apresenta o maior valor entre os exemplares, em razão da boa cor, baixo teor de inclusões e boa lapidação, enquanto a sua “gêmea” que recebeu um 6,25 de nota gemológica possui menos de um terço do valor; demonstrando o impacto das inclusões na nota de uma gema.

A água-marinha Dodger Blue 1 apresenta uma cor muito incomum para este mineral, uma cor rara. A amostra já possuía uma cor intensa em estado bruto (Apêndice 4), ao ser lapidada esta cor foi perdida parcialmente pela diminuição da saturação. uma gema com os mesmos fatores deste exemplar receberia uma nota inferior a 8,00, porém devido a cor muito acentuada foi atribuído uma nota maior em razão da cor rara.

Gráfico 10: Distribuição da qualidade gemológica das águas-marinhas de Quixeramobim - CE.



Fonte: autor

Os dados da qualidade gemológica e os valores de mercado foram compilados em uma tabela (Tabela 13), sendo notável o elevado preço que as amostras de maior tamanho possuem em relação às demais, mesmo que possuam notas menores. Este maior valor é consequência do tamanho das amostras e não da sua qualidade. As gemas com as notas gemológicas mais altas possuem valores inferiores aos das amostras de notas inferiores; em detrimento do tamanho superior destas gemas de qualidade inferior; gemas com mais quilates (ct) tendem a valer mais que os exemplares com pouco ct. O exemplar Steel Blue 2 é exceção neste caso, apresenta a segunda maior nota juntamente com outro exemplar; apesar de possuir 10 ct têm o maior valor entre todas as amostras, mais que o triplo do valor da segunda gema mais expressiva economicamente. Importante salientar que estes valores correspondem aos preços que chegam no consumidor final, já em joalherias e as gemas já em peças montadas (jóias).

Tabela 13: Qualidade gemológica das águas-marinhas de Quixeramobim e valor de mercado.

Peso (ct)	Cor da amostra	Qualidade Gemológica	Nota Gemológica	Preço em dólar (2022)
2,5	Azul (Cyan 2)	Excelente	8,25	481,06
1	Azul (Deep Sky Blue 1)	Excelente	8,75	145,61
1	Azul (Deep Sky Blue 1)	Excelente	8,50	145,61
0,5	Azul (Deep Sky Blue 1)	Excelente	8,75	84,05
0,5	Azul (Deep Sky Blue 2)	Excelente	8,75	84,05
0,5	Azul (Cyan 2)	Excelente	8,25	84,05
0,5	Azul (Cyan 2)	Excelente	8,00	84,05
0,5	Azul (Deep Sky Blue 2)	Excelente	8,00	84,05
21	Azul (Cyan 1)	Média	5,85	737,83
10,5	Azul (Steel Blue 1)	Boa	6,25	919,65
10	Azul (Steel Blue 2)	Excelente	8,50	3445,90
1,75	Azul (Dodger Blue 1)	Excelente*	8,75*	303,08*
6	Azul (Cadet Blue 1)	Média	5,00	324,98

Fonte: autor

7.2.4 Polariscópio Gomes

Após serem analisadas 13 amostras no laboratório de Gemologia TN utilizando o Polariscópio Gomes, O grau de qualidade das figuras de interferência foi inserido na em uma tabela (Tabela 14), além da confecção um gráfico (Gráfico 11) 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 gema deste trabalho) possuem uma figura de interferência extremamente nítida e com contornos bem definidos. Os exemplares tidos como “excelente” (duas águas-marinhas) são detentoras de um caráter e sinal óptico de fácil interpretação, possuindo pouca dificuldade ao visualizá-lo. As gemas cuja classificação foi “boa” (três exemplares) detêm uma figura de interferência mais difícil de ser analisada, com uma imagem não tão nítida. As amostras classificadas como “regular” (oito mineral) possuem 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” (nenhuma gema) não possuem uma figura de interferência nítida, esta falta de nitidez foi ocasionada pelo baixo grau de diafanidade das amostras, sendo possível apenas classifica-los como anisotrópicos. Para a visualização do caráter e sinal óptico, fatores como diafanidade são muito importantes, se este for de baixo grau a interpretação fica muito comprometida. Estima-se que minerais com qualidade de figura de interferência “regular” e “ruim” tenham seu eixo óptico paralelo ou quase paralelo aos planos de polarização.

Nas amostras de meio quilate e uma gema de 1 quilate foi constatado que estas possuem uma imagem classificada como regular, pois as isóginas dos exemplares são muito espessas para os seus tamanhos, dificultando a visualização, tornando-as como regulares. Se estas amostras tivessem tamanhos maiores, provavelmente a qualidade seria boa ou excelente.

Foi constatado que a lapidação pode melhorar a qualidade das figuras de interferência. Foram analisadas 3 águas-marinhas em estado bruto de Quixeramobim e suas classificações foram ruins, regular e regular respectivamente (Oliveira, 2018). Em 2020 estas mesmas amostras foram reavaliadas após serem lapidadas e sua classificação passou a ser boa, regular e boa respectivamente. Duas de três tiveram sua figura melhorada em razão da melhora na

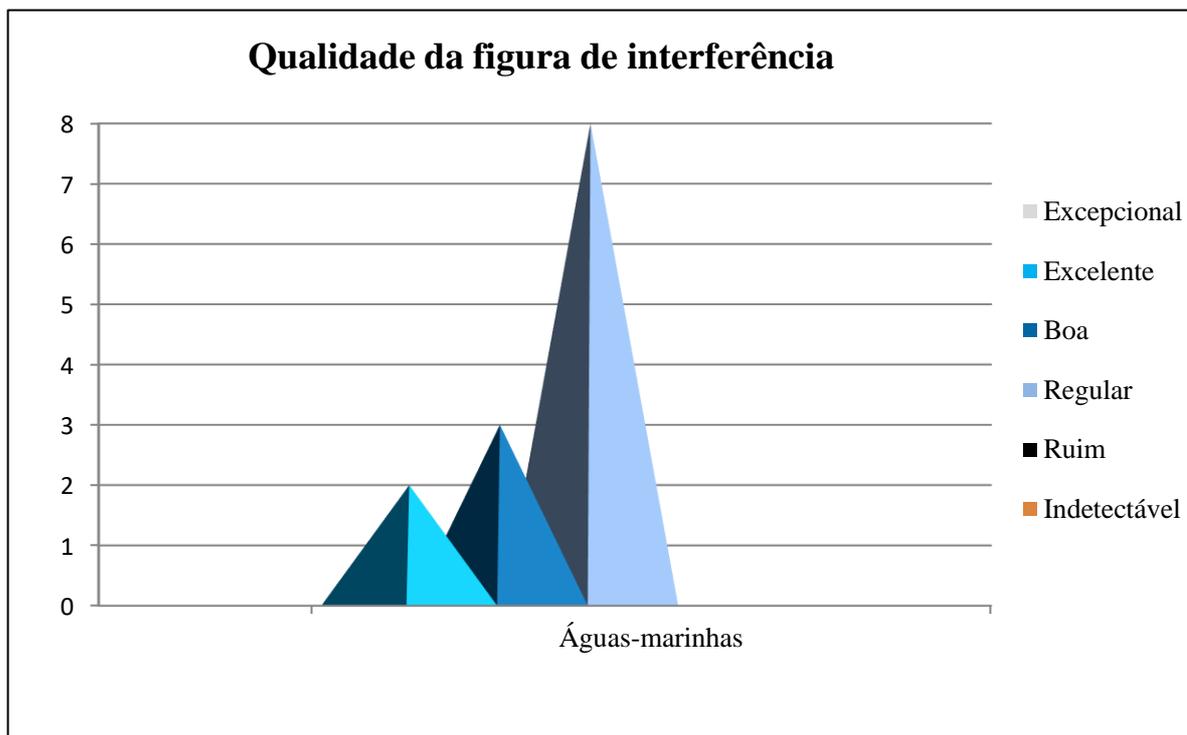
visibilidade de suas imagens de interferência. O exemplar que era anteriormente regular, foi dividido em duas gemas após a lapidação; em ambas as peças a qualidade continuou regular.

Tabela 14: Qualidade das figuras de interferência das águas-marinhas de Quixeramobim fornecidas pelo Polariscópio Gomes.

Número da amostra	Cor da amostra	Peso (ct)	Qualidade da figura de interferência
1	Azul (Cyan 2)	2,5	Excelente
2	Azul (Deep Sky Blue 1)	1	Boa
3	Azul (Deep Sky Blue 1)	1	Regular
4	Azul (Deep Sky Blue 1)	0,5	Regular
5	Azul (Deep Sky Blue 2)	0,5	Regular
6	Azul (Cyan 2)	0,5	Regular
7	Azul (Cyan 2)	0,5	Regular
8	Azul (Deep Sky Blue 2)	0,5	Regular
9	Azul (Cyan 1)	21,5	Ruim (em estado bruto) Boa (lapidada)
10	Azul (Steel Blue 1)	10,5	Regular (em estado bruto) Regular (lapidada)
11	Azul (Steel Blue 2)	10	Regular (em estado bruto) Regular (lapidada)
12	Azul (Dodger Blue 1)	1,75	Regular (em estado bruto) Boa (lapidada)
13	Azul (Cadet Blue 1)	6	Excelente

Fonte: autor

Gráfico 11: Distribuição das águas-marinhas analisadas conforme o grau de facilidade ao observar o caráter e sinal óptico por meio do polariscópio Gomes.



Fonte: autor

7.2.5 Química Mineral

A química mineral dos minerais da região do distrito pegmatítico Solonópole-Quixeramobim permite compreender e explicar as correlações existentes nas propriedades gemológicas; além de justificar os valores aferidos no índice de refração, birrefringência, densidade relativa, espectro de absorção e a intensidade do pleocroísmo e fluorescência. A química é a principal responsável pela intensidade das bandas de intensidade Raman, com as quantidades dos elementos sendo as agentes causadoras. Em relação à cristalochímica, os dados químicos permitem a quantificação dos elementos identificados pelo difratômetro de raios-X em monocrystal; além de justificar e explicar alguns valores captados gemologicamente (índice de refração, birrefringência, densidade relativa, espectro de absorção e pleocroísmo).

Os elementos químicos presentes e suas quantidades (Tabela 15) influenciam diretamente nas várias características das águas-marinhas, como cor, inclusões, propriedades ópticas e densidade relativa. Situação semelhante ocorre nas águas-marinhas de Yukon (Canadá) (Groat *et al*, 2010) onde amostras desta região apresentam claras correlações envolvendo suas propriedades cristalochímicas; nesta situação, foram utilizadas treze amostras, mas um maior número de análises químicas tornaria a correlação mais perceptível. Os dados citados nesta última tabela não chegam a 100%, em razão de fatores como voláteis, água e limitação na máquina de detecção.

Semelhante às turmalinas da região de Quixeramobim, as águas-marinhas analisadas possuem quantidades relevantes de CaO e Na₂O (Oliveira *et al*, 2020). Como esperado, a gema Cadet Blue 1 apresenta baixa quantidade de FeO (< 1%) quando comparada a outras amostras, o que permitiu que o exemplar possuísse fluorescência em baixa intensidade; como os ETR (que causam fluorescência) não foram detectados na amostra Cadet Blue 1, estes elementos se fazem presentes em quantidades muito baixas (< 0,1%) no berilo, o equipamento EDS não detectou ETR, devido a limitação do equipamento. Foi feita uma média para onze águas-marinhas, pois ambas têm cor, densidade relativa e conteúdo químico semelhante; a quantidade de FeO e NiO nesses espécimes é maior que a do Cadet Blue 1 e menor que a da gema Dodger Blue 1 de coloração azul mais intensa (Tabela 8). Além disso, um gráfico (Gráfico 12) mostra esta correlação, para melhorar a visualização do gráfico 12, a densidade relativa e o valor Wt% (Peso total) foram multiplicados por 100. Então, existe uma correlação entre cor, densidade relativa e as quantidades de FeO + NiO. No qual, quanto maior a quantidade desses dois elementos, maior a densidade relativa e a intensidade da cor nas águas-

marinhas; o elemento Na_2O também compartilha desta mesma progressão nas amostras (Gráfico 12); enquanto que o MgO apresentando uma relação inversa, pois se faz presente em maiores quantidades nas amostras mais claras e totalmente ausente na gema Dodger Blue 1. Portanto, existe uma correlação entre cor, densidade relativa e as quantidades de $\text{FeO} + \text{NiO}$. Em que, quanto maior a quantidade desses dois elementos, maior a densidade relativa e a intensidade da cor nas águas-marinhas. Pois o Fe e Ni são elementos de alta densidade, e o Fe influencia a cor das águas-marinhas (Dana e Hurlbut Jr., 1985) (Arem, 2023). A amostra de cor mais escura (Dodger Blue 1) se difere das outras 12 amostras também na maior quantidade de Na_2O (2,11%) que as demais, além da ausência MgO e CaO , além de uma presença muito pequena de MnO em relação as outras 12 gemas. Os dados citados nesta última tabela não chegam a 100%, em razão de fatores como voláteis, água e limitação na máquina de detecção.

A química mineral das águas-marinhas de Berilândia diverge das quantidades das gemas do Condado no FeO ; além dos exemplares desta região não apresentarem quantidades de CaO , MnO , MgO e NiO (Cavalcanti, 2017).

Os teores químicos dos 3 principais óxidos presentes nas águas-marinhas estudadas são condizentes com o padrão mundial, com as seguintes quantidades BeO (10%), Al_2O_3 (22%) e SiO_2 (60%); apresentando valores muito próximos da literatura mundial; cuja a normalidade é 13% para BeO , 18% para Al_2O_3 , 65% de SiO_2 (Franco, 1967) (Roberts *et al*, 1990) (Deer *et al*, 2010) (Shiyuan *et al*, 2023).

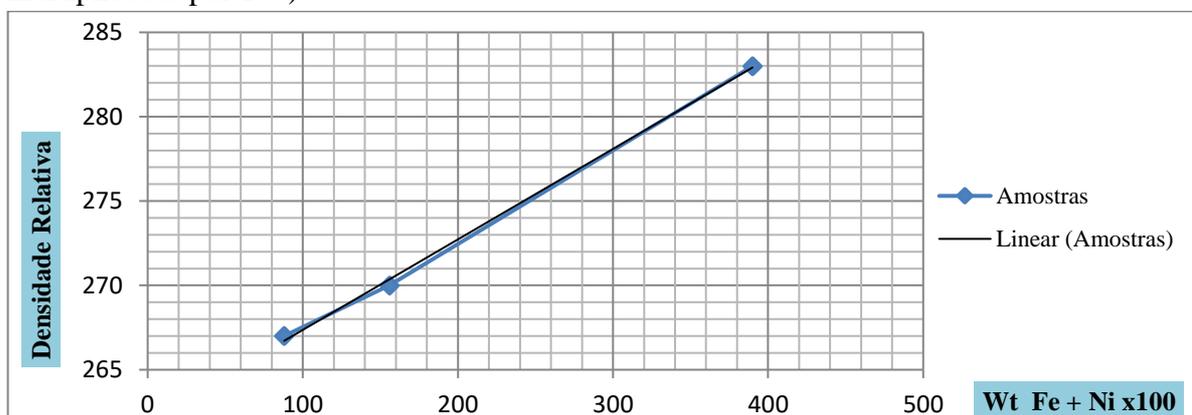
Enquanto as quantidades e correlações envolvendo FeO (0,9 – 4,15), MgO (0,57), Na_2O (1,22 – 2,46) e NiO (0,78 – 3,52) são uma característica bastante peculiar das amostras da região. As correlações envolvendo Fe + Ni estão associadas à sua compatibilidade geoquímica, como: peso atômico, ponto de fusão, densidade, capacidade térmica, eletronegatividade e raio atômico; todas estas características citadas são muito próximas nos dois elementos. O Mg não possui a compatibilidade do Fe e Ni, apenas o raio atômico do Mg (20% maior que o do Fe) tem alguma proximidade com os dois elementos citados, de modo que ele apresenta uma relação inversamente proporcional, quanto maior a quantidade de FeO e NiO menor será a quantidade de MgO ; desta forma, por possuir raios atômicos semelhantes o Mg entra no sistema cristalino da água-marinha substituindo o Fe e Ni. Esta situação ocorreu, pois o líquido magmático que gerou as águas-marinhas de cor mais clara não era tão rico em FeO e NiO o que permitiu que o MgO entrasse na estrutura (Klein & Dutrow, 2012). É notável e peculiar que o Na seja proporcional aos elementos Fe e Ni, pois estes dois são elementos incompatíveis em relação ao Na.

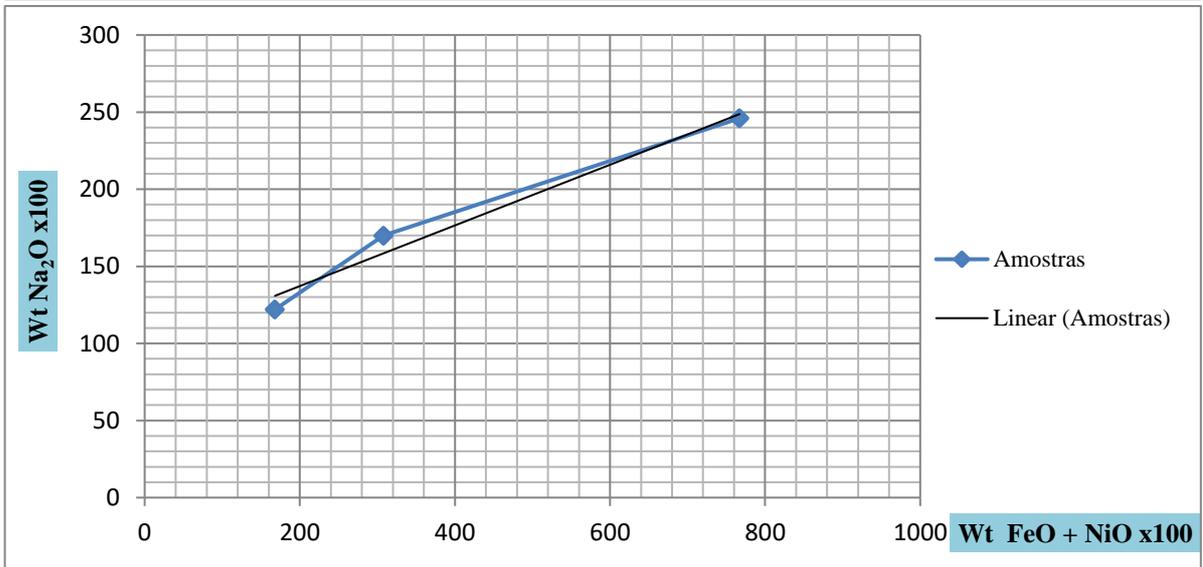
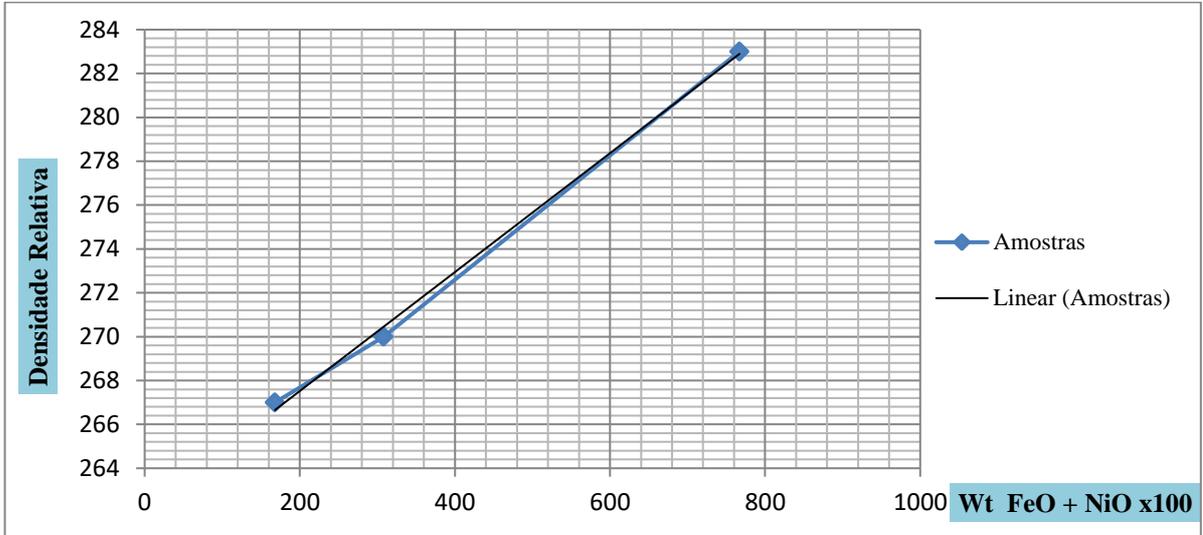
Tabela 15: Componentes químicos das amostras de água-marinha de Quixeramobim - CE.

AMOSTRAS	Cadet Blue 1 (Com fluorescência)	Águas-marinhas (exceto Cadet Blue 1 e Dodger Blue 1)	Dodger Blue 1 (Amostra de cor mais intensa)
Fórmula Química	$\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$	$\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$	$\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$
ELEMENTOS	Peso%	Peso%	Peso%
Be	5,13	5,06	5,19
Si	34,19	30,74	28,00
Al	10,46	10,37	12,31
Fe	0,47	1,23	2,11
Na	0,64	0,86	1,25
Mg	0,30	0,29	0
Mn	0	0	0,09
Ni	0,41	0,33	1,79
Ca	0	1,58	0
O	48,08	49,54	49,26
ÓXIDOS			
BeO	9,84	10,01	10,22
SiO ₂	65,64	60,86	55,16
Al ₂ O ₃	20	20,53	24,15
FeO	0,9	2,43	4,15
Na ₂ O	1,22	1,70	2,46
MgO	0,57	0,57	0
Mn ₂ O ₃	0	0	0,17
NiO	0,78	0,65	3,52
CaO	0	3,12	0
Densidade Relativa	2,67 g/cm ³	2,70 g/cm ³	2,83 g/cm ³

Fonte: autor

Gráfico 12: Correlação entre densidade relativa e porcentagem do FeO + NiO e Na₂O nas águas-marinhas de Quixeramobim. (Densidade Relativa e peso porcentagem (Wt) multiplicadas por 100).





Fonte: autor

7.2.6 Organização Cristaloquímica

As informações cristalográficas obtidas pelo difratômetro de raios-X em monocristal das gemas analisadas estão ligadas e correlacionadas com as densidades das gemas e o índice de refração (o raio ordinário, n_o) das amostras. Os dados obtidos ajudam a embasar ainda mais e permitem a visualização das ligações obtidas com o espectroscópio Raman; tornando possível contextualizar e melhorar a compreensão das ligações. A química mineral obtida pelo método EDS permite a quantificação dos elementos captados pelo difratômetro; além de justificar e explicar os valores dos pesos moleculares, densidade relativa e volumes das células unitárias mensurados pelo difratômetro. Deste modo, os dados obtidos pelo Raman e difratômetro em monocristal estão estritamente ligados aos obtidos pelo EDS e que por sua vez se relacionam e justificam várias das características gemológicas (índice de refração, birrefringência, densidade relativa, espectro de absorção e pleocroísmo).

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

A água-marinha que é um berilo e tem como características dominantes em sua estrutura os anéis hexagonais de seis tetraedros de Si-O, formando estes anéis colunas ocas paralelas ao eixo do cristal. No interior dos anéis, dois dos átomos de oxigênio de cada grupo SiO, são compartilhados por grupos SiO₄ em qualquer dos lados resultando, desta maneira, a razão metassilicato. Os átomos de Al e Be localizam-se entre os anéis, nos espaços intersticiais, sendo cada Al coordenado por um grupo octaédrico de seis átomos de oxigênio e cada Be rodeado de quatro átomos de oxigênio que se agrupam segundo um tetraedro distorcido. Nestas posições, ligam os oxigênios dos anéis Si₆O₁₈ vizinhos, tanto lateral como verticalmente. Nenhum centro de qualquer átomo está mais próximo que 2,55 Å dos centros dos canais abertos. No entanto, conhecem-se berilos alcalinos com quantidades apreciáveis de Na e Cs; estes íons de maior raio iônico vão ocupar, evidentemente, canais que de outro modo estariam vazios, e as cargas deles resultantes são compensadas, por substituições de outros cátions em qualquer outro local da estrutura. A água a que geralmente está presente nas análises químicas também está localizada nestes canais. Podem ocorrer dois tipos de água: a molécula de água do tipo I está orientada nos canais vazios com o seu eixo binário perpendicular ao eixo dos zz do berilo, enquanto a molécula de água do tipo II sofreu uma rotação de 90° por influência de um elemento alcalino vizinho sobre a molécula dipolar, e tem o seu eixo de simetria paralelo ao hexagonal dos zz . O berilo, embora normalmente

considerado como sendo $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ pode conter álcalis e, em certas variedades, o teor total de álcalis pode atingir cerca de 5-7 por cento. Além do Na e Li, também se encontram os íons alcalinos de maior raio atômico, K e Cs, mas o Rb é menos frequente. Embora o Li e Na possam substituir o Be, os íons de maior raio iônico, K e Cs, não o podem substituir, pois estão localizados nos canais hexagonais da estrutura (Deer *et al*, 2010).

Em termos gerais, as amostras de água-marinha analisadas possuem as mesmas características elencadas acima. Como as 13 águas-marinhas, desta pesquisa, podem ser agrupadas em 3 grupos (com base na saturação da cor) por causa das grandes similaridades em suas propriedades gemológicas; foram selecionadas uma amostra de cada um destes grupos para as análises em monocristal. Estas informações foram adquiridas por meio da difração de raios-X em monocristal, as imagens referentes à organização molecular dos sítios cristalinos das águas-marinhas Dodger Blue 1, Deep Sky Blue 1 e Cadet Blue 1 estão representadas pelas figuras 36, 37 e 38 no qual nota-se que o elemento ferro está sempre interligado com o alumínio. A fórmula química obtida é coerente com as fórmulas postuladas em Anderson (1984), Roberts *et al* (1990) Schumann (2006), ²Adamo *et al* (2008), Deer *et al* (2010), Shiyuan *et al* (2023) e (Arem, 2023).

O peso molecular está diretamente relacionado aos teores químicos das amostras; conforme ilustrado na tabela 16. A gema Dodger Blue 1 apresenta os seguintes teores químicos na seguinte porcentagem: $\text{BeO} = 10,22$, $\text{SiO}_2 = 55,16$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 24,15$, $\text{FeO} = 4,15$, $\text{Na}_2\text{O} = 2,46$, $\text{MgO} = 0$, $\text{Mn}_2\text{O}_3 = 0,17$, $\text{NiO} = 3,52$, $\text{CaO} = 0$. O exemplar de água-marinha Deep Sky Blue 1 possui os seguintes teores químicos na seguinte porcentagem: $\text{BeO} = 10,01$, $\text{SiO}_2 = 60,86$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 20,53$, $\text{FeO} = 2,43$, $\text{Na}_2\text{O} = 1,70$, $\text{MgO} = 0,57$, $\text{Mn}_2\text{O}_3 = 0$, $\text{NiO} = 0,65$, $\text{CaO} = 3,12$. A água-marinha Cadet Blue 1 apresenta os seguintes teores químicos na seguinte porcentagem: $\text{BeO} = 9,84$, $\text{SiO}_2 = 65,64$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 20$, $\text{FeO} = 0,9$, $\text{Na}_2\text{O} = 1,22$, $\text{MgO} = 0,57$, $\text{Mn}_2\text{O}_3 = 0$, $\text{NiO} = 0,78$, $\text{CaO} = 0$. A amostra com maior peso (Dodger Blue 1), possui o peso molecular de 560,33 em massa molecular (u), além de 7,67% de soma dos elementos de maior peso como FeO e NiO. A gema Deep Sky Blue 1 apresenta 558,57 u e 3,08% de peso com elementos mais densos de sua estrutura (FeO e NiO). A água-marinha Cadet Blue 1 têm respectivamente, 552,37 u e 1,68% (FeO e NiO) de soma dos elementos. Por possuírem as maiores massas dentre os elementos presentes nas amostras; os dados desta tese surtem que quanto maior a presença destes elementos, maior é o peso molecular do mineral. Contudo, as variações de outros elementos com peso molecular relevante (além de não apresentarem um padrão de quantidade nas gemas) nas 3 amostras contribuíram para que as diferenças nos pesos moleculares não fossem ainda maiores (Roberts *et al* 1990) (²Adamo *et al*, 2008) (Deer

et al, 2010) (Klein & Dutrow, 2012) (Shiyuan *et al*, 2023).

Em relação às dimensões da célula unitária *a* e *b* são as mesmas, pois se trata de um mineral cristalizado no sistema hexagonal e os valores obtidos em Angstrom 9,3151-9,2274 para os eixos cristalográficos “a” e “b”, e 9,2088-9,1968Å para os eixos cristalográficos “c” condizem com Brown & Mills (1986), ²Adamo *et al* (2008), Yakubivich *et al* (2009), Deer *et al* (2010). Uma vez que os valores tabelados para o berilo são “a” = 9,200 – 9,220Å; “b” = 9,200 – 9,220Å; c = 9,187 – 9,249Å. No qual os valores ligeiramente acima da média, devem-se ao fato da presença de elementos extras na estrutura como ferro e níquel, em que seus raios atômicos permitem a pouca expansão nas células unitárias.

O volume da célula unitária está diretamente ligado com as dimensões das células unitárias, os maiores valores das células unitárias (“a”) 9,3151 Å e (“c”) 9,2088 Å e do volume 799,057 ocorrem no mesmo mineral (Dodger Blue 1); quanto maior o valor da célula, maior será o volume ocupado; os menores valores das células unitárias 9,2274 Å e 9,1968 Å e do volume 678,15 ocorrem no mesmo mineral (Cadet Blue 1). A gema Deep Sky Blue 1 possui o valor intermediário de 777,65 no volume da célula unitária; além de apresentar os eixos (“a” 9,2454 e “c” 9,0978) com valores superiores ao da Cadet Blue 1 e inferiores ao da Dodger Blue 1 Sabe-se que um íon ou grupo iônico pode substituir outro íon ou grupo, ocupando um sítio cristalográfico específico no mineral (Klein & Dutrow, 2012), nas águas-marinhas isto ocorreu envolvendo o Al₂O₃, FeO e NiO. Estas alternâncias e substituições têm impacto direto na organização das células unitárias e seus respectivos volumes, conferindo diferentes valores mesmo que as três gemas sejam água-marinha (Klein & Dutrow, 2012).

A densidade das amostras também mostra correlação com os teores químicos, consequentemente com o peso molecular, no qual a gema de maior densidade (Dodger Blue 1) possui 2,77 g/cm³, peso de 560,33 e detém como soma dos elementos mais densos (FeO e NiO) o valor de 7,67%; sendo os maiores valores dentre os três minerais, ressaltando também a correlação destes fatores nas outras amostras. A amostra Deep Sky Blue 1 apresenta peso de 558,57, densidade de 2,73 g/cm³ e soma dos elementos de maior peso é 3,08%; sendo a Cadet Blue 1 possui peso de 558,57, densidade de 2,70 g/cm³ e a soma dos elementos mais pesados é 1,68%.

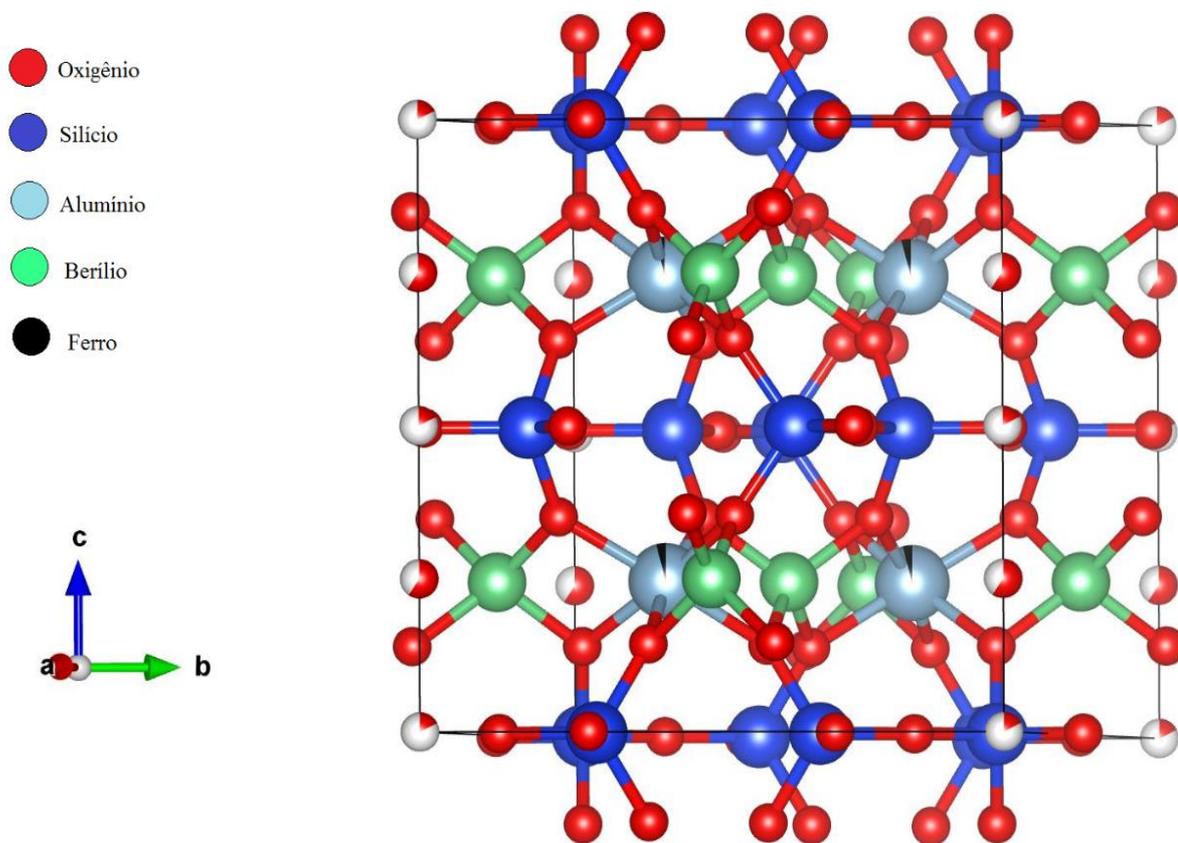
Importante salientar que a densidade relativa calculada nas águas-marinhas pelo método de raios-X em monocristal 2,77, 2,73 e 2,70 se aproxima bastante dos valores obtidos com a balança hidrostática respectivamente 2,83, 2,70 e 2,67 g/cm³.

Os berilos da região de Berilândia (também estado do Ceará) analisadas por Cavalcanti (2017) apresentam valores muito distintos das águas-marinhas (região de

Quixeramobim) desta pesquisa. Os eixos dos cristais de Berilândia apresentam valores menores (“a” = 9,228-9,207 e “c” = 9,203-9,179), assim como o peso molecular também é inferior (553,53). O volume das células unitárias oscila levemente entre 673,91 e 677,80 e é bastante inferior aos dados das águas marinhas de Quixeramobim. A densidade dos minerais de Berilândia é constante e se mantém em 2,72.

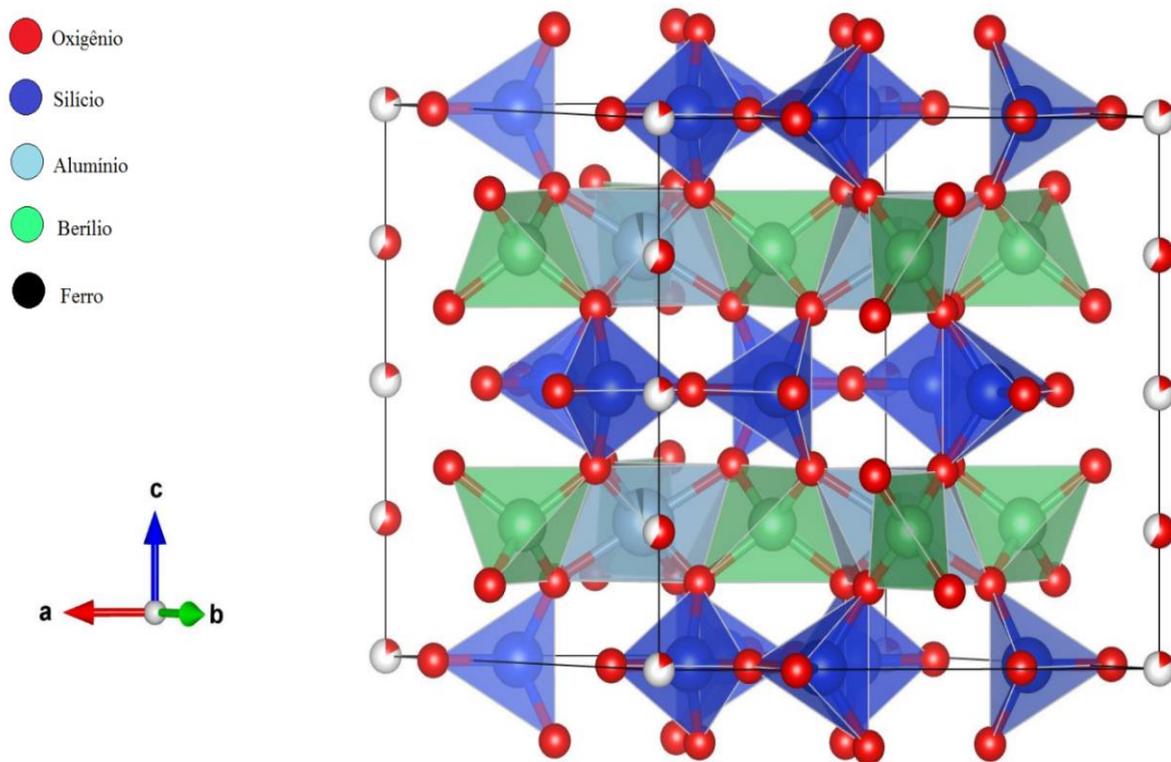
Estes dados obtidos por meio da difração de raios-X em monocristal, tais como: fórmula química teórica, peso molecular, dimensões da célula unitária, volume e densidade (g/cm^3) foram agrupados na tabela 16 como parte das análises cristalográficas.

Figura 36: Organização cristalográfica molecular da água-marinha (Dodger Blue 1)



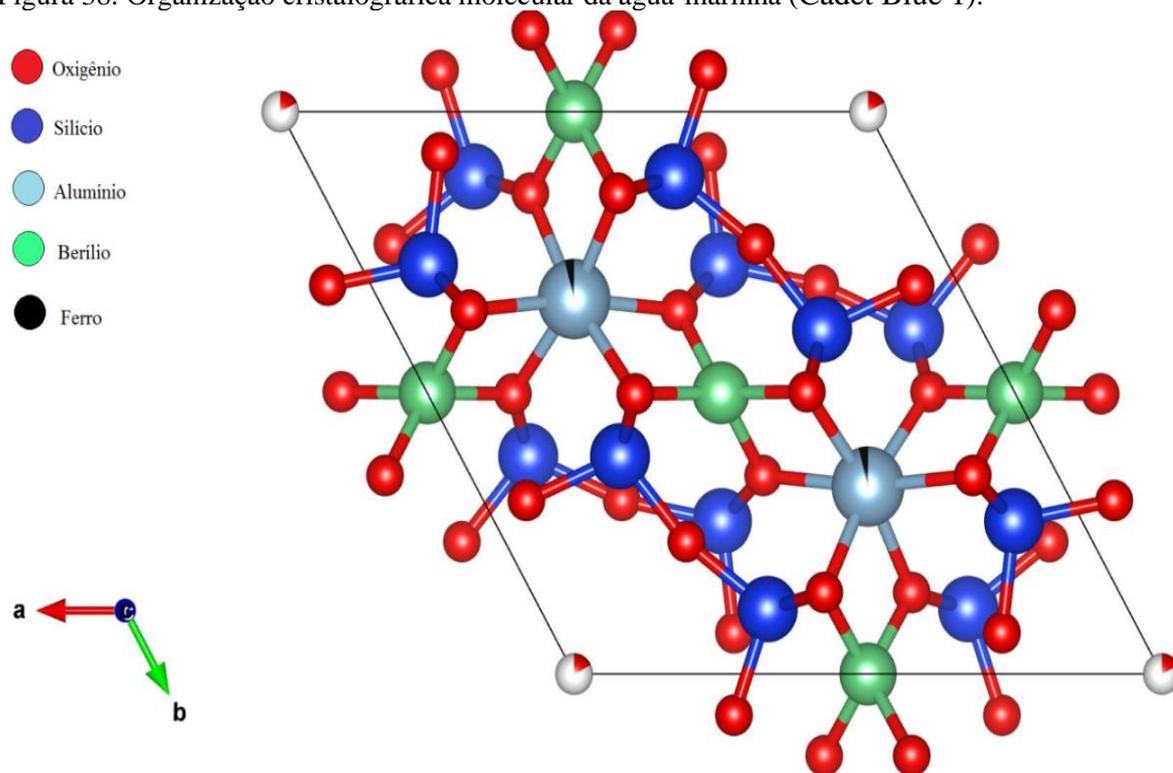
Fonte: autor

Figura 37: Organização cristalográfica molecular da água-marinha (Steel Blue 1).



Fonte: autor

Figura 38: Organização cristalográfica molecular da água-marinha (Cadet Blue 1).



Fonte: autor

Tabela 16: Dados obtidos a partir de refinamento da difração de raios-X em monocristal, para amostras de água-marinha e teores químicos obtidos pelo método EDS.

Amostra	Azul escuro (Dodger Blue 1)	Azul médio (Deep Sky Blue 1)	Azul claro (Cadet Blue 1)
Fórmula química	$\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$	$\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$	$\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$
Peso molecular	560,33	558,57	552,37
Dimensões da célula unitária Eixo a (Å)	9,3151(10)	9,2454(8)	9,2274(10)
Dimensões da célula unitária Eixo b (Å)	9,3151(10)	9,2454(8)	9,2274(10)
Dimensões da célula unitária Eixo c (Å)	9,2088(2)	9,0978(5)	9,1968(2)
Volume da célula unitária	799,057(6)	777,65(4)	678,15(2)
Densidade (g/cm ³)	2,77	2,73	2,70

Fonte: autor

7.2.7 Espectroscopia Raman

O espectro Raman apresenta correlações com algumas propriedades gemológicas, como os dados dos espectros de absorção (captados pelo espectroscópio gemológico) e informações dos aspectos internos. As bandas e módulos captados pelo Raman que se referem as ligações químicas podem ser vistos nas imagens obtidas pelo difratômetro de raios-X em monocristal. Existem interligações dos dados cristalográficos juntamente das bandas Raman, os módulos tornam ainda maior a evidência das ligações captadas pelo difratômetro de monocristal. A química mineral também se faz presente e é a principal responsável pela intensidade das bandas de intensidade Raman, com as quantidades dos elementos sendo as intencionalmente.

A espectroscopia Raman foi utilizada com o intuito de ser utilizado como um “finger print” das águas-marinhas desta região geográfica (Quixeramobim, CE), para constatação das ligações químicas nos minerais, também para evidenciar se as peculiaridades e correlações identificadas (cor, birrefringência, densidade relativa, fluorescência, teores químicos e dados cristalográficos) na caracterização gemológica, podem ser identificadas no espectro Raman.

Como as 13 águas-marinhas, desta pesquisa, podem ser agrupadas em 3 grupos (com base na saturação da cor) por causa das grandes similaridades em suas propriedades gemológicas; no entanto, não haviam fragmentos da amostra de cor escura (Dodger Blue 1), deste modo, foram selecionadas uma amostra de cor média (Deep Sky Blue 1) e um exemplar das gemas de cor clara (Cadet Blue 1) para as análises de espectroscopia Raman. Foram analisadas duas amostras (1 azul moderado e 1 claro), as posições das bandas e suas intensidades integradas estão relacionadas à ocupação do local composicional; a intensidade da banda 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 as bandas nas amostras de água-marinha, estas bandas são em aproximadamente 88 (mais acentuado na azul médio), 252 (apenas na azul médio), 284 (apenas na azul claro), 318, 400, 410 (apenas na azul claro), 450, 458, 522 e 625 (apenas no azul médio) e 683 cm^{-1} ; as bandas foram comparadas aos dados das águas-marinhas da RRUFF (Rossman, 2023) (University of Arizona Mineral Museum, 2023)

(Vanconselos, 2023) e de Bunnag *et al* (2020), estes indicam as vibrações das principais ligações químicas desses minerais. Em média, as águas-marinhas analisadas da RRUFF (Rossman, 2023) (University of Arizona Mineral Museum, 2023) (Vanconselos, 2023) e por Bunnag *et al* (2020) não possuem bandas ou acentuações em 252, 450, 458 e 625 cm^{-1} ; as amostras de Quixeramobim possuem estas bandas em razão da sua peculiar composição química, com quantidades expressivas de Na_2O , MgO , NiO e CaO (Tabela 14).

Tabela 17: Componentes químicos das amostras de água-marinha de Quixeramobim - CE.

AMOSTRAS	Cadet Blue 1 (Com fluorescência)	Águas-marinhas (exceto Cadet Blue 1 e Dodger Blue 1)	Dodger Blue 1 (Amostra de cor mais intensa)
Fórmula Química	$\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$	$\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$	$\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$
BeO	9,84	10,01	10,22
SiO ₂	65,64	60,86	55,16
Al ₂ O ₃	20	20,53	24,15
FeO	0,9	2,43	4,15
NaO	1,22	1,70	2,46
MgO	0,57	0,57	0
Mn ₂ O ₃	0	0	0,17
NiO	0,78	0,65	3,52
CaO	0	3,12	0
Densidade Relativa	2,67 g/cm^3	2,70 g/cm^3	2,83 g/cm^3

Fonte: autor

Na tabela de bandas Raman da RRUFF (Rossman, 2023) (University of Arizona Mineral Museum, 2023) (Vanconselos, 2023) e de Bunnag *et al* (2020) não há um único valor de espectro para cada ligação, existem alguns com valores muito próximos (uma “margem de variabilidade”). Nos quais as bandas 88 e 284 evidenciam as ligações nos anéis hexagonais (pois os berilos são ciclossilicatos) (Klein & Dutrow, 2012); a banda em 318 indica as ligações no anel hexagonal com a ligação de Al; as bandas em 400 e 410 são uma evidência do “Ring breathing”; a banda em 522 evidencia as ligações Si-Be ou a vibração Al-O e a banda em 683 atesta a ligação Be-O ou Si-O-Si (Bunnag *et al*, 2020). Estes espectros podem ser visualizados no gráfico 13.

Os dois exemplares possuem as bandas regulares para este padrão mineral de água-marinha, pois foram comparados com o banco de dados *online* da RRUFF (Rossman, 2023) (University of Arizona Mineral Museum, 2023) (Vanconselos, 2023) e com os dados de

Bunnag *et al* (2020).

As anomalias e correlações entre cor, birrefringência, densidade relativa, fluorescência, teores químicos e dados cristalográficos convergem com as peculiaridades encontradas na espectroscopia Raman que são condizentes com as anomalias encontradas na caracterização gemológica, geoquímica e cristalográfica. Evidenciando que todas as propriedades destas gemas se relacionam entre si.

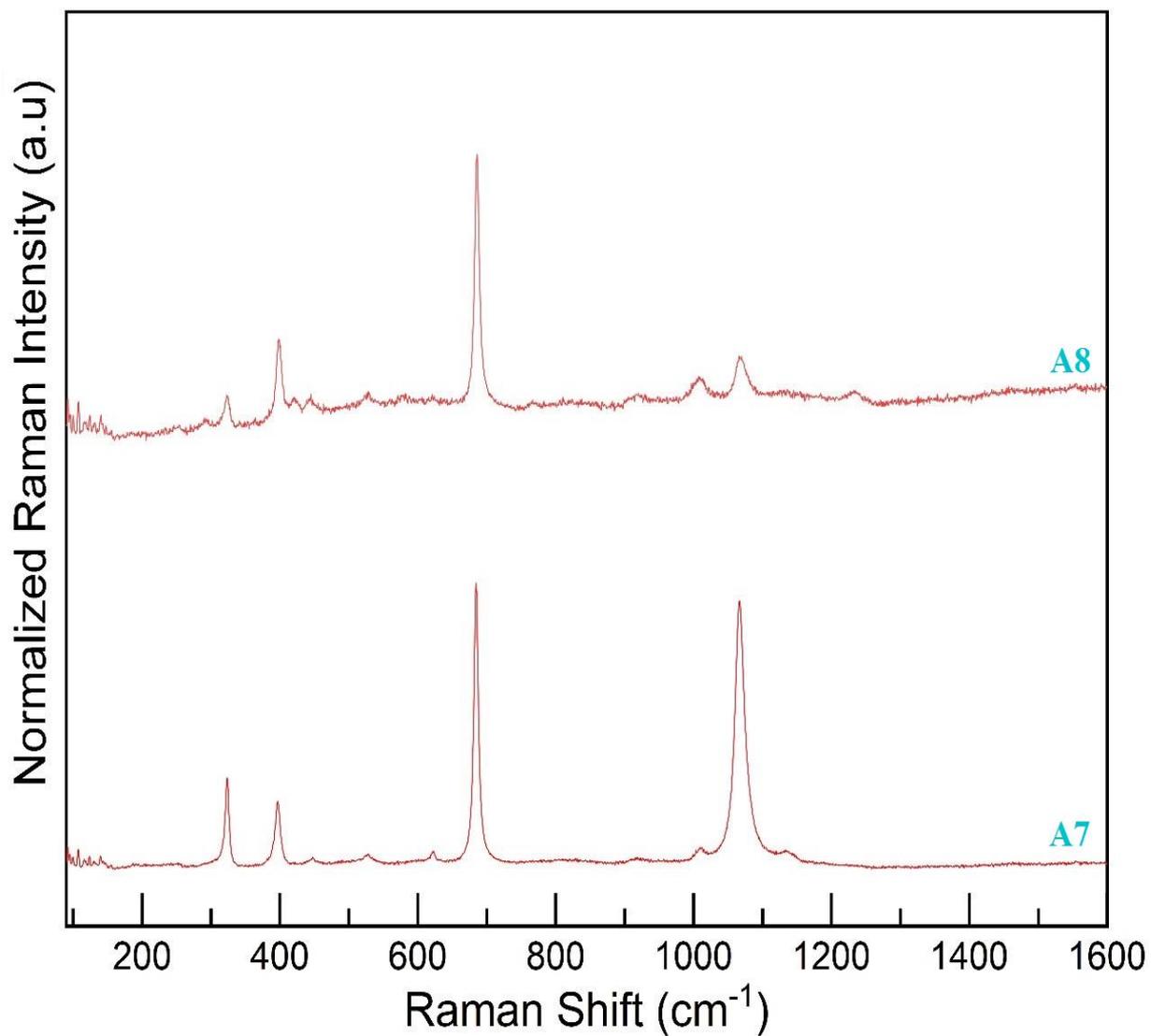
De modo geral, as bandas encontradas até 800 cm^{-1} são basicamente as mesmas nas duas amostras e com exceção dos 252, 450, 458 e 625 são normais para amostras de água-marinha. Estes dados citados são consequência da análise da radiação eletromagnética transmitida, absorvida ou refletida por uma amostra/substância, no domínio da frequência ou comprimento de onda da radiação. Para que cada acentuação nas bandas aconteça são necessárias energias bem definidas, e que variam para cada substância (Hutchings *et al* 2008).

As duas amostras (Deep Sky Blue 1 e Cadet Blue 1) apresentaram bandas em 1020-1088, apenas uma gema (Deep Sky Blue 1) detém banda em 1230 cm^{-1} , estas acentuações respectivamente indicam um alongamento Si–O₂ e deformação O₂–Al/Be–O₂ (Bunnag *et al*, 2020).

Logo, os espectros Raman apresentaram os padrões e regularidades quando comparados com os dados da RRUFF (Rossman, 2023) (University of Arizona Mineral Museum, 2023) (Vanconselos, 2023) assim como os dados gemológicos, geoquímicos e cristalográficos obtidos que mostraram algumas propriedades não comuns para este mineral.

Os diferentes aspectos na organização cristalográfica (célula unitária), as quantidades e os elementos químicos, até mesmo a diafanidade (que inclui as inclusões e microfissuras) que podem gerar falhas na estrutura cristalina ou até mesmo na célula, que impactam na acentuação das bandas do espectro Raman; isto pode explicar o motivo da água-marinha Deep Sky Blue 1 possuir alguns bandas mais notáveis ou que estão ausentes na gema Cadet Blue 1; conforme ilustrado no gráfico 13. Na tabela de bandas Raman de Bunnag *et al* (2020) não há um único valor de espectro para cada ligação; o que já era esperado, pois em um mesmo mineral ocorrem variações na composição química (Brown & Mills, 1986) (Yakubivich *et al*, 2009) (Deer *et al*, 2010), bem como a posição que um íon ocupa dentro da estrutura do mineral.

Grafico 13: Espectroscopia Raman das águas marinhas (Deep Sky Blue 1 (A7) e Cadet Blue 1 (A8)) do Município de Quixeramobim



Fonte: Autor

7.2.8 Petrografia

As informações ópticas adquiridas pelo microscópio petrográfico se correlacionam e reforçam os dados obtidos através da caracterização gemológica. Principalmente, as características aferidas de ordem quantitativa, como a birrefringência, em que os dados ópticos microscópicos são os mesmos dos dados ópticos/gemológicos microscópicos. Outras informações microscopiamente, de ordem qualitativa, obtidas são da mesma ordem que os dados macroscópicos. Ademais, da mesma forma que os dados ópticos/gemológicos se correlacionam com os dados geoquímicos, cristalográficos e espectroscópicos; os dados ópticos microscópicos também se correlacionam.

Uma lâmina de secção delgada (0,03 mm) foi confeccionada para aferir as propriedades ópticas em escala microscópica das águas-marinhas de Quixeramobim. Foi selecionada uma amostra de água-marinha (de cor azul médio para a região) para a confecção e análise microscópica; pois esta tonalidade de azul é a mais comum da região de estudo.

No sistema de luz natural, a água-marinha analisada em lâmina delgada não apresentou nenhuma cor. Ao apresentar ausência de cor isto significa que este exemplar não absorve nenhum comprimento de onda (entre 800-390 nm), tampouco transmite comprimentos de onda. Devido a ausência de cor, o grão analisado não possui absorção e tampouco apresenta pleocroísmo. Cor, absorção e pleocroísmo são três características que frequentemente estão interligadas e em conjunto. A absorção é o resultado direto da intensidade da transmissão (cor percebida pelos órgãos visuais) (Flint, 1965) (Zukov, 1967) (Wahlstrom, 1969) (Heinrich, 1980) (Fujimori & Ferreira, 1987). O exemplar não apresentou clivagem, o que já era esperado, e microfraturas se fazem presente. A amostra possui hábito subhedral em razão de duas fácies bem definidas. A linha de Becke é maior que o meio (balsámo do Canadá), em razão do índice de refração da água-marinha (~1,580) ser superior ao líquido (1,520) que está em contato com as suas bordas. O relevo deste mineral é baixo, pois o índice de refração do berilo é pouco superior ao do meio circundante, deste modo o contorno do grão se torna fino e pouco visível. Quanto maior esta diferença, mais visível será a borda do mineral. O grão de água-marinha analisado não apresenta alterações ou inclusões (Fujimori & Ferreira, 1987) (Bloss, 1999) (Nesse, 2004) (Klein & Dutrov, 2012) (Machado e Nardy, 2016).

As características elencadas acima, pertencentes ao sistema de luz natural, são condizentes e dentro da normalidade do mineral berilo (água-marinha) (Kerr, 1987) (Frank,

2018).

No sistema ortoscópico, em que se faz necessário cruzar os nicóis, foram obtidos mais dados deste exemplar. A diferença entre os índices de refração (n_o e n_e) ao atravessarem a água-marinha resultam em uma diferença de encaminhamento que é dada pela espessura multiplicada pela birrefringência do mineral analisado. Cada um destes raios ao atravessar o analisador se decompõe em dois componentes ($(w - e)$ e $(n - s)$) no plano do polarizador estes raios vibram no mesmo plano, mas com velocidades diferentes. Logo, em condições de se interferirem. A cor de interferência deste grão é o amarelo de primeira ordem, o que corresponde ao comprimento de onda em 380 nm na tabela de cores de interferência de Michel Levy. A cor de interferência é o resultado da espessura do mineral em lâmina delgada multiplicado pela birrefringência. A birrefringência, diferença entre os raios n_o e n_e da amostra, obtida por meio da constatação da cor de interferência e com o auxílio do acessório de quartzo-gipso é de 0,013; a tabela e cores de birrefringência de Michel Levy pode ser vista no Apêndice 3. A extinção é paralela à forma do mineral, pois o berilo pertence ao sistema hexagonal. Utilizando o acessório de quartzo-gipso e colocando a forma de maior comprimento paralela ao raio lento do acessório, constatou-se que o raio rápido da água-marinha (n_e) está paralelo ao maior comprimento e o raio lento (n_o) está perpendicular ao maior comprimento do cristal; com o raio rápido (n_e) paralelo a forma o sinal de alongação da água-marinha é negativo. O mineral analisado não apresenta nenhum dos 6 tipos de geminação (Carls Bad, Baveno, Albita, Periclina, Lei da Albita-Periclina, Cíclica), tampouco nenhum dos 3 tipos de zoneamento (alteração, composição e inclusão) (Wahlstrom, 1969) (Heinrich, 1980) (Fujimori & Ferreira, 1987) (Klein & Dutrov, 2012) (Machado e Nardy, 2016).

As características elencadas acima, pertencentes ao sistema ortoscópico, são condizentes e dentro da normalidade do mineral berilo, exceto pela cor de interferência e birrefringência de 0,013 (Kerr, 1987) (Frank, 2018).

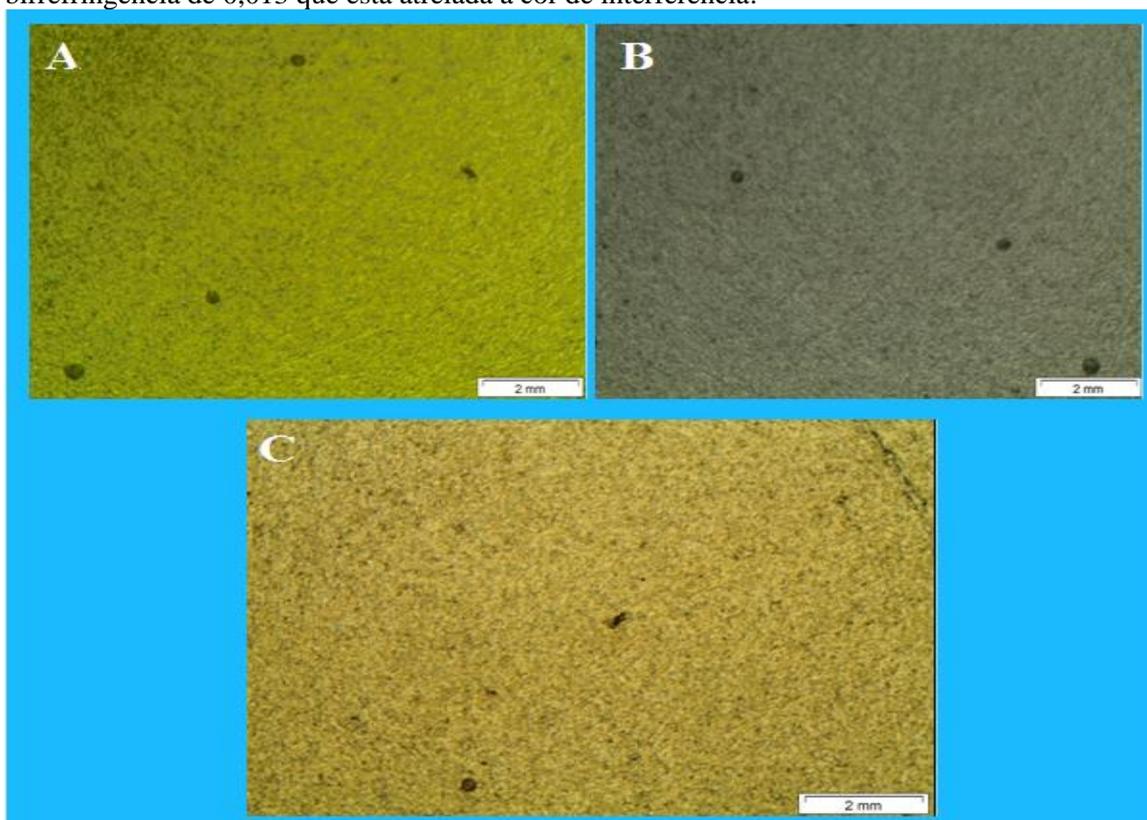
No sistema conosópico, com os aditivos da lente de Amici-Berttand e da lente condensadora, somado a maior objetiva do microscópio permitiram a visualização da figura de interferência da água-marinha; neste sistema, os raios de luz incidentes (provenientes do polarizador) sobre o berilo não são paralelos como nos outros sistemas, mas divergentes. Ao visualizar a figura de interferência do grão analisado constatou-se que seu eixo óptico estava perpendicular, mas inclinado em relação a platina do microscópio, pois foi gerada uma figura uniaxial de eixo óptico descentrada. Com o aditivo do acessório de quartzo-gipso e os fatores de soma e subtração das cores resultante dos raios ordinário e extraordinário em cada um dos

quadrantes, constatou-se que o mineral é opticamente negativo, devido a disposição da cor amarela no 1º e 3º quadrante, e da cor azul no 2º e 4º quadrante. A água-marinha analisada não possui isocromáticas (Flint, 1965) (Zukov, 1967) (Wahlstrom, 1969) (Heinrich, 1980) (Fujimori & Ferreira, 1987).

As características citadas acima, pertencentes ao sistema conoscópico, são condizentes e dentro da normalidade do mineral berilo (Kerr, 1987) (Frank, 2018). Algumas características obtidas microscopicamente, tais como: relevo (índice de refração), pleocroísmo, birrefringência, caráter e sinal óptico; também foram obtidas macroscopicamente por meio da caracterização gemológica e através do polariscópio Gomes. Estes dados macros e microscópicos coincidiram completamente.

Todos os dados obtidos, e mencionados acima, por meio da caracterização óptica petrográfica foram organizados na tabela 18. Ademais foi confeccionada uma prancha (Prancha 3) contendo fotomicrografias de algumas características mencionadas nos parágrafos acima.

Prancha 3 – Fotomicrografia A – Cor de soma em água-marinha analisada por meio do acessório de quartzo-gipso, resultando em cor amarela esverdeado de 2ª ordem (910 nm); Foto B – Cor de subtração na água-marinha por meio do acessório de quartzo-gipso, resultando em cor cinza (250 nm); Fotomicrografia C – Cor de interferência amarela de 1ª ordem (380 nm), evidenciando a birrefringência de 0,013 que está atrelada a cor de interferência.

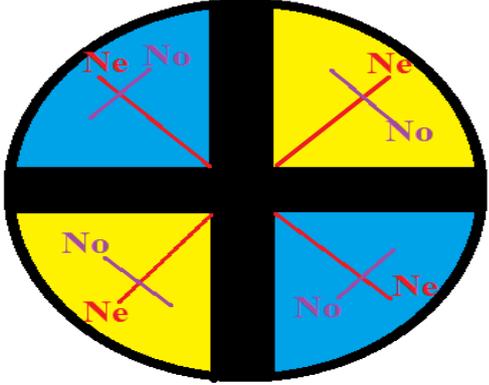


Fonte: autor

Tabela 18: Propriedades ópticas em lâmina delgada das águas-marinhas de Quixeramobim – CE.

MINERAL		PROPRIEDADES ÓPTICAS
L U Z N A T U R A L	Cor	Incolor
	Pleocroísmo	Ausente
	Absorção	Ausente
	Clivagem	Ausente
	Fratura	Presente
	Hábito	Subhedral
	Linha de Becke	Maior que o meio
	Relevo	Baixo
	Alterações	Ausente
	Inclusões	Ausente
S. O R T O S C Ó P I C O	Cor de Interferência	Amarelo Primeira Ordem, 380 nm
	Birrefringência	0,013
	Tipo de Extinção	Paralela a Forma do maior comprimento
	Posição dos Raios Lento e Rápido	Raio Rápido paralelo ao maior comprimento Raio Lento perpendicular ao maior comprimento
	Sinal de Elongação	Negativo
	Posição dos Raios Ordinário (No) e Extraordinário (Ne)	No perpendicular a forma Ne paralelo a forma
	Geminação	Ausente
	Zoneamento	Ausente
S.	Caráter	Uniaxial

C
O
N
O
S
C
Ó
P
I
C
O

Sinal Óptico	Negativo
Isocromática	Ausente
Ilustração	

Fonte: autor

7.3 GRANADAS

7.3.1 Propriedades gemológicas

Após a caracterização gemológica das granadas da região do Trapiá (Município de Quixeramobim), os dados adquiridos foram comparados com a base de dados mundial da International Gem Society (IGS) (^{2.1}Arem & Clark, 2023) e em diversas obras de grande reconhecimento e credibilidade mundial, obras desde 1971 até 2020 (Franco & Campos, 1971) (Hurlbut & Switzer, 1979) (Nassau, 1980) (Webster, 1981) (Anderson, 1984) (Schumann, 2006) (IBGM/DNPM, 2009) (Bonewitz, 2013) (Schumann, 2020). Para averiguar se as granadas da região possuem características novas para serem incorporadas aos dados mundiais, ou a fim de embasar melhor estes dados, ou aumentar a gama de possíveis características para este mineral, ou identificar anomalias que caracterizem bem estes minerais como sendo provenientes de Quixeramobim (Ceará), até o momento foram encontradas granadas gemológicas apenas neste município do Estado.

Foram analisadas onze amostras de granadas, gemologicamente dois exemplares foram classificados como spessartita e nove como grossulárias. As gemas analisadas possuem as propriedades ópticas dentro do padrão das granadas. Para a caracterização óptica destes minerais, o refratômetro teve um papel fundamental, provando que os dois minerais classificados como spessartitas são isotrópicos e só possuem um índice de refração, pertencendo ao sistema cristalino cúbico. Já as outras nove gemas exibem anisotropia; com dois índices de refração. Para a caracterização óptica destes minerais, dada a importância do refratômetro foram utilizados dois refratômetros (*Rayner Dialdex*) e realizadas seis leituras com cada uma das gemas; todas as 12 medições (seis em cada refratômetro) para cada uma das 11 granadas foram as mesmas (Apêndice – 1 anexo). Além disto, ambos os instrumentos estavam devidamente calibrados após o uso de um quartzo (cristal de rocha) com índices de refração conhecidos.

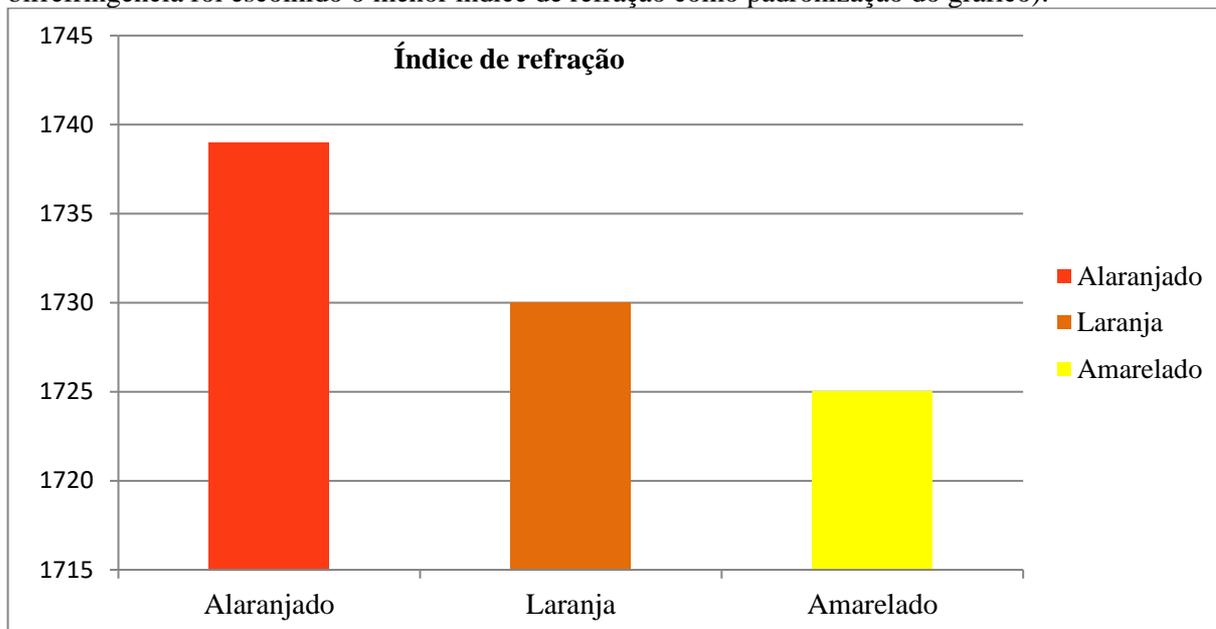
Minerais que se cristalizam no sistema tetragonal, hexagonal e trigonal são uniaxiais. Minerais que se cristalizam nos sistemas ortorrômbico, monoclinico e triclinico e são biaxiais. No primeiro caso o cristal irá possuir dois índices de refração em razão da organização cristalológica que interfere nos encaminhamentos da luz no mineral, possuindo o raio ordinário (*no*) e extraordinário (*ne*), no qual um raio (*no*) é sempre fixo e o outro (*ne*) oscila (Fujimori & Ferreira, 1987). No segundo caso, o cristal irá possuir 3 índices de refração n_x , n_y e n_z ; o primeiro e o último podem ser visualizados no refratômetro, o segundo (n_y) é obtido a partir de cálculos matemáticos utilizando os valores de n_x e n_z . Sete amostras de

grossulárias analisadas possuem os dois índices imutáveis e fixos, não podendo ser classificadas nem como uniaxiais ou biaxiais. Porém, duas destas gemas possuem oscilações nos dois índices de refração, possuindo o padrão óptico de minerais biaxiais. A granada é muitas vezes tida como o mineral isotrópico, mas, e embora predominantemente a granada almandina e o piropo sejam em geral completamente isotrópicos, a spessartita pode ser anisotrópica e a série ugrandita (uvarovita, andradita e grossulária) pode apresentar um evidente anisotropismo. Percebeu-se que a presença de CaO na uvarovita, grossulária e andradita os torna birrefringentes (Camargo, 1961) (Anderson, 1984) (Deer *et al*, 2010) (Schumann, 2020) (^{2.1}Arem & Clark, 2023).

O índice de refração das granadas analisadas, aferido com o refratômetro, possuem valores dentro da normalidade; as duas spessartitas possuem um único índice de refração de 1,802. As gemas grossulárias possuem índices variáveis, mas ainda assim dentro da normalidade, com índices que vão de 1,749 (Orange Red 3) a 1,738 (Dark Golden Rod 1). Ambos os índices das onze gemas estão dentro da normalidade; a refração das granadas oscila entre 1,72 a 1,95; 1,79 – 1,83 para as spessartitas e 1,72 – 1,80 para as grossulárias (^{2.2}Arem & Clark, 2023). Foi notada uma correlação entre a cor e os índices de refração nas granadas; as gemas vermelhas (spessartitas) possuem os maiores índices em valor 1,802; as peças laranja escuro (Orange Red 3 e Dark Orange 3) têm uma refração em torno de 1,740 (menor índice aferido para todos os exemplos); os exemplares laranjas (Dark Golden Rod 2, Chocolate 2, Orange 2) têm índices em torno de 1,730; o espécime amarelo (Golden Rod 1) possui uma refração de 1,725, esta correlação pode ser observada no Gráfico 14.

A birrefringência das granadas grossulárias de Quixeramobim oscila entre 0,009 (Orange Red 3) e 0,013 (Orange Red 3 e Golden Rod 1); não existe qualquer correlação da dupla refração das amostras com qualquer outro aspecto gemológico.

Gráfico 14: Correlação entre a cor e a média dos índices de refração nas granadas de Quixeramobim (Índice de refração multiplicado por 1000 para melhor representação) (Nas granadas com birrefringência foi escolhido o menor índice de refração como padronização do gráfico).



Fonte: autor

A densidade relativa, aferida com o uso da balança hidrostática apresentou resultados dentro do que esperado, mas com algumas ressalvas. As duas gemas spessartitas Red 4 e Violet Red 4 possuem a densidades no valor de 4,13 e 4,15 g/cm³ respectivamente. A densidade de granadas spessartitas oscila entre 3,80 e 4,25 g/cm³ (^{2,3}Arem & Clark, 2023); logo, os valores obtidos para as gemas estão dentro do padrão mundial.

Nos exemplares de granadas grossulárias cinco amostras tiveram densidade acima da média. As duas amostras Orange Red 3 tem como valores 3,80 e 3,82 g/cm³; a gema Dark Orange 3 possui 3,76 g/cm³; as granadas Dark Golden Rod 2 e Orange 2 detém 3,68 g/cm³; os três exemplares Chocolate 2 tem densidades entre 3,70 3 3,72 g/cm³; e a gema Golden Rod 1 possui a menor densidade entre as amostras com 3,56 g/cm³. A densidade de granadas grossulárias oscila entre 3,40 e 3,71 g/cm³, mais comumente entre 3,60-4,30 g/cm³ (Franco & Campos, 1971) (Webster, 1981) (Anderson, 1984) (Schumann, 2006) (IBGM/DNPM, 2009) (^{2,2}Arem & Clark, 2023); logo, quatro amostras estão dentro do padrão mundial, porém os valores obtidos para cinco gemas estão acima da média mundial.

Em 1960, o índice de refração das granadas era entre 1,75-1,89 (dependendo do grupo), a densidade destas era considerada entre 3,51-4,13 g/cm³ (Anderson, 1960); desta forma, fica evidente como as gemas muitas vezes possuem atualizações nas suas propriedades gemológicas.

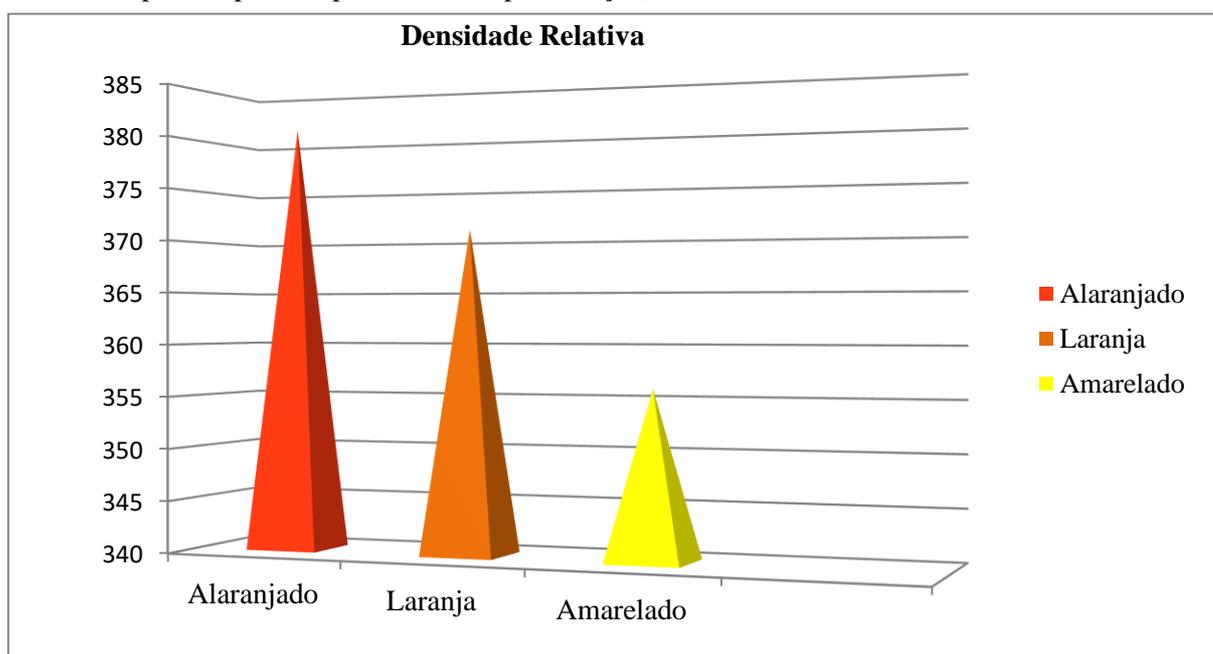
No caso das gemas com maiores valores, isto pode ser explicado pelo fato das granadas serem soluções sólidas, portanto são várias moléculas de diferentes granadas constituindo o mesmo exemplar; o que influencia na densidade. Estas gemas devem possuir teores consideráveis de moléculas de espécimes de granadas densas em sua constituição.

A presença de elementos densos em sua estrutura cristaloquímica e a grande quantidade de inclusões sólidas no interior de algumas amostras, também contribuem para que alguns exemplares tenham uma densidade relativa acima da média.

Foi notada uma correlação entre a cor e a densidade relativa das amostras, no qual as gemas que tendem ao vermelho possuem os maiores valores e os minerais mais próximos da cor amarela tem os menores valores de densidade; esta correlação faz-se presente no Gráfico 15. Nas granadas grossulárias a correlação é quase linear e nas spessartitas a angulação da reta tendendo para mais é notável.

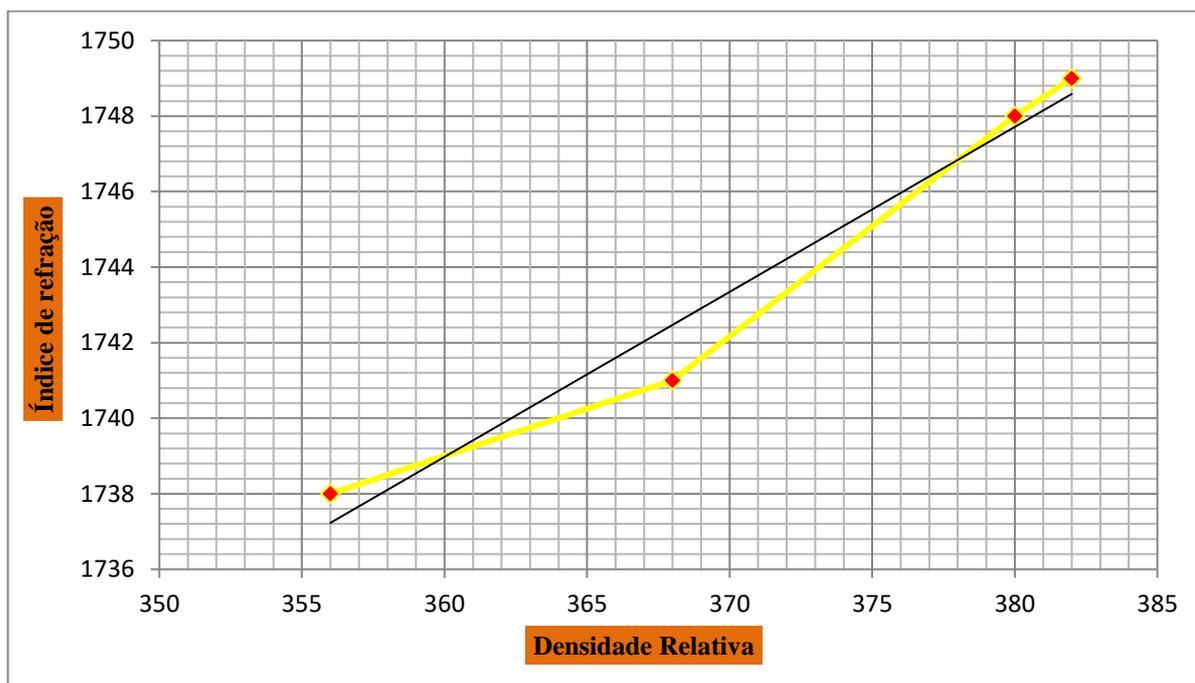
Também existe uma correlação entre os índices de refração nas granadas e a densidade das mesmas; no qual as gemas mais próximas da cor vermelha possuem os maiores valores de refração e densidade relativa, já os minerais de cor mais próxima do amarelo tendem a ter os menores valores. Esta correlação não é linear, como no caso das turmalinas rosa de Quixeramobim (Oliveira, 2020), mas é perceptível a correlação conforme demonstrada no Gráfico 16. Nas granadas grossulárias a correlação é quase linear e nas spessartitas a angulação da reta tendendo para maiores valores é notável.

Gráfico 15: Correlação entre a cor e a densidade relativa nas granadas de Quixeramobim (Densidade relativa multiplicada por 100 para melhor representação).



Fonte: autor

Gráfico 16: Correlação entre a densidade relativa e o índice de refração nas granadas de Quixeramobim (Densidade relativa multiplicada por 100 para melhor representação) (Índice de refração multiplicado por 1000 para melhor representação. Para estes foram considerados os maiores valores da refração).



Fonte: autor

O dicroísmo das gemas, ou pleocroísmo, que é analisado com o dicróscópio, mostrou a ausência desta característica em todas as onze amostras. Esta é uma característica típica em granadas (Hurlbut & Switzer, 1979) (Nassau, 1980) (Webster, 1981) (Anderson, 1984) (Schumann, 2020) (Arem & Clark, 2023), pois se cristalizam no sistema cúbico. Por se formarem neste sistema cristalino são classificadas como isotrópicas, pois a luz não sofre divisão em dois raios que vibram perpendicular entre si (Fujimori & Ferreira, 1987) (Machado & Nardy, 2016) ao atravessar o material, diferente do que ocorre em minerais anisotrópicos. Os minerais anisotrópicos são os que se cristalizam nos demais sistemas (trigonal, tetragonal, hexagonal, ortorrômbico, monoclinico e triclinico) e podem possuir pleocroísmo. Este fenômeno (dicroísmo) resulta da absorção distinta da luz em cristais anisotrópicos; isto ocorre em razão das diferentes velocidades de propagação e de absorção da luz no mineral, consequência do sistema cristalino. No caso das granadas birrefringentes, a dupla refração ocorre em razão da presença do cálcio (Ca) e não por causa do sistema cristalino propriamente dito. A presença deste elemento causa uma pequena deformação na estrutura cristalina das granadas, o que causa um retardo e divisão da luz (Klein & Dutrow, 2012). Isto ocasiona a birrefringência, mas não é o suficiente para causar o fenômeno do

pleocroísmo; em razão deste elemento (Ca) modificar a cela unitária e não o sistema cristalino do mineral. O cátion cálcio somado as condições de formação das granadas grossulárias ocasiona um defeito linear helicoidal, no qual o retículo cristalino passa a ter defeitos estruturais ao longo de um eixo que não estaria presente no arranjo; logo, será causado um deslocamento na estrutura cristalina da granada. A presença de um defeito linear permite que um cristal deforme sob tensão, pelo deslizamento destes defeitos em uma escala atômica ao longo da estrutura (Klein & Dutrow, 2012).

O uso de uma lâmpada de luz ultravioleta permitiu a observação da fluorescência, que não pode ser constatada em nenhuma das granadas analisadas, o que já era esperado para estes minerais (Franco & Campos, 1971) (Hurlbut & Switzer, 1979) (IBGM/DNPM, 2009) (Bonewitz, 2013) (Schumann, 2020) (²⁻¹Arem & Clark, 2023). Este dado mostra que os exemplares não possuem elementos ativadores de fluorescência ou fosforescência, como cromo e elementos terras raras. Estes elementos químicos associados à luminescência em minerais, quando na presença de uma lâmpada UV é energizado e salta para a próxima camada de sua valência, retornando após um período de tempo e repetindo este ciclo enquanto a exposição à luz UV (ultravioleta) durar; ao ser energizado e retornar para sua camada de valência normal e estável o elemento libera a energia acumulada em forma de luz (Anderson, 1984).

Os espectros de absorção são uma medida qualitativa de certos elementos químicos, no qual metais de transição (Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} , Mn^{3+} , Cu^{3+} , Mg^{2+} e etc) possuem uma transmissão em determinados comprimentos de onda, como 490 nanômetros (nm) está relacionada ao Mn^{2+} e 700 nm ao Cu^{2+} em alguns minerais. O espectro de absorção (Figura 39A e B) (esquema ilustrativo representativo dado a difícil visualização e aquisição de fotografias) captado pelo espectroscópio condiz com o padrão das granadas. As amostras de spessartitas analisadas possuem espectros na ordem de 570, 520, 500 e 430 nm (nanômetros). As spessartitas, em escala mundial, têm como valões padrão: 495, 485, 462, 432, 424 e 412 nm; almandina pode estar presente, contribuindo linhas em 432 e 412 nm (²⁻³Arem & Clark, 2020). Para as grossulárias os valores foram 630, 605, 600, 500, e 405 nm. Em nível mundial, as grossulárias podem ter valores em 697, 630, 605, 505, 461, 407 e 403 (²⁻²Arem & Clark, 2023). Os valores de 438, 470, 500, 580 e 690 nm estão relacionados ao Fe^{3+} (Rhind *et al*, 2014) (Stubna *et al* 2019); os valores 488 e 623 nm ao Cr^{3+} (Stubna *et al* 2019); 425 e 606 nm ligados ao V^{3+} (Adamo *et al* 2012). Estes valores amplos que as granadas possuem são uma consequência da sua complexa cristaloquímica.

Figura 39A: Representação dos quatro espectros mais comuns em granadas spessartitas.

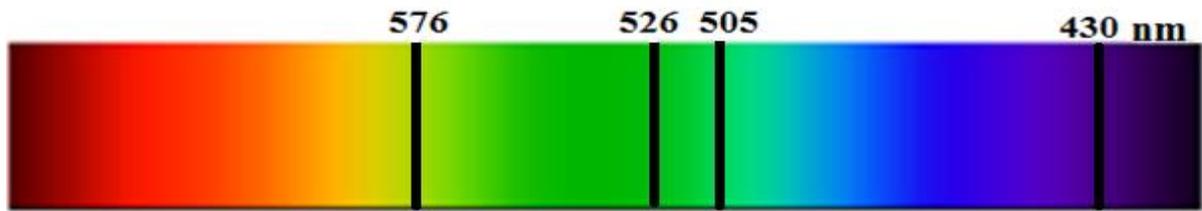


Figura 39B: Representação dos sete espectros mais comuns em granadas grossulárias.



Fonte: adaptado de Schumann (2020).

Logo, estes dados citados foram compilados em uma tabela (Tabela 19), como parte da caracterização gemológica.

A análise da diafanidade das gemas se deu por meio da visualização de uma ponta de uma caneta através das granadas, nas amostras transparentes a imagem possui contorno e nitidez bem definido, nas semitransparentes a nitidez não é tão notável enquanto que nas translúcidas o contorno é definido e a nitidez é quase ausente. A análise mostrou que todas as dez amostras são transparentes. Todos estes dados elencados encontram-se na Tabela 19.

Tabela 19: Características gemológicas das granadas de Quixeramobim – CE.

Amostr a/ Proprie dades	Diafaneida de	Índice de refração e Birrefrin gência	Caráter e sinal óptico	Pleocroism o	Espectro de absorção	Fluorescê ncia	Densidad e Relativa	Inclusões e aspectos internos
Spessartita (Red 4)	Transparente	1,802	Ausente, Sempre permite a passagem de luz	Ausente	570, 520, 500 e 430 nm	Ausente	4,13 g/cm ³	Cristais irregulares em forma de ponto e cristais irregulares de cor escura, agrupados e com leve orientação.
Spessartita (Violet Red 4)	Transparente	1,802	Ausente, Sempre permite a passagem de luz	Ausente	570, 520, 500 e 430 nm	Ausente	4,15 g/cm ³	Cristais irregulares em forma de ponto e cristais irregulares de cor escura, agrupados.
Grossulária (Orange Red 3)	Transparente	1,740- 1,749; 0,009	Anisotropia, mistura de cores, mas sem um caráter e sinal óptico tradicional	Ausente	630, 600 e 500 nm	Ausente	3,82 g/cm ³	Fraturas; cristais de minerais com tamanhos distintos; inclusões fluidas; por vezes cristais bem formados (euédricos); raramente presença de iridescência por meio das fraturas existentes.
Grossulária (Orange Red 3)	Transparente	1,739- 1,748; 0,009	Anisotropia, mistura de cores, mas sem um caráter e sinal óptico tradicional	Ausente	630, 600 e 500 nm	Ausente	3,80 g/cm ³	Fraturas; cristais de minerais com tamanhos distintos por vezes bem formados (euédricos); Cristais de minerais agrupados com inclusões fluidas exibindo orientação; abundantes inclusões fluidas com orientação.
Grossulária (Dark Orange 3)	Transparente	1,738- 1,748; 0,010	Anisotropia, mistura de cores, mas sem um caráter e sinal óptico tradicional	Ausente	630, 605, 500 e 405 nm	Ausente	3,76 g/cm ³	Fraturas; abundantes cristais de minerais com tamanhos distintos por vezes bem formados (euédricos); inclusões fluidas perpendiculares as inclusões dos cristais.

Grossulária (Dark Golden Rod 2)	Transparente	1,730-1,741; 0,011	Anisotropia, mistura de cores, mas sem um caráter e sinal óptico tradicional	Ausente	630, 605, 500 e 405 nm	Ausente	3,68 g/cm ³	Fraturas; diversos cristais de minerais com tamanhos distintos por vezes bem formados (euédricos); inclusões fluidas perpendiculares as inclusões dos cristais; presença de cristais junto aos fluidos; raramente inclusões fluidas com orientação juntamente com cristais de tamanho reduzido.
Grossulária (Chocolate 2)	Transparente	1,731-1,741; 0,010	Anisotropia, mistura de cores, mas sem um caráter e sinal óptico tradicional	Ausente	630, 600 e 500 nm	Ausente	3,72 g/cm ³	Fraturas; abundantes cristais de diferentes minerais com tamanhos distintos e bastante esféricos (pouco angulosos); raras inclusões bifásicas (líquido e gás); inclusões de cristais bem agrupados e sem orientação.
Grossulária (Chocolate 2)	Transparente	1,730-1,740; 0,010	Anisotropia, mistura de cores, mas sem um caráter e sinal óptico tradicional	Ausente	630, 600 e 500 nm	Ausente	3,72 g/cm ³	Fraturas; poucos cristais de minerais, bastante esféricos (pouco angulosos), com tamanhos distintos; abundantes inclusões fluidas sem orientação.
Grossulária (Chocolate 2)	Transparente	1,730-1,740; 0,010	Anisotropia, mistura de cores, mas sem um caráter e sinal óptico tradicional	Ausente	630, 600, 500 e 405 nm	Ausente	3,70 g/cm ³	Fraturas; abundantes cristais de minerais com tamanhos distintos e bastante esféricos (pouco angulosos); inclusões de cristais com leve orientação juntamente com fluidos. Por vezes inclusões de cristais angulosos e melhor formados.

Grossulária (Orange 2)	Translúcida	1,730-1,740; 0,010	Anisotropia, mistura de cores, mas sem um caráter e sinal óptico tradicional	Ausente	630, 600 e 500 nm	Ausente	3,68 g/cm ³	Fraturas; diversos cristais de minerais com tamanhos distintos por vezes bem formados (euédricos); inclusões fluidas abundantes e sem orientação; presença de cristais junto aos fluidos.
Grossulária (Golden Rod 1)	Transparente	1,725-1,738; 0,013	Anisotropia, mistura de cores, mas sem um caráter e sinal óptico tradicional	Ausente	630, 600, 500 e 405 nm	Ausente	3,56 g/cm ³	Fraturas; abundantes cristais de minerais com tamanhos distintos por vezes bem formados (euédricos); inclusões fluidas orientadas e por vezes paralelas entre si.

Fonte: autor

7.3.2 Feições Internas

Ao microscópio gemológico, os cristais de granadas (spessartita e grossulária) estudados são caracterizados por fraturas, inclusões sólidas escuras com leve orientação, cristais de minerais com tamanhos distintos; inclusões fluidas; por vezes cristais bem formados (euédricos) e abundantes cristais de diferentes minerais com tamanhos distintos e bastante esféricos. As granadas (spessartitas e grossulárias) possuem normalmente fraturas, inclusões líquidas tipo penas onduladas e irregulares, inclusões bifásicas, cristais negativos, linhas de crescimento, cristais de manganês, ferro, magnetita, diopsídio e zircão arredondado, agulhas de cristais longos, tubos de crescimento, fraturas cicatrizadas (impressões digitais) e linhas de crescimento (Anderson, 1984) (IBGM/DNPM, 2009) ^(2.1, 2.2, 2.3) Arem & Clark, 2023).

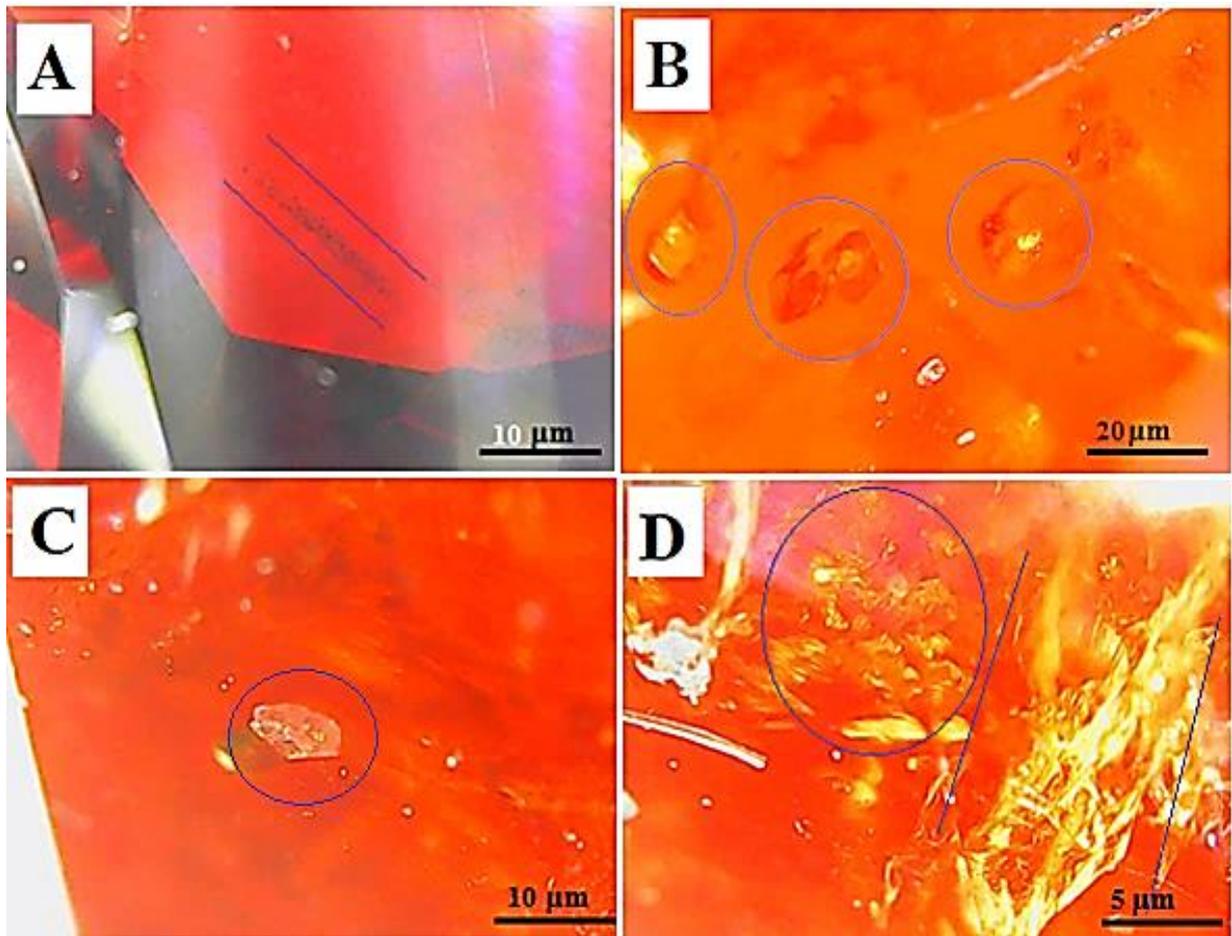
Foram visualizadas inclusões sólidas escuras (sem forma) e orientadas em granada a spessartita (Figura 40A – Red 4). Foram identificadas inclusões sólidas de cristais de zircão em grossulária (Figura 40B – Orange Red 3) e inclusão de cristal anedral (Figura 40C – Orange Red 3); estes sólidos possuem configuração de inclusões protogenéticas. Também foram visualizadas fraturas cicatrizadas (preenchidas por fluidos) com uma configuração avulsa, não estando orientadas (Figura 40D – Orange Red 3); a cor destas fraturas ficou amarela em razão do reflexo da iluminação. Fluidos monofásicos e sem orientação também se fazem presentes (Figura 40E – Orange Red 3); além de cristais de zircão sem orientação e com fácies definidas, sendo minerais euédricos (Figura 40F – Orange Red 3). Em uma dessas granadas de forte cor laranja (Orange Red 3) foi identificada uma forte iridescência (Figura 39G), 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. Foram encontrados fluidos monofásicos com aspecto circular e possuindo leve orientação, além de inclusões de zircão (Figura 40H – Orange Red 3). Com estes dados pode-se posteriormente efetuar um estudo, mais detalhado, para investigar os processos de formações destas gemas.

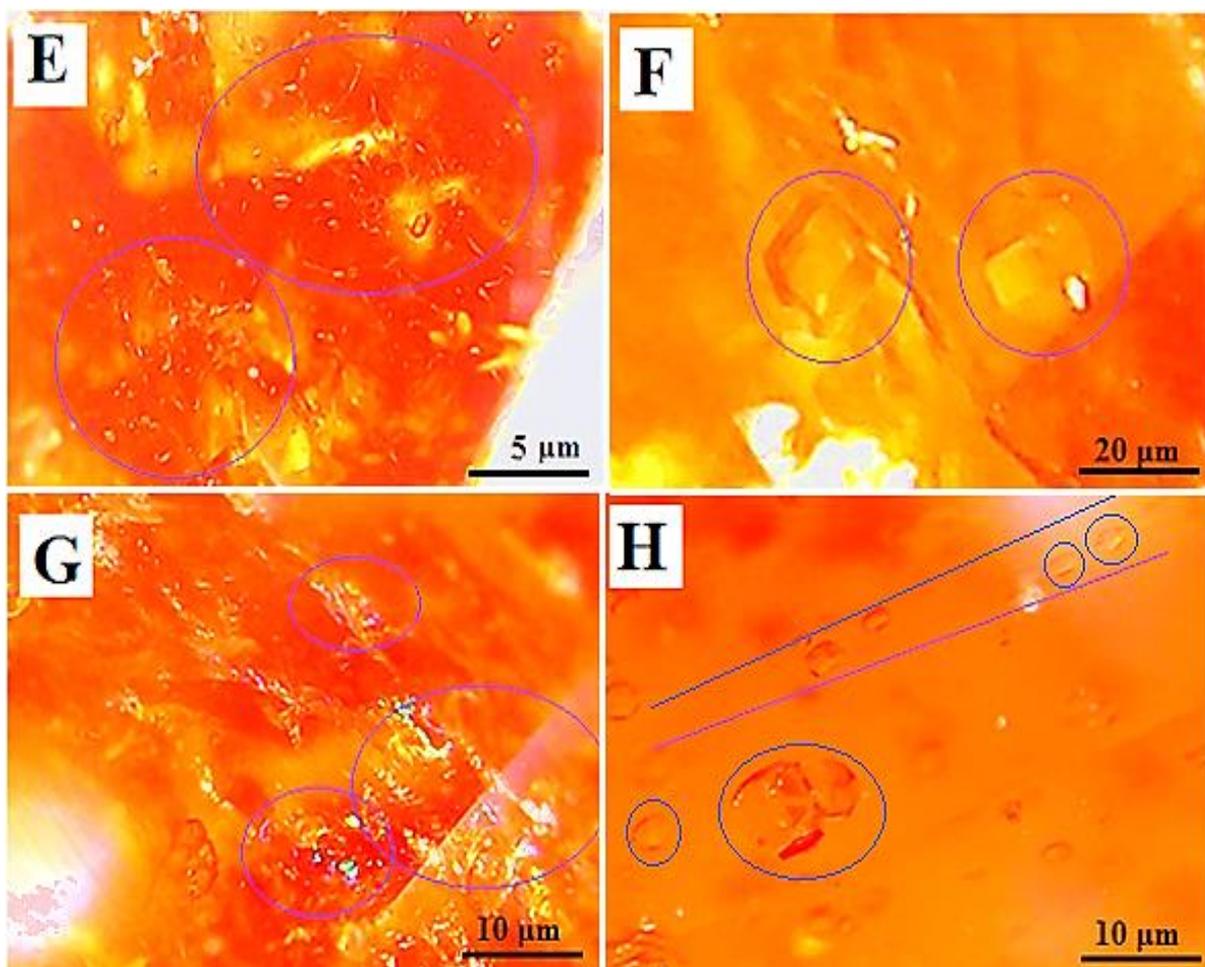
As inclusões sólidas se apresentam em diferentes tipos de formas e coloração, podendo ser da mesma natureza que o mineral hospedeiro ou de outro mineral. Por vezes, podem ser facilmente reconhecidas por seu hábito, cor, brilho e outras características ópticas visualizadas ao microscópio gemológico. Estas inclusões podem ser formadas antes, ao mesmo tempo ou posteriores aos minerais hospedeiros. As inclusões fluidas presentes mostram que durante o resfriamento e cristalização, alguns fluidos contendo voláteis ficaram retidos na estrutura da granada, 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) (Franco & Campos, 1971) (Hughes, 2017) As linhas de crescimento são uma “marca” do crescimento mineral e as fraturas internas uma consequência de algum regime compressivo que os cristais foram submetidos após a cristalização.

Figura 40: Inclusões nas amostras de granadas estudadas do Município de Quixeramobim.

A) Inclusões sólidas (pequenas e escuras) com orientação em spessartitas (Red 4). B) Inclusões sólidas de cristais de zircão na grossulária (Orange Red 3). C) Inclusão de cristal anedral (sem forma) em grossulária (Orange Red 3). D) Fraturas preenchidas (cicatrizadas) de cor amarelada em grossulária (Orange Red 3). E) Inclusões fluidas anastomosadas (sem forma), monofásicas e sem orientação em grossulária (Orange Red 3). F) Inclusões sólidas de cristais euédricos de zircão na grossulária (Orange Red 3). G) Iridescência (jogo de cores) em grossulária (Orange Red 3). H) Fluidos monofásicos (transparentes e circulares) com leve orientação e cristal de zircão em grossulária (Orange Red 3).



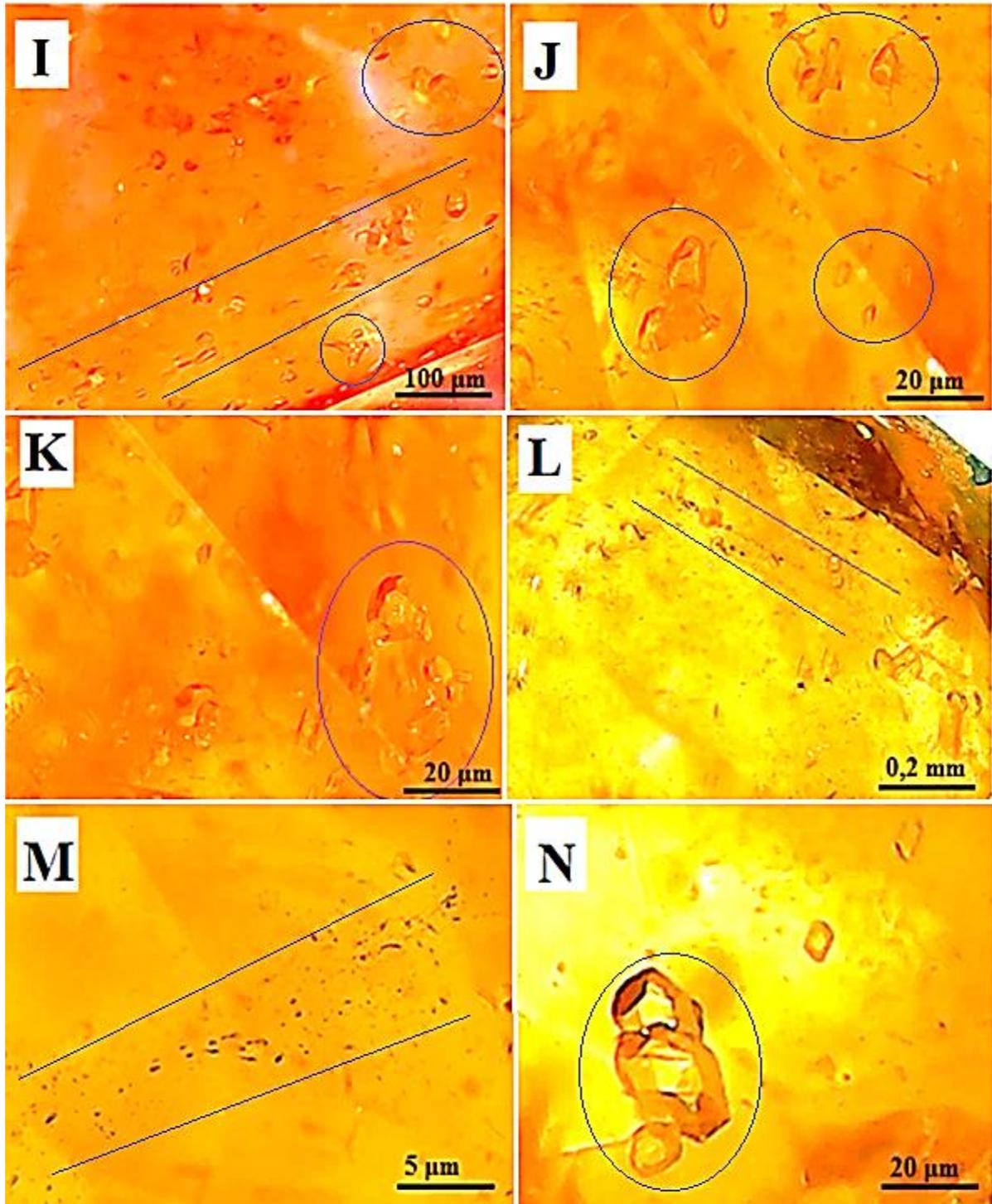


Fonte: autor

Foram visualizadas inclusões sólidas e fluidas monofásicas com leve orientação em granada grossulária (Figura 41I – Dark Golden Rod 2), e as mesmas feições, mas sem orientação em uma gema da mesma cor (Figura 41J – Dark Golden Rod 2). Foram identificadas inclusões sólidas bem formadas de cristais de zircão em grossulária (Figura 40K – Chocolate 2) e fluidos orientados (Figura 41L – Chocolate 2); estes fluidos possuem configuração de inclusões singenéticas. Também foram encontrados fluidos com leve orientação (Figura 41M – Chocolate 2) e cristais de zircão bem formados e agrupados (Figura 41N – Chocolate 2); as granadas grossulárias (internamente) contém comumente grande quantidade de cristais prismáticos, curtos e arredondados (Franco, 1959). Com estes dados pode-se posteriormente efetuar um estudo, mais detalhado, para investigar os processos de formações destas gemas.

Figura 41: Inclusões nas amostras de granadas estudadas do Município de Quixeramobim.

I) Inclusões sólidas e fluidas monofásicos com leve orientação em granada grossulária (Dark Golden Rod 2). J) Estas feições no exemplo anterior, mas sem orientação em uma gema da mesma cor (Dark Golden Rod 2). K) Inclusões sólidas bem formadas de cristais de zircão (Chocolate 2). L) fluidos orientados (Chocolate 2). M) Fluidos monofásicos com leve orientação (Chocolate 2). N) cristais de zircão bem formados e agrupados (Chocolate 2).

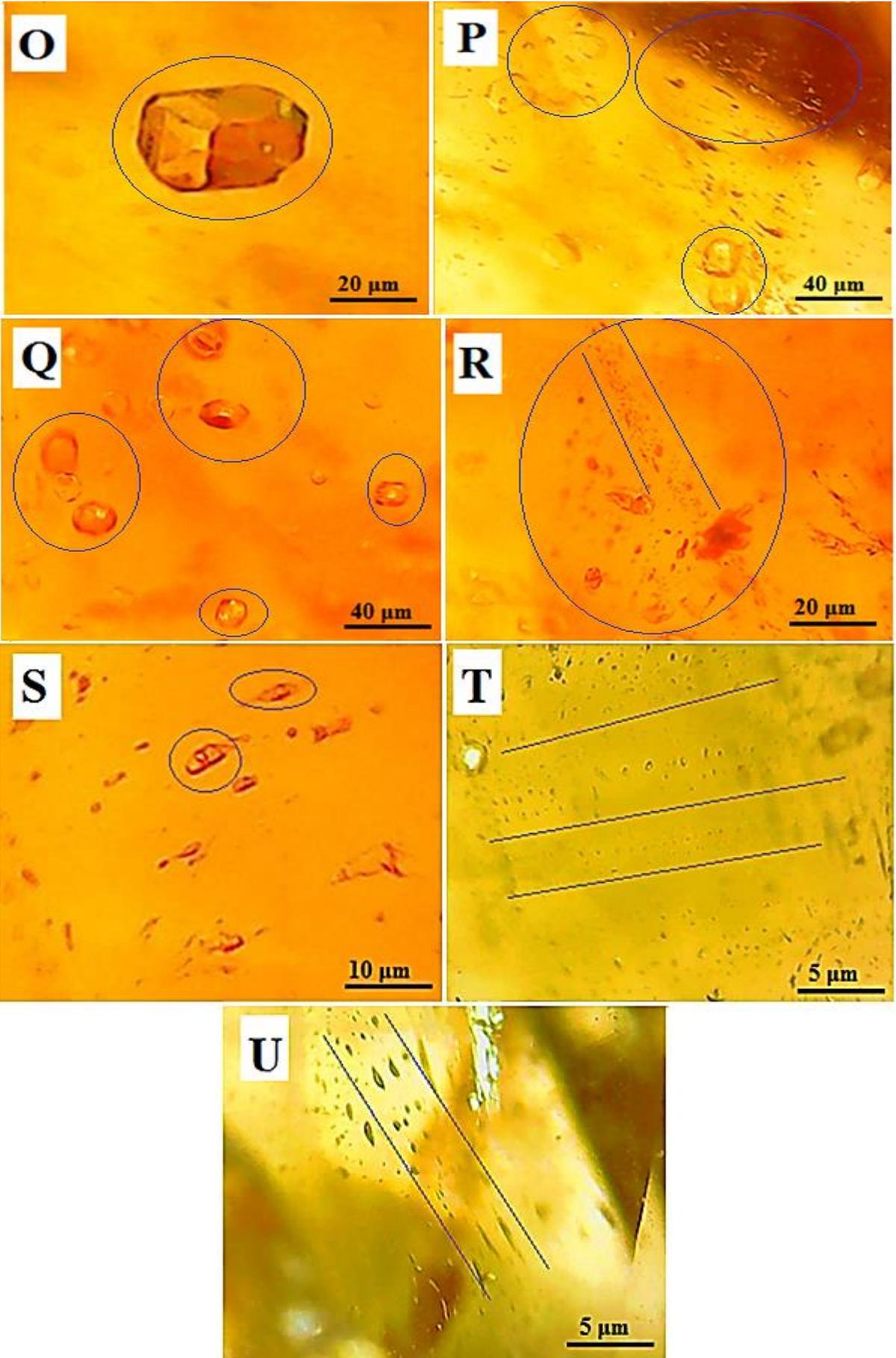


Fonte: autor

Essas inclusões de cristais podem ser encontradas isoladas (Figura 42O – Chocolate 2); além de apresentar fluidos agrupados em meio aos cristais (Figura 42P – Chocolate 2). As inclusões de zircão podem ser encontradas agrupadas, mas sem nenhuma orientação ou configuração, possuem distribuição irregular (Figura 42Q – Chocolate 2). Nesta mesma amostra são encontradas inclusões fluidas monofásicas com orientação (Figura 42R – Chocolate 2). Raramente são encontrados fluidos bifásicos (líquido e gás) nas amostras de granadas grossulárias, estes possuem uma distribuição irregular (Figura 42S – Chocolate 2). Em uma gema analisada (Golden Rod 1) deste mineral existem abundantes inclusões fluidas monofásicas e com nítida orientação (Figura 42T – Golden Rod 1) (Figura 42U – Golden Rod 1). Além disto, estudos mais específicos como os realizados por Beurlen *et al* (2002) utilizando a microtermometria nas inclusões fluidas, podem servir como traçadores mais específicos e precisos de proveniência destas granadas.

Figura 42: Inclusões nas amostras de granadas estudadas do Município de Quixeramobim.

O) Inclusões de cristais de zircão isoladas (Chocolate 2). P) Fluidos agrupados em meio aos cristais de zircão (Chocolate 2). Q) Cristais de zircão agrupadas, mas sem nenhuma orientação ou configuração (Chocolate 2). R) Inclusões fluidas monofásicas com orientação (Chocolate 2). S) Fluidos bifásicos (líquido e gás) (Chocolate 2). T) Inclusões fluidas monofásicas e com nítida orientação (Golden Rod 1). U) Fluidos monofásicas e com nítida orientação (Golden Rod 1).



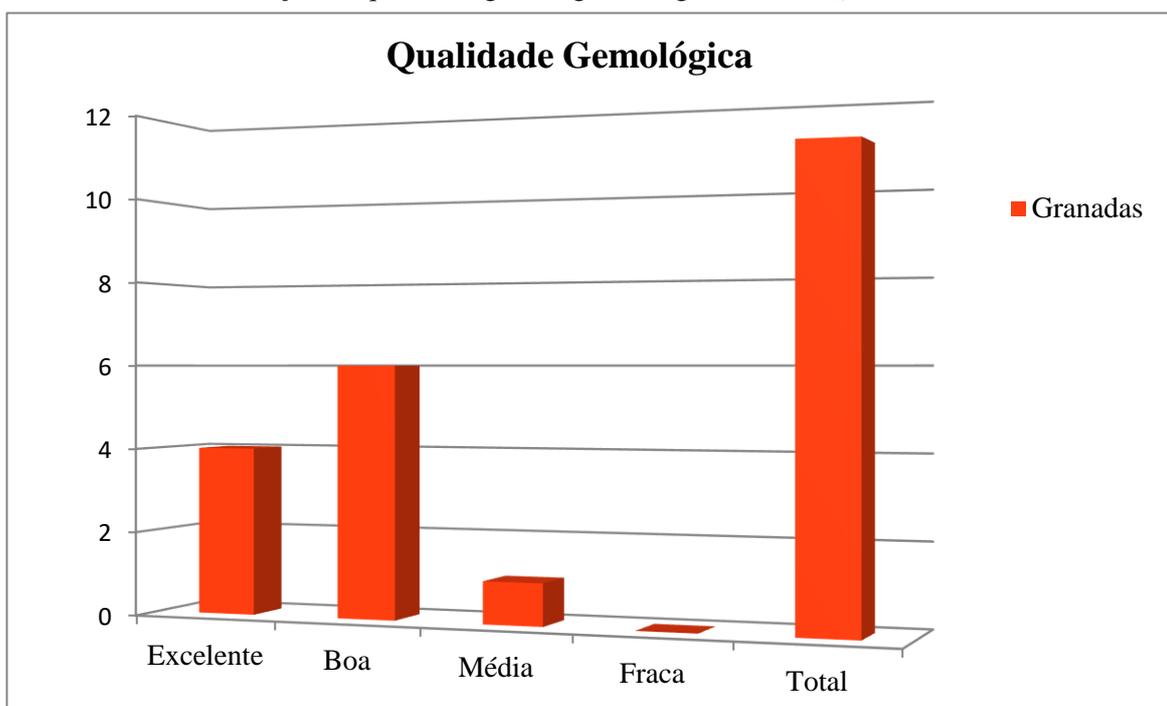
7.3.3 Diafaneidade, Qualidade Gemológica e Valor Comercial

A análise da diafaneidade dos exemplares se deu por meio da visualização de um objeto (ponta de uma caneta) através das granadas. Por definição as amostras transparentes possuem a imagem com contorno e nitidez bem definida, nas semitransparentes a nitidez não é tão visível, enquanto que nas translúcidas o contorno é definido e a nitidez é quase ausente, nas 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, estas feições interferem na passagem e propagação da luz nas granadas, interferindo na visualização das imagens e em alguns casos na saturação ou tonalidade da gema.

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 21). 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”, posteriormente o valor em dólar das amostras foi reajustado para dezembro de 2020 de acordo com a inflação. Entre as onze gemas analisadas, dez são transparentes e uma é translúcida. Em exemplares com elevado teor de inclusões (sólidas e fluidas), principalmente sólidas (Orange 2), estas podem reduzir a propagação da luz deixando a gema com a cor menos acentuada ou até mesmo intensificar determinados comprimentos de onda mudando a saturação e tonalidade, isto pode ser visto em uma gema Orange 2.

As granadas entre 1,25 quilate (ct) e 2 ct possuem as melhores notas gemológicas em relação às demais, o que já era esperado em gemas, peças menores tendem a possuir uma qualidade superior as amostras de tamanho maior. Isto ocorre em razão destas possuírem uma matiz (cor) mais “pura” e uniforme; enquanto que as demais têm uma tonalidade e saturação mais distante da ideal. Coincidentemente a pior nota (4,50) é do maior exemplar (Violet Red 4) pesando 5 ct; isto deve-se ao fato desta primeira gema possuir uma grande quantidade de inclusões e possuir uma saturação um pouco menos intensa. Os maiores valores comerciais (\$ 525,52; 420,41 e 360,36) são das gemas de maior peso (com exceção da Red 4 de 5 ct), e não das peças de melhor nota. Isto se deve ao fato destas gemas com elevados valores possuírem uma boa nota e tamanho considerável, enquanto que as granadas com notas elevadas possuem pequenos tamanhos (Gráfico 17).

Gráfico 17: Distribuição da qualidade gemológica das granadas de Quixeramobim - CE.



Fonte: autor

Os dados da qualidade gemológica e os valores de mercado foram compilados em uma tabela (Tabela 20), sendo notável o elevado preço que as amostras de maior tamanho possuem em relação às demais, mesmo que possuam notas menores. Este maior valor é consequência do tamanho das amostras e não da sua qualidade. As gemas com as notas gemológicas mais altas possuem valores inferiores aos das amostras de notas inferiores; em detrimento do tamanho superior destas gemas de qualidade inferior; gemas com mais quilates (ct) tendem a valer mais que os exemplares com pouco ct. O exemplar vermelho mais pesado (Violet Red 4) possui um dos piores valores comerciais (\$211,79), possuindo como nota um 4,50; enquanto que a outra gema vermelha Red 4 tem um valor em \$ 91,07 com uma nota gemológica de 8,5, o valor atrelado a esta gema é semelhante ao do mineral Violet Red 4, pois mesmo possuindo uma nota alta o exemplar Red 4 pesa apenas 1,5 ct, enquanto que a outra gema vermelha (Violet Red 4) têm quase 4 vezes o peso da spessartita de excelente qualidade; existindo uma espécie de compensação neste caso, no qual uma granada tem qualidade e tamanho reduzido, enquanto que a outra tem qualidade baixa e tamanho considerável para que ao fim o tamanho compense a qualidade. A granada (Chocolate) de maior valor (\$ 525,52) possui a nota gemológica 7,25. Enquanto que as gemas com maiores notas (8,75 e 8,50) são respectivamente uma spessartita (Red 4) e uma grossulária (Golden Rod 1), possuem como valor comercial \$ 91,07 e \$ 300,03; esta diferença de preço ocorre, pois grossulárias são

valiosas aos olhos do mercado frente assim como as spessartitas e também, em razão, desta granada grossulária pesar 0,5 ct a mais que a spessartita em questão. Importante salientar que estes valores correpodem aos preços que chegam no consumidor final, já em joalherias e as gemas já em peças montadas (jóias).

Tabela 20: Qualidade gemológica das granadas de Quixeramobim e valor de mercado.

Peso (ct)	Cor da amostra	Qualidade Gemológica	Nota Gemológica	Preço em dólar (2022)
1,5	Spessartita (Red 4)	Excelente	8,75	91,07
5,0	Spessartita (Violet Red 4)	Média	4,50	211,79
3	Grossulária (Orange Red 3)	Boa	6,75	360,36
3,5	Grossulária (Orange Red 3)	Boa	6,75	420,41
1,5	Grossulária (Dark Orange 3)	Boa	7,50	113,51
1,25	Grossulária (Dark Golden Rod 2)	Excelente	8,25	170,87
2	Grossulária (Chocolate 2)	Excelente	8,00	300,03
2,5	Grossulária (Chocolate 2)	Boa	7,50	264,26
3,5	Grossulária (Chocolate 2)	Boa	7,25	525,52
1,25	Grossulária (Orange 2)	Boa	7,00	98,02
2	Grossulária (Golden Rod 1)	Excelente	8,50	300,03

Fonte: autor

7.3.4 Polariscópio Gomes

Após analisar as 11 amostras no laboratório de Gemologia TN utilizando o Polariscópio Gomes, foram constatadas algumas anomalias. 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 11 gemas exibiram comportamentos atípicos que não se encaixam nestas definições. As duas granadas spessartitas não exibem comportamento de extinção em nenhum momento, estas ficam o tempo todo permitindo a passagem da luz. Em minerais isotrópicos (formados no sistema cristalino cúbico, como as granadas) não existe a passagem da luz, logo ficam o tempo todo escuros (comportamento chamado de “extinto”), ocasionalmente podem exibir uma pequena passagem de luz nas bordas, gerando uma falsa anisotropia. Para este caso (falsa anisotropia), a passagem de luz é ocasionada por algum elemento químico atípico na rede cristalina, por possuir padrões químicos que forçam a célula do cristal a ficar no seu “limite de estabilidade”, modificando um pouco a sua estrutura original, que permite uma passagem significativa de luz. No caso das granadas birrefringentes, a dupla refração ocorre em razão da presença do cálcio (Ca) e não por causa do sistema cristalino propriamente dito (Shtukenberg *et al.* 2001) (Shtukenberg *et al.* 2005) (Deer *et al.*, 2010) (Klein & Dutrow, 2012). A presença deste elemento causa uma pequena deformação na estrutura cristalina das granadas, o que causa um retardo e divisão da luz. Isto ocasiona a birrefringência, mas não é o suficiente para causar o fenômeno do pleocroísmo; em razão deste elemento (Ca) modificar a cela unitária e não o sistema cristalino do mineral. Deste modo as células unitárias que deveriam possuir uma única orientação, acabam por possuir mais de uma direção (orientação) de vibração da luz, fenômeno parecido ocorre nas geminações (Carls Bad, Baveno, Albita, Periclina, Lei da Albita-Periclina) observadas em lâmina petrográfica. O cátion Ca somado as condições de formação das granadas grossulárias ocasiona um defeito linear helicoidal, no qual o retículo cristalino passa a ter defeitos estruturais ao longo de um eixo que não estaria presente no arranjo; logo, será causado um deslocamento na estrutura cristalina da granada. A presença de um defeito linear permite que um cristal deforme sob tensão, pelo deslizamento destes defeitos em uma escala atômica ao longo da estrutura (Klein & Dutrow, 2012).

No caso da ausência da extinção, houve uma deformação (ocasionada por algum evento geológico) na rede cristalina das granadas, modificando as células. Desta forma, ao invés de ficarem o tempo todo “extintas”, permitem a passagem da luz em tempo integral. Por exemplo, as granadas spessartitas são típicas de xistos granatíferos resultantes do

metamorfismo regional de sedimentos argilosos, é utilizada como um mineral zonal em regiões com este tipo de rochas e que passaram por metamorfismo progressivo (Deer *et al.*, 2010).

Todas as 9 granadas grossulárias exibem características atípicas; um mosaico de interferência (Apêndice 5). Os exemplares não exibem uma figura de interferência, ao invés disto, uma mistura confusa das cores originais que formam o caráter óptico de um mineral, exibindo as cores roxo, azul, amarelo e azul esverdeado. Esta anomalia é causada por uma forte deformação da rede cristalina, ocasionada por algum evento geológico; fenômeno raríssimo em minerais de uma forma geral e um caso raro em granadas grossulárias, andraditas e uvarovitas. Deste modo as células unitárias que deveriam possuir uma única orientação, acabam por possuir mais de uma direção (orientação) de vibração da luz; um fenômeno parecido é o da geminação (em lâmina delgada) em feldspatos (mais precisamente os tipos albita e periclina) no qual o mineral possui diferentes direções de vibração da luz. Ademais, a química mineral ou eventos deformacionais (ou ambos) alteraram o tamanho de algumas células unitárias; desta forma as grossulárias birrefringentes possuem ao menos duas células com tamanhos e direções de vibração diferentes, ao mesmo tempo que ainda pertencem ao sistema cúbico. A grossulária é, comumente, encontrada em rochas calcárias metamorfozadas térmica e regionalmente, também ocorrendo em rochas que tenham passado por metassomatismo cálcico; a ocorrência de grossulária em zonas de metamorfismo regional de calcários impuros é menos comum do que no caso de metamorfismo de contato (Deer *et al.*, 2010). A presença do átomo de Ca na uvarovita, grossulária e andradita pode as tornar birrefringentes (Shtukenberg *et al.* 2001) (Shtukenberg *et al.* 2005) (^{2.1}Arem & Clark, 2023), a presença de um mosaico de interferência corrobora e permite uma melhor compreensão da dupla refração anômala. Pois, minerais naturalmente com birrefringência possuem figura de interferência, estas granadas possuem uma birrefringência e um caráter e sinal óptico sob a forma do mosaico de interferência.

Este mosaico de interferência, nos quesitos interpretativos se assemelha vagamente a figura do tipo Relâmpago nos minerais uniaxiais e a figura Normal Óptica em minerais biaxiais. No primeiro caso, o eixo óptico do mineral está paralelo a platina; no segundo caso o corte no mineral é feito perpendicular a normal óptica. Em ambos os casos, as isóginas não apresentam contornos definidos ou nítidos (Zukov, 1967) (Fujimori & Ferreira, 1987) (Bloss, 1999) de modo que se torna muito difícil determinar o caráter e principalmente o sinal óptico nestes casos; em razão da complicada determinação da posição das isóginas e cores de soma e subtração nos quadrantes. No caso do mosaico de interferência, este reconhecimento é

inexistente devido a ausência de uma posição fixa das cores de soma e subtração (existindo um mosaico de cores). De modo que é possível determinar, em algum aspecto, as isóginas, mas não a posição das cores e conseqüentemente a posição dos raios (Nesse, 2004) (Machado & Nardy, 2016).

A presença deste mosaico de interferência, obtido pelo Polariscópio Gomes, evidencia uma anormalidade na rede cristalina das granadas grossulárias analisadas; esta anormalidade também pode ser complementada pela birrefringência e ausência de pleocroísmo em todas as amostras; tornando este polariscópio um equipamento de excelente uso e eficiência para ser utilizado conjuntamente com o refratômetro e dicróscópio. Evidenciando que o Polariscópio Gomes pode ser um instrumento que detecta deformações na rede cristalina de um mineral.

7.3.5 Química Mineral

A química mineral dos minerais da região do distrito pegmatítico Solonópole-Quixeramobim permite compreender e explicar as correlações existentes nas propriedades gemológicas; além de justificar os valores aferidos no índice de refração, birrefringência, densidade relativa, espectro de absorção e a intensidade do pleocroísmo e fluorescência. A química é a principal responsável pela intensidade das bandas de intensidade Raman, com as quantidades dos elementos sendo as agentes causadoras. Em relação à cristaloquímica, os dados químicos permitem a quantificação dos elementos identificados pelo difratômetro de raios-X em monocristal; além de justificar e explicar alguns valores captados gemologicamente (índice de refração, birrefringência, densidade relativa, espectro de absorção e pleocroísmo).

Pelo método do EDS no microscópio de varredura eletrônica (MEV), a composição química obtida para as granadas spessartitas vermelhas foi $Mn_3Al_2Si_3O_{12}$ e $Ca_3Al_2Si_3O_{12}$ para as amostras de grossulária laranjas e amarela. Os elementos químicos presentes e suas quantidades (Tabela 21) influenciam diretamente nas várias características das granadas, como cor, índice de refração, densidade relativa e inclusões; o mesmo não ocorre nas granadas mais próximas geograficamente das estudadas, as grossulárias da Paraíba (Ferreira, *et al* 2006). Neste estudo, foram utilizadas onze amostras, mas um maior número de análises químicas em mais exemplares tornaria a correlação mais perceptível. Os dados citados nesta última tabela não chegam a 100%, em razão de fatores como voláteis, água e limitação na máquina de detecção.

A fórmula geral para os minerais do supergrupo granada é $\{X_3\}[Y_2](Z_3)\phi_{12}$, onde X, Y e Z referem-se a sítios dodecaédrico, octaédrico e tetraédrico, respectivamente, e ϕ é O, OH ou F. Esses elementos entram e ocupam posições específicas dentro do sítio cristalino (Deer *et al*, 2010) (Grew *et al*, 2013). Foi feita uma média para as duas granadas vermelhas em razão de possuírem valores muito próximos. Semelhante às turmalinas da região de Quixeramobim (Oliveira *et al*, 2020), as granadas analisadas possuem quantidades relevantes de CaO, especialmente as grossulárias. Como esperado, as gemas Red 4 e Violet Red 4 possuem baixa quantidade de CaO (< 0,5%) quando comparada a outras amostras, além de possuírem os maiores valores 6,7 % de Fe entre as 11 amostras, no entanto estas duas spessartitas possuem uma quantidade considerável 1,2% de PbO₂ e grandes quantidades 21% de MnO; estes dois elementos não são encontrados nas outras 9 gemas (grossulárias) analisadas.

Foi feita uma média para as 3 granadas alaranjadas (Orange Red 3, Orange Red 3 e

Dark Orange 3), pois ambas têm cor, índice de refração, densidade relativa e conteúdo químico semelhantes; a quantidade de FeO 4,4% nesses espécimes é inferior ao das granadas vermelhas (spessartitas) (Tabela 20). Foi feita uma média para as 5 granadas laranjas (Dark Golden Rod 2, as 3 gemas Chocolate 2 e a Orange 2) utilizando os mesmos critérios elencados acima; a quantidade de FeO 2,56% nesses espécimes é inferior ao das granadas alaranjadas (grossulárias). A granada grossulária amarela (Golden Rod 1) possui 1,27 % de FeO, o menor entre todas as amostras. Além disso, um gráfico (Gráfico 18) mostra a correlação envolvendo a cor das granadas e o FeO, quanto maior a quantidade de FeO mais vermelha será o exemplar e quanto menor mais amarela ela será; para melhorar a visualização do gráfico 20, o valor Wt% (Peso total) foi multiplicado por 100. Ademais, existe uma correlação entre cor, índice de refração, densidade relativa e as quantidades de FeO nas granadas. No qual, quanto maior a quantidade desse elemento, maior o índice de refração, a densidade relativa e a intensidade da cor nas granadas. Pois o FeO é o elemento mais denso dentre os presentes nas granadas de Quixeramobim, e esta mesma substância influencia a cor das granadas (Dana e Hurlbut Jr., 1985) (Nassau, 1983) (Diamond News, 2006) (Arem & Clark, 2023). A quantidade de CaO nas 9 grossulárias oscila entre 28,47% e 40,19%, além de não apresentar nenhuma correlação com as propriedades gemológicas ou com os demais elementos químicos.

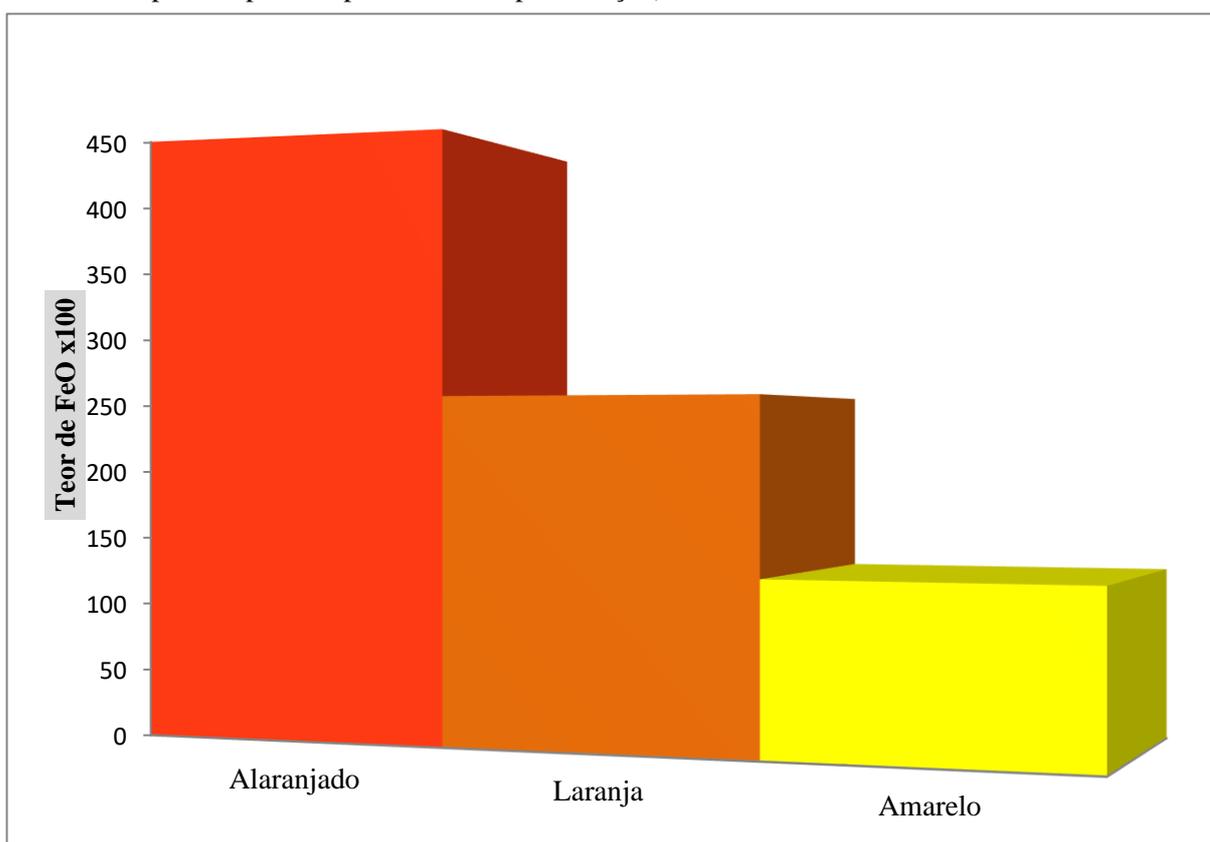
A química mineral das granadas de Santa Luzia (Paraíba), geograficamente as granadas mais próximas das gemas deste estudo, diverge das quantidades das gemas da região do Trapiá (Quixeramobim); além das quantidades dos elementos químicos serem divergentes, as amostras de grossulária deste estudo não apresentam quantidades de TiO₂, MnO e MgO (Ferreira *et al*, 2006).

Os teores químicos de 2 dos 3 principais elementos presentes nas granadas spessartitas estudadas são condizentes com o padrão mundial, com as seguintes quantidades de Al₂O₃ em 29% e SiO₂ em 40% apresentando valores próximos da literatura mundial. A normalidade é 20% para Al₂O e 36% para SiO₂. A quantidade de MnO presente nas amostras estudadas é 1/2 da normalidade, possuindo apenas 21%, quando a normalidade é 40%; ademais, o PbO₂ (encontrado em 1,2% nas gemas) não é normalmente encontrado em spessartitas (Roberts *et al*, 1990) (Laurs *et al*, 2001) (Deer *et al*, 2010), sendo um elemento traço muito raro. Enquanto quantidades e correlações envolvendo o FeO são uma característica bastante peculiar das amostras da região. As ligações envolvendo o FeO e o MnO estão associadas à sua compatibilidade geoquímica, tais como: peso atômico ponto de fusão, densidade, capacidade térmica, eletronegatividade e raio atômico; todas estas características citadas são

muito próximas nos dois elementos. O Pb não possui a compatibilidade do Fe e Mn, apenas o raio atômico do Pb tem alguma proximidade com os dois elementos citados; desta forma, por possuir raios atômicos ligeiramente semelhantes (20% maior) o Pb entrou no sistema cristalino da spessartita substituindo o Fe ou o Mn (Klein & Dutrow, 2012). Esta situação ocorreu, pois o líquido magmático que gerou as granadas vermelhas possivelmente não era tão rico em FeO ou MnO.

Os teores químicos dos 3 principais elementos presentes nas granadas grossulárias estudadas são condizentes com o padrão mundial; com Al_2O_3 em 20-29% e SiO_2 em 34-38% e o CaO em 28-40% apresentando valores próximos da literatura mundial; cujo a normalidade é 22% para Al_2O_3 , 40% para SiO_2 e 37% de CaO. A quantidade de CaO (28-30%) presente em algumas amostras de grossulárias estudadas está um pouco abaixo da normalidade, quando o comum é uma quantidade em torno de 40% (Roberts *et al*, 1990) (Deer *et al*, 2010) (Urosevic *et al*, 2018).

Gráfico 18: Correlação entre a cor e a quantidade de FeO nas granadas de Quixeramobim (Teor de FeO multiplicado por 100 para melhor representação).



Fonte: autor

Tabela 21: Componentes químicos das amostras de granada de Quixeramobim - CE.

Amostras/ Grupo/Teores químicos médios em %	O	Si	Al	Mn	Fe	Pb	Ca
(Red 4) e (Violet Red 4) Spessartita $Mn_3Al_2Si_3O_{12}$	47,718	21,052	15,476	11,271	03,593	0,668	0,222
(Orange Red 3) (Orange Red 3) e (Dark Orange 3) Grossulária $Ca_3Al_2Si_3O_{12}$	50,79	17,30	10,41	0	2,20	0	19,30
(Dark Golden Rod 2) 3x (Chocolate 2) e (Orange 2) Grossulária $Ca_3Al_2Si_3O_{12}$	42,413	22,942	16,265	0	01,16	0	16,86
(Golden Rod 1) Grossulária $Ca_3Al_2Si_3O_{12}$	41,887	22,232	17,16	0	0,585	0	18,136
ÓXIDOS							
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	FeO	PbO ₂	CaO
(Red 4) e (Violet Red 4) Spessartita $Mn_3Al_2Si_3O_{12}$		40,18	29,52	21,50	6,85	1,27	0,42
(Orange Red 3) (Orange Red 3) e (Dark Orange 3) Grossulária $Ca_3Al_2Si_3O_{12}$		34,36	20,40	0	4,50	0	40,19
(Dark Golden Rod 2) 3x (Chocolate 2) e (Orange 2) Grossulária $Ca_3Al_2Si_3O_{12}$		38,76	29,49	0	2,56	0	28,47
(Golden Rod 1) Grossulária $Ca_3Al_2Si_3O_{12}$		38,12	29,65	0	1,27	0	30,28

Fonte: autor

Com base nas propriedades gemológicas e parâmetros químicos, as duas granadas vermelhas são predominantemente spessartita e as demais são do grupo grossulária (Anderson, 1984) (Roberts *et al*, 1990) (Laurs *et al*, 2001) (Shtukenberg *et al*. 2001) (Shtukenberg *et al*. 2005) (IBGM/DNPM, 2009) (Deer *et al*, 2010) (Grew *et al*, 2013) (Urosevic *et al*, 2018) (Schumann, 2020) (^{2.1, 2.2, 2.3}Arem & Clark, 2023). Todos esses dados citados foram organizados em uma tabela (Tabelas 20) como produto final da química mineral das granadas de Quixeramobim (Brasil).

7.3.6 Organização Cristalológica

As informações cristalográficas obtidas pelo difratômetro de raios-X em monocristal das gemas analisadas estão ligadas e correlacionadas com as densidades das gemas e o índice de refração (o raio ordinário, n_o) das amostras. Os dados obtidos ajudam a embasar ainda mais e permitem a visualização das ligações obtidas com o espectroscópio Raman; tornando possível contextualizar e melhorar a compreensão das ligações. A química mineral obtida pelo método EDS permite a quantificação dos elementos captados pelo difratômetro; além de justificar e explicar os valores dos pesos moleculares, densidade relativa e volumes das células unitárias mensurados pelo difratômetro. Deste modo, os dados obtidos pelo Raman e difratômetro em monocristal estão estritamente ligados aos obtidos pelo EDS e que por sua vez se relacionam e justificam várias das características gemológicas (índice de refração, birrefringência, densidade relativa, espectro de absorção e pleocroísmo).

Por meio da difração de raios-X em monocristal nas granadas grossulária (não havia amostras das spessartitas) foi possível obter a fórmula química, peso molecular, dimensões da célula unitária, volume da célula e densidade relativa; além da organização cristalográfica molecular.

Os minerais do grupo das granadas são particularmente característicos das rochas metamórficas, mas podem também ocorrer em alguns tipos de rochas ígneas e, como grãos detríticos, em sedimentos. Contudo, raramente, ocorre uma granada cuja composição química corresponda à de qualquer dos termos finais, dependendo o nome atribuído do tipo "molecular" dominante na amostra. As granadas podem ser divididas em duas séries - pirlspita (piropo, almandina, spessartita) e ugrandita (uvarovita, grossulária, andradita). A malha unitária das granadas contém oito unidades de fórmulas químicas $X_3Y_2Z_3O_{12}$. A estrutura consiste em tetraedros ZO_4 alternantes com octaedros YO_6 , compartilhando vértices de modo a formar uma rede tridimensional. No interior da rede existem interstícios que podem ser descritos como cubos distorcidos, tendo em cada vértice um oxigênio e albergando no seu interior os íons X. Dentro do grupo das granadas o comprimento da aresta da malha unitária tem uma utilização apreciável como diagnóstico e é de fácil obtenção. Admitindo que a aresta da malha é uma função aditiva das proporções moleculares dos termos finais do grupo das granadas, pode elaborar-se uma fórmula que permita relacionar a aresta da malha com o número e tipo de íons metálicos numa "molécula" particular de granada. Para além dos seis principais grupos de granadas, existem 33 grupos de granadas (Grew *et al*, 2013) combinando alguns elementos como: Ca, Mg, Fe e Mn com um dos quatro metais Al, Fe, Mn e Cr (em

todos os grupos há o domínio de Si na posição tetraédrica) (Quartieri *et al*, 1995) (Rodehorst *et al*, 2002) (Deer *et al*, 2010).

Em termos gerais, as amostras de granadas grossulárias analisadas possuem as mesmas características cristalográficas elencadas acima. Como as 9 granadas grossulárias, desta pesquisa, podem ser agrupadas em 3 grupos (com base na cor) por causa das grandes similaridades em suas propriedades gemológicas; foram selecionadas uma amostra de cada um destes grupos para as análises em monocristal. Estas informações foram adquiridas por meio da difração de raios-X em monocristal, imagens referentes à organização molecular dos sítios cristalinos das granadas Dark Orange 3, Orange 2 e Golden Rod 1 estão representadas pelas figuras 43,44 e 45. A fórmula química obtida é coerente com as fórmulas postuladas em Anderson (1984), Roberts *et al* (1990), Quartieri *et al* (1995), Rodehorst *et al* (2002) Schumann (2006), Deer *et al* (2010), (Urosevic *et al*, 2018) e ^{2.1}Arem & Clark (2023).

O peso molecular está diretamente relacionado aos teores químicos das amostras; conforme ilustrado na tabela 23. A gema Dark Orange 3 possui os seguintes teores químicos na seguinte porcentagem: SiO₂ = 34,36; Al₂O₃ = 20,40; MnO = 0; FeO = 4,50 e CaO = 40,19. A gema Orange 2 detém os seguintes teores químicos na seguinte porcentagem: SiO₂ = 38,76; Al₂O₃ = 29,49; MnO = 0; FeO = 2,56 e CaO = 28,47. A grossulária Golden Rod 1 possui os seguintes teores químicos na seguinte porcentagem SiO₂ = 38,12; Al₂O₃ = 29,65; MnO = 0; FeO = 1,27 e CaO = 30,28. A amostra com maior peso (Dark Orange 3), possui o peso molecular de 480,55 em massa molecular (u), além de 4,50% do elemento de maior densidade em sua estrutura: FeO. A gema Orange 2 possui 472,37 e 2,56% de peso do elemento mais denso de sua estrutura (FeO). A grossulária Golden Rod 1 têm respectivamente, 460,22 e 1,27% de FeO em sua estrutura. Por possuírem as maiores massas dentre os elementos presentes nas amostras; ficou constatado que quanto maior a presença do FeO, maior é o peso molecular do mineral. Contudo, as variações de outros elementos com peso molecular relevante (além de não apresentarem um padrão de quantidade nas gemas) como Al₂O₃ e CaO nas amostras contribuíram para que as diferenças nos pesos moleculares não fossem ainda maiores (Deer *et al*, 2010) (Klein & Dutrow, 2012).

Em relação às dimensões da célula unitária *a* e *b* e *c* são as mesmas, pois se trata de um mineral cristalizado no sistema cúbico e os valores obtidos em Angstrom 11,8699-12,1120 para os eixos cristalográficos “a” “a” e “a”, condizem com Roberts *et al* (1990), Quartieri *et al* (1995), Rodehorst *et al* (2002), Deer *et al* (2010), Urosevic *et al* (2018). Uma vez que os valores tabelados para a granada grossulária são “a” = 11,851-11,880 Å; em que apenas os valores da amostra Golden Rod 1 (12,1120) são ligeiramente superiores a média

mundial.

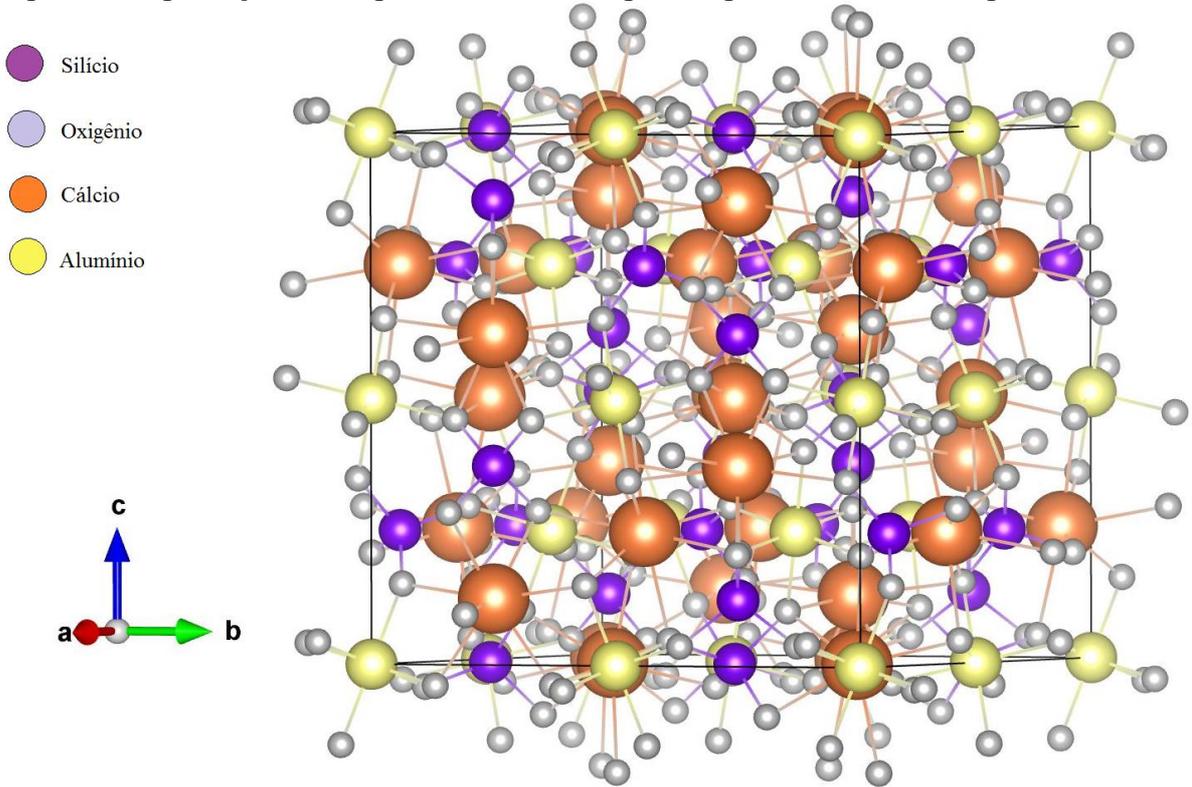
O volume da célula unitária está diretamente ligado com as dimensões das células unitárias, os maiores valores das células unitárias (“a”) 12,1120Å e do volume 1776,5435 ocorrem no mesmo mineral (Golden Rod 1); quanto maior o valor da célula, maior será o volume ocupado; os menores valores das células unitárias 11,8699 Å e do volume 1672,4039 ocorrem no mesmo mineral (Dark Orange 3). A gema Orange 2 possui o valor intermediário de 1675,4067 no volume da célula unitária; além de possuir os eixos “a” = 11,8770 com valores superiores ao da Dark Orange 3 e inferiores ao da Golden Rod 1. Sabe-se que um íon ou grupo iônico pode substituir outro íon ou grupo, ocupando um sítio cristalográfico específico no mineral (Klein & Dutrow, 2012), nas grossulárias isto ocorreu com Fe substituindo o Al. Estas alternâncias e substituições têm impacto direto na organização das células unitárias e seus respectivos volumes, conferindo diferentes valores mesmo que as três gemas sejam grossulárias (Roberts *et al*, 1990) (Quartieri *et al*, 1995) (Rodehorst *et al*, 2002) (Deer *et al*, 2010) (Klein & Dutrow, 2012) (Grew *et al*, 2013) (Urosevic *et al*, 2018).

A densidade das amostras também mostra correlação com os teores químicos, consequentemente com o peso molecular, no qual a gema de maior densidade (Dark Orange 3) possui 3,80 g/cm³, peso de 480,55 e detém 4,50% de FeO (seu elemento mais pesado na estrutura cristalina); sendo os maiores valores dentre os três minerais analisados, ressaltando também a correlação destes fatores nas outras amostras. A amostra Orange 2 possui peso de 472,37, densidade de 3,73 g/cm³ e 2,56% de FeO (seu elemento mais denso); sendo a Golden Rod 1 que possui peso de 460,22, densidade de 3,60 g/cm³ e 1,27% de FeO.

Importante salientar que a densidade relativa calculada nas granadas grossulárias pelo método de raios-X em monocristal 3,60, 3,73 e 3,80 se aproxima bastante dos valores obtidos com a balança hidrostática respectivamente 3,56, 3,68 e 3,76 g/cm³.

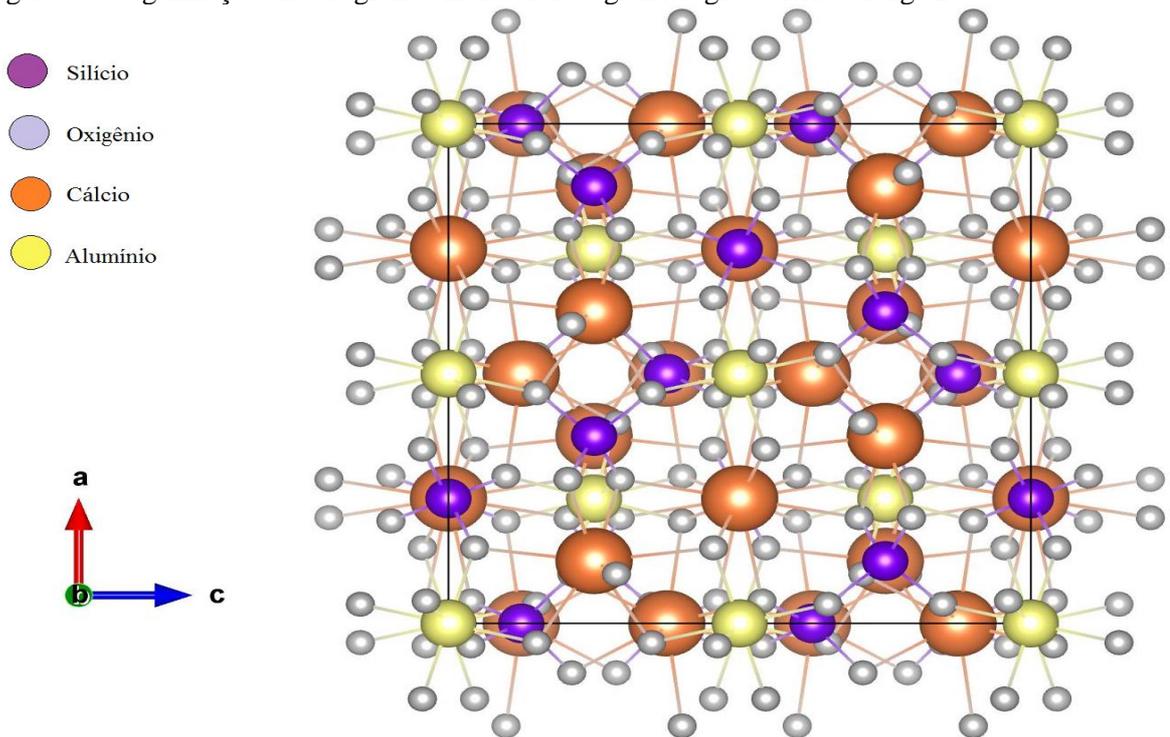
Estes dados obtidos por meio da difração de raios-X em monocristal, tais como: fórmula química teórica, peso molecular, dimensões da célula unitária, volume e densidade (g/cm³) foram agrupados na tabela 22 como parte das análises cristalográficas.

Figura 43: Organização cristalográfica molecular da granada grossulária Dark Orange 3.



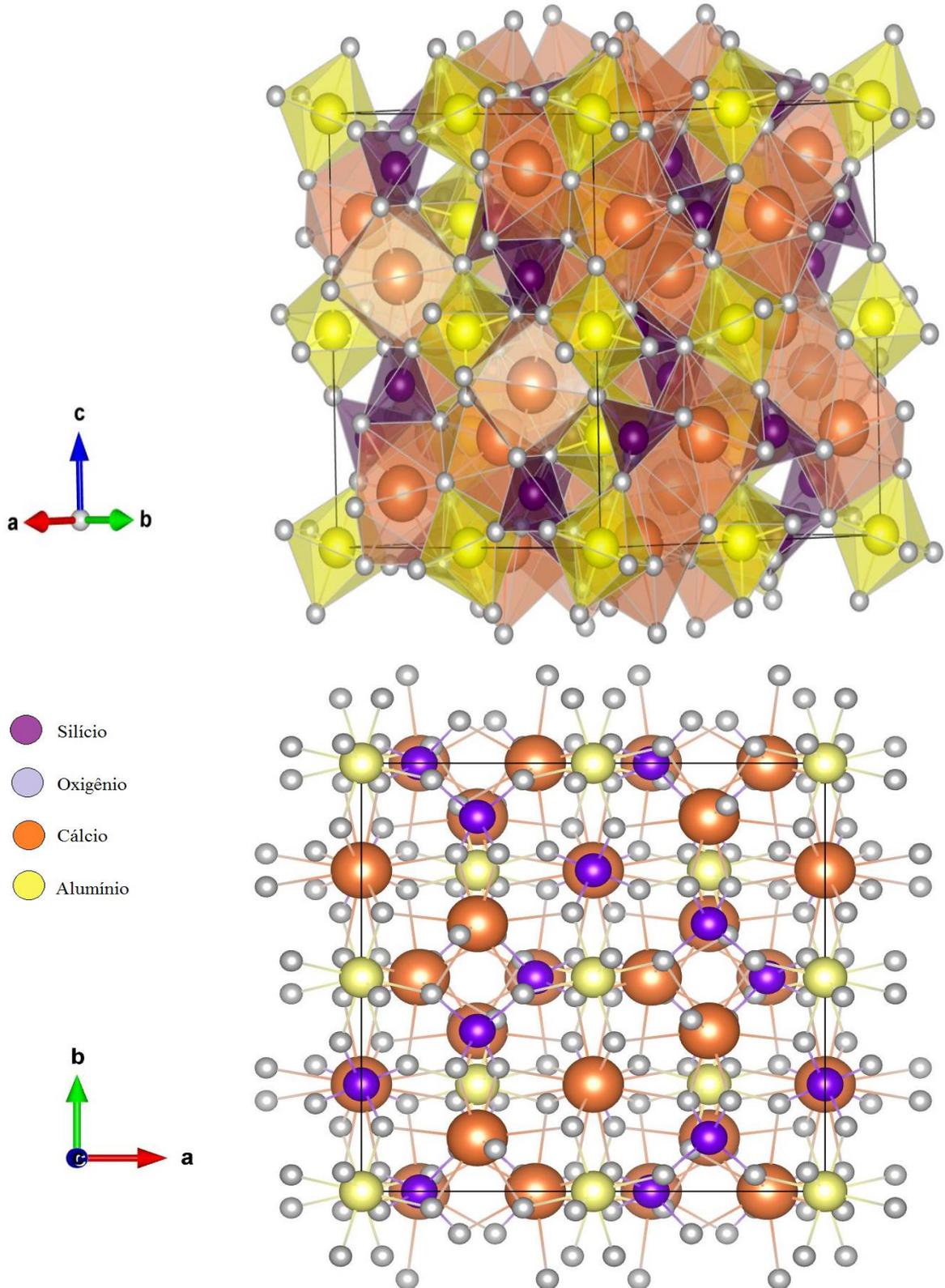
Fonte: autor

Figura 44: Organização cristalográfica molecular da granada grossulária Orange 2.



Fonte: autor

Figura 45: Organização cristalográfica molecular da granada grossulária Golden Rod 1.



Fonte: autor

Tabela 22: Dados obtidos a partir de refinamento da difração de raios-X em monocristal, para amostras de granada grossulária.

Amostra	Dark Orange 3	Orange 2	Golden Rod 1
Fórmula química	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$
Peso molecular	480,55	472,37	460,22
Dimensões da célula unitária Eixo a (Å)	11,8699(7)	11,8770(3)	12,1120(2)
Dimensões da célula unitária Eixo b (Å)	11,8699(7)	11,8770(3)	12,1120(2)
Dimensões da célula unitária Eixo c (Å)	11,8699(7)	11,8770(3)	12,1120(4)
Volume da célula unitária	1672,4039	1675,4067	1776,5435
Densidade (g/cm^3)	3,80	3,73	3,60

Fonte: autor

Os dados do monocristal mostraram que as células unitárias possuem o tamanho padrão para granadas grossulárias, além de o seu sistema permanecer cúbico; contudo eventos geológicos deformacionais da região de Quixeramobim (que é uma área “conturbada” para o crescimento de gemas, devido a intensa atividade geológica no passado) juntamente com o Ca podem ter permitido que algumas células tenham um tamanho um pouco maior que o normal. Shtukenberg *et al.* (2001 e 2005), Rodehorst *et al* (2002), Deer *et al* (2010), Urosevic *et al* (2018), ^{2.1}Arem & Clark (2023) e outros autores afirmam que o Ca pode gerar micro deformações e alterações nas estruturas das granadas grossulárias. Nesta proposta da “Teoria da Birrefringência Anômala” eventos deformacionais com o aditivo do Ca, que entrou em algumas partes do reticulo cristalino, geraram algumas células unitárias com um tamanho levemente superior ao da média. A deformação externa gerada acarretou que algumas células unitárias (de tamanhos desiguais) ficassem com diferentes orientações de vibração, na situação das granadas analisadas pelo menos em duas direções distintas. O Ca somado as condições de formação das granadas grossulária ocasiona um defeito linear helicoidal, no qual o retículo cristalino passa a ter defeitos estruturais ao longo de um eixo que não estaria presente no arranjo; logo, será causado um deslocamento na estrutura cristalina da granada. A presença de um defeito linear permite que um cristal deforme sob tensão, pelo deslizamento destes defeitos em uma escala atômica ao longo da estrutura (Shtukenberg *et al.* 2001) (Shtukenberg *et al.* 2005) (Klein & Dutrow, 2012). Apesar de ainda permanecer no sistema

cúbico, possivelmente têm-se essas granadas grossulária com células unitárias de diferentes tamanhos e diferentes direções de vibração (que podem ou não ser uma consequência de regimes compressivos), um defeito maior no retículo cristalino causado pela deformação também pode estar relacionado. Em que se permanece o sistema cristalino cúbico, mas com uma série de desordens dentro do retículo; o que acarreta em granadas do sistema cúbico, sem dimensões dos eixos cristalográficos ou elementos químicos anômalos, mas que possuem: dupla refração, birrefringência e um “mosaico de interferência”; este último é o resultado direto de diferentes direções de vibração dentro de um mineral. Minerais dos sistemas tetragonal, trigonal e hexagonal geram 3 tipos de figuras de interferência (positivas e negativas para cada figura), minerais dos sistemas ortorrômbico, monoclinico e triclínico geram 7 tipos de figuras de interferência (positivas e negativas para cada figura); estas 10 figuras são resultados de diferentes índices de refração e da mesma direção de propagação da luz dentro do retículo do mineral (Zukov, 1967) (Fujimori & Ferreira, 1987) (Bloss, 1999) (Machado & Nardy, 2016). As grossulárias de Quixeramobim são do sistema cúbico (Tabela 19 e 23), mas não se comportam opticamente como minerais deste sistema; pois não ficam o tempo todo extintas, nem o tempo todo claras no Polariscópio Gomes (características de substâncias isotrópicas), mas também não possuem nenhuma das 10 figuras de interferência dos minerais anisotrópicos, ao mesmo tempo que possuem dupla refração (característica anisotrópica).

7.3.7 Espectroscopia Raman

O espectro Raman apresenta correlações com algumas propriedades gemológicas, como os dados dos espectros de absorção (captados pelo espectroscópio gemológico) e informações dos aspectos internos. As bandas e módulos captados pelo Raman que se referem as ligações químicas podem ser vistos nas imagens obtidas pelo difratômetro de raios-X em monocristal. Existem interligações dos dados cristalográficos juntamente das bandas Raman, os módulos tornam ainda maior a evidência das ligações captadas pelo difratômetro de monocristal. A química mineral também se faz presente e é a principal responsável pela intensidade das bandas de intensidade Raman, com as quantidades dos elementos sendo as intendententes.

A espectroscopia Raman foi utilizada com o intuito de servir como um “finger print” das granadas (spessartitas e grossulárias) do Município de Quixeramobim CE, para constatação das ligações químicas nos minerais, também para evidenciar se as peculiaridades identificadas (birrefringência e densidade relativa) e correlações na caracterização gemológica, podem ser identificadas na espectroscopia Raman.

Como as 9 granadas grossulárias, desta pesquisa, podem ser agrupadas em 3 grupos (com base na cor) por causa das grandes similaridades em suas propriedades gemológicas; foram selecionadas uma amostra de cada um destes grupos para as análises em espectroscopia Raman, além da seleção de 1 amostra de spessartita, de duas. Foram analisadas três amostras de grossulárias (1 alaranjada, 1 laranja e 1 amarela), as posições das bandas e suas intensidades integradas estão relacionadas à ocupação do local composicional; a intensidade da banda 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 as bandas nas amostras de granadas grossulárias e spessartita, estas bandas das grossulárias são em aproximadamente 180, 241, 278, 385, 420, 550 823, 888 e 1046. Na granada spessartita foram visualizadas as bandas em 180, 219, 372, 508, 553, 930 e 1046. As bandas das 4 gemas foram comparadas aos dados das granadas da RRUFF (¹Currier, 2023) (²Currier, 2023) (GIA – 28, 2023) (GIA – 29, 2023) (GIA - 4569, 2023) (GIA – 5796, 2023) (University of Arizona Mineral Museum - 7979,

2023), Gilete & Geiger (1992), Makreski *et al* (2011) e de Kolesov & Geiger (1998), estes indicam as vibrações das principais ligações químicas desses minerais. Na tabela de bandas Raman da RRUFF (2023), Gilete & Geiger (1992), Kolesov & Geiger (1998) e Makreski *et al* (2011) não há um único valor de espectro para cada ligação, existem alguns em valores muito próximos (uma “margem de variabilidade”).

Para as granadas, a banda 180 evidencia uma vibração de SiO₄; as bandas em 219, 241 e 278 representam as ligações entre o Ca e algum metal (Al ou Fe); as bandas em 372 e 385 mostram as rotações tetraedrais de SiO₄; a banda em 420 demonstra os modos rotacionais de SiO₄; as bandas em 550 e 553 ilustram a ligação O-Si-O e as bandas em 930 e 1046 evidenciam alongamentos tetragonais de Si-O (Gilete & Geiger, 1992) (Kolesov & Geiger, 1998) (Makreski *et al*, 2011); estes espectros podem ser visualizados no gráfico 19.

Os exemplares possuem as bandas regulares para este padrão mineral, pois foram comparados com o banco de dados *online* da RRUFF (¹Currier, 2023) (²Currier, 2023) (GIA – 28, 2023) (GIA – 29, 2023) (GIA - 4569, 2023) (GIA – 5796, 2023) (University of Arizona Mineral Museum - 7979, 2023). Diante das condições de análises na espectroscopia Raman obtida na presente pesquisa, não foram encontradas as anomalias nos espectros Raman, diferente do que foi encontrado na caracterização gemológica, geoquímica e cristalográfica das granadas. No entanto, isto se deve ao fato de que não foram encontrados elementos diferentes em sua composição química, com exceção de 1,27% de PbO₂ na spessartita; diferente do que aconteceu com as águas-marinhas da mesma região que possuíam valores expressivos de elementos não comuns em sua composição.

De modo geral, as bandas encontradas até 800 cm⁻¹ são basicamente os mesmos nas quatro granadas. Porém, a spessartita possui duas bandas que as grossulárias não possuem, são eles: 219 e 508. 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 banda aconteça são necessárias energias bem definidas, e que variam para cada substância (Hutchings *et al* 2008). Somado ao fato de que as granadas spessartitas possuem uma composição química diferente das grossulárias (Tabela 23); em que a ausência de MnO está ligado a pelo menos uma destas duas ausências no espectro Raman das grossulárias, pois a faixa de 500 cm⁻¹ está associada a translações de Fe ou Cr-O₆ (Stubna *et al*, 2019) (Gilete & Geiger, 1992).

Tabela 23: Componentes químicos das amostras de granada de Quixeramobim - CE.

Amostras/ Grupo/Teores químicos médios em %	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	FeO	PbO ₂	CaO
(Red 4) e (Violet Red 4) Spessartita Mn ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂	40,18	29,52	21,50	6,85	1,27	0,42
(Orange Red 3) (Orange Red 3) e (Dark Orange 3) Grossulária Ca ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂	34,36	20,40	0	4,50	0	40,19
(Dark Golden Rod 2) 3x (Chocolate 2) e (Orange 2) Grossulária Ca ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂	38,76	29,49	0	2,56	0	28,47
(Golden Rod 1) Grossulária Ca ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂	38,12	29,65	0	1,27	0	30,28

Fonte: autor

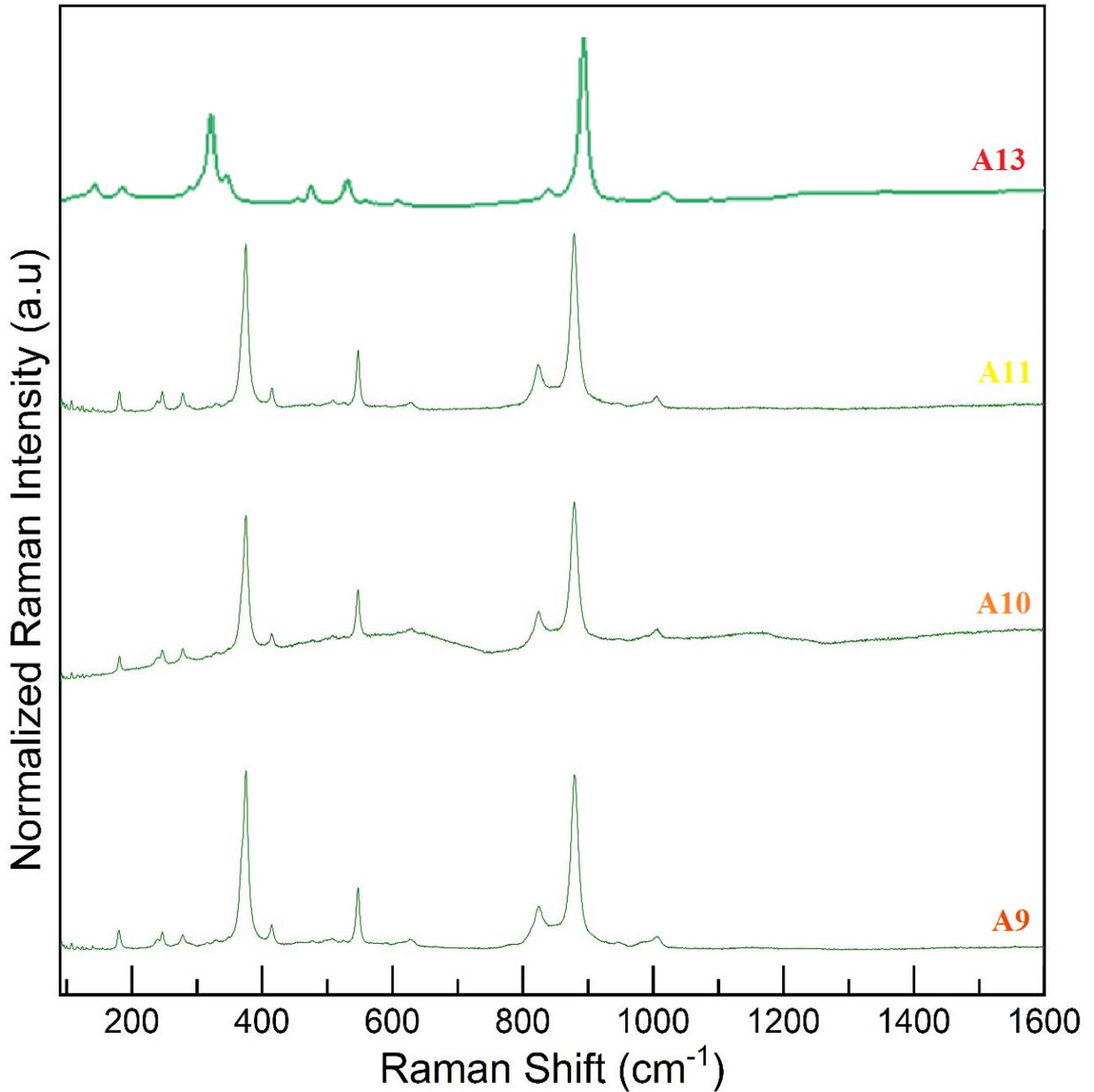
Quando comparados, os espectros obtidos nas três granadas grossulárias são praticamente idênticos, as pequenas diferenças se devem as diferentes quantidades de elementos químicos em suas estruturas, assim como as diferenças sutis em sua organização cristalográfica. Essas similaridades são condizentes a pequena variação na composição química das 3 grossulárias. Dentre os 4 espectros analisados (Gráfico 19), o mais diferente é o da spessartita, por se tratar de outro grupo de granada possui diferentes propriedades gemológicas e geoquímicas, mas ainda sim consideravelmente próximas das grossulárias (Tabela 23); em que a diferença mais notável está na presença de PbO₂ nas spessartitas, a maior quantidade de FeO e a muito inferior quantidade de CaO na estrutura da spessartita em comparação com as grossulárias. Isto era esperado, pois em um mesmo mineral ocorrem variações na composição química (substituições nos íons e oscilações nas quantidades) (Deer *et al*, 2010), bem como a posição que um íon ocupa dentro da estrutura do mineral. As variações composicionais e estruturais cristalinas, da granada são responsáveis pela variedade de cores, grupos e as demais características (^{2.1}Arem & Clark, 2023).

As 3 amostras de grossulária apresentaram bandas em 823, 888 e 1046 cm⁻¹ que indicam alongamentos tetragonais de Si-O (Stubna *et al*, 2019).

Logo, os espectros Raman (Gráfico 19) apresentaram padrões e regularidades quando comparadas com os dados do RRUFF (¹Currier, 2023) (²Currier, 2023) (GIA – 28, 2023) (GIA – 29, 2023) (GIA - 4569, 2023) (GIA – 5796, 2023) (University of Arizona Mineral Museum - 7979, 2023), diferente dos dados obtidos por meio da caracterização gemológica, geoquímica e cristalográfica que mostraram algumas propriedades não comuns para este

grupo mineral, bem como correlações envolvendo as propriedades gemológica, geoquímica e cristalográfica.

Grafico 19: Espectroscopia Raman das granadas grossulárias (cor alaranjada (A9), cor laranja (A10) e cor amarela (A11)) e das granadas spessartitas (A13) do Município de Quixeramobim.



Fonte: Autor

7.3.8 Petrografia

As informações ópticas adquiridas pelo microscópio petrográfico se correlacionam e reforçam os dados obtidos através da caracterização gemológica. Outras informações microscopiamente, de ordem qualitativa, obtidas são da mesma ordem que os dados macroscópicos. Ademais, da mesma forma que os dados ópticos/gemológicos se correlacionam com os dados geoquímicos, cristalográficos e espectroscópicos; os dados ópticos microscópicos também se correlacionam.

Uma lâmina de secção delgada (0,03 mm) foi confeccionada para aferir as propriedades ópticas em escala microscópica das granadas grossulárias de Quixeramobim. Foi selecionada uma amostra do grupo grossulária para a confecção e análise microscópica; pois dentre os dois grupos presentes na região (spessartita e grossulária) as grossulárias mostraram características anômalas na caracterização gemológica.

No sistema de luz natural, a grossulária analisada em lâmina delgada não apresentou nenhuma cor. Ao apresentar ausência de cor isto significa que este exemplar não absorve nenhum comprimento de onda (entre 800-390 nm), tampouco transmite comprimentos de onda. Dada à ausência de cor, a granada analisada não possui absorção e tampoco apresenta pleocroísmo. Cor, absorção e pleocroísmo são três características que frequentemente estão interligadas e em conjunto. A absorção é o resultado direto da intensidade da transmissão (cor percebida pelos órgãos visuais) (Flint, 1965) (Zukov, 1967) (Wahlstrom, 1969) (Heinrich, 1980) (Fujimori & Ferreira, 1987). O exemplar não apresentou clivagem, o que já era esperado, e micro fraturas se fazem presente. A amostra possui hábito anderal em razão da ausência de fácies definidas. A linha de Becke é maior que o meio (balsámo do Canadá), em razão do índice de refração da grossulária (~1,740) ser superior ao líquido (1,520) que está em contato com as suas bordas. O relevo deste mineral é alto, pois o índice de refração do mineral analisado é muito superior ao do meio circundante, deste modo o contorno do grão se torna espesso e muito visível. Quanto maior esta diferença, mais visível será a borda do mineral. O grão de grossulária analisado não apresenta alterações ou inclusões (Fujimori & Ferreira, 1987) (Bloss, 1999) (Nesse, 2004) (Klein & Dutrov, 2012) (Machado e Nardy, 2016).

As características elencadas acima, pertencentes ao sistema de luz natural, são condizentes e dentro da normalidade do mineral granada (grupo grossulária) (Kerr, 1987) (Frank, 2018).

No sistema ortoscópico, em que se faz necessário cruzar os nicóis, foram obtidos mais

dados deste exemplar. O centro da granada fica o tempo extinto (escuro), não possuindo cor de interferência, birrefringência, tipo de extinção; não sendo possível determinar as posições dos raios lento e rápido, o sinal de alongação, geminação ou zoneamento. Contudo, as bordas do mineral possuem a cor de interferência cinza e uma birrefringência em 0,009; a tabela e cores de birrefringência de Michel Levy pode ser vista no Apêndice 3. No entanto esta peculiaridade é recorrente em granadas que estão passando por troca catiônica, essa mudança de carga ou de elementos da estrutura cristalina podem ser notados nas bordas das granadas (Wahlstrom, 1969) (Heinrich, 1980) (Fujimori & Ferreira, 1987) (Bloss, 1999) (Nesse, 2004) (Klein & Dutrov, 2012) (Machado e Nardy, 2016).

As características elencadas acima, pertencentes ao sistema ortoscópico, são condizentes e dentro da normalidade das granadas grossulária (Kerr, 1987) (Frank, 2018).

No sistema conoscópico, com os aditivos da lente de Amici-Bertand e da lente condensadora, somado a maior objetiva do microscópio não permitiram a visualização da figura de interferência da granada; neste sistema, os raios de luz incidentes (provenientes do polarizador) sobre a grossulária não são paralelos como nos outros sistemas, mas divergentes. Utilizando este sistema a figura não pode ser visualizada, ao tentar formar a figura nas bordas que são anisotrópicas, esta mostrava similaridades com as figuras do tipo relâmpago e do tipo normal óptica; não sendo possível classificar o caráter ou sinal óptico. A grossulária analisada não possui isocromáticas (Flint, 1965) (Zukov, 1967) (Wahlstrom, 1969) (Heinrich, 1980) (Fujimori & Ferreira, 1987).

As características citadas acima, pertencentes ao sistema conoscópico, são condizentes e dentro da normalidade do mineral granada (Kerr, 1987) (Frank, 2018).

Algumas características obtidas microscopicamente, tais como: relevo (índice de refração), ausência do pleocroísmo, birrefringência, ausência do caráter e sinal óptico; mostraram divergência das obtidas macroscopicamente por meio da caracterização gemológica e através do polariscópio Gomes. Os índices de refração, birrefringência (nas bordas) e a ausência de pleocroísmo são condizentes pelos meios macro e microscopicamente; no polariscópio Gomes as gemas apresentaram características anisotrópicas formando uma figura de interferência (Mosaico de Interferência), enquanto microscopicamente isto não pode ser visualizado.

Todos os dados obtidos, e mencionados acima, por meio da caracterização óptica petrográfica foram organizados na tabela 24. Ademais, foi confeccionada uma prancha (Prancha 4) contendo fotografias de algumas características mencionadas nos parágrafos acima.

Prancha 4 – Fotomicrografia A – Ausência de cor na granada analisada, no sistema de luz natural; evidenciando o alto relevo; Foto B – Extinção da granada com o acessório de quartzo-gipso, evidenciando cores de soma (azul) e subtração (amarelo) na bordas do grão.

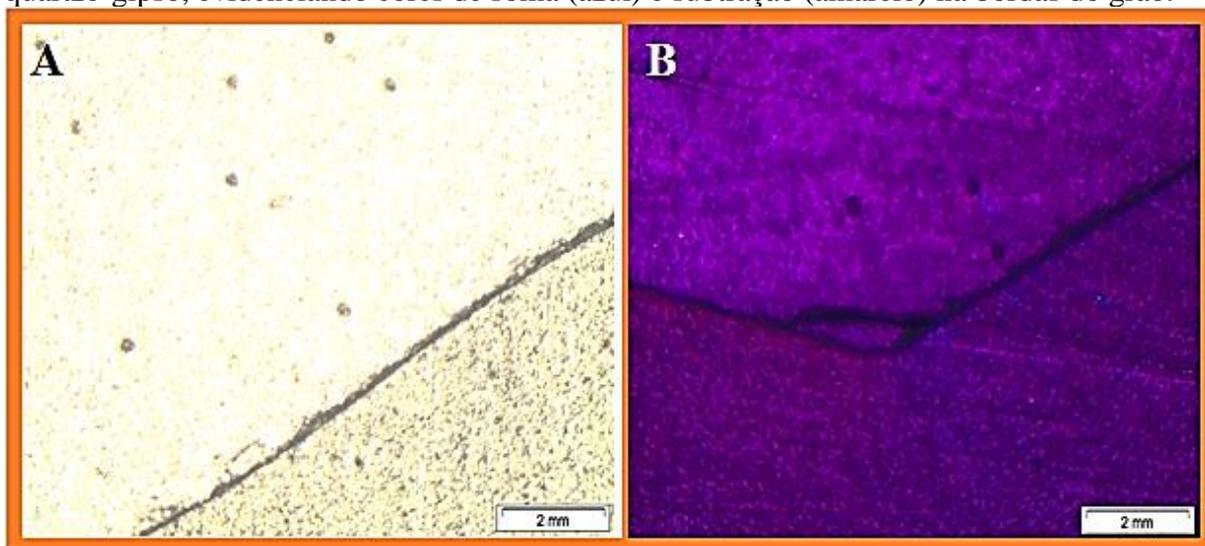


Tabela 24: Propriedades ópticas em lâmina delgada das granadas de Quixeramobim – CE.

MINERAL		PROPRIEDADES ÓPTICAS
L U Z N A T U R A L	Cor	Incolor
	Pleocroísmo	Ausente
	Absorção	Ausente
	Clivagem	Ausente
	Fratura	Presente
	Hábito	Anedral
	Linha de Becker	Maior que o meio
	Relevo	Alto
	Alterações	Ausente
	Inclusões	Ausente
S.	Cor de Interferência	Bordas Cinzas, Centro Escuro (extinto)
O	Birrefringência	Bordas 0,009, Centro sem birrefringência

R T O S C Ó P I C O	Tipo de Extinção	Ausente
	Posição dos Raios Lento e Rápido	Impossível Diagnosticar
	Sinal de Elongação	Impossível Diagnosticar
	Posição dos Raios Ordinário e Extraordinário	Impossível Diagnosticar
	Geminação	Ausente
	Zoneamento	Ausente
S. C O N O S C Ó P I C O	Caráter	Bordas Anisotrópicas
	Sinal Óptico	Ausente
	Isocromática	Ausente
	Ilustração	Ausente

Fonte: autor

7.4 AMETISTA

7.4.1 Propriedades gemológicas

Após a caracterização gemológica das ametistas da região do Coque (Município de Quixeramobim), os dados adquiridos foram comparados com a base de dados mundial da International Gem Society (IGS) (³Arem & Clark, 2023) e em diversas obras de grande reconhecimento e credibilidade mundial, obras desde 1971 até 2020 (Franco & Campos, 1971) (Hurlbut & Switzer, 1979) (Nassau, 1980) (Webster, 1981) (Anderson, 1984) (Schumann, 2006) (IBGM/DNPM, 2009) (Bonewitz, 2013) (Schumann, 2020). Para averiguar se as ametistas da região possuem características novas para serem incorporadas aos dados mundiais, ou a fim de embasar melhor estes dados, ou aumentar a gama de possíveis características para este mineral, ou identificar anomalias que caracterizem bem estes minerais como sendo provenientes de Quixeramobim (Ceará). Além disto, estas gemas tiveram seus dados comparados com os das ametistas de Santa Quitéria (Oliveira *et al*, 2020), também do Estado do Ceará, pois em um mesmo Estado podem ter algumas ocorrências do mesmo mineral, mas com propriedades e características divergentes. Logo, é importante caracterizar as ocorrências em nível municipal, não apenas estadual.

Ficou constatado que as gemas de Quixeramobim possuem a cor roxa, mas não com a saturação ideal e muito valorizada pelo comércio; diferente dos minerais da região de Santa Quitéria que possuem esta cor desejada e que também ocorrem no estado do Ceará (Oliveira *et al.*, 2020). A cor mais valorizada para ametistas é um roxo intenso e vívido (³Arem & Clark, 2023).

Para a caracterização óptica destes minerais, dada a importância do refratômetro foram utilizados dois refratômetros (*Rayner Dialdex*) e realizadas seis leituras com cada uma das gemas; todas as 12 medições (seis em cada refratômetro) para cada uma das 10 ametistas foram as mesmas (Apêndice – 1 anexo). Além disto, ambos os instrumentos estavam devidamente calibrados após o uso de um quartzo (cristal de rocha) com índices de refração conhecidos. Os 10 cristais de ametistas são uniaxiais positivos. Minerais que se cristalizam no sistema tetragonal, hexagonal e trigonal são uniaxiais. Possuem o raio ordinário (*no*) e extraordinário (*ne*), o primeiro é sempre invariável e possui valor fixo que não se altera quando se realiza novas leituras, o segundo (*ne*) possui valores que se alteram em uma ou algumas casas decimais a cada nova leitura. Os valores de *no* nas ametistas analisadas sempre são menores que os valores de *ne*, razão esta que torna o sinal óptico destas como positivo; valor de *ne* maior que *no*. O índice de refração das ametistas analisadas, aferido com o

refratômetro, possui um raio ordinário (no) com valores que oscilam levemente entre 1,540 (amostras Plum 3 e Medium Orchid 4) e 1,544 (gema Dark Orchid 4) ; os valores do raio extraordinário (ne) variam entre 1,548 (Plum 3) e 1,555 (Dark Orchid 4). A birrefringência dos minerais da região de Quixeramobim (CE) varia entre 0,008 e 0,011, valores dentro da média. Diferente dos valores entre 0,017 e 0,020 das ametistas provenientes de Santa Quitéria (Ceará) (Oliveira, et al 2020). Todas as gemas analisadas são uniaxiais positivos e com índice de refração e birrefringência dentro da normalidade (Franco & Campos, 1971) (Anderson, 1984) (IBGM/DNPM, 2009) (Bonewitz, 2013) (Schumann, 2020) (³Arem & Clark, 2023).

O dicroísmo das gemas, ou pleocroísmo, que é analisado com o dicroscópio mostrou a presença desta característica com baixa intensidade nas dez amostras. Estas gemas possuem o pleocroísmo classificado com fraco em detrimento da baixa absorção, característica comum em ametistas (Hurlbut & Switzer, 1979) (Nassau, 1980) (Webster, 1981) (Anderson, 1984) (Schumann, 2006) (IBGM/DNPM, 2009) (Bonewitz, 2013) (Schumann, 2020) (³Arem & Clark, 2023). Isto ocorre, pois um dos raios está sendo mais refletido e menos absorvido devido aos aspectos cristalquímicos das amostras, diminuindo a compensação dos raios ordinário (no) e extraordinário (ne), quanto menor esta compensação (diferença) menor será a absorção observada (pleocroísmo) (Anderson, 1984).

O uso de uma lâmpada de luz ultravioleta permitiu a observação da fluorescência, que não pode ser constatada em nenhuma ametista analisada, o que já era esperado para estes minerais (Franco & Campos, 1971) (Nassau, 1980) (Webster, 1981) (Anderson, 1984) (Schumann, 2020) (³Arem & Clark, 2023). Este dado mostra que os exemplares não possuem elementos ativadores de fluorescência ou fosforescência, como cromo e elementos terras raras. Estes elementos químicos associados à luminescência em minerais, quando na presença de uma lâmpada UV é energizado e salta para a próxima camada de sua valência, retornando após um período de tempo e repetindo este ciclo enquanto a exposição à luz UV (ultravioleta) durar; ao ser energizado e retornar para sua camada de valência normal e estável o elemento libera a energia acumulada em forma de luz.

A ausência do espectro de absorção captado pelo espectroscópio é algo de praxe em ametistas (Hurlbut & Switzer, 1979) (Nassau, 1980) (Schumann, 2006) (IBGM/DNPM, 2009) (Schumann, 2020); raramente este mineral exhibe algum espectro e quando ocorre o valor obtido é de 550-520 nm para os exemplares (³Arem & Clark, 2023). Os espectros são uma medida qualitativa de certos elementos químicos, no qual metais de transição (Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} , Mn^{3+} , Cu^{3+} , Mg^{2+} e etc) possuem uma transmissão em determinados comprimentos de onda.

A densidade relativa, aferida com o uso da balança hidrostática apresentou resultados dentro do que esperado. Quatro das dez gemas possuem a densidade média um pouco acima de 2.65 g/cm^3 (densidade média das ametistas), uma ametista (Dark Orchid 4) detém um valor de 2,67 e as três amostras (Dark Orchid 2) possuem $2,66 \text{ g/cm}^3$; estes valores levemente acima da média são absolutamente normais, é atribuído uma pequena margem de variação de 0,03 na densidade deste grupo mineral, em razão das inclusões nas gemas (Lameiras *et al*, 2009) (Deer *et al*, 2010) (Schumann, 2020) (Arem & Clark, 2023). As outras gemas com as cores Medium Orchid 4, Dark Orchid 4 e Dark Orchid 3 possuem densidades que vão de 2,63 a $2,65 \text{ g/cm}^3$, o que é normal como já foi elencado acima. Porém uma ametista (Plum 3) detém uma densidade de $2,61 \text{ g/cm}^3$, este trata-se de um exemplar de cor lilás e não roxa como as outras nove ametistas analisadas. Como o elemento cromóforo é o Fe^{3+} (Anderson, 1984) é possível que a gema Plum 3 tenha este elemento em menor quantidade que as outras ametistas (o que é reforçado pela cor menos intensa desta amostra), logo a menor quantidade de Fe^{3+} ocasiona uma cor menos evidente e menor densidade relativa da ametista.

Com o uso do polariscópio simples foi possível conferir a anisotropia das ametistas, característica já anteriormente comprovada pela presença da birrefringência, atestada pelo refratômetro. Além da anisotropia, percebeu-se a ausência da geminação “Lei do Brasil” nas dez amostras, fenômeno cuja presença é relativamente comum para ametistas encontradas em solo brasileiro (Crowningshield *et al*, 1986), porém apesar de comum nos minerais brasileiros, não ocorre nas gemas de Quixeramobim.

Não existe nenhuma correlação envolvendo índice de refração, birrefringência ou densidade relativa nas amostras.

Logo, estes dados citados foram compilados em uma tabela (Tabela 25), como parte da caracterização gemológica.

A análise da diafaneidade das gemas se deu por meio da visualização de uma ponta de uma caneta através das ametistas, nas amostras transparentes a imagem possui contorno e nitidez bem definido, nas semitransparentes a nitidez não é tão notável enquanto que nas translúcidas o contorno é definido e a nitidez é quase ausente. A análise mostrou que todas as dez amostras são transparentes. Todos estes dados elencados encontram-se na Tabela 26.

Os resultados obtidos por meio dos equipamentos citados anteriormente, somados aos dados aferidos em pesquisas bibliográficas permitiram a confecção de uma tabela com as propriedades ópticas das gemas (Tabela 25). A composição química geral das amostras também foi compilada em tabela (Tabela 28); os dados são o padrão para ametistas, porém a presença de alumínio em uma amostra bicolor é algo pouco fora do comum.

Tabela 25: Características gemológicas dos cristais de ametista de Quixeramobim – CE.

Amostra/ Propriedades	Diafaneidade	Índice de refração e Birrefringência	Caráter e sinal óptico	Pleocroísmo	Espectro de absorção	Fluorescência	Densidade Relativa	Inclusões e aspectos internos
(Dark Orchid 4)	Transparente	1,555 – 1,544; 0,011	Uniaxial positivo	Presente: Fraco	Não diagnosticável	Ausente	2,67 g/cm ³	Fraturas, raramente em paralelo; Inclusões sólidas e fluidas, por vezes orientadas; líquidos por vezes agrupados e orientados, inclusões de outros minerais (possivelmente quartzo); linhas de crescimento; centro de cor alaranjada; minúsculas inclusões sólidas orientadas (possivelmente de hematita ou goethita); inclusões fluidas quase que perpendiculares as linhas de crescimento.
(Medium Orchid 4)	Transparente	1,551 – 1,542; 0,009	Uniaxial positivo	Presente: Fraco	Não diagnosticável	Ausente	2,65 g/cm ³	Abundantes inclusões sólidas (possivelmente hematita ou goethita); raras inclusões fluidas com leve orientação.
(Dark Orchid 4)	Transparente	1,550 – 1,541; 0,009	Uniaxial positivo	Presente: Fraco	Não diagnosticável	Ausente	2,64 g/cm ³	Linhas de crescimento em duas cores; Inclusões sólidas (majoritariamente de coloração escura e de tamanho reduzido) agrupadas e por vezes com leve orientação;

								raramente inclusões fluidas; pequenos tubos orientados; fluidos raramente agrupados.
(Medium Orchid 4)	Transparente	1,552 – 1,544; 0,008	Uniaxial positivo	Presente: Fraco	Não diagnosticável	Ausente	2,64 g/cm ³	Linhas de crescimento com grande diferença de tonalidade; Inclusões sólidas por vezes agrupadas; inclusões fluidas, raramente com orientação.
(Medium Orchid 4)	Transparente	1,550 – 1,540; 0,010	Uniaxial positivo	Presente: Fraco	Não diagnosticável	Ausente	2,63 g/cm ³	Linhas de crescimento; Inclusões sólidas e fluidas; sólidos por vezes agrupados.
(Plum 3)	Transparente	1,548 – 1,540; 0,008	Uniaxial positivo	Presente: Fraco	Não diagnosticável	Ausente	2,61 g/cm ³	Fraturas; Centro de cor alaranjado com formato triangular; Inclusões sólidas e fluidas; raramente pequenos fluidos orientados e paralelos; inclusões sólidas por vezes agrupadas (possivelmente hematita ou goethita).
(Dark Orchid 3)	Transparente	1,552 – 1,542; 0,010	Uniaxial positivo	Presente: Fraco	Não diagnosticável	Ausente	2,64 g/cm ³	Fraturas; Inclusões sólidas raramente agrupadas; inclusões fluidas, inclusões de outros minerais (possivelmente quartzo); linhas de crescimento; raramente inclusões bifásicas; raramente centro de cor roxa mais intensa que o restante do

								mineral.
(Dark Orchid 2)	Transparente	1,550 – 1,540; 0,010	Uniaxial positivo	Presente: Fraco	Não diagnosticável	Ausente	2,66 g/cm ³	Raramente fraturas; Inclusões sólidas e fluidas.
(Dark Orchid 2)	Transparente	1,552 – 1,541; 0,011	Uniaxial positivo	Presente: Fraco	Não diagnosticável	Ausente	2,66 g/cm ³	Centros de cor; Inclusões sólidas (possivelmente de hematita ou goethita); inclusões fluidas raramente orientadas.
(Dark Orchid 2)	Transparente	1,553 – 1,542; 0,011	Uniaxial positivo	Presente: Fraco	Não diagnosticável	Ausente	2,66 g/cm ³	Centros de cor; Inclusões sólidas (possivelmente de hematita ou goethita); inclusões fluidas.

Fonte: autor

7.4.2 Feições Internas

Ao microscópio gemológico, as amostras foram submetidas a análises em busca de fraturas, inclusões (sólidas, líquidas ou gasosas) e linhas de crescimento, características comuns em ametistas (IBGM, 2009), os minerais mais comuns encontrados como inclusões em ametistas são hematita e goethita (³Arem & Clark, 2023), estes aspectos e feições internas são importantes para auxiliar quando necessário nos casos de proveniência mineral.

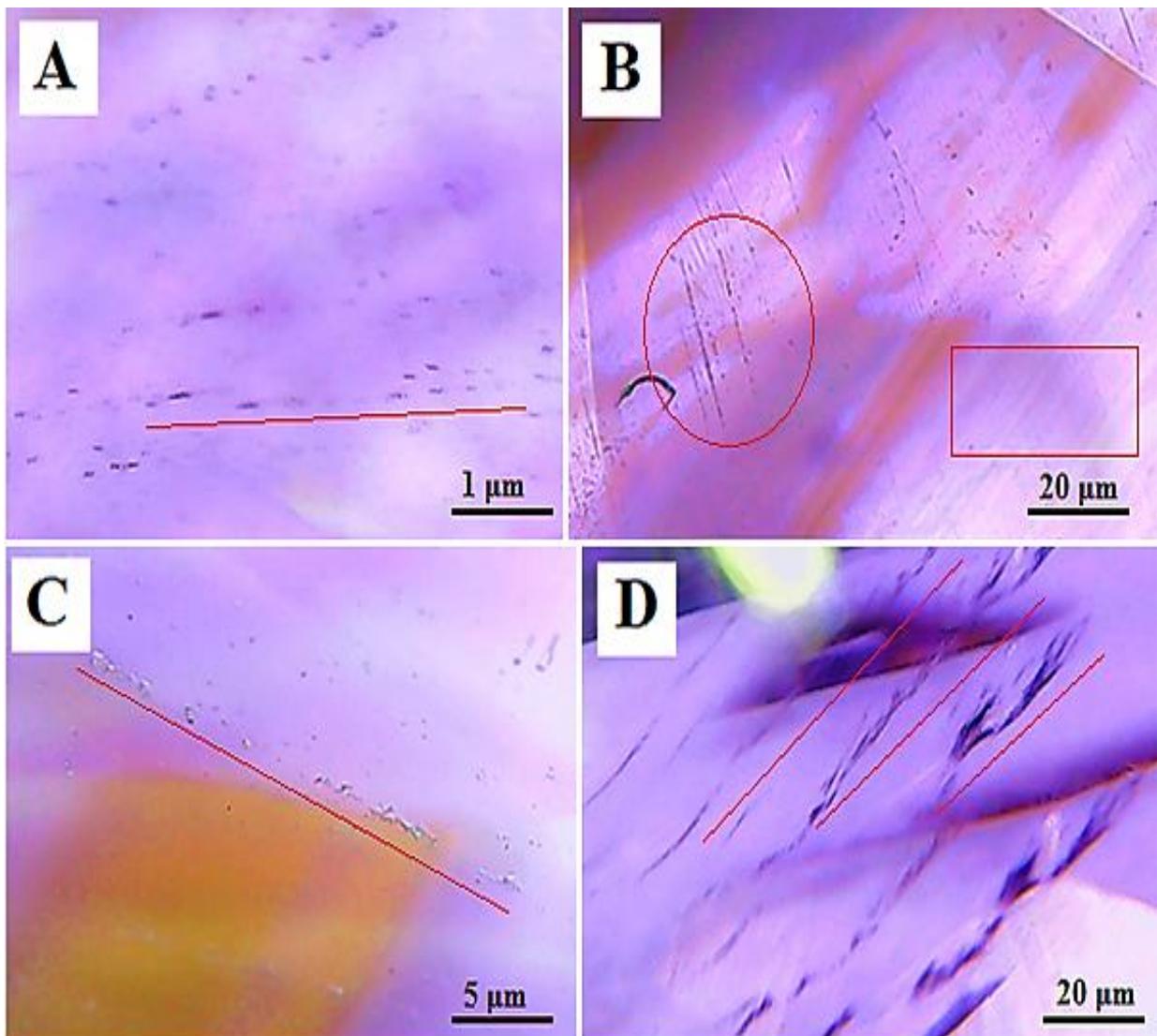
As ametistas de Quixeramobim são caracterizadas predominantemente por inclusões sólidas levemente orientadas (Figura 46A - Dark Orchid 4), linhas de crescimento (Figura 46B - Dark Orchid 4), recorrentes fluidos monofásicos com orientação (Figura 46C - Dark Orchid 4) e fraturas (Figura 46D - Dark Orchid 4). Além disto, ocorrem (ainda que muito raramente) fluidos orientados paralelos entre si e perpendiculares à linhas de crescimento (Figura 46B - Dark Orchid 4). Estas feições exibindo orientação possuem características de materiais singenéticos, formados ao mesmo tempo em que a gema hospedeira. Também podem ser vistas inclusões sólidas e fluidas monofásicas com orientação (Figura 46E - Dark Orchid 4) e com distribuição avulsa (Figura 46F - Dark Orchid 4). Linhas de crescimento (Figura 46G - Medium Orchid 4) e fluidos monofásicos sem orientação se fazem presentes (Figura 46H - Medium Orchid 4). Estes elementos presentes nas gemas que não apresentam orientação, estão apenas distribuídos avulsamente ou agrupados e possuem a configuração de materiais protogenéticos.

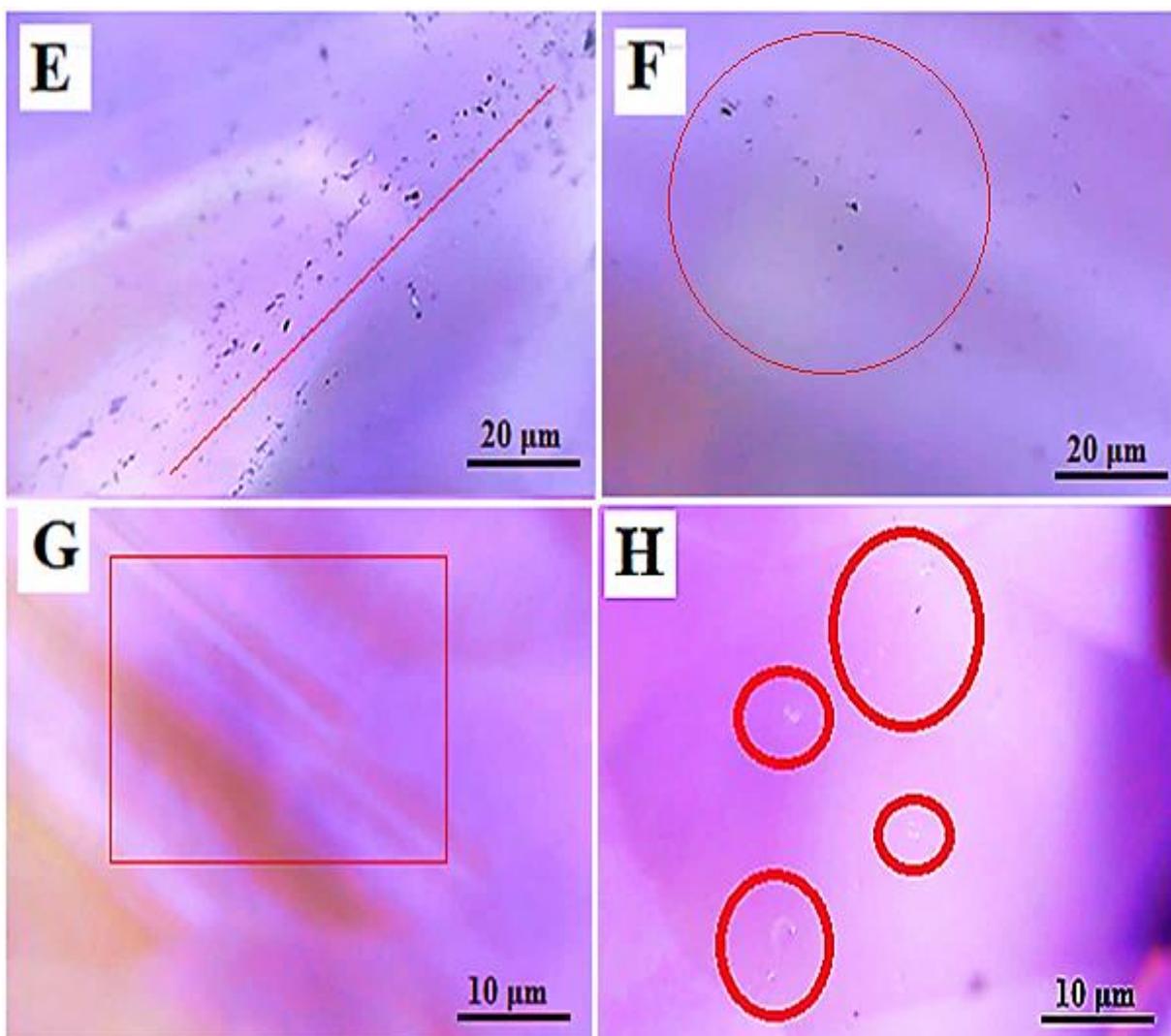
As inclusões sólidas se apresentam em diferentes tipos de formas e coloração, podendo ser da mesma natureza que o mineral hospedeiro ou de outro mineral. Por vezes, podem ser facilmente reconhecidas por seu hábito, cor, brilho e outras características ópticas visualizadas ao microscópio gemológico. Estas inclusões podem ser formadas antes, ao mesmo tempo ou posteriores aos minerais hospedeiros. As inclusões fluidas presentes mostram que durante o resfriamento e cristalização, alguns fluidos contendo voláteis foram aprisionados na estrutura da ametista, 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) (Franco & Campos, 1971) (Hughes, 2017) As linhas de crescimento são uma “marca” do crescimento mineral e as fraturas internas uma consequência de algum regime compressivo que os cristais foram submetidos após a cristalização.

Diferente das ametistas de Santa Quitéria (Ceará), as gemas de Quixeramobim não

possuem as inclusões sólidas orientadas e em forma de agulha (Oliveira *et al.*, 2020).

Figura 46: Inclusões nas amostras de ametistas estudadas do Município de Quixeramobim. A) Inclusões sólidas (escuras) levemente orientadas (Dark Orchid 4). B) Linhas de crescimento e inclusões fluidas orientadas paralelas entre si e perpendiculares às linhas de crescimento (Dark Orchid 4). C) Fluidos monofásicos (transparentes) com orientação (Dark Orchid 4). D) Fraturas paralelas entre si (Dark Orchid 4). E) Inclusões sólidas e fluidas monofásicas com orientação (Dark Orchid 4). F) Inclusões sólidas e fluidas monofásicas com distribuição avulsa G) Linhas de crescimento (Medium Orchid 4). H) Fluidos sem orientação (Medium Orchid 4).



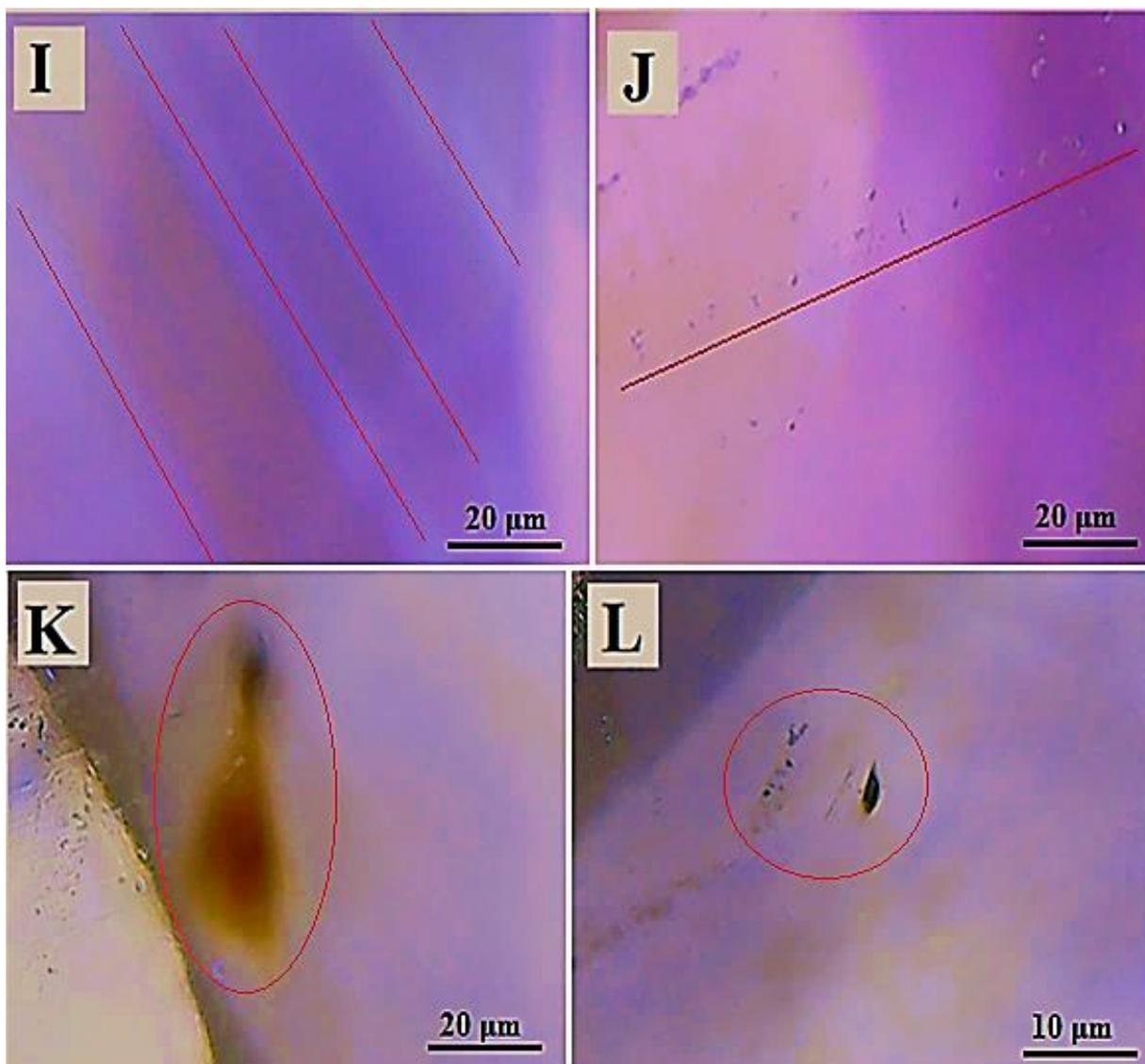


Fonte: autor

Foram visualizadas linhas de crescimento em mais de uma amostra de ametista (Figura 47I – Dark Orchid 3), além de inclusões fluidas monofásicas com nítida orientação (Figura 47J - Medium Orchid 4). A presença de um centro de cor laranja pode indicar uma concentração de ferro (em estado de oxidação, com vacância diferente) no interior da amostra (Figura 47K – Plum 3); além de uma inclusão sólida isolada (Figura 47L – Plum 3), possivelmente hematita ou goethita. Com todos estes dados citados pode-se posteriormente efetuar um estudo, mais detalhado, para investigar os processos de formações destas gemas.

Figura 47: Inclusões nas amostras de ametistas estudadas do Município de Quixeramobim.

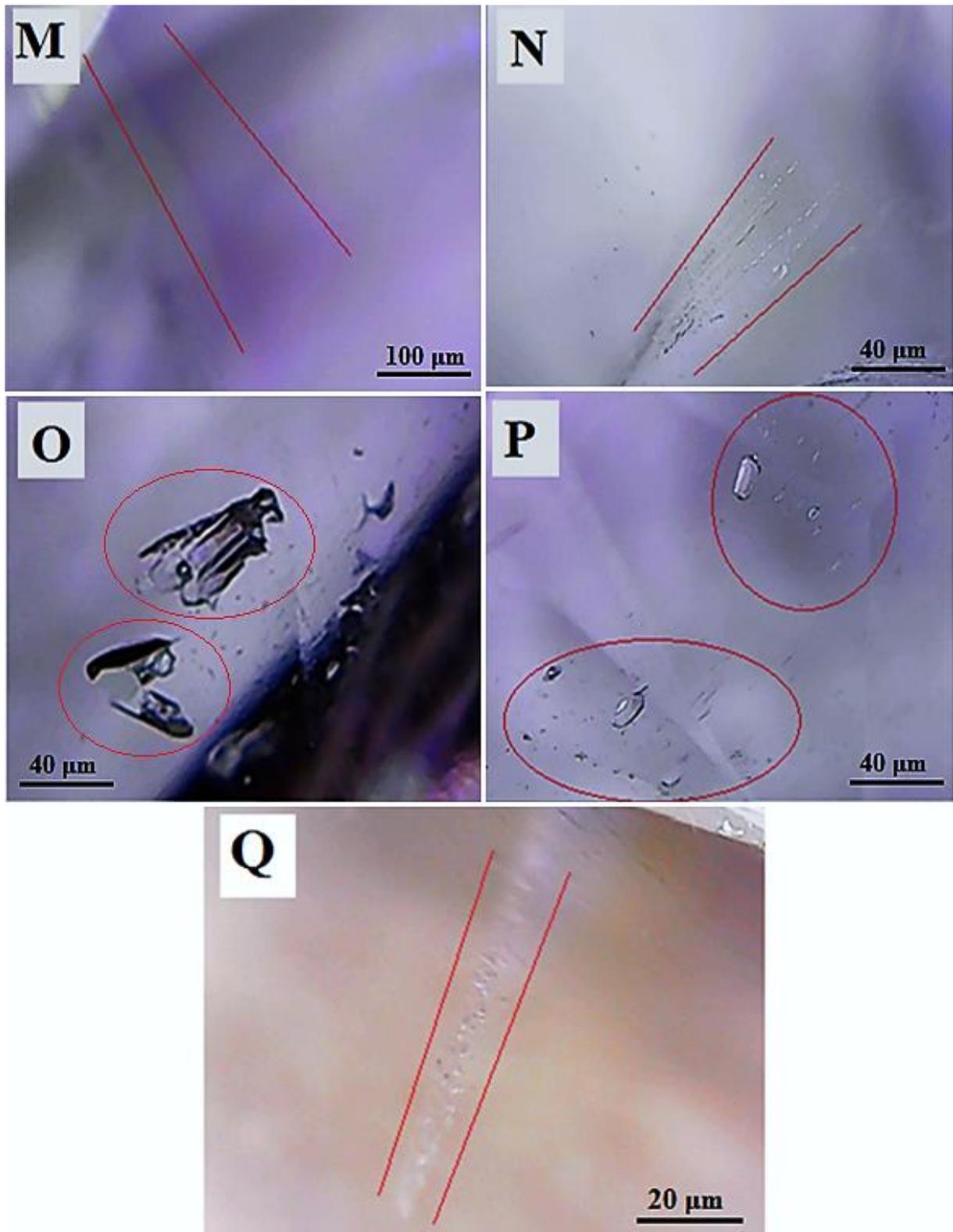
I) Linhas de crescimento (Dark Orchid 3). J) Inclusões fluidas monofásicas com orientação (Medium Orchid 4). K) Centro de cor laranja (Plum 3). L) Inclusão sólida isolada (Plum 3).



Fonte: autor

A presença de centro de cor mais escuro da cor roxa se faz presente (Figura 48M – Dark Orchid 3), além de inclusões fluidas com curta orientação (Figura 48N – Dark Orchid 3). Em casos mais raros, existe a presença de fluidos bifásicos (líquido e gás) (Figura 48O – Dark Orchid 3), bem como inclusões fluidas com leve orientação e paralelas entre si (Figura 48P – Dark Orchid 3). Em mais de uma gema foram visualizados fluidos monofásicos com curta orientação (Figura 48Q – Dark Orchid 2), para o padrão das outras gemas ametistas analisadas.

Figura 48: Inclusões nas amostras de ametistas estudadas do Município de Quixeramobim. M) Centro de cor mais escuro (Dark Orchid 2). N) Inclusões fluidas com curta orientação (Dark Orchid 2). O) Fluidos bifásicos (líquido e gás) (Dark Orchid 3). P) Inclusões fluidas com leve orientação e paralelas entre si (Dark Orchid 3). Q) Fluidos monofásicos (Dark Orchid 2).



Fonte: autor

7.4.3 Diafaneidade, Qualidade Gemológica e Valor Comercial

A análise da diafaneidade dos exemplares se deu por meio da visualização de um objeto (ponta de uma caneta) através das dez ametistas. Por definição as amostras transparentes possuem a imagem com contorno e nitidez bem definida, nas semitransparentes a nitidez não é tão visível, enquanto nas translúcidas o contorno é definido e a nitidez é quase ausente, nas 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 podem interferir na passagem e propagação da luz nas ametistas.

Todas as dez gemas são transparentes. Possuem baixo teor de inclusões (fluidas e sólidas), de modo que as poucas inclusões existentes pouco impactam na qualidade gemológica das ametistas. Sabe-se que em minerais com elevado teor de inclusões fluidas, estas podem reduzir a propagação da luz deixando a gema com a cor menos acentuada ou até mesmo intensificar determinados comprimentos de onda mudando a saturação e tonalidade. Isto não ocorre nestas ametistas. A cor destas ametistas não é tão intensa em razão da quantidade do elemento cromóforo na sua estrutura cristaloquímica (Anderson, 1984).

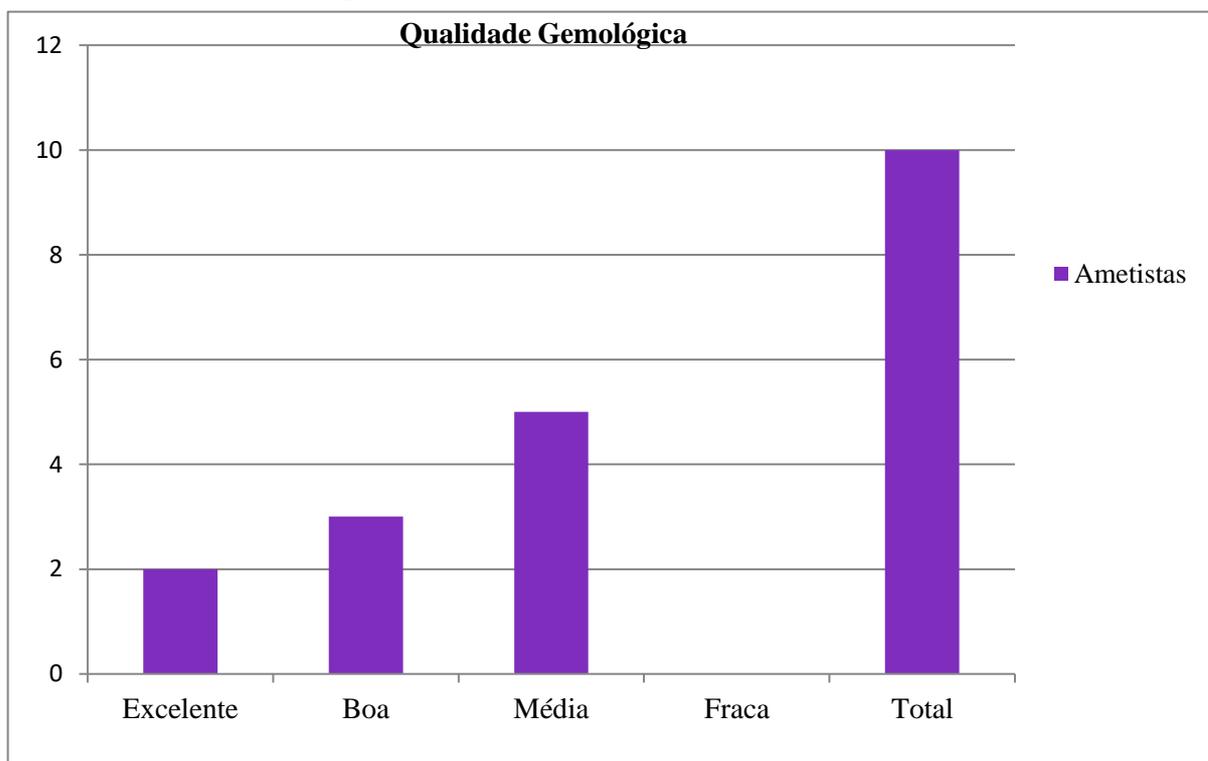
Ao serem analisadas para constatação do valor comercial, estas tiveram o seu peso mensurado em quilates e compilados em um gráfico (Gráfico 23). Utilizou-se todo procedimento de análise da cor e diafaneidade das amostras, teor de inclusões e qualidade da lapidação conforme as regras do “Boletim Referencial de Preços de Diamantes e Gemas de Cor”; posteriormente o valor em dólar das amostras foi reajustado para dezembro de 2020 de acordo com a inflação. Com duas amostras possuindo “excelente” qualidade gemológica, cinco sendo classificadas como “média” e três como “boa”. As ametistas entre 4 quilate e 6 ct possuem as melhores notas gemológicas em relação às demais, isto ocorre em razão destas possuírem uma matiz (cor) mais “pura” sendo o roxo, possuindo uma cor mais intensa e “vívida”; enquanto que as demais têm uma matiz roxa com baixa saturação e tonalidade, se aproximando mais do lilás do que do roxo. Os três exemplares Dark Orchid 2 possuem centros de cor em tons amarelados-acastanhados, característica esta que impactou negativamente na qualidade das amostras.

Os exemplares (Dark Orchid 2 e Plum 3) com a pior nota gemológica (4,75) não possuem o menor valor comercial; o menor valor econômico ficou com um exemplar do trio Dark Orchid 2. Apesar de possuírem notas muito próximas, o menor valor pertence a gema (Dark Orchid 2) de menor peso (3 quilates); enquanto o maior valor pertence ao exemplar

mais pesado (Dark Orchid 4) (Gráfico, 20).

Diferente do que ocorre em gemas de valores mais expressivos, as ametistas não possuem grande diferença econômica nos valores entre exemplares de diferentes quilates (ct); por possuírem baixa valorização econômica. Em gemas mais valorizadas como rubis e safiras, uma diferença de 1 ct causa uma discrepância de milhares de dólares em exemplares de boa-excelente qualidade.

Gráfico 20: Distribuição da qualidade gemológica das ametistas de Quixeramobim - CE.



Fonte: autor

Os dados da qualidade gemológica e os valores de mercado foram compilados em uma tabela (Tabela 26), sendo notável o elevado preço que as amostras de maior tamanho possuem em relação às demais, mesmo que às vezes possuam notas menores. As diferenças dos valores econômicos não foram significativas, em razão da ametista não possuir grande valor comercial. A cor de alguns exemplares foi a grande responsável pelas notas médias de algumas ametistas, as notas mais baixas dependeram unicamente da cor pouco valorizada das amostras; pois as gemas possuem baixo teor de inclusões e excelente lapidação e estas características também influenciam na qualidade. Importante salientar que estes valores correpodem aos preços que chegam no consumidor final, já em joalherias e as gemas já em peças montadas (jóias).

Tabela 26: Qualidade gemológica das ametistas de Quixeramobim e valor de mercado.

Peso (ct)	Cor da amostra	Qualidade Gemológica	Nota Gemológica	Preço em dólar (2022)
6,25	(Dark Orchid 4)	Excelente	8,00	50,42
4,75	(Medium Orchid 4)	Boa	7,00	18,03
4,0	(Dark Orchid 4)	Excelente	8,00	40,86
3,50	(Medium Orchid 4)	Boa	7,25	10,50
5,25	(Medium Orchid 4)	Boa	6,50	11,04
6,25	(Plum 3)	Média	4,75	8,20
4,0	(Dark Orchid 3)	Média	5,50	6,08
4,0	(Dark Orchid 2)	Média	4,75	6,08
3,0	(Dark Orchid 2)	Média	5,00	4,50
5,25	(Dark Orchid 2)	Média	4,75	4,86

Fonte: autor

7.4.4 Polariscópio Gomes

Após serem analisadas 10 amostras no laboratório de Gemologia TN utilizando o Polariscópio Gomes, O grau de qualidade das figuras de interferência foi inserido na em uma tabela (Tabela 27), além da confecção um gráfico (Gráfico 21) contendo as análises referentes às amostras, para isto as amostras foram enumeradas e 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 gema deste trabalho) possuem uma figura de interferência extremamente nítida e com contornos bem definidos. O exemplar tido como “excelente” (uma ametista) é detentor de um caráter e sinal óptico de fácil interpretação, possuindo pouca dificuldade ao visualizá-lo. As gemas cuja classificação foi “boa” (quatro gemas) detêm uma figura de interferência mais difícil de ser analisada, com uma imagem não tão nítida. As amostras classificadas como “regular” (cinco minerais) possuem um elevado grau de dificuldade ao ser analisada, com o caráter e sinal óptico sendo visto com certa dificuldade, exibindo um contorno pouco definido. 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. Estima-se que minerais com qualidade de figura de interferência “regular” e “ruim” tenham seu eixo óptico paralelo ou quase paralelo aos planos de polarização.

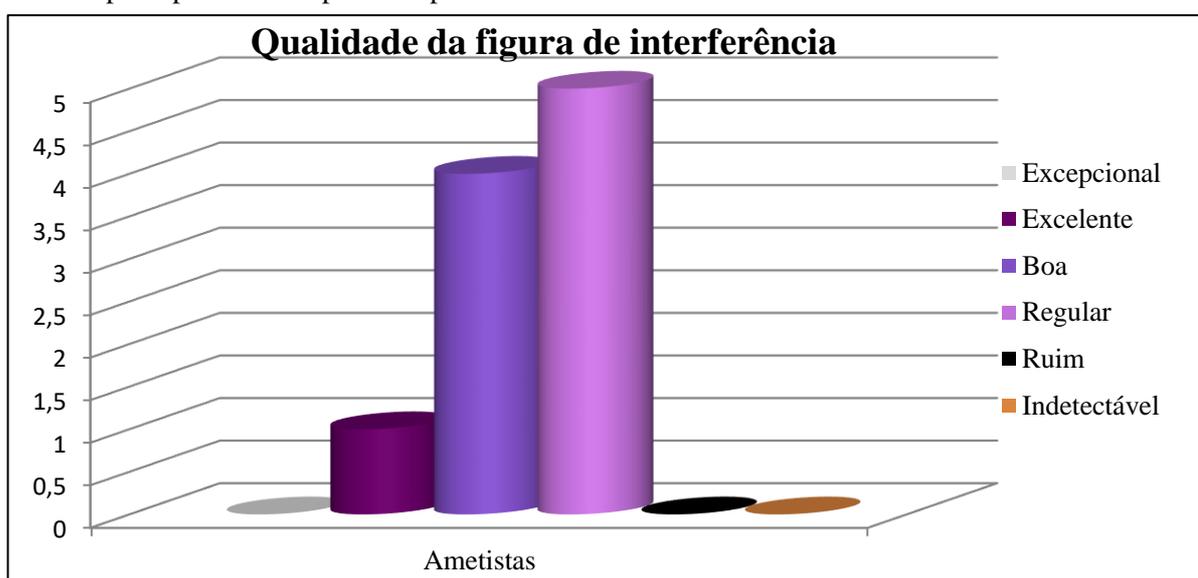
Nas amostras de maior peso, houve uma leve tendência de que os exemplares tivessem uma “boa” qualidade de visualização da figura de interferência; porém a gema com visualização “excelente” possui 4 quilates (ct) e é menor que a maioria das ametistas classificadas como “boa”, mostrando que não existe correlação entre o tamanho e a qualidade das figuras de interferência nas ametistas.

Tabela 27: Qualidade das figuras de interferência das ametistas de Quixeramobim fornecidas pelo Polariscópio Gomes.

Número da amostra	Cor da amostra	Peso (ct)	Qualidade da figura de interferência
1	(Dark Orchid 4)	6,25	Boa
2	(Medium Orchid 4)	4,75	Boa
3	(Dark Orchid 4)	4,0	Excelente
4	(Medium Orchid 4)	3,50	Boa
5	(Medium Orchid 4)	5,25	Regular
6	(Plum 3)	6,25	Regular
7	(Dark Orchid 3)	4,0	Regular
8	(Dark Orchid 2)	4,0	Regular
9	(Dark Orchid 2)	3,0	Regular
10	(Dark Orchid 2)	5,25	Boa

Fonte: autor

Gráfico 21: Distribuição das ametistas analisadas conforme o grau de facilidade ao observar o caráter e sinal óptico por meio do polariscópio Gomes.



Fonte: autor

7.4.5 Química Mineral

A química mineral dos minerais da região do distrito pegmatítico Solonópole-Quixeramobim permite compreender e explicar as correlações existentes nas propriedades gemológicas; além de justificar os valores aferidos no índice de refração, birrefringência, densidade relativa, espectro de absorção e a intensidade do pleocroísmo e fluorescência. A química é a principal responsável pela intensidade das bandas de intensidade Raman, com as quantidades dos elementos sendo as agentes causadoras. Em relação à cristalochimica, os dados químicos permitem a quantificação dos elementos identificados pelo difratômetro de raios-X em monocristal; além de justificar e explicar alguns valores captados gemologicamente (índice de refração, birrefringência, densidade relativa e pleocroísmo).

Pelo método do EDS no microscópio de varredura eletrônica (MEV), a composição química obtida para as ametistas foi SiO_2 . Foram analisadas duas amostras, uma completamente roxa e outra com traços amarelos, em razão da proximidade e da pouca variabilidade das propriedades gemológicas. Os teores de SiO_2 (100%) das amostras condiz com a normalidade. Porém, a presença do elemento Al na ametista com traços amarelos é uma peculiaridade e algo incomum em ametistas (Roberts *et al*, 1990) (Lameiras *et al*, 2009) (Deer *et al*, 2010). Estes estão organizados na tabela 28. Os dados citados nesta última tabela não chegam a 100%, em razão de fatores como voláteis, água e limitação na máquina de detecção.

A presença de Al_2O_3 em quartzos (principalmente ametistas) é raro. No entanto, algo plausível e com facilidade de acontecer; pois o Al é um elemento relativamente leve (26,98 u), quase a mesma massa atômica do Si (28,08 u), o Al possui um raio atômico (143 pm) pouco próximo ao do Si (111 pm). Desta forma, o que tornaria possível fisicamente do Al_2O_3 entrar e substituir o SiO_2 em algumas partes do retículo cristalino da ametista, pois é possível estas substituições quando o raio atômico do elemento em questão possui até 20% do tamanho do elemento que será substituído. Além destes dois elementos possuírem um estado de oxidação em comum (+1), os outros estados possíveis são +4 para o SiO_2 e +3 para o Al_2O_3 (Klein & Dutrow, 2012).

Não foi detectado Fe nas amostras, que é o elemento cromóforo, neste caso (o que é comum) o FeO ocorre em quantidades muito pequenas, por vezes inferiores a 1% (0,02%). A explicação para esta ausência de um elemento tão importante deve-se a dois fatores; o feixe de elétrons adentra entre 150 a 200 nm (nanômetros) na superfície da gema, o que é muito superficial e elementos em baixas quantidades ou no interior do material podem não ser

detectados; somado ao fato que o FeO se localiza em poucas células unitárias, podendo esta ser uma distribuição arbitrária ou mais localizada ao centro das ametistas analisadas, uma vez que as suas regiões mais centrais detêm uma saturação levemente mais acentuada (Lameiras *et al*, 2009) (Deer *et al*, 2010) (Klein & Dutrow, 2012).

Tabela 28: Componentes químicos das amostras de ametista de Quixeramobim - CE.

Amostras / Teores químicos médios em %	O	Si	Al
Dark Orchid 4 SiO ₂	52,44	47,56	0
Dark Orchid 2 SiO ₂	54,245	43,87	2,33
ÓXIDOS			
Amostras / Teores químicos médios em %	SiO ₂	Al ₂ O ₃	
Dark Orchid 4 SiO ₂	100	0	
Dark Orchid 2 SiO ₂	94,85	5,00	

Fonte: autor

7.4.6 Organização Cristalológica

As informações cristalográficas obtidas pelo difratômetro de raios-X em monocristal das gemas analisadas estão ligadas e correlacionadas com as densidades das gemas e o índice de refração (o raio ordinário, n_o) das amostras. Os dados obtidos ajudam a embasar ainda mais e permitem a visualização das ligações obtidas com o espectroscópio Raman; tornando possível contextualizar e melhorar a compreensão das ligações. A química mineral obtida pelo método EDS permite a quantificação dos elementos captados pelo difratômetro; além de justificar e explicar os valores dos pesos moleculares, densidade relativa e volumes das células unitárias mensurados pelo difratômetro. Deste modo, os dados obtidos pelo Raman e difratômetro em monocristal estão estritamente ligados aos obtidos pelo EDS e que por sua vez se relacionam e justificam várias das características gemológicas.

Por meio da técnica de difração de raios-X em monocristal nas ametistas de Quixeramobim foi possível obter a fórmula química, peso molecular, dimensões da célula unitária, volume da célula e densidade relativa; além da organização cristalográfica molecular. Foi selecionada apenas uma amostra para análise devido a variabilidade quase ausente nas propriedades gemológicas e geoquímicas das ametistas, além da simplicidade das estruturas presentes em quartzos.

As três principais formas cristalinas de SiO_2 (quartzo, tridimita, cristobalita) possuem estruturas cristalinas muito diferentes, tendo cada uma um campo de estabilidade bem definido sob condições de equilíbrio. Todavia, as transformações de umas para outras são um tanto lentas, de tal modo que as formas de alta temperatura, cristobalita e tridimita, podem existir em equilíbrio metaestável abaixo das suas temperaturas de inversão. Cada uma das três formas: quartzo, tridimita metaestável e cristobalita metaestável, tem uma modificação (polimorfo) de baixa e alta temperatura designada por α e β , respectivamente. Em cada caso a estrutura é formada por tetraedros de SiO_4 que estão ligados por compartilhamento de cada um dos seus vértices com outro tetraedro. No esqueleto tridimensional assim formado, cada um dos silícios tem quatro oxigênios e cada oxigênio tem dois silícios como vizinhos mais próximos. O Quartzo alfa tem simetria trigonal e pertence à classe de simetria enantiomórfica 32. A sua estrutura é semelhante à do quartzo- β , mas os tetraedros de SiO_4 são menos regulares e sofreram rotação em relação às suas posições ideais; assim, a transformação alfa-beta é um dos movimentos atômicos relativamente menores. Os parâmetros da malha do quartzo alfa foram medidos em várias amostras e por muitos investigadores, e a constância dos valores obtidos para o quartzo proveniente de diferentes localidades, levou à sua

utilização durante algum tempo como padrão de calibragem das câmaras de poeiras de raios X. Contudo, os métodos de medição revelam diferenças significativas, provavelmente associadas com soluções sólidas de outros íons (Deer *et al*, 2010).

Como as 10 amostras de ametistas da região de Quixeramobim possuem características gemológicas quase idênticas, somado ao fato da sua estrutura cristalina ser muito simples (quando comparada a das turmalinas e granadas, por exemplo) foi selecionada apenas uma amostra para as análises em monocristal. Em termos gerais, a amostra analisada possui as mesmas características elencadas acima. Estas informações foram adquiridas por meio da difração de raios-X em monocristal, imagens referentes (Figura 49) à organização molecular dos sítios cristalinos da ametista Dark Orchid 4 estão representadas. A fórmula química obtida é coerente com as fórmulas postuladas em Will *et al* (1988), Schumann (2006), Lameiras *et al* (2009), Deer *et al* (2010), Koralay (2013) e ³Arem & Clark (2023).

O peso molecular é diretamente relacionado aos teores químicos das amostras; conforme ilustrado na tabela 29. O peso molecular da referida amostra é de 63,07 em massa molecular (u). Não foi detectado FeO na amostra, que é o elemento cromóforo, neste caso (o que é comum) o FeO ocorre em quantidades muito pequenas, inferiores a 0,1%. A explicação para esta ausência de um elemento tão importante deve-se a dois fatores; o feixe de elétrons penetra entre 150 a 200 nm (nanômetros) na superfície da gema, o que é muito superficial e elementos em baixas quantidades ou no interior do material podem não ser detectados; somado ao fato que o Fe se localiza em poucas células unitárias, podendo esta ser uma distribuição arbitrária ou mais localizada ao centro das ametistas analisadas, uma vez que as suas regiões mais centrais detêm uma saturação levemente mais acentuada (Deer *et al*, 2010) (Klein & Dutrow, 2012).

Em relação as dimensões da célula unitária *a* e *b* são as mesmas, pois se trata de um mineral cristalizado no sistema trigonal e o valor obtido em Angstrom 4,91585 para os eixos cristalográficos “*a*” /” *b*” e 5,40740Å para o eixo cristalográfico “*c*” condizem com Will *et al* (1988), Antao *et al* (2008), Lameiras *et al* (2009), Deer *et al* (2010). Uma vez que os valores tabelados para os quartzos são “*a*” e “*b*” = 4,913-4,914 Å, “*c*” = 5,4041-5,4053.

O volume da célula unitária está diretamente ligado com as dimensões das células unitárias, os valores das células unitárias 4,91585 Å e 5,40740Å e do volume 130,6729 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 ametista existem diferentes elementos com tamanho iônico ou atômicos levemente variados; elementos como o FeO e o Al₂O₃ podem alternar substituindo no sítio

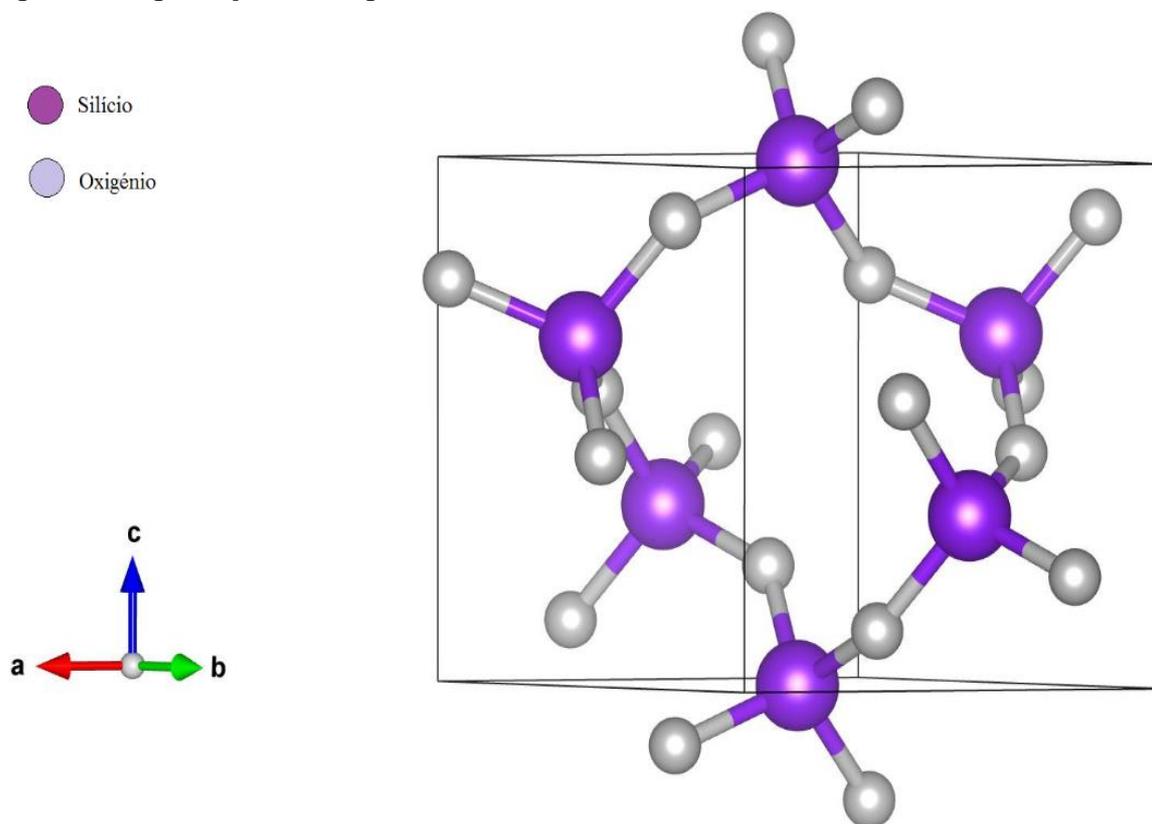
crystalino. Estas alternâncias e substituições têm um impacto levemente expressivo na organização das células unitárias e seus respectivos volumes, conferindo diferentes valores levemente diferentes (Klein & Dutrow, 2012).

A densidade das amostras também mostra correlação com os teores químicos, consequentemente com o peso molecular, no qual a gema Dark Orchid 4 possui $2,63 \text{ g/cm}^3$, peso de 63,07 e 100% de SiO_2 .

Importante salientar que a densidade relativa calculada na ametista Dark Orchid 4 pelo método de raios-X em monocristal $2,63$ se aproxima bastante do valor obtido com a balança hidrostática $2,64 \text{ g/cm}^3$.

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/cm^3) foram agrupados na tabela 29 como parte das análises cristalográficas.

Figura 49: Organização cristalográfica molecular da ametista Dark Orchid 4.



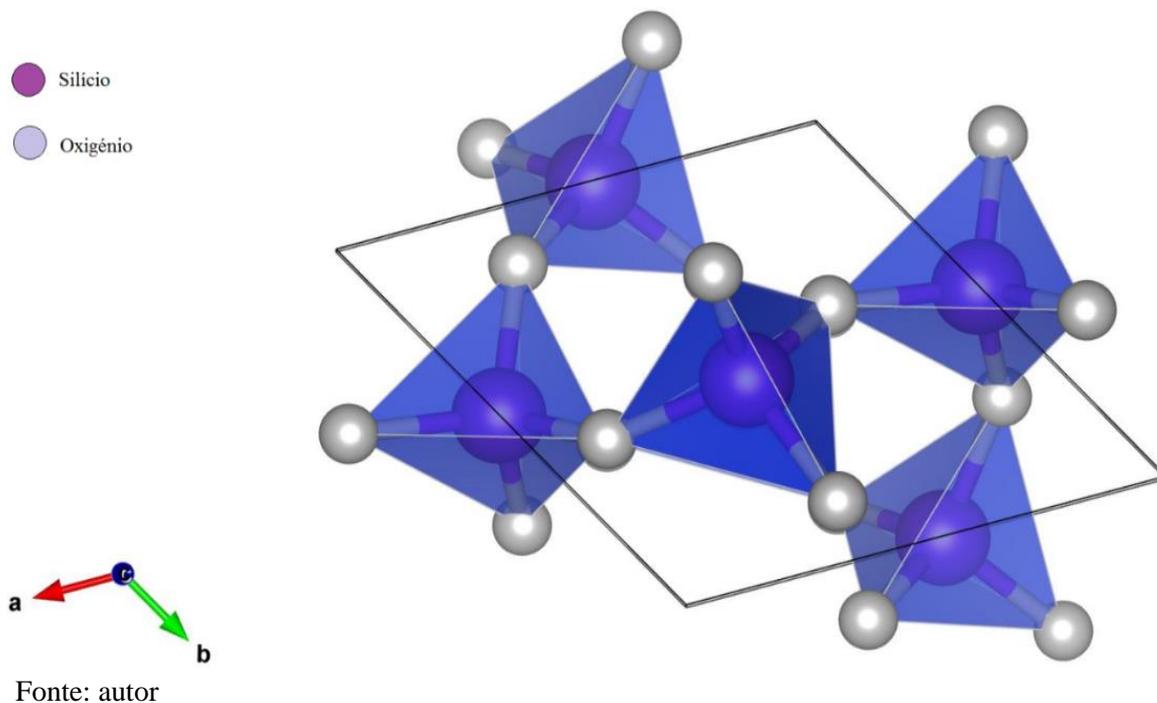


Tabela 29: Dados obtidos a partir de refinamento da difração de raios-X em monocristal, para amostra de ametista Dark Orchid 4.

Amostra	Dark Orchid 4
Fórmula química	SiO ₂
Peso molecular	63,07
Dimensões da célula unitária Eixo a (Å)	4,91585 (7)
Dimensões da célula unitária Eixo b (Å)	4,91585 (7)
Dimensões da célula unitária Eixo c (Å)	5,40740 (5)
Volume da célula unitária	130,6729(6)
Densidade (g/cm ³)	2,63

Fonte: autor

7.4.7 Espectroscopia Raman

O espectro Raman apresenta correlações com algumas propriedades gemológicas e informações dos aspectos internos. As bandas e módulos captados pelo Raman que se referem as ligações químicas podem ser vistos nas imagens obtidas pelo difratômetro de raios-X em monocristal. Existem interligações dos dados cristalográficos juntamente das bandas Raman, os módulos tornam ainda maior a evidência das ligações captadas pelo difratômetro de monocristal. A química mineral também se faz presente e é a principal responsável pela intensidade das bandas de intensidade Raman, com as quantidades dos elementos sendo as intendentas.

A espectroscopia Raman foi utilizada com o intuito de servir como um “finger print” das ametistas desta região geográfica (Quixeramobim, CE), através da constatação das ligações químicas nos minerais, em razão das 10 ametistas possuírem características quase imutáveis e muito próximas, foi selecionada apenas uma amostra (Dark Orchid 4) para análise Raman.

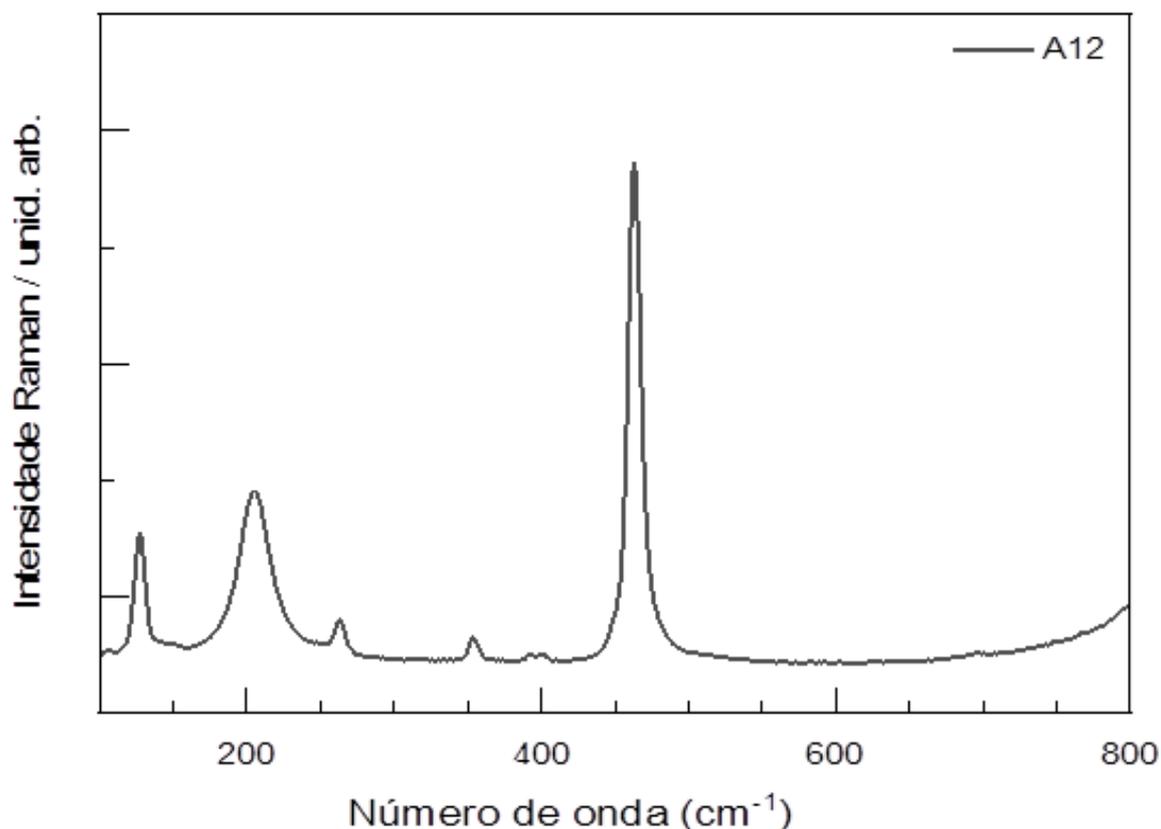
Foram realizadas análises utilizando o pó (minúsculos fragmentos) resultantes de pedaços que sobraram da lapidação da gema Dark Orchid 4.

A gema possui aproximadamente as seguintes bandas: 124, 211, 266, 359, 465 e 800 cm^{-1} . Estes modos em aproximadamente 124, 211, 266, 359, 465 e 800 cm^{-1} foram comparados aos dados das ametistas da RRUFF (Scott, 2023), Krishnamurt (1958) e Pasquarello & Corso (2001), em que todos estas bandas estão relacionadas com as vibrações e os processos envolvendo as ligações de SiO_4 das ametistas (quartzo) e principais ligações químicas desse mineral; todos os valores encontrados são normais para a ametista analisada. Na tabela de bandas Raman da RRUFF (Scott, 2023), de Krishnamurt (1958) e Pasquarello & Corso (2001) não há um único valor de espectro para cada ligação, existem alguns com valores muito próximos uns dos outros (uma “margem de variabilidade”). São evidentes que as bandas Raman características do mineral quartzo estão em torno de 220 e 466 (Krishnamurt, 1958) (Pasquarello & Corso, 2001); enquanto que as bandas mais fracas (de maneira geral) do quartzo estão em 130, 360 e 800 (Krishnamurt, 1958) (Pasquarello & Corso, 2001). Comparativamente a amostra analisada (Dark Orchid 4) possui o mesmo padrão espectroscópico Raman que outras ametistas (Scott, 2023), mas também apresenta os mesmos bandas e similaridades que outras amostras de quartzo (Scott, 2023); sejam elas: ametistas, citrinos, cristal de rocha, quartzo rosa, quartzo azul ou prasiolita. Isto deve-se ao fato de que mais de 99% da composição dos quartzos, majoritariamente, é composta por Si e O em uma

estrutura cristalográfica simples; desde modo outros elementos entrando na estrutura do quartzo são em minúsculas quantidades, como no caso do Fe (elemento cromóforo) das ametistas que é de aproximadamente 0,02% (Roberts *et al*, 1990) (Lameiras *et al*, 2009) (Deer *et al*, 2010) (Klein & Dutrow, 2012) (Schumann, 2020); a gema Dark Orchid 4 possui a composição química padrão de um quartzo, tornando extremamente improvável qualquer anomalia no Raman. As sutis e quase imperceptíveis diferenças entre os espectros Raman dos quartzos se dão na intensidade das bandas Raman, como por exemplo na notável intensidade em 124 cm^{-1} que os citrinos e prasiolitas possuem em relação aos demais quartzos; ademais as diferenças de intensidade nos quartzos (em geral) é quase ausente.

Logo, os espectros Raman (Gráfico 22) apresentaram os padrões e regularidades quando comparadas com os dados do RRUFF (Scott, 2023), assim como os dados obtidos por meio da caracterização gemológica, geoquímica e cristalográfica que mostraram todas as propriedades comuns para este mineral. Ainda que as propriedades citadas da ametista sejam muito próximas e semelhantes com outras variedades do quartzo, são as informações Raman da ametista as mais parecidas com as demais variações do SiO_2 .

Gráfico 22: Espectroscopia Raman da ametista Dark Orchid 4 do Município de Quixeramobim.



Fonte: Autor

7.4.8 Petrografia

As informações ópticas adquiridas pelo microscópio petrográfico se correlacionam e reforçam os dados obtidos através da caracterização gemológica. Principalmente, as características aferidas de ordem quantitativa, como a birrefringência, em que os dados ópticos microscópicos são os mesmos dos dados ópticos/gemológicos microscópicos. Outras informações microscopiamente, de ordem qualitativa, obtidas são da mesma ordem que os dados macroscópicos. Ademais, da mesma forma que os dados ópticos/gemológicos se correlacionam com os dados geoquímicos, cristalográficos e do Raman; os dados ópticos microscópicos também se correlacionam.

Uma lâmina de secção delgada (0,03 mm) foi confeccionada para aferir as propriedades ópticas em escala microscópica das ametistas de Quixeramobim. Foi selecionada uma amostra de ametista para a confecção e análise microscópica, devido a estabilidade das características ópticas macroscópicas.

No sistema de luz natural, a ametista analisada em lâmina delgada não apresentou nenhuma cor. Ao apresentar ausência de cor isto significa que este exemplar não absorve nenhum comprimento de onda (entre 800-390 nm), tampouco transmite comprimentos de onda. Dada à ausência de cor, o grão analisado não possui absorção e tampouco apresenta pleocroísmo. Cor, absorção e pleocroísmo são três características que com frequência estão interligadas e em conjunto. A absorção é o resultado direto da intensidade da transmissão (cor percebida pelos órgãos visuais) (Flint, 1965) (Zukov, 1967) (Wahlstrom, 1969) (Heinrich, 1980) (Fujimori & Ferreira, 1987). O grão não apresentou clivagem, o que já era esperado, e micro fraturas se fazem presente. O exemplar possui hábito anderal em razão da ausência das fácies definidas. A linha de Becke é maior que o meio (balsámo do Canadá), em razão do índice de refração da ametista (~1,550) ser superior ao líquido (1,520) que está em contato com as suas bordas. O relevo deste minearal é baixo, pois o índice de refração do quartzo é pouco superior ao do meio circundante, deste modo o contorno do grão se torna fino e pouco visível. Quanto maior esta diferença, mais visível será a borda do mineral. O grão de quartzo analisado não apresenta alterações ou inclusões (Fujimori & Ferreira, 1987) (Bloss, 1999) (Nesse, 2004) (Klein & Dutrov, 2012) (Machado e Nardy, 2016).

As características elencadas acima, pertencentes ao sistema de luz natural, são condizentes e dentro da normalidade do mineral quartzo (Kerr, 1987) (Frank, 2018).

No sistema ortoscópico, em que se faz necessário cruzar os nicóis, foram obtidos mais dados deste grão. A diferença entre os índices de refração (no e ne) ao atravessarem a

ametista resultam em uma diferença de encaminhamento que é dada pela espessura multiplicada pela birrefringência do mineral analisado. Cada um destes raios ao atravessar o analisador se decompõe em dois componentes ((w – e) e (n – s)) no plano do polarizador estes raios vibram no mesmo plano, mas com velocidades diferentes. Logo, em condições de se interferirem. A cor de interferência deste grão é o cinza, o que corresponde ao comprimento de onda em 300 nm na tabela de cores de interferência de Michel Levy. A cor de interferência é o resultado da espessura do mineral em lâmina delgada multiplicado pela birrefringência. A birrefringência, diferença entre os raios ne e no da amostra, obtida por meio da constatação da cor de interferência e com o auxílio do acessório de quartzo-gipso é de 0,010; a tabela e cores de birrefringência de Michel Levy pode ser vista no Apêndice 3. A extinção, a posição dos raios lento e rápido, o sinal de alongação não puderam ser diagnosticados devido à ausência de características que permitissem uma referência espacial (forma, clivagem, partição ou geminação). O mineral analisado não apresenta nenhum dos 6 tipos de geminação (Carls Bad, Baveno, Albita, Periclina, Lei da Albita-Periclina, Cíclica), tampouco nenhum dos 3 tipos de zoneamento (alteração, composição e inclusão) (Flint, 1965) (Zukov, 1967) (Wahlstrom, 1969) (Heinrich, 1980) (Fujimori & Ferreira, 1987) (Bloss, 1999) (Nesse, 2004) (Klein & Dutrov, 2012) (Machado e Nardy, 2016).

As características elencadas acima, pertencentes ao sistema ortoscópico, são condizentes e dentro da normalidade do mineral quartzo (Kerr, 1987) (Frank, 2018).

No sistema conoscópico, com os aditivos da lente de Amici-Berttrand e da lente condensadora, somado a maior objetiva do microscópio permitiram a visualização da figura de interferência da ametista; neste sistema, os raios de luz incidentes (provenientes do polarizador) sobre o quartzo não são paralelos como nos outros dois sistemas, mas divergentes. Ao visualizar a figura de interferência do exemplar analisado constatou-se que seu eixo óptico estava perpendicular, mas inclinado em relação a platina do microscópio, pois foi gerada uma figura uniaxial de eixo óptico descentrada. Com o aditivo do acessório de quartzo-gipso e os fatores de soma e subtração das cores resultante dos raios ordinário e extraordinário em cada um dos quadrantes, constatou-se que o mineral é opticamente positivo, devido a disposição da cor azul no 1º e 3º quadrante, e da cor amarela no 2º e 4º quadrante. O quartzo analisado não possui isocromáticas (Flint, 1965) (Zukov, 1967) (Wahlstrom, 1969) (Heinrich, 1980) (Fujimori & Ferreira, 1987).

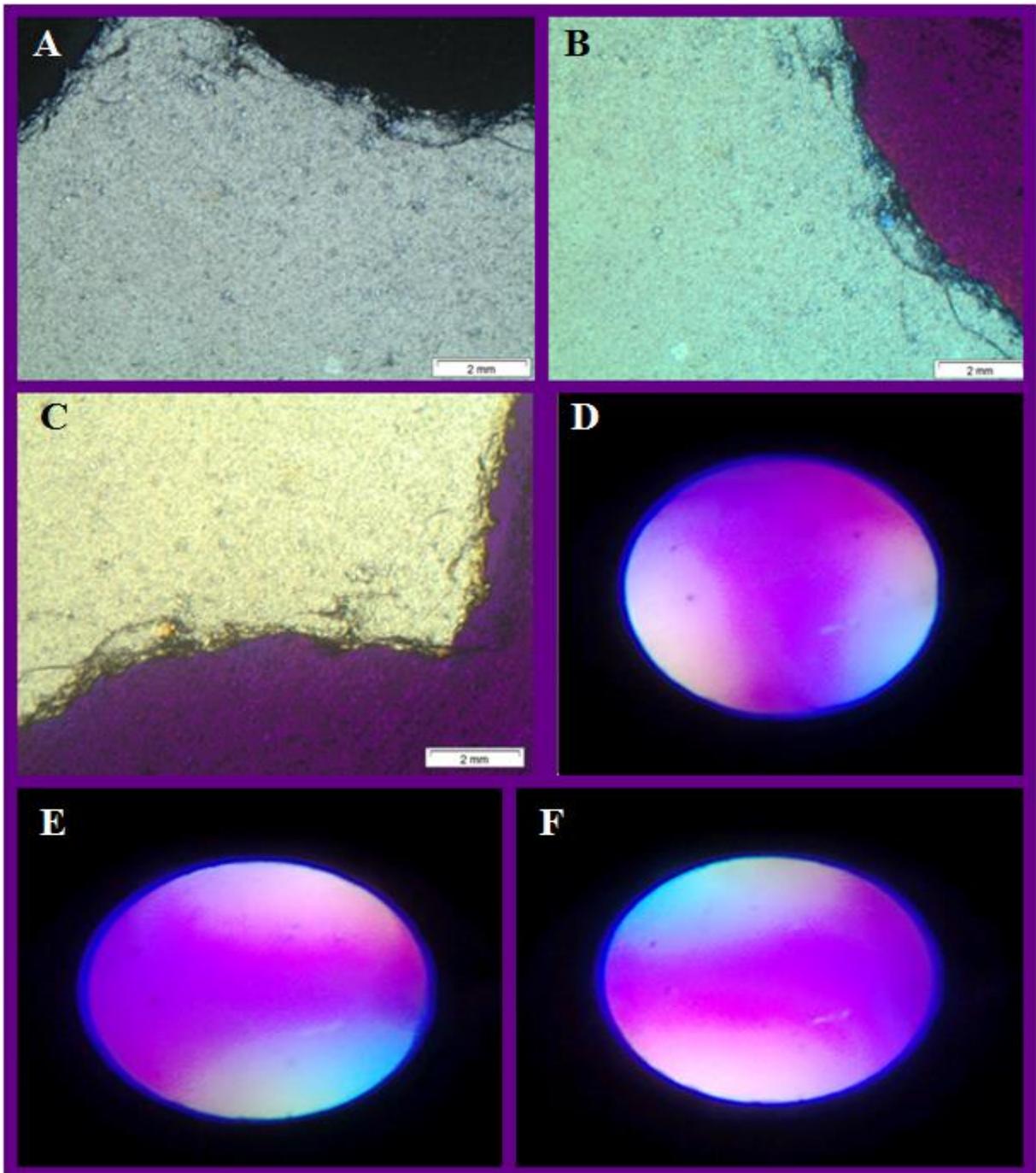
As características citadas acima, pertencentes ao sistema conoscópico, são condizentes e dentro da normalidade do mineral quartzo (Kerr, 1987) (Frank, 2018).

Algumas características obtidas microscopicamente, tais como: relevo (índice de

refração), pleocroísmo, birrefringência, caráter e sinal óptico; também foram obtidas macroscopicamente por meio da caracterização gemológica e através do polariscópio Gomes. Estes dados macros e microscópicos coincidiram completamente.

Todos os dados obtidos, e mencionados acima, por meio da caracterização óptica petrográfica foram organizados na tabela 30. Ademais foi confeccionada uma prancha (Prancha 5) contendo fotografias de algumas características mencionadas nos parágrafos acima.

Prancha 5 – Fotomicrografia A – Cor de interferência cinza (300 nm) da amostra de ametista no sist. ortoscópico; Foto B – Cor de soma (azul) na ametista, por meio do acessório de quartzo-gipso (530 nm); Fotomicrografia C – Cor de subtração (amarela) na ametista, evidenciando a birrefringência de 0,010 que está atrelada a cor de interferência; Fotomicrografia D – Figura de interferência uniaxial positiva de eixo óptico descentrado; Fotomicrografia E – Figura de interferência uniaxial positiva de eixo óptico descentrado, evidenciando as cores no 2^a e 4^a quadrante; Fotomicrografia F – Figura de interferência uniaxial positiva de eixo óptico descentrado, evidenciando as cores no 1^a e 3^a quadrante.



Fonte: autor

Tabela 30: Propriedades ópticas em lâmina delgada das ametistas de Quixeramobim – CE.

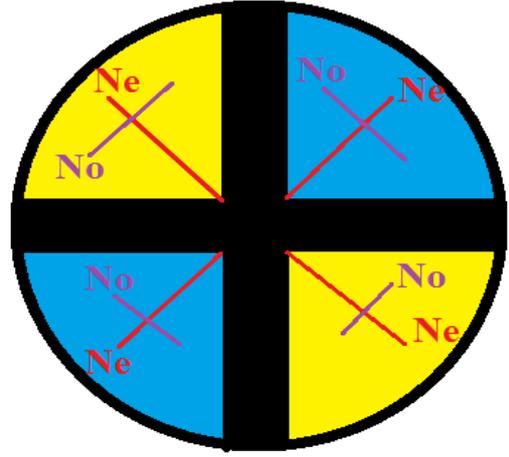
MINERAL		PROPRIEDADES ÓPTICAS
L U Z N A T U R A L	Cor	Incolor
	Pleocroísmo	Ausente
	Absorção	Ausente
	Clivagem	Ausente
	Fratura	Presente
	Hábito	Anedral
	Linha de Becker	Maior que o meio
	Relevo	Baixo
	Alterações	Ausente
	Inclusões	Ausente
S. O R T O S C Ó P I C O	Cor de Interferência	Cinza, 300 nm
	Birrefringência	0,010
	Tipo de Extinção	Não Diagnosticável
	Posição dos Raios Lento e Rápido	Não Diagnosticável
	Sinal de Elongação	Não Diagnosticável
	Posição dos Raios Ordinário e Extraordinário	Não Diagnosticável
	Geminação	Ausente
	Zoneamento	Ausente
S. C	Caráter	Uniaxial
	Sinal Óptico	Positivo

O
N
O
S
C
Ó
P
I
C
O

Isocromática

Ausente

Ilustração



Fonte: autor

7.5 Propriedades Gemológicas Gerais das Gemas de Quixeramobim, CE

As 52 gemas analisadas tiveram suas propriedades gemológicas resumidas em uma única tabela (Tabela IG), seus dados geoquímicos em outra (Tabela IG2), informações cristalográficas em outra tabela (Tabela IG3) e as bandas Raman em outra (Tabela IG4) atribuindo os valores máximos e mínimos de cada uma das propriedades mensuradas. Como foram analisadas seis cores de turmalinas e 1 espécie; três cores de granadas, em um total de 2 grupos desta gema, e como as águas-marinhas possuem algumas propriedades com certa variabilidade, além das peculiaridades das quatro espécies minerais estudadas, foi elaborada uma tabela contendo todos estes aspectos. Esta Tabela IG possui todos os valores das propriedades tanto quantitativas como qualitativas, juntando desta forma os valores e características que as gemas de Quixeramobim possuem.

Também foi confeccionado um gráfico (Gráfico IG), para fins representativos gerais, contendo os graus de qualidade das figuras de interferência das 52 gemas analisadas de Quixeramobim, juntando os dados acerca destas gemas que já foram citados nos tópicos anteriores; além do gráfico (Gráfico IGO) que contém a qualidade gemológica dos 52 exemplares, criado com a mesma finalidade do Gráfico IG.

Tabela 31 – Propriedades Gemológicas gerais (mínimas e máximas) dos minerais do Município de Quixeramobim.

Minerais	Turmalina	Água-marinha	Ametista	Granada
Propriedades gemológicas				
Diafaneidade	Semitranslúcida – Transparente	Semitransparente – Transparente	Transparente	Translúcida – Transparente
Índice de refração e Birrefringência	1,605 – 1,621 (ne) 1,633 – 1,646 (no) Birrefringência: 0,016 - 0,036	1,567 – 1,575 (ne) 1,580 – 1,590 (no) Birrefringência: 0,010 - 0,014	1,540 – 1,544 (no) 1,548 – 1,555 (ne) Birrefringência: 0,008 - 0,011	1,802 (cristais mono refringentes) Cristais com birrefringência anômala: 1,725 – 1,740 (nx) 1,738 – 1,749 (nz) Birrefringência: 0,009 - 0,013

Caráter e Sinal Óptico	Uniaxial Negativo	Uniaxial Negativo	Uniaxial Positivo	Ausente
Pleocroísmo	Fraco - Forte	Fraco - Moderado	Fraco	Ausente
Espectro de Absorção	700 675 670 660 650 500 498 492 490 485 460 480 440 420 410 408 nm	520 480 460 420 nm	Não Diagnosticável	630, 605, 600, 570, 520, 500 e 430 e 405 nm
Fluorescência	Ausente	Ausente – Fraca	Ausente	Ausente
Densidade Relativa	3,02 – 3,39 g/cm ³	2,67 – 2,83 g/cm ³	2,61 – 2,67 g/cm ³	3,56 – 4,15 g/cm ³
Inclusões e aspectos internos	Fraturas; estrias, linhas de crescimento; inclusões sólidas e fluidas; raras inclusões fluidas e sólidas possuindo leve orientação; muito ocasionalmente bifásicas (sólida + líquida); raramente minúsculas inclusões gasosas agrupadas; inclusões fluidas por vezes orientadas preenchendo fraturas; raramente encontra-se sólidos com líquidos possuindo leve orientação; inclusões sólidas	Inclusões sólidas e fluidas, raramente orientadas; líquidos por vezes agrupados, inclusões de outros minerais (possivelmente apatita e/ou quartzo); linhas de crescimento; cristais esqueléticos de rutilo; pequenos tubos orientados e por vezes paralelos uns aos outros; fluidos e sólidos agrupados; diversas inclusões bifásicas (líquido e gás) agrupadas; Inclusões fluidas muito raramente orientadas e com	Fraturas, raramente em paralelo; Inclusões sólidas e fluidas, por vezes orientadas; líquidos por vezes agrupados e orientados, inclusões de outros minerais (possivelmente quartzo); linhas de crescimento; centro de cor alaranjada; minúsculas inclusões sólidas orientadas (possivelmente de hematita ou goethita); inclusões fluidas quase que perpendiculares as	Cristais irregulares em forma de ponto e cristais irregulares de cor escura, agrupados e com leve orientação; Fraturas; cristais de minerais com tamanhos distintos; inclusões fluidas; por vezes cristais bem formados (euédricos); raramente presença de iridescência por meio das fraturas existentes; Cristais de minerais agrupados com inclusões fluidas exibindo

orientadas e por vezes com leve orientação, ocasionalmente perpendicular as estrias do mineral; muito raramente líquidos orientados perpendicularmente as linhas de crescimento.	possível configuração singenética; tubos ocos e alongados ocasionalmente com preenchimento; inclusões sólidas; outros cristais de minerais como de granada; tubos perpendiculares aos líquidos orientados.	linhas de crescimento; raras inclusões fluidas com leve orientação; Linhas de crescimento em duas cores; pequenos tubos orientados; fluidos raramente agrupados; raramente inclusões bifásicas; raramente centro de cor roxa mais intensa que o restante do mineral;	orientação; abundantes inclusões fluidas com orientação; inclusões fluidas perpendiculares as inclusões dos cristais; abundantes cristais de diferentes minerais com tamanhos distintos e bastante esféricos; raras inclusões bifásicas (líquido e gás); inclusões de cristais bem agrupados e sem orientação; inclusões fluidas orientadas e por vezes paralelas entre si.
--	--	--	---

Fonte: autor

Tabela 32– Propriedades Geoquímicas gerais (mínimas e máximas) dos minerais do Município de Quixeramobim.

Minerais	Turmalina		Água-marinha		Ametista		Granada	
	EQ	WT%	EQ	WT%	EQ	WT%	EQ	WT%
Elementos Químicos	O	55,8-59,8	O	48-49,5	O	52,4-54,2	O	42,4-50,7
	Si	15,5-18,7	Si	28-34,1	Si	43,8-47,5	Si	17,3-23
	Al	17,8-19,4	Al	10,3-13	Al	0	Al	10,4-17,1
	B	3,1-3,5	B	0	B	0	B	0
	Be	0	Be	5-5,2	Be	0	Be	0
	Na	1,5-2,8	Na	0,6-1,2	Na	0	Na	0
	Fe	0-0,99	Fe	0,4-2,1	Fe	0	Fe	0,5-3,6
	Mn	0-1,3	Mn	0-0,1	Mn	0	Mn	0-11,2
	Ca	0-0,4	Ca	0-1,5	Ca	0	Ca	0,2-19,3
	F	0-2,7	F	0	F	0	F	0
	Mg	0	Mg	0-0,3	Mg	0	Mg	0
	Ni	0	Ni	0,3-1,8	Ni	0	Ni	0
	Pb	0	Pb	0	Pb	0	Pb	0-0,66
ÓXIDOS	O	WT%	O	WT%	O	WT%	O	WT%
	SiO ₂	34,6-42,8	SiO ₂	55,1-65,6	SiO ₂	94,8-100	SiO ₂	17,3-22,9
	Al ₂ O ₃	40,3-43,8	Al ₂ O ₃	20-24,1	Al ₂ O ₃	0-5	Al ₂ O ₃	10,4-17,1
	B ₂ O ₃	10,8-11	B ₂ O ₃	0	B ₂ O ₃	0	B ₂ O ₃	0
			BeO	9,8-10,2	BeO	0		

BeO	0	Na ₂ O	1,2-2,4	FeO	0	BeO	0
Na ₂ O	2,1-6,3	FeO	0,9-4,1	Mn ₂ O ₃	0	Na ₂ O	0
FeO	0-2,7	Mn ₂ O ₃	0-0,17	CaO	0	FeO	1,2-6,8
Mn ₂ O ₃	0-2,9	CaO	0-3,1	OF ₂	0	Mn ₂ O ₃	0-21,5
CaO	0-1,4	OF ₂	0	MgO	0	CaO	0,4-41,2
OF₂	0-6,1	MgO	0-0,57	NiO	0	OF ₂	0
MgO	0	NiO	0,78-	PbO ₂	0	MgO	0
NiO	0	3,52				NiO	0
PbO ₂	0	PbO ₂	0			PbO₂	0-1,27

Fonte: autor

Tabela 33– Propriedades Cristalográficas gerais (mínimas e máximas) dos minerais do Município de Quixeramobim.

Minerais	Turmalina	Água-marinha	Ametista	Granada
Peso molecular	937,36 - 974,62	552,37 - 560,33	63,07	460,22 - 480,55
Dimensões da célula unitária Eixo a (Å)	15,84 - 15,92	9,22 - 9,31	4,915	11,86-12,11
Dimensões da célula unitária Eixo b (Å)	15,84 - 15,92	9,22 - 9,31	4,915	11,86-12,11
Dimensões da célula unitária Eixo c (Å)	7,105 - 7,173	9,09 - 9,20	5,407	11,86-12,11
Volume da célula unitária	1545,49 - 1586,92	678,15 - 799,05	130,672	1672,40 - 1776,54
Densidade (g/cm ³)	3,041-3,2	2,70 - 2,77	2,63	3,60 – 3,80

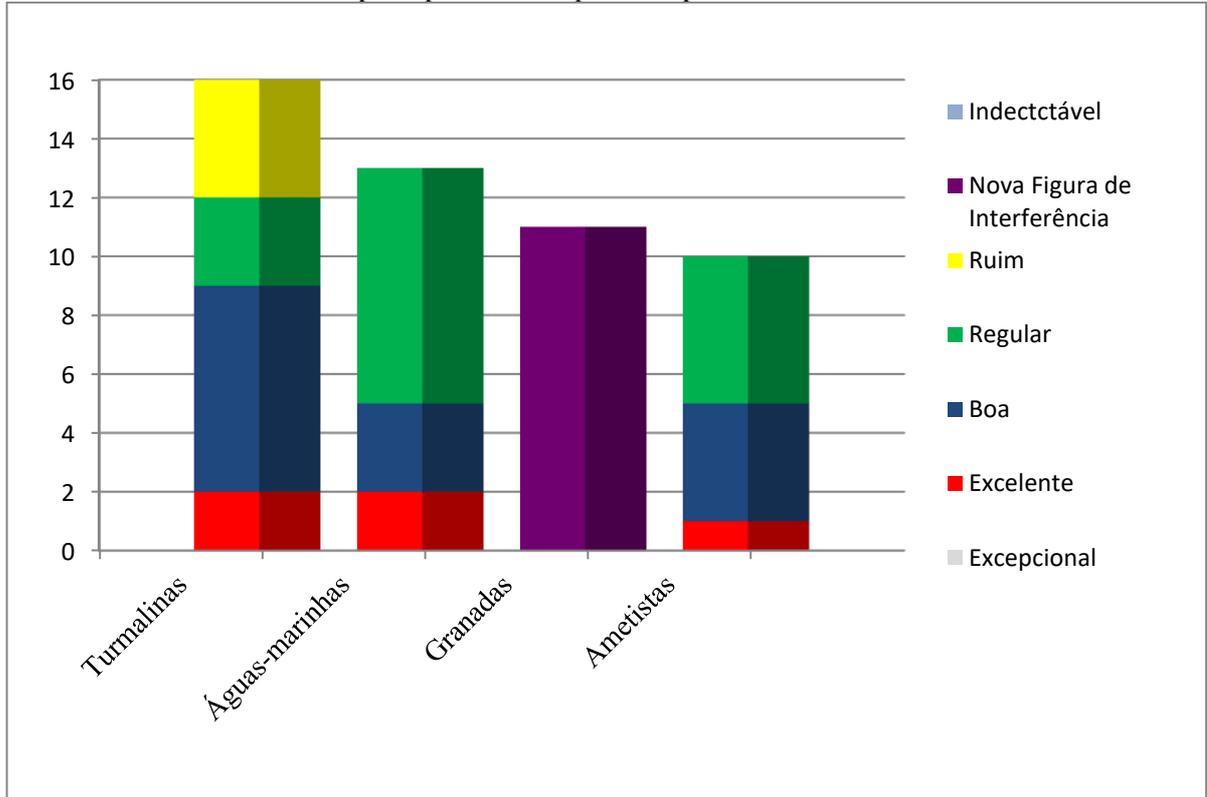
Fonte: autor

Tabela 34– Propriedades (Valores) Raman dos minerais do Município de Quixeramobim.

Minerais	Turmalina	Água-marinha	Ametista	Granada
Valores bandas (cm⁻¹)	184, 221, 379, 398, 423, 500, 511, 630, 650, 705, 710, 724, 726, 760, 1073 e 1254	88, 252, 284, 318, 400, 410 450, 458, 522, 625, 683 1020,1088, 1230	124, 211, 266, 359, 465 e 800	180, 219, 241, 278, 372, 385, 420, 508, 550, 553, 930, 823, 888 e 1046

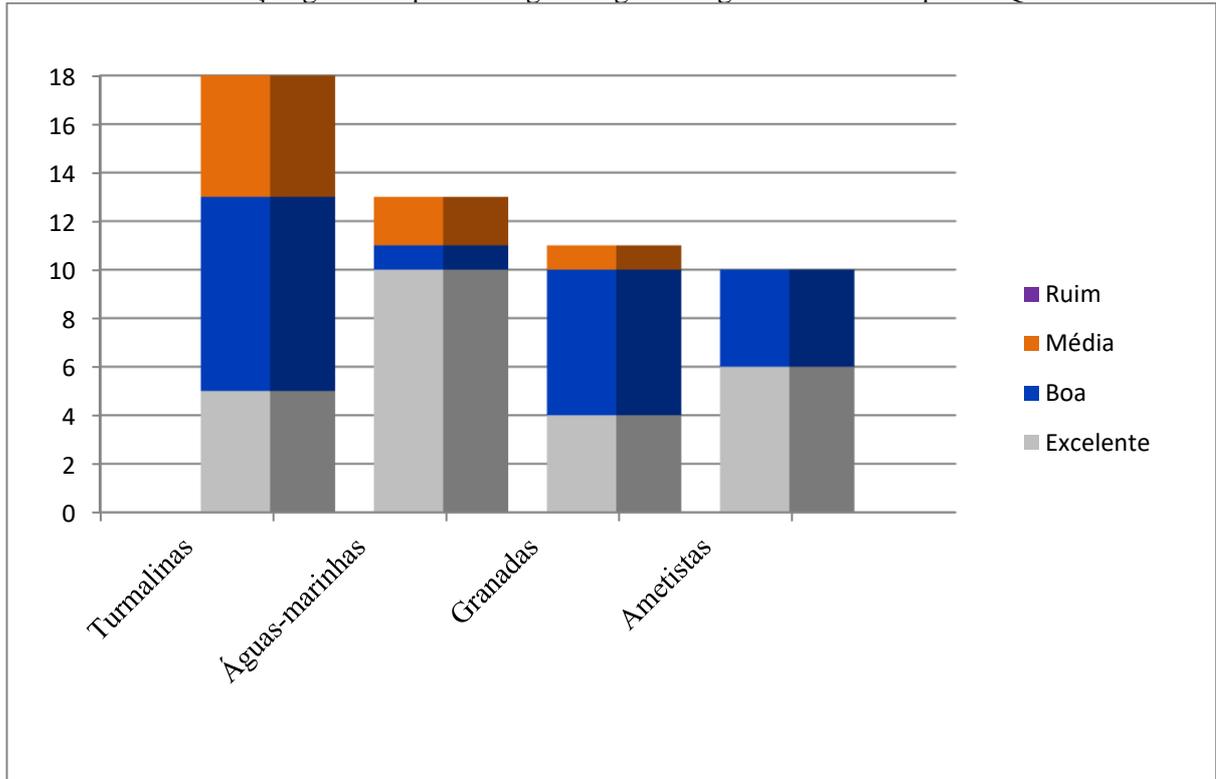
Fonte: autor

Gráfico 23: Distribuição geral das gemas de Quixeramobim analisadas conforme o grau de facilidade ao observar o caráter e sinal óptico por meio do polariscópio Gomes.



Fonte: autor

Gráfico 24: Distribuição geral da qualidade gemológica das gemas do Município de Quixeramobim.



Fonte: autor

8. CONCLUSÃO

As conclusões a respeito das turmalinas são:

- 1) 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, porém a amostra azul clara (Dark Turquoise) detém um dicroísmo classificado como fraco. As demais propriedades ópticas não são anômalas e estão dentro das expectativas. No entanto, uma das medidas físicas (densidade relativa) da amostra (Dark Turquoise) é incomum para este grupo, em decorrência do elevadíssimo valor. Os teores elevados do FeO (2,7%) nas amostras de cor azul justificam estas anomalias: birrefringência e densidade relativa elevadas. Todas as amostras possuem elevado teor de inclusões fluidas, sólidas e algumas fraturas. 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 rosas, de forma simplória, possuem características ópticas normais para o grupo, mas com algumas singularidades. Internamente dispõem de algumas fraturas e inclusões ocasionalmente orientadas. A parte peculiar destas gemas rosa está na correlação entre a birrefringência e a densidade relativa, no qual o peso específico aumenta proporcionalmente com a dupla refração, percebeu-se que o teor de Na₂O é proporcional ao aumento destas características; e que o CaO é inversamente proporcional ao Na₂O em quantidades, quanto maior o teor de Na₂O menor é o teor de CaO.
- 2) A qualidade gemológica das turmalinas 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 diafanidade das amostras e conseqüentemente diminuindo sua qualidade e valor de mercado.
- 3) Ao se obter as figuras de interferências (uniaxial negativa) por meio do Polariscópio Gomes, constatou-se que as inclusões fluidas (predominantemente nas gemas azuis) 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. Percebeu-se também a correlação entre a qualidade da figura de interferência nas amostras rosa e a intensidade do pleocroísmo, no qual o CaO está ausente na amostra que apresenta um pleocroísmo fraco e figura de baixa qualidade.

- 4) Os dados obtidos pela difração de raios-X em monocristal foram muito importantes para visualizar a organização cristalográfica interna das turmalinas, principalmente para constatação das dimensões dos eixos cristalográficos e volume da célula unitária. Em que as diferentes cores de turmalina possuem valores diferentes, principalmente as de cor azul. A densidade relativa calculada nas turmalinas 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.
- 5) Os dados da espectroscopia Raman são semelhantes aos das turmalinas disponíveis na bibliografia, percebeu-se que estas não apresentam anomalias; diferente dos dados obtidos por meio da caracterização gemológica que mostraram alguns valores não comuns para este mineral. As bandas detectadas nas 6 cores de turmalina mostram inúmeras semelhanças; contudo, algumas intensidades ou presença/ausência de bandas diferentes em algumas cores são o reflexo das diferentes composições químicas e estrutura cristalina.
- 6) A óptica microscópica das amostras de turmalina demonstram que as propriedades ópticas são as mesmas, independente do tamanho e/ou espessura, com diversas características sendo as mesmas encontradas em exemplares macroscópicos. Ademais, a petrografia das turmalinas trouxe um nível de detalhamento ainda maior para os exemplares no quesito óptico, auxiliando o entendimento do comportamento da luz dentro destes minerais. Característica esta que se relaciona diretamente com a cristalografia e química mineral.
- 7) Gemologicamente e ópticamente os exemplares de turmalina são da espécie elbaíta, apesar de algumas peculiaridades e anomalias, com destaque para a turmalina azul que é uma elbaíta com propriedades, algumas, acima da média da elbaíta. Geoquimicamente e cristalograficamente, as seis cores de turmalina são elbaítas, e novamente a turmalina azul é a cor com as propriedades mais distantes do grupo, de modo que ela é uma elbaíta rica em FeO quando comparada com as demais cores. Dentro da espectroscopia Raman o diagnóstico é o mesmo citado anteriormente, as seis cores são elbaítas. Após analisar as propriedades gemológicas, ópticas, geoquímicas, cristalográficas e de espectroscopia as turmalinas de Quixeramobim são da espécie elbaíta, ademais suas características se

correlacionam entre si, além de em alguns casos serem proporcionais entre si. Em certos casos, as características podem ser ligeiramente contrastantes, ilustrando a diferente cristaloquímica dentro de uma mesma espécie (elbaíta) dentro de uma mesma região (Quixeramobim); evidenciando a rica complexidade da turmalina. O potencial da região é notável, as turmalinas são detentoras de qualidade gemológica, majoritariamente boa e consequentemente um elevado valor de mercado.

As conclusões a respeito das águas-marinhas são:

- 8) As águas-marinhas de Quixeramobim possuem uma birrefringência elevada, tangenciando ou superando os valores da média dos berilos. Um exemplar, Cadet Blue 1, possui fluorescência em baixíssima intensidade, algo muito raro para os berilos. As demais propriedades ópticas não são anômalas e estão dentro das expectativas. Uma das amostras (Dodger Blue 1) possui uma cor azul muito acentuada, o que é incomum para a região e detém a maior densidade relativa entre as amostras. O teor elevado do FeO (2,11%) na amostra Dodger Blue 1 justifica estas anomalias: birrefringência e densidade relativa elevadas. Todas as amostras possuem elevado teor de inclusões fluidas, sólidas e algumas fraturas. A presença de NiO é algo incomum de acontecer em berilos. A peculiaridade destes berilos está na correlação entre: intensidade da cor azul e densidade relativa; teor de FeO + NiO e densidade relativa; teor de Na₂O e FeO + NiO; no qual estas características são grandezas diretamente proporcionais. Estas correlações envolvendo gemologia, óptica e química mineral são lineares e demonstram como um fator influencia diretamente em características dos minerais.
- 9) A qualidade gemológica das águas-marinhas foi classificada como "excelente", com a média das avaliações das gemas sendo 7,96, o que pode ser arredondado para 8, visto que a segunda casa decimal é superior a 5. Utilizando a metodologia do "Boletim Referencial de Preços de Diamantes e Gemas de Cor", dentro dos padrões estabelecidos, essa pontuação é considerada "excelente", pois notas iguais ou superiores a 8 são assim classificadas.
- 10) Por meio do Polariscópio Gomes, ao se obter as figuras de interferências (uniaxial negativa), observou-se que as inclusões fluidas e a espessura das isóginas dificultaram a visualização do caráter e sinal óptico. Entre as águas-marinhas analisadas, nenhuma apresentou uma figura de má qualidade ou não visível.
- 11) Os dados obtidos através da difração de raios-X em monocristal foram cruciais para visualizar a organização cristalográfica interna das águas-marinhas gemológicas, especialmente para determinar as dimensões dos eixos cristalográficos e o volume da

célula unitária. Os maiores valores foram obtidos na gema de cor mais intensa, Dodger Blue 1. A densidade relativa calculada pelo método de raios-X em monocristal se aproxima bastante dos valores obtidos com a balança hidrostática, demonstrando que, apesar de ser um método "antigo", ele continua sendo altamente preciso.

- 12) Os dados da espectroscopia Raman são semelhantes aos das águas-marinhas descritas na literatura, porém, a presença de uma banda específica é incomum para a água-marinha e está relacionada à presença de Ni. As bandas detectadas nas duas cores de água-marinha analisadas mostram muitas semelhanças; contudo, algumas variações em intensidade ou presença/ausência de bandas diferentes em algumas cores refletem as diferentes composições químicas e estrutura cristalina desses berilos.
- 13) A análise óptica microscópica das amostras de água-marinha demonstrou que as propriedades ópticas são consistentes, independentemente do tamanho e/ou espessura, com diversas características encontradas em exemplares macroscópicos, como a elevada birrefringência neste mineral. Além disso, a petrografia das águas-marinhas forneceu um nível de detalhamento ainda maior sobre as propriedades ópticas dos exemplares, auxiliando na compreensão do comportamento da luz dentro desses minerais, o que se relaciona diretamente com a cristalografia e química mineral.
- 14) Gemologicamente e opticamente, os exemplares de água-marinha são padrões para o berilo, apesar de algumas peculiaridades e anomalias, com destaque para todas as correlações encontradas. Geoquimicamente e cristalograficamente, as informações são consistentes com os dados mencionados, com correlações presentes, sendo a presença de NiO o maior destaque nessas amostras do ponto de vista geoquímico. Dentro da espectroscopia Raman, o diagnóstico é o mesmo citado anteriormente, com características padrão para a água-marinha, exceto pela banda relacionada ao NiO. Após analisar as propriedades gemológicas, ópticas, geoquímicas, cristalográficas e de espectroscopia, observou-se que suas características se correlacionam entre si, além de, em alguns casos, serem proporcionais entre si. O potencial da região é notável, com águas-marinhas de qualidade gemológica "excelente" e, conseqüentemente, um elevado valor de mercado.

As conclusões a respeito das granadas são:

- 15) Com o uso das propriedades gemológicas, as granadas de Quixeramobim são de dois grupos distintos: spessartita (duas amostras) e grossulária (nove exemplares); que possuem características padrão para este grupo mineral. No entanto, também foi observada: densidade relativa acima da média em algumas granadas, bem como

propagação de luz incomum. A spessartita da região é isotrópica e tem apenas um índice de refração, como esperado, mas as grossuláreas têm três índices de refração e birrefringência, o que é um fenômeno relativamente raro neste grupo de granada.

- 16) Os teores de FeO (1,27-6,85%) nas amostras justificam esta anomalia: densidade relativa elevadas. A parte peculiar das granadas grossulárias está nas correlações entre: cor e índice de refração; cor e densidade relativa; índice de refração e densidade relativa. No qual a intensidade da cor (mais próxima do vermelho ou laranja, cores com valores superiores a 590 nm) está ligada aos maiores valores de índice de refração e densidade relativa, percebeu-se que o teor de FeO é proporcional ao aumento destas características; quanto maior a quantidade de FeO, maiores são os valores destas características citadas.
- 17) A qualidade gemológica das granadas é classificada como “boa”, pois a média das notas atribuídas às gemas é 7,34, 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 no grupo das granadas grossulárias.
- 18) As granadas grossulárias da região de Quixeramobim (Brasil) exibem um novo tipo de figura de interferência. A figura tipo “Mosaico” detém uma aglutinação de cores quando vista com o acessório de quartzo-gipso; as cores azul, amarela e roxa aparecem juntas em uma configuração de mosaico. Esta figura é formada devido as diferentes direções de vibração da luz ao atravessar estas granadas anisotrópicas. Nesta referida configuração, os eixos ópticos e bissetrizes aguda e obtusa ocorrem de tal maneira que existem, ao mesmo tempo, de maneira //, inclinada e \perp a platina. A rara e referida característica se faz presente nas nove amostras de grossulárias da região, cuja cor vai do laranja até o amarelo. O “mosaico” de interferência até o presente momento só foi visualizado em granadas do grupo grossulária de Quixeramobim.
- 19) Os dados obtidos pela difração de raios-X em monocristal foram muito importantes para visualizar a organização cristalográfica interna das granadas, principalmente para constatação das dimensões dos eixos cristalográficos e volume da célula unitária. Em que as diferentes cores de granada possuem valores diferentes. A densidade relativa calculada nas grossulárias 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.
- 20) Os dados da espectroscopia Raman são semelhantes aos das spessartitas e grossulárias disponíveis na bibliografia, percebeu-se que estas não apresentam anomalias; diferente

dos dados obtidos por meio da caracterização gemológica que mostraram peculiaridades e anomalias. As bandas detectadas nos dois grupos de granadas mostram inúmeras semelhanças; contudo, algumas intensidades ou presença/ausência de bandas diferentes em alguns exemplos são o reflexo das diferentes composições químicas e estrutura cristalina.

- 21) A óptica microscópica das amostras de granadas demonstram que as propriedades ópticas são as mesmas, independente do tamanho e/ou espessura, com diversas características sendo as mesmas encontradas em exemplares macroscópicos, com exceção da anisotropia das granadas grossulárias. Os fatores corroboram para que isto ocorra devido a ausência de mais direções de vibração da luz em amostras microscópicas; macroscopicamente as grossulárias de Quixeramobim tem diversas direções de vibração, tornando-as anisotrópicas; contudo, ao utilizar uma fração microscópica, esta pequena parte possui apenas uma direção de vibração. Ademais, a petrografia nestas granadas trouxe um nível de detalhamento ainda maior para os exemplares no quesito óptico, auxiliando o entendimento do comportamento da luz dentro destes minerais. Característica esta que se relaciona diretamente com a cristalografia e química mineral das granadas estudadas.
- 22) Gemologicamente e ópticamente os exemplares de granada são dos grupos spessartita e grossulária, apesar de algumas peculiaridades e anomalias, com destaque para as grossulárias e sua anisotropia, além da nova figura de interferência. Geoquimicamente e cristalograficamente, os nove cristais (do laranja até o amarelo) são grossulárias e os dois cristais (vermelhos) são spessartitas. Dentro da espectroscopia Raman o diagnóstico é o mesmo citado anteriormente, as granadas são spessartitas e grossulárias. Após analisar as propriedades gemológicas, ópticas, geoquímicas, cristalográficas e de espectroscopia as granadas de Quixeramobim são dos grupos spessartita e grossulária; ademais suas características se correlacionam entre si, além de em alguns casos serem proporcionais entre si. O potencial da região é notável, as granadas são detentoras de qualidade gemológica, majoritariamente boa e conseqüentemente um elevado valor de mercado.

As conclusões a respeito das ametistas são:

- 23) Os exemplares de ametistas de Quixeramobim possuem as características comuns para as ametistas (grupo quartzo); a única peculiaridade é uma birrefringência um pouco elevada, superando a média em 0,001 ou 0,002 em alguns exemplares. As demais propriedades ópticas não são anômalas e estão dentro das expectativas. Todas as amostras possuem elevado teor de inclusões fluidas, sólidas, fraturas e por vezes centros e faixas

de cor. Diferente das outras gemas de Quixeramobim, as ametistas não possuem correlações.

- 24) A qualidade gemológica das ametistas foi classificada como "boa", com a média das avaliações das gemas sendo 6,15. Utilizando a metodologia do "Boletim Referencial de Preços de Diamantes e Gemas de Cor", dentro dos padrões estabelecidos, essa pontuação é considerada "boa".
- 25) Por meio do Polariscópio Gomes, ao se obter as figuras de interferências (uniaxial positiva), observou-se que as inclusões fluidas e a espessura das isóginas dificultaram a visualização do caráter e sinal óptico. Dentre as ametistas analisadas, nenhuma apresentou uma figura de má qualidade ou não visível.
- 26) Os dados obtidos através da difração de raios-X em monocristal foram cruciais para visualizar a organização cristalográfica interna das ametistas, especialmente para determinar as dimensões dos eixos cristalográficos e o volume da célula unitária. A densidade relativa calculada pelo método de raios-X em monocristal se aproxima bastante dos valores obtidos com a balança hidrostática, demonstrando que, apesar de ser um método "antigo", ele continua sendo um método preciso.
- 27) Os dados da espectroscopia Raman são semelhantes aos das ametistas descritas na literatura, porém. As bandas detectadas são condizentes com amostras de diferentes lugares do mundo; não foi detectado nenhuma anomalia ou peculiaridade nas bandas Raman das ametistas de Quixeramobim.
- 28) A análise óptica microscópica dos exemplares de ametistas demonstrou que as propriedades ópticas são consistentes, independentemente do tamanho e/ou espessura, com diversas características encontradas em exemplares macroscópicos. Além disso, a petrografia dos cristais de ametistas forneceu um nível de detalhamento ainda maior sobre as propriedades ópticas das amostras, auxiliando na compreensão do comportamento da luz dentro desses minerais, o que se relaciona diretamente com a cristalografia e química mineral.
- 29) Gemologicamente e opticamente, os exemplares de ametista são padrões para o quartzo. Geoquimicamente e cristalograficamente, as informações são consistentes com os dados mencionados, com correlações presentes, sendo a presença de Al_2O_3 o maior destaque nessas amostras do ponto de vista geoquímico. Dentro da espectroscopia Raman, o diagnóstico é o mesmo citado anteriormente, com características padrão para as amostras. O potencial da região é notável, com ametistas de qualidade gemológica "boa".

30) Dentre todos os fatores em comum e entre todas as correlações presentes nos minerais gema da região de Quixeramobim, o FeO é o fator comum entre as turmalinas, águas-marinhas, granadas e ametistas da região. Este, influencia diversas características dos minerais, ocasionalmente está no centro de alguma consequência nos quatro minerais da região e apresenta-se em algumas correlações lineares; de modo que este poderia ser a assinatura geoquímica dos minerais de Quixeramobim.

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.
- ADAMO, I.; GATTA, G. D.; ROTIROTI, N.; DIELLA, V.; PAVESE, A. Gemmological investigation of a synthetic blue beryl: a multi-methodological study. **Mineralogical Magazine**. Volume 72. 2008.
- ADAMO, I.; PAVESE, A.; PROSPERI, L.; DIELLA, V.; AJÒ, D.; GATTA, G. D.; SMITH, C. P. Aquamarine, Maxixe-type beryl, and hydrothermal synthetic blue beryl: Analysis and identification. **Gems & Gemology**, v. 44, 214–226, 2008.
- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B.; FUCK, R. A. Províncias Estruturais Brasileiras. In: 8º Simp. Geol. Nordeste, Campina Grande. **Atlas. Campina Grande, SBG**, p. 363-391, 1977.
- ANDERSON, B. W. **Identificação das Gemas**. Rio de Janeiro: Editora Ao Livro Técnico S/A, p. 460, 1984.
- ANDERSON, B. W. Propriedades e classificação individual da granada. **Periódico da Associação Brasileira de Gemologia**. São Paulo. Ano V, Número 19. 1-6. 1960.
- ANTAO S M, HASSAN I, WANG J, LEE P L, TOBY B H (2008). State-of-the-art high-resolution powder x-ray diffraction (HRPXRD) illustrated with Rietveld structure refinement of quartz, sodalite, tremolite, and meionite. **The Canadian Mineralogist**, 46 1501-1509.
- AREM, J. E. & CLARK D. Amethyst Value, Price, and Jewelry Information. 2023. IGS, **International Gem Society**. Disponível em: <https://www.gemsociety.org/article/amethyst-jewelry-and-gemstone-information/>. Acesso em 13 de maio de 2023.
- AREM, J. E. & CLARK D. Garnet Value, Price, and Jewelry Information. 2023. IGS, **International Gem Society**. Disponível em: <https://www.gemsociety.org/article/garnet-jewelry-and-gemstone-information/>. Acesso 13 de maio de 2023.
- AREM, J. E. & CLARK D. Grossular Garnet Value, Price, and Jewelry Information. 2023. IGS, **International Gem Society**. Disponível em: <https://www.gemsociety.org/article/grossular-garnet/>. Acesso em 13 de maio de 2023.
- AREM, J. E. & CLARK D. Spessartite Garnet Value, Price, and Jewelry Information. 2023. IGS, **International Gem Society**. Disponível em: <https://www.gemsociety.org/article/spessartite-garnet/>. Acesso em 13 de maio de 2023.
- AREM, J. E. & CLARK D. Tourmaline Value, Price, and Jewelry Information. 2023. IGS, **International Gem Society**. Disponível em: <https://www.gemsociety.org/article/tourmaline-jewelry-and-gemstone-information/>. Acesso em 2 de fevereiro de 2019 e 13 de maio de 2023.
- AREM, J. E. Aquamarine Value, Price, and Jewelry Information. 2023. IGS, **International**

Gem Society. Disponível em: <https://www.gemsociety.org/article/aquamarine-jewelry-and-gemstone-information/>. Acesso em 13 de maio de 2023.

ARTHAUD, M. H. **Geologia e tectônica no Domínio Ceará Central.** Qualificação ao Doutorado em Geologia, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília (UNB), p. 270, 2005.

ARTHAUD, M. H. Main structural features of Precambrian domains from Ceará (NEBrazil). International conference on basement tectonics, 14, Ouro Preto. **Abstracts**, Ouro Preto: UFOP/Escola de Minas, p. 84-85, 1998.

ARTHAUD, M. H.; LANDIM, D. F. Relações da seqüência metassedimentar de Quixeramobim com seu embasamento. In: Simposio de Geologia do Nordeste, 16, Recife. **Atas, Recife: SBG**, v. 1, p. 125-128, 1995.

ARTHAUD, M. H.; TORQUATO, J. R.; NOGUEIRA NETO, J. A. BAGGIO, S. B. et al. Silica gossan as a prospective guide for amethyst geode deposits in the Ametista do Sul mining district, Paraná volcanic province, southern Brazil. **Journal of Geochemical Exploration**, vol. 159: p. 213-226, 2015.

ARTHAUD, M.H., CABY, R., FUCK, R.A., DANTAS, E.L. AND PARENTE, C.V. Geology of the Northern Borborema Province, NE Brazil and its correlation with Nigeria, NW Africa. In: West Gondwana: Pre-Cenozoic Correlations Across the Atlantic Region (R.J. Pankhurst, R.A.J. Trouw, B.B. Brito Neves and M.J. De Wit, ed). **Geol. Soc. London Spec. Publ.**, 294, p. 49–67, 2008.

Bello, R. M. S.; Fuzikawa, K.; Gandini, A. L.; Dantas, M. S. S.; Mano, E. S.; Svisero, D. P.; César-Mendes, J. C. Caracterização e Composição Química das Inclusões fluidas em Água-Marinha e Heliodoro de Vila de Água-Marinha, Município de Teixeira de Freitas, Bahia. **Revista da Escola de Minas**, v. 50, n. 2, p. 33-39, 1997.

Bello, R. M. S.; Fuzikawa, K.; Gandini, A. L.; Dantas, M. S. S.; Mano, E. S.; Svisero, D. P.; César-Mendes, J. C. Caracterização e composição química das inclusões fluidas em berilos da Vila de Água-Marinha, município de Teixeira de Freitas, Bahia. In: **2º Simpósio de Inclusões Fluidas - SBG**, v. 7, p. 490-492, 1996.

Beurlen, H.; da Silva, M. R. R.; de Castro, C. Fluid inclusion microthermometry in BeTa-(Li-Sn) – bearing pegmatites from the Borborema Province, Northeast Brazil. **Chemical Geology**, v. 173, 107–123, 2001.

Beurlen, H.; da Silva, M.R.R.; Thomas, R.; Soares, D.R.; Olivier, P. Nb-Ta-(Ti-Sn)-oxide mineral chemistry as tracers of rare-element granitic pegmatite fractionation in the Borborema Province, Northeast Brazil. **Mineralium Deposita**, v. 43, n. 2, 207-228, 2008.

BEURLLEN, 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.

BEURLLEN, 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 (UFPE)**, v. 19, p. 67-71, 2009.

BEURLIN, H.; SILVA, M. R. R. & SOARES, D. R. Ametista da Província Pegmatítica da Borborema: Gênese e Confirmação da Procedência Através do Estudo de Inclusões Fluidas, **Revista de Geologia** (Fortaleza), vol. 15, p. 77-86. 2002.

BITNER, J., HEIMANN, A., WISE, M., SOARES, D.R. & FERREIRA, A.C.M. Garnet and gahnite from the Borborema Pegmatite Province, Northeastern Brazil, as indicators of pegmatite evolution and potential for rare-metal mineralization. **GSA Annual Meeting**, Minneapolis. In: GSA Abstracts with Programs, 43(5), p. 413, 2011.

BLOSS, F. D. **An Introduction to the Methods of Optical Crystallography**. New York: Holt, Rinehart and Winston, 2 edition, p. 294, 1999.

BOSI, F.; ANDREOZZI, G. B.; SKOGBY, H.; LUSSIER, A. J.; ABDU, Y.; HAWTHORNE, F. C. Fluor-elbaite, $\text{Na}(\text{Li}_{1.5}\text{Al}_{1.5})\text{Al}_6(\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_3\text{F}$, a new mineral species of the tourmaline supergroup. **American Mineralogist**. Vol 98. 2013.

BOSI, F.; GIOVANNI, B.; ANDREOZZI, M. F.; GIORGIO, G.; AND SERGIO LUCCHESI. Crystal chemistry of the elbaite-schorl series. **American Mineralogist**, v 90, p. 1784-1792, 2005.

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. Fortaleza: NUCLEBRÁS/CEMINAS, 1984.

BRASIL. 2002. **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.

BRASIL.IBGE. **Censo Populacional 2010**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 29 de novembro de 2010.

BRITO NEVES, B. B. **Regionalização Geotectônica do Pré-cambriano Nordeste**. São Paulo. (Tese de doutoramento, instituto de geociências da usp), p. 198, 1975.

BRITO NEVES, B. B. Tectonic history of the Borborema Province, NW Brazil. In: **International Geological Congress**, 31, Rio de Janeiro, 2000.

BRITO NEVES, B. B., Cordani, U.G., Tectonic Evolution of South America during the late Proterozoic. **Precambrian Research**, 53, p. 23-40, 1991.

BROWN G. E, MILLS B. A. High-temperature structure and crystal chemistry of hydrous alkali-rich beryl, from the Harding pegmatite, Taos County, New Mexico, **American Mineralogist**, 71, p. 547-556, 1986.

BUNNAG, N., KASRI, B., SETWONG, W., SIRISURAWONG, E., CHOTSAWAT, M., CHIRAWATKUL, P., & SAIYASOMBAT, C. Study of Fe ions in aquamarine and the effect of dichroism as seen using UV-Vis, NIR and x-ray, **Radiation Physics and Chemistry**, vol. 177, article id. 109107, 2020.

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

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

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

CAMARGO, W. G. R. Dupla refração e pleocroísmo. **Periódico da Associação Brasileira de Gemologia**. São Paulo. Ano VI, Número 23, p. 23-34, 1961.

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. In: **Brazilian Journal of Geology**. volume 42, n 2, 2019.

CASTRO, N. A. **Evolução geológica proterozóica da região entre Madalena e Taparuaba Domínio Tectônico Ceará Central (Província Borborema)**, São Paulo: s.n, 2004.

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

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

CAVALCANTI, D. E. **Caracterização cristaloquímica, mineralógica e gemológica do berilo do pegmatito mendonça, Distrito de Berilândia, Quixeramobim/CE**. Dissertação (Dissertação em Geologia). Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2017.

ČERNÝ, P. Rare-element granitic pegmatites. Part I: Anatomy and internal evolution of pegmatite deposits. In: Ore Deposit Models. 6 ed. s.l.: **Geoscience Canada reprint series 6**, p. 29-47. 1993.

Cesar-Mendes, J. C.; Bello, R. M. S.; Souza, M. M.; Gandini, A. L.; Fuzikawa, K.; Svisero, D. P. Dados Mineralógicos e Microtermométricos Preliminares dos Berilos Gemológicos da Vila de Água-Marinha, Município de Teixeira de Freitas, Bahia. In: **37º Congresso Brasileiro de Geologia**, v. 2, 113-114, 1992.

César-Mendes, J.; Jordt-Evangelista, H.; Wegner, R. Tourmaline and aquamarine deposits from Brazil. **Australian Gemmologist**, v. 21, n. 1, 3–6, 2001.

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

CORREA, M. **Geologia E Gemologia Das Ametistas De Brejinho Das Ametistas, Bahia**, Graduação. Monografia. Universidade Federal da Bahia, 2007.

CORREA, M. **Variedades gemológicas de quartzo na Bahia, geologia, mineralogia, causas de cor, e técnicas de tratamento**, Msc. Dissertação, Universidade de São Paulo, 2010.

CROWNINGSHIELD, R; HURLBUT, C. & FRYER, C.W. A Simple Procedure to Separate Natural from Synthetic Amethyst on The Basis of Twinning, **Gems and Gemology**, Identification of Amethysts, vol. 22(3), p. 130-139, 1986.

CURRIER, R. **Spessartine R050063**. 2023. Disponível em: <https://rruff.info/spessartine/R050063> Acesso em 17 de agosto de 2024.

CURRIER, R. **Spessartine R060177**. 2023. Disponível em: <https://rruff.info/spessartine/R060177> Acesso em 17 de agosto de 2024.

DANA, J. D.; HURLBURT, C. S. **Manual of Mineralogy**. Edição 20, p. 596, 1985.

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

DNPM. Geologia dos pegmatitos de Metais Raros da Região W e NW de Solonópole (CE). **Anais do XXXIV Congresso Brasileiro de Geologia**, Goiânia, Goiás; V.5; p. 2283-96, 1986.

DOTTO, C. T. & ISOTANI, S. Irradiation and heating effects in amethyst crystals from Brazil, **Radiation Effects and Defects in Solids**, vol. 117, p. 355-361 In: **Evolution of South America**. Rio de Janeiro: SGB, p. 151-182, 2006.

EECKHOUT.S.G., CASTANEDA, C., FERREIRA, A. C. M.; SABIONI, A. C. S., GRAVE, E. & VASCONCELOS, D. C. L. Spectroscopic studies of spessartine from Brazilian pegmatites. **American Mineralogist**, 87, p. 10. 2002.

ESPERANÇA, S., MURRAY, D. C., LAMBERT, D. D. & SVISERO, D. P. The major and trace element geochemistry of garnets from the Vargem 1 Kimberlite pipe, Minas Gerais State, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências (Impresso)**, 67, p. 293-306, 1995.

FERREIRA, A. C. M., FERREIRA, J. A. M. & SOARES, D. R. Almandina-espessartita gema de Marimbondos, Carnaúba dos Dantas, Rio Grande do Norte. IG. **Série B, Estudos e Pesquisas**, 12, p. 31-40, 2007.

FERREIRA, A. C. M., FERREIRA, J. A. M. & SOARES, D. R. Caracterização química e mineralógica da grossulária gema de Água Fria, Região do Seridó, NE do Brasil. IG. **Série B, Estudos e Pesquisas**, 16, p. 83-92. 2006.

FERREIRA, M. S. F.; FONSECA, M. A.; PIRES, F. R. M. Pegmatitos mineralizados em água-marinha e topázio do ponto do Marambaia, Minas Gerais: tipologia e relações com o granito Caladão. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 35, n. 4, p. 463-473, 2005.

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**, Japan, 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. 164 f. Thesis. (PhD) - Department of Geology, Kansas University, Kansas, 1999.

FILHO, J. B. M. & CAMARGO, W. G. R. Sobre a determinação física das granadas. **Periódico da Associação Brasileira de Gemologia**. São Paulo. Ano XIX, Número 39. 23-26. 1974.

Fisher, C. A. et al. Petrography and chemistry of SiO₂ filling phases in the amethyst geodes from the Serra Geral Formation deposit, Rio Grande do Sul, Brazil. **Journal of South America Earth Sciences**, vol. 29(3): p. 751-760, 2010.

FISHER, C. A. et al. Petrography and chemistry of SiO₂ filling phases in the amethyst geodes from the Serra Geral Formation deposit, Rio Grande do Sul, Brazil. **Journal of South America Earth Sciences**, vol. 29(3): pp. 751-760, 2010.

FLINT, E. **Princípios de Cristalografia**. Editorial Paz. Moscou. 1965.

FRANCESCO, N., FARINA, F., LANA C., STEVENS, G., HARRIS, C. & NALINE, H. A. Trace element and oxygen isotope compositions of grossular-rich magmatic garnets from the lower crustal Galiléia granitoids, Araçuaí orogen, SE Brazil. **Geophysical Research Abstracts**, 20, 10416, 2018.

FRANCO, R. R. & CAMPOS, J. E. S. **As pedras preciosas**. Editora da Universidade de São Paulo. Rio de Janeiro, p.155, 1971.

FRANCO, R. R. Berílio – Mineral e Metal. **Periódico da Associação Brasileira de Gemologia**. São Paulo. Ano XI, Número 3, p. 19-23, 1967.

FRANCO, R. R. Microscópio e Lupas. Imperfeições das gemas naturais. **Periódico da Associação Brasileira de Gemologia**. São Paulo. Ano VI, Número 36. p. 15-22, 1961.

FRANCO, R. R. Sobre as inclusões em minerais e gemas. **Periódico da Associação Brasileira de Gemologia**. São Paulo. Ano V, Número 17, p. 11-20, 1959.

FRANK, H. T. **Guia de Minerais Transparentes ao Microscópio Petrográfico**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 218 p. 2008.

FREIRE, D, M, N. **Caracterização Cristaloquímica E Cristalofísica Sobre A Gênese De Turmalina E Columbita-(Fe) De Pegmatitos Das Regiões De Solonópole E Berilândia No Estado Do Ceará**. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

FUJIMORI, S. & FERREIRA, Y.A. **Introdução ao uso do microscópio petrográfico**, 2a. edição, Centro Editorial e Didático da UFBA – Salvador, 202 p. 1987.

GEMOLOGICAL INSTITUTE OF AMERICA (GIA) – **Elbaite R060562**. Disponível em:

<https://rruff.info/Elbaite/R060562> Acesso em 13/12/2023.

GEMOLOGICAL INSTITUTE OF AMERICA (GIA) – **Elbaite R060631**. Disponível em: <https://rruff.info/Elbaite/R060631> Acesso em 13/12/2023.

GEMOLOGICAL INSTITUTE OF AMERICA (GIA) – **Elbaite R070564**. Disponível em: <https://rruff.info/Elbaite/R070564> Acesso em 13/12/2023.

GEMOLOGICAL INSTITUTE OF AMERICA (GIA) – **Grossular R060442**. Disponível em: <https://rruff.info/grossular/display=default/R060442> Acesso em 19/12/2023.

GEMOLOGICAL INSTITUTE OF AMERICA (GIA) – **Grossular R060444**. Disponível em: <https://rruff.info/grossular/display=default/R060444> Acesso em 19/12/2023.

GEMOLOGICAL INSTITUTE OF AMERICA (GIA) – **Grossular R060452**. Disponível em: <https://rruff.info/grossular/display=default/R060452> Acesso em 19/12/2023.

GEMOLOGICAL INSTITUTE OF AMERICA (GIA) – **Spessartine R060447**. Disponível em: <https://rruff.info/spessartine/R060447> Acesso em 19/12/2023.

GILG, H. A. et al. Genesis of amethyst geodes in basaltic rocks of the Serra Geral Formation (Ametista do Sul, Rio Grande do Sul, Brazil): a fluid inclusion, REE, oxygen, carbon, and Sr isotope study on the basalt, quartz and calcite. **Mineralium Deposita**, vol. 28: p. 1009-1025, 2002.

GILLET, P.; GEIGER, C. A.; High-Pressure and High-Temperature Raman-Spectroscopy of End-Member Garnets - Pyrope, Grossular and Andradite. **European Journal of Mineralogy** 4(4), p. 651-664, January 1992.

GRAZIANI G.; DI GIULIO V. Growth of aquamarine crystal from Brazil. **Neues Jahrbuch für Mineralogie—Monatshefte**, v. 3, p. 101–108, 1979.

GREW, E. S., LOCOCK, A. J., MILLS, S. J., GALUSKINA, I. O., GALUSKIN, E. V. & HÅLENIUS, U. Nomenclature of the garnet supergroup. **American Mineralogist**, 98, p. 785–811, 2013.

GROAT, L.A., ROSSMAN, G.R., DYAR, M.D., TURNER, D., PICCOLI, P.M.B., SCHULTZ, J., & OTTOLINI, L. Crystal Chemistry of Dark Blue Aquamarine from The True Blue Showing, Yukon Territory, Canada. **The Canadian Mineralogist**, vol. 48, p. 597-613, 2010.

GUTTLER, S. R. & KOHIGASHI, H. C. Treated violetish blue to violet quartz from Brazil, **Gems & Gemology**, vol. 42, p. 285-286, 2006.

HARTMANN, L. A. et al. Sequential opening and filling of cavities forming vesicles, amygdales and giant amethyst geodes in lavas from the southern Paraná volcanic province, Brazil and Uruguay. **International Geology Review**, vol. 54(1): p. 1-14, 2010.

HARTMANN, L. A. Indicadores geológicos da presença de jazidas de ametista, ágata e cobre em basaltos no Grupo Serra Geral. In: Maciel Donato; Lauren da Cunha Duarte; Léo Afraneo Hartmann. (Org.). **Inovação, design e pesquisas aplicadas em gemas, joias e mineração**.

1ed. Porto Alegre: IGeo/UFRGS, v. 1, p. 6-13, 2015.

HAWTHORNE, F.C.; DIRLAM, D.M. Tourmaline the indicator mineral: from atomic arrangement to viking navigation. **Elements**, 7(5): 307-312, 2011.

HEINRICH, E.W. **Microscopic Identification of Minerals**. McGraw-Hill, New York. Second edition, p. 414, 1980.

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

HOFFMAN, E., STROOBANT, V. **Mass Spectrometry: Principles and Applications**. John Wiley & Sons Ltd, Third Edition, England, 2007.

HOFMEISTER, A.M., SCHAAL, R.B., CAMPBELL, K.R., BERRY, S.L. & FAGAN, T.J. Prevalence and origin of birefringence in 48 garnets from the pyropealmandine-grossularite-spessartine quaternary. **American Mineralogist**, 83, p. 1293–1301, 1998.

HOLLANDA, M.H.B.M., ARCHANJO, C.J., SOUZA, L.C., ARMSTRONG, R., VASCONCELOS, P.M. Cambrian mafic to felsic magmatism and its connections with transcurent shear zones of the Borborema Province (NE Brazil): Implications for the late assembly of the West Gondwana. **Precambrian Research** 178, 1e14, 2010.

HOOVER, D. B., KARFUNKEL, J., KRAMBROCK, K. & FERNANDES, A. F. An unusual color-change almandine from Fazenda Rodolita, Tocantins State, Brazil. **Australian Gemmologist**, 25, p. 337-345, 2015.

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

HURLBUT JR. C.S. & SWITZER, G.S. **Gemology**, John Wiley & Sons, New York, 243p. 1979.

HUTCHINGS, J. Rapid Raman microscopic imaging for potential histological screening. Proceedings of SPIE - **The International Society for Optical Engineering**, march 2008.

IBGM/DNPM. **Manual Técnico de Gemas**. Editora Convênio DNPM/IBGM – Brasília, p. 215, 2009.

IPECE (Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará). **Limites municipais e distritais - Região de planejamento Sertão Central**, 1 mapa, 2019.

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

JUCHEM, P. L. Mineralizações De Ametista Em Riodacitos Do Grupo Serra Geral, Província Vulcânica Paraná. In: **Metalogenia e Exploração Mineral no Grupo Serra Geral**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 41-54, 2014.

JUCHEM, P. L.; FISCHER, A. C.; SVISERO, D. P.; SILVA, A.O. Características químicas dos minerais de sílica de geodos mineralizados a ametista da região do Alto Uruguai, RS, Brasil. **Anais del XI Congresso Latinoamericano de Geologia**, p. 1-6, 2001.

JUCHEM, P. L.; FISCHER, A. C; BELLO, R. M. S. ; SVISERO, D. P. Inclusões fluidas em ametistas da região do Alto Uruguai, Rio Grande do Sul. **Boletim de Resumos Expandidos do 38º Congresso Brasileiro de Geologia**, p. 649-650, 1994.

KELLER, P. C. Gemstones Formed in Pegmatites: Gem Pegmatites of Minas Gerais, Brazil. In: KELLER, P. C. **Gemstones and Their Origins**. Boston: Springer, p. 57–69, 1990.

KERR, P.F. Optical mineralogy. McGraw Hill Inc. New York, USA, 2st edition. 492 p., 1987.

KLEIN, C. & DUTROW, B. **Manual do Ciência dos Minerais**. Bookman – Porto Alegre. 23 ° edição. 706 p., 2012.

KOIVULA, J. I., FRYER, C. W. & KAMMERLING R. C. Spessartine garnet in Brazilian topaz. **The Journal of Gemmology**. Gemological Institute of America, California, US, 22(6), p. 366–368, 1991.

KOLESOV, B. A.; GEIGER, C. A.; Raman spectra of silicate garnets. **Phys Chem Minerals** 25:142-151. Springer-Verlag. 1998.

KORALAY, T. et al. Determination of Tourmaline Composition in Pegmatite from Buldan, Denizli (Western Anatolia, Turkey) Using XRD, XRF, and Confocal Raman Spectroscopy. **Spectroscopy Letters United Kingdom**, v 46, p. 499-506, 2013.

KRAMBROCK, K., GUIMARÃES, F. S., PINHEIRO, M. V. B., PANIAGO, R., RIGHI, A., PERSIANO, A. I. C., KARFUNKEL, J. & HOOVER, D. B. Purplish-red almandine garnets with alexandrite-like effect: causes of colors and color-enhancing treatments. **Physics and Chemistry of Minerals**, 40, p. 555-562, 2013.

KRISHNAMURT, The Raman spectrum of quartz and its interpretation. **Proceedings of the Indian Academy of Sciences A**, 47, 276, 1958.

LAMEIRAS, F.S., NUNES, E.H.M., VASCONCELOS, W.L. Infrared and chemical characterization of natural amethysts and prasiolites colored by irradiation. **Materials Research**: 12, p. 315-320, 2009.

LAURS, BRENDAN. M., & KNOX, KIMBERLY. Spessartine garnet from Ramona, San Diego County, California. **Gems & Gemology**, 37(4), 278-295 doi:10.5741/gems.37.4.278, 2001.

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

LIMA, E. S., VANNUCCI, R., BOTTAZZI, P. & OTTOLINI, L. Reconnaissance study of trace element zonation in garnet from the central structural domain, northeastern Brazil: an

example of polymetamorphic growth. **Journal of South American Earth**, 8(3-4), p. 315–324, 1995.

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

LÚCIO, T. **Paleogeografia do cretáceo no nordeste do Brasil: abordagem geoquímica e geocronológica estratégica das Bacias do Araripe, São Luís e Grajaú**. Thesis for: PhD, UFPE, 2022.

MACHADO, F. B. & NARDY, A. J. R. Mineralogia Óptica. **São Paulo: Oficina de Textos**. 121 p. 2016.

MAKRESKI, P.; RUNCEVSKI, T.; JOVANOVSKI, G.; Minerals from Macedonia. XXVI. Characterization and spectra–structure correlations for grossular and uvarovite. Raman study supported by IR spectroscopy. **Journal of Raman Spectroscopy**. v 42, 72–77 2011.

MARFUNIN, A.S. Advanced Mineralogy: Composition, Structure, and Properties of Mineral Matter. **Springer-Verlag**, US, 1994.

MARQUES JR., F.; NOGUEIRA NETO, J. A. Considerações petrogenéticas do campo pegmatítico de Berilândia (CE). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37., São Paulo, 1992. **Boletim de Resumos Expandidos**. São Paulo: SBG, p. 53-54, 1992.

MARQUES JR., F.; NOGUEIRA NETO, J. A.; NERI, T. F. O. Contribuição à Geologia do Campo Pegmatítico de Berilândia (CE). In: **35º Congresso Brasileiro de Geologia**, v. 1, 329-337, 1988.

MARQUES, F. J. **Geologia do Campo Pegmatítico de Berilândia, CE**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação e Recursos Minerais e Hidrogeologia. Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências. São Paulo, 1992.

MARQUES, J. G. **Caracterização geológica e tecnológica de granitóides do Ceará**. Thesis for: Mestre em Geomateriais e Recursos Geológicos, 2014.

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 SBG**, p. 28, 1998.

MARTINS, G. **Litogeoquímica e controles geocronológicos da Suíte Metamórfica Algodões-Choró**. 218 f. Dissertação (Mestrado) - 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**, Fortaleza, v. 17, n. 1, p. 38-51, 2004.

MAZZOLENI, P.; BARONE, G.; RANERI, S.; AQUILIA, E.; BERSANI, D.; CIRRINCIONE, R. Application of microraman spectroscopy for the identification of

unclassified minerals preserved in old museum collections. **Pliniu**, v. 42, p. 112-124, 2016.

MERKEL, P., & BREEDING, C. 2009 apud NETO, J.A.N et al Estudo espectroscópico preliminar em turmalinas bicolors, azuis e verdes oriundas da Província Borborema, Estado do Ceará, Brasil. **XII Congresso Ibérico de Geoquímica**, p. 169-172, 2019.

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**, Berlin, 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**, 1: p. 901-909, 1987.

NASSAU, K. **Gems Made by Man**. 1 edição. 364p. 1980.

NASSAU, K. **The Physics and Chemistry of Color**. The Fifteen Causes of Color. New York, John Wiley & Sons, p. 454, 1983.

NESSE, W. D. Introduction to Optical Mineralogy. Oxford Univ. Press, New York, 3rd edition. 348p. 2004.

NOGUEIRA NETO, J. A.; CAVALCANTI, D. E. ; SANTIAGO, C. S. ; LIMA, MARTHA NOÉLIA. Estudo espectroscópico preliminar em turmalinas bicolors, azuis e verdes oriundas da Província Borborema, Estado do Ceará, Brasil. In: XII Congresso Ibérico de Geoquímica, Évora. **Boletim de Resumos Extendidos do XII CIG**. Évora - Portugal: Universidade de Évora, v. Unico. p. 169-172, 2019.

NOGUEIRA, J. F. **Estrutura, geocronologia e alojamento dos batólitos de Quixadá, Quixeramobim e Senador Pompeu – Ceará Central**. 123 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2004.

OLIVEIRA, A. B. Imperfeições internas cristalinas e sua importância em gemologia. **Periódico da Associação Brasileira de Gemologia**. São Paulo. Ano XI, Número 36, p. 25-37. 1967.

OLIVEIRA, I. G. **Caracterização e análise do potencial gemológico de turmalinas de Quixeramobim, CE, Brasil**. 80 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020. Disponível em: http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/53134/7/2020_dis_igoliveira.pdf. Acesso em: 23 agost. 2020.

OLIVEIRA, I. G. **Análise De Gemas e Minerais Por Meio Do Polariscópio Gomes**. 54 f. TCC (Graduação) - Curso de Geologia, Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018. Disponível em: http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/43008/3/2018_tcc_igoliveira.pdf. Acesso em: 23 agost. 2020.

OLIVEIRA, I.G.; CARNEIRO, L.S.; SARAIVA, C.E.R. & NERI, T.F.O. Identificação Gemológica dos Coríndons e Diferenciação de suas Imitações. **Anuário do Instituto de**

Geociências – IGEO, Universidade Federal do Rio de Janeiro, v 42(2): p. 456-465. 2019.

OLIVEIRA, I.G.; CARNEIRO, L.S.; SARAIVA, C.E.R.; MATTOS, I.C.; NERI, T.F.O. Caracterização Gemológica das Turmalinas de Quixeramobim. **Anuário do Instituto de Geociências – IGEO**, Universidade Federal do Rio de Janeiro, v 43(1): p. 207-217. 2020.

OLIVEIRA, I.G.; MACIEL, E.L.; RODRIGUES, T.F.; MATTOS, I.C.; NERI, T.F.O. Caracterização Gemológica das Ametistas com Alta Birrefringência de Santa Quitéria. **Anuário do Instituto de Geociências – IGEO**, Universidade Federal do Rio de Janeiro, v 43(3): p. 137-144. 2020.

OLIVEIRA, J. C. P., KUNRATH, J. I. & VASQUEZ, A. The Mössbauer effect in natural almandine: $\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$. **IOP Publishing Ltd**, Physica Scripta, 36(3), p. 526, 1987.

OLIVEIRA, J.C.P., COSTA, M.I. JR., SCHREINER, W.H. & VASQUEZ, A. Magnetic properties of the natural pyrope-almandine garnets. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 79(1), p. 1-7, 1989.

ORIGLIERI, M. **Elbaite R050260**. Disponível em: <<https://rruff.info/Elbaite/R050260>> Acesso em 13/12/2023.

PALHETA, E. S. M. **Geologia e recursos minerais da folha Senador Pompeu – SB.24-V-D-VI: Estado do Ceará**. 1 mapa. Escala 1:100.000. Fortaleza. CPRM, 2017.

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

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. (Orgs.). Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. **Revista de Geologia**. [S.l.]: Beca. p. 525-536. 2004.

PASQUARELLO & CORSO, Identification of Raman Defect Lines as Signatures of Ring Structures in Vitreous Silica. **Physical Review Letters**. vol 80, 5145 – Published 8 June 1998.

PEHRSON, E.A.K. **Identification Methods of Sri Lankan Corundum in comparison to Other Common Gemstones**. Department of Earth Sciences, Uppsala University, Independent thesis Basic level (degree of Bachelor), p. 42, 2017.

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

PHICHAIKAMJORNWUT, B, PONGKRAPAN, S, INTARASIRI, S, BOOTKUL D. Conclusive comparison of gamma irradiation and heat treatment for color enhancement of Rubellite from Mozambique. **Vibrational Spectrosc**, 103:102926, 2019.

PINCH, W. W., **Elbaite R100137**. Disponível em: <https://rruff.info/Elbaite/R100137> Acesso em 13/12/2023.

PINEO, T. R. G. ET AL. **Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Ceará**, 1 mapa. Escala 1:500.000. Fortaleza. CPRM, 2020.

PROUST, D. & FONTAINE, C. Amethyst-bearing lava flows in the Paraná Basin (Rio Grande do Sul, Brazil): cooling, vesiculation and formation of the geodic cavities. **Geological Magazine**, vol. 144(1): p. 53-65, 2007.

QUARTIERI, S.; CHABOY, J.; MERLI, M.; OBERTI, R.; UNGARETTI, L. Local structural environment of calcium in garnets: A combined structure-refinement and XANES investigation. **Physics and Chemistry of Minerals**. Volume 22. 1995.

RESENDE, J. A. L. C. & FERNANDES, N.G. X-ray powder refinement of a natural garnet from Diamantina, Minas Gerais, Brazil. **Acta Cryst.** 61, p. 265-267, 2005.

ROBERTS, W.L., CAMPBELL, T.J., & RAPP, G.R.Jr. **Encyclopedia of Minerals**, Van Nostrand Reinhold, New York, USA, 1990.

RODEHORST U, GEIGER CA, ARMBRUSTER T. The crystal structures of grossular and spessartine between 100 and 600 K and the crystal chemistry of grossular-spessartine solid solutions. **American Mineralogist** 87, p.542-549, 2002.

ROLFF, P. **Minerais dos pegmatitos da Borborema**, Rio de Janeiro: s.n. 1946.

ROSSMAN, G.R. Beryl X050030. Disponível em <[https://rruff.info/aquamarine\\$/X050030](https://rruff.info/aquamarine$/X050030)> Data de acesso 13/12/2023.

SANTOS E.J. & BRITO NEVES B.B. Província Borborema. In: F.F.M. Almeida & Y. Hasui (Eds.) **O Pré-cambriano do Brasil**, Edgard Blücher, São Paulo, p. 123– 186, 1984.

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

SCHMETZER, H.; KIEFERT, L.; HÄNNI, H. A. Asterism in beryl, aquamarine and emerald – an update. **Journal of Gemmology**, v. 29, n. 2, 65-71, 2004.

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

SCHUMANN, W. **Gemas do Mundo**. São Paulo, DISAL Editora. 279 p., 2006.

SCHUMANN, W. **Gemstones of the World**. Sterling Editora – Nova York, 319 p., 2020.

SCOTT, M. Quartz R060604. Disponível em:

<https://rruff.info/quartz/display=default/R060604> Acesso em 19/12/2023.

SHIYUAN, CUI, XU, BO, SHEN, JIAQI, MIAO, ZHUANG, WANG, ZIXUAN. Gemology, Spectroscopy, and Mineralogy Study of Aquamarines of Three Different Origins. **Crystals**, 13 (10) doi:10.3390/cryst13101478, 2023.

SHTUKENBERG, A. G., PUNIN, Y. O., FRANK-KAMENETSKAYA, O. V., KOVALEV, O. G. & SOKOLOV, P. B. On the origin of anomalous birefringence in grandite garnets. **Mineralogical Magazine**, 65, p. 445–459, 2001.

SHTUKENBERG, A.G., POPOV, D. YU. & PUNIN, Y.O. Growth ordering and anomalous birefringence in ugrandite garnets. **Mineralogical Magazine**, 69, p. 537–550. 2005.

SIMMONS, S. A. **Look at Pegmatite Classifications**, Louisiana: s.n. 2005.

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) – Programa de Pós-Graduação em Geociências - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

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

SOARES, D. R.; FERREIRA, A. C. M.; BEURLIN, 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 (UFPE)**, v. 21, p. 123-133, 2011.

SOUZA, J. V. **Geologia dos Pegmatitos de Metais Raros da Região W e NW de Solonópole – CE**. Tese de Professor Titular. Departamento de Geologia. UFC. Fortaleza. CE. 1985.

STUBNA J, BACÍK P, FRIDRICHOVÁ J, HANUS R, ILLÁŠOVÁ L. Gem-quality green Cr-bearing andradite (var. Demantoid) from Dobšiná, Slovakia. **Minerals**, 9 (164): p. 1-12, 2019.

SVISERO, D. P. Piropos cromíferos da mina de diamantes de Romaria: composição química e origem. **Boletim Mineralógico**, 6, p. 7-14, 1979.

TERRA, C. Gemologia: a ciência de mil cores. Terræ Didática, vol. 16: p. 1-13, 2020.
TONONI et al. Tratamento Por Radiação Gama Em Cristais De Ametista Da Região De Progresso/Rs. **Revista Ciatec – UPF**, vol. 11(1), p. 10-18, 2019.

TONONI, L. L.; DUARTE, L. C. ; JUCHEM, P. L.; MENEZES, M. T. F; SCHNELLRATH, J. Tratamento por radiação gama em cristais de ametista da região de Progresso/RS. **Revista de Ciências Exatas Aplicadas e Tecnológicas da UPF**, v. 11, p. 10-18, 2019.

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

TRUMBULL, B. R; BEURLIN, 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.

University of Arizona Mineral Museum - **Grossular R040066**. Disponível em:

<https://rruff.info/grossular/display=default/R040066> acesso em 19/12/2023.

University of Arizona Mineral Museum, **Beryl R040002**. Disponível em:
[https://rruff.info/aquamarine\\$/R040002](https://rruff.info/aquamarine$/R040002) Acesso em: 13/12/2023.

UROSEVIC, MAJA, NEBEL, OLIVER, PADRÓN-NAVARTA, JOSÉ ALBERTO, RUBATTO, DANIELA. Assessment of O and Fe isotope heterogeneity in garnet from Kakanui (New Zealand) and Erongo (Namibia). **European Journal of Mineralogy**, 30 (4). 695-710 doi:10.1127/ejm/2018/0030-2755, 2018.

VASCONSELOS, C. P. **Beryl R050121**, 2023. Disponível em:
[https://rruff.info/aquamarine\\$/R050121](https://rruff.info/aquamarine$/R050121) Acesso em: 13/12/2023.

VERTRIEST, A. C. W. & RENFRO, N.D. Field Gemology: Building a Research Collection and Understanding the Development of Gem Deposits. **Gems & Gemology**. Gemological Institute of America, Vol. 55, No.4, p. 490-511, 2019.

VIDAL, F.W.H. & NOGUEIRA NETO, J. A. Minerais de pegmatitos. In: VIDAL, F.W.H.; SALES, F.A.C.B.; ROBERTO, F.A.C.; SOUSA, J.F. & MATTOS, I.C (ed.). **Rochas e Minerais Industriais do Estado do Ceará**. Realce Editora & Indústria Gráfica, p. 67-81, 2005.

WAHLSTROM, E. E. **Cristalografia Óptica**. Editora da Universidade de São Paulo. Rio de Janeiro. p. 367, 1969.

WHITE, J. S. Spessartine from the Navegador Mine, Minas Gerais, Brazil. **Rocks & Minerals**, 84(1), p. 42-45, 2010.

WILL, G; BELLOTTO, M; PARRISH, W; HART, M. Crystal structures of quartz and magnesium germanate by profile analysis of synchrotron-radiation high-resolution powder data. **Journal of Applied Crystallography**. Volume 21, 1988.

YAKUBIVICH O V, PEKOV I V, STEELE I M, MASSA W, CHUKANOV N V. Alkali metals in beryl and their role in the formation of derivative structural motifs: Comparative crystal chemistry of vorobyevite and pezzottaite. **Crystallography Reports** 54, p. 399-412, 2009.

ZUKOV, V. **General Petrography**. Moscou: Editora Nedra, p. 227, 1967.

APÊNDICE A - ÍNDICES DE REFRAÇÃO, TOTAIS

ÍNDICES DE REFRAÇÃO		
Amostra Cor (Identificação)	Refratômetro 1	Refratômetro 2
TURMALINAS		
Azul (Dark Turquoise)	No: 1,640, 1,640, 1,640, 1,640, 1,640, 1,640 Ne: 1,608, 1,618, 1,611, 1,612, 1,610, 1,608	No: 1,640, 1,640, 1,640, 1,640, 1,640, 1,640 Ne: 1,608, 1,618, 1,611, 1,612, 1,610, 1,608
Azul (London Blue Topaz)	No: 1,641, 1,641, 1,641, 1,641, 1,641, 1,641 Ne: 1,605, 1,605, 1,611, 1,615, 1,608, 1,612	No: 1,641, 1,641, 1,641, 1,641, 1,641, 1,641 Ne: 1,605, 1,605, 1,611, 1,615, 1,608, 1,612
Azul (Deep Sky Blue 4)	No: 1,646, 1,646, 1,646, 1,646, 1,646, 1,646 Ne: 1,611, 1,615, 1,613, 1,611, 1,612, 1,613	No: 1,646, 1,646, 1,646, 1,646, 1,646, 1,646 Ne: 1,611, 1,615, 1,613, 1,611, 1,612, 1,613
Azul (Turquoise)	No: 1,645, 1,645, 1,645, 1,645, 1,645, 1,645 Ne: 1,611, 1,617, 1,611, 1,615, 1,616, 1,613	No: 1,645, 1,645, 1,645, 1,645, 1,645, 1,645 Ne: 1,611, 1,617, 1,611, 1,615, 1,616, 1,613
Verde (Green 3)	No: 1,642, 1,642, 1,642, 1,642, 1,642, 1,642 Ne: 1,620, 1,624, 1,620, 1,626, 1,621, 1,623	No: 1,642, 1,642, 1,642, 1,642, 1,642, 1,642 Ne: 1,620, 1,624, 1,620, 1,626, 1,621, 1,623
Verde (Chartreuse 3)	No: 1,637, 1,637, 1,637, 1,637, 1,637, 1,637 Ne: 1,621, 1,621, 1,625, 1,622, 1,623, 1,624	No: 1,637, 1,637, 1,637, 1,637, 1,637, 1,637 Ne: 1,621, 1,621, 1,625, 1,622, 1,623, 1,624
Verde (Chartreuse 4)	No: 1,638, 1,638, 1,638, 1,638, 1,638, 1,638	No: 1,638, 1,638, 1,638, 1,638, 1,638, 1,638

	Ne: 1,620, 1,624, 1,621, 1,622, 1,620, 1,620	Ne: 1,620, 1,624, 1,621, 1,622, 1,620, 1,620
Verde (Olive Drab)	No: 1,640, 1,640, 1,640, 1,640, 1,640, 1,640 Ne: 1,620, 1,625, 1,621, 1,620, 1,624, 1,623	No: 1,640, 1,640, 1,640, 1,640, 1,640, 1,640 Ne: 1,620, 1,625, 1,621, 1,620, 1,624, 1,623
Rosa (Hot Pink 2)	No: 1,633, 1,633, 1,633, 1,633, 1,633, 1,633 Ne: 1,610, 1,612, 1,616, 1,610, 1,611, 1,612	No: 1,633, 1,633, 1,633, 1,633, 1,633, 1,633 Ne: 1,610, 1,612, 1,616, 1,610, 1,611, 1,612
Rosa (Deep Pink 1)	No: 1,636, 1,636, 1,636, 1,636, 1,636, 1,636 Ne: 1,612, 1,614, 1,612, 1,615, 1,612, 1,613	No: 1,636, 1,636, 1,636, 1,636, 1,636, 1,636 Ne: 1,612, 1,614, 1,612, 1,615, 1,612, 1,613
Rosa (Deep Pink 2)	No: 1,634, 1,634, 1,634, 1,634, 1,634, 1,634 Ne: 1,608, 1,609, 1,608, 1,612, 1,614, 1,615	No: 1,634, 1,634, 1,634, 1,634, 1,634, 1,634 Ne: 1,608, 1,609, 1,608, 1,612, 1,614, 1,615
Rosa (Deep Pink 3)	No: 1,638, 1,638, 1,638, 1,638, 1,638, 1,638 Ne: 1,609, 1,615, 1,610, 1,609, 1,612, 1,610	No: 1,638, 1,638, 1,638, 1,638, 1,638, 1,638 Ne: 1,609, 1,615, 1,610, 1,609, 1,612, 1,610
Vermelho (Dark Red)	No: 1,640, 1,640, 1,640, 1,640, 1,640, 1,640 Ne: 1,608, 1,612, 1,610, 1,613, 1,611, 1,608	No: 1,640, 1,640, 1,640, 1,640, 1,640, 1,640 Ne: 1,608, 1,612, 1,610, 1,613, 1,611, 1,608
Vermelho (Red 3)	No: 1,639, 1,639, 1,639, 1,639, 1,639, 1,639 Ne: 1,610, 1,612, 1,613, 1,610, 1,615, 1,616	No: 1,639, 1,639, 1,639, 1,639, 1,639, 1,639 Ne: 1,610, 1,612, 1,613, 1,610, 1,615, 1,616
Vermelho (Red 3)	No: 1,640, 1,640, 1,640, 1,640, 1,640, 1,640 Ne: 1,610, 1,610, 1,614, 1,612, 1,615, 1,613	No: 1,640, 1,640, 1,640, 1,640, 1,640, 1,640 Ne: 1,610, 1,610, 1,614, 1,612, 1,615, 1,613

Vermelho (Dark Red)	No: 1,640, 1,640, 1,640, 1,640, 1,640, 1,640 Ne: 1,608, 1,609, 1,613, 1,612, 1,617, 1,610	No: 1,640, 1,640, 1,640, 1,640, 1,640, 1,640 Ne: 1,608, 1,609, 1,613, 1,612, 1,617, 1,610
Bicolor (Azul e Verde) (Deep Sky Blue 3 /Chartreuse 3)	No: 1,640, 1,640, 1,640, 1,640, 1,640, 1,640 Ne: 1,619, 1,619, 1,623, 1,622, 1,621, 1,619	No: 1,640, 1,640, 1,640, 1,640, 1,640, 1,640 Ne: 1,619, 1,619, 1,623, 1,622, 1,621, 1,619
Bicolor (Verde e Rosa) (Deep Pink 4/ Chartreuse 4)	No: 1,638, 1,638, 1,638, 1,638, 1,638, 1,638 Ne: 1,609, 1,609, 1,615, 1,614, 1,611, 1,610	No: 1,638, 1,638, 1,638, 1,638, 1,638, 1,638 Ne: 1,609, 1,609, 1,615, 1,614, 1,611, 1,610
ÁGUA-MARINHA		
Azul (Cyan 2)	No: 1,585, 1,585, 1,585, 1,585, 1,585, 1,585 Ne: 1,575, 1,578, 1,577, 1,575, 1,578, 1,576	No: 1,585, 1,585, 1,585, 1,585, 1,585, 1,585 Ne: 1,575, 1,578, 1,577, 1,575, 1,578, 1,576
Azul (Deep Sky Blue 1)	No: 1,585, 1,585, 1,585, 1,585, 1,585, 1,585 Ne: 1,572, 1,576, 1,572, 1,573, 1,574, 1,574	No: 1,585, 1,585, 1,585, 1,585, 1,585, 1,585 Ne: 1,572, 1,576, 1,572, 1,573, 1,574, 1,574
Azul (Deep Sky Blue 1)	No: 1,585, 1,585, 1,585, 1,585, 1,585, 1,585 Ne: 1,572, 1,572, 1,575, 1,572, 1,574, 1,573	No: 1,585, 1,585, 1,585, 1,585, 1,585, 1,585 Ne: 1,572, 1,572, 1,575, 1,572, 1,574, 1,573
Azul (Deep Sky Blue 1)	No: 1,588, 1,588, 1,588, 1,588, 1,588, 1,588 Ne: 1,578, 1,580, 1,582, 1,578, 1,579, 1,582	No: 1,586, 1,586, 1,586, 1,586, 1,586, 1,586, Ne: 1,575, 1,579, 1,582, 1,575, 1,580, 1,581
Azul (Deep Sky Blue 2)	No: 1,588, 1,588, 1,588, 1,588, 1,588, 1,588 Ne: 1,574, 1,576, 1,574, 1,577, 1,575, 1,575	No: 1,588, 1,588, 1,588, 1,588, 1,588, 1,588 Ne: 1,574, 1,576, 1,574, 1,577, 1,575, 1,575
Azul	No: 1,585, 1,585, 1,585, 1,585,	No: 1,585, 1,585, 1,585, 1,585,

(Cyan 2)	1,585, 1,585 Ne: 1,573, 1,576, 1,574, 1,573, 1,576, 1,574	1,585, 1,585 Ne: 1,573, 1,576, 1,574, 1,573, 1,576, 1,574
Azul (Cyan 2)	No: 1,585, 1,585, 1,585, 1,585, 1,585, 1,585 Ne: 1,574, 1,575, 1,577, 1,574, 1,575, 1,576	No: 1,584, 1,584, 1,584, 1,584, 1,584, 1,584 Ne: 1,573, 1,575, 1,577, 1,574, 1,573, 1,575
Azul (Deep Sky Blue 2)	No: 1,590, 1,590, 1,590, 1,590, 1,590, 1,590 Ne: 1,576, 1,577, 1,579, 1,577, 1,576, 1,577	No: 1,590, 1,590, 1,590, 1,590, 1,590, 1,590 Ne: 1,576, 1,577, 1,579, 1,577, 1,576, 1,577
Azul (Cyan 1)	No: 1,580, 1,580, 1,580, 1,580, 1,580, 1,580 Ne: 1,570, 1,574, 1,570, 1,573, 1,575, 1,573	No: 1,581, 1,581, 1,581, 1,581, 1,581, 1,581 Ne: 1,571, 1,575, 1,573, 1,571, 1,576, 1,573
Azul (Steel Blue 1)	No: 1,582, 1,582, 1,582, 1,582, 1,582, 1,582 Ne: 1,570, 1,572, 1,571, 1,572, 1,571, 1,572	No: 1,582, 1,582, 1,582, 1,582, 1,582, 1,582 Ne: 1,570, 1,573, 1,571, 1,572, 1,573, 1,572
Azul (Steel Blue 2)	No: 1,582, 1,582, 1,582, 1,582, 1,582, 1,582 Ne: 1,570, 1,575, 1,574, 1,571, 1,570, 1,573	No: 1,582, 1,582, 1,582, 1,582, 1,582, 1,582 Ne: 1,570, 1,575, 1,574, 1,571, 1,570, 1,573
Azul (Dodger Blue 1)	No: 1,580, 1,580, 1,580, 1,580, 1,580, 1,580 Ne: 1,567, 1,569, 1,568, 1,567, 1,567, 1,570	No: 1,580, 1,580, 1,580, 1,580, 1,580, 1,580 Ne: 1,567, 1,571, 1,570, 1,567, 1,570, 1,567
Azul (Cadet Blue 1)	No: 1,582, 1,582, 1,582, 1,582, 1,582, 1,582 Ne: 1,570, 1,575, 1,570, 1,571, 1,571, 1,572	No: 1,582, 1,582, 1,582, 1,582, 1,582, 1,582 Ne: 1,570, 1,575, 1,570, 1,571, 1,571, 1,572
AMETISTA		
Lilás	Ne: 1,555, 1,555, 1,555, 1,555,	Ne: 1,555, 1,555, 1,555, 1,555,

(Dark Orchid 4)	1,555, 1,555 No: 1,544, 1,545, 1,547, 1,544, 1,544, 1,546	1,555, 1,555 No: 1,544, 1,545, 1,548, 1,544, 1,544, 1,546
Lilás (Medium Orchid 4)	Ne: 1,551, 1,551, 1,551, 1,551, 1,551, 1,551 No: 1,542, 1,544, 1,543, 1,546, 1,545, 1,542	Ne: 1,551, 1,551, 1,551, 1,551, 1,551, 1,551 No: 1,542, 1,544, 1,543, 1,546, 1,545, 1,542
Lilás (Dark Orchid 4)	Ne: 1,550, 1,550, 1,550, 1,550, 1,550, 1,550 No: 1,541, 1,543, 1,543, 1,544, 1,541, 1,542	Ne: 1,550, 1,550, 1,550, 1,550, 1,550, 1,550 No: 1,541, 1,543, 1,543, 1,544, 1,541, 1,542
Lilás (Medium Orchid 4)	Ne: 1,552, 1,552, 1,552, 1,552, 1,552, 1,552 No: 1,543, 1,544, 1,543, 1,545, 1,546, 1,543	Ne: 1,552, 1,552, 1,552, 1,552, 1,552, 1,552 No: 1,543, 1,544, 1,543, 1,545, 1,546, 1,543
Lilás (Medium Orchid 4)	Ne: 1,550, 1,550, 1,550, 1,550, 1,550, 1,550 No: 1,539, 1,540, 1,543, 1,539, 1,539, 1,543	Ne: 1,550, 1,550, 1,550, 1,550, 1,550, 1,550 No: 1,539, 1,540, 1,543, 1,539, 1,539, 1,543
Lilás (Plum 3)	Ne: 1,548, 1,548, 1,548, 1,548, 1,548, 1,548 No: 1,540, 1,543, 1,542, 1,541, 1,540, 1,542	Ne: 1,548, 1,548, 1,548, 1,548, 1,548, 1,548 No: 1,540, 1,543, 1,542, 1,541, 1,540, 1,542
Lilás (Dark Orchid 3)	Ne: 1,552, 1,552, 1,552, 1,552, 1,552, 1,552 No: 1,542, 1,545, 1,544, 1,546, 1,544, 1,542	Ne: 1,552, 1,552, 1,552, 1,552, 1,552, 1,552 No: 1,542, 1,545, 1,544, 1,546, 1,544, 1,542
Lilás (Dark Orchid 2)	Ne: 1,550, 1,550, 1,550, 1,550, 1,550, 1,550 No: 1,540, 1540, 1544, 1542, 1543, 1542	Ne: 1,550, 1,550, 1,550, 1,550, 1,550, 1,550 No: 1,540, 1540, 1544, 1542, 1543, 1542
Lilás (Dark Orchid 2)	Ne: 1,552, 1,552, 1,552, 1,552, 1,552, 1,552	Ne: 1,552, 1,552, 1,552, 1,552, 1,552, 1,552

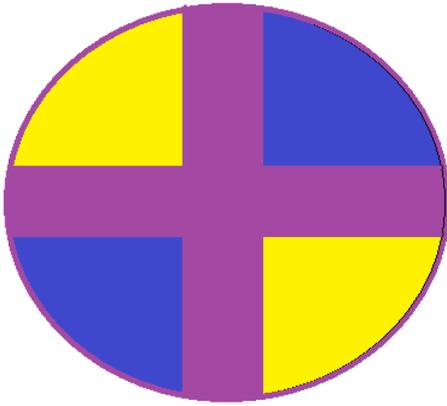
	No: 1,541, 1544, 1542, 1543, 1541, 1,543	No: 1,541, 1544, 1542, 1543, 1541, 1,543
Lilás (Dark Orchid 2)	Ne: 1,553, 1,553, 1,553, 1,553, 1,553, 1,553 No: 1,542, 1,545, 1,544, 1,546, 1,545, 1,542	Ne: 1,554, 1,554, 1,554, 1,554, 1,554, 1,554 No: 1,543, 1,546, 1,545, 1,547, 1,546, 1,543
GRANADAS		
Vermelho (Red 4)	N: 1,802, 1,802, 1,802, 1,802, 1,802, 1,802 N: 1,802, 1,802, 1,802, 1,802, 1,802, 1,802	N: 1,802, 1,802, 1,802, 1,802, 1,802, 1,802 N: 1,802, 1,802, 1,802, 1,802, 1,802, 1,802
Vermelho (VioletRed 4)	N: 1,802, 1,802, 1,802, 1,802, 1,802, 1,802 N: 1,802, 1,802, 1,802, 1,802, 1,802, 1,802	N: 1,802, 1,802, 1,802, 1,802, 1,802, 1,802 N: 1,802, 1,802, 1,802, 1,802, 1,802, 1,802
Laranja (Orange Red 3)	Nz: 1,749, 1,748, 1,749, 1,746, 1,746, 1,746 Nx: 1,740, 1,741, 1,740, 1,743, 1,740, 1,741	Nz: 1,749, 1,748, 1,749, 1,746, 1,746, 1,746 Nx: 1,740, 1,741, 1,740, 1,743, 1,740, 1,741
Laranja (Orange Red 3)	Nz: 1,748, 1,746, 1,748, 1,747, 1,748, 1,746 Nx: 1,739, 1,740, 1,741, 1,741, 1,740, 1,739	Nz: 1,748, 1,746, 1,748, 1,747, 1,748, 1,746 Nx: 1,739, 1,740, 1,741, 1,741, 1,740, 1,739
Laranja (Dark Orange 3)	Nz: 1,748, 1,748, 1,746, 1,747, 1,746, 1,747 Nx: 1,739, 1,739, 1,741, 1,741, 1,740, 1,739	Nz: 1,748, 1,748, 1,746, 1,747, 1,746, 1,747 Nx: 1,739, 1,739, 1,741, 1,741, 1,740, 1,739
Laranja (Dark Golden Rod 2)	Nz: 1,741, 1,740, 1,740, 1,738, 1,741, 1,739 Nx: 1,730, 1,733, 1,730, 1,731, 1,732, 1,731	Nz: 1,741, 1,740, 1,740, 1,738, 1,741, 1,739 Nx: 1,730, 1,733, 1,730, 1,731, 1,732, 1,731
Laranja (Chocolate 2)	Nz: 1,741, 1,740, 1,740, 1,738, 1,741, 1,739	Nz: 1,741, 1,740, 1,740, 1,738, 1,741, 1,739

	Nx: 1,731, 1,733, 1,731, 1,732, 1,733, 1,732	Nx: 1,731, 1,733, 1,731, 1,732, 1,733, 1,732
Laranja (Chocolate 2)	Nz: 1,740, 1,737, 1,738, 1,739, 1,737, 1,738 Nx: 1,730, 1,731, 1,733, 1,732, 1,730, 1,732	Nz: 1,740, 1,737, 1,738, 1,739, 1,737, 1,738 Nx: 1,730, 1,731, 1,733, 1,732, 1,730, 1,732
Laranja (Chocolate 2)	Nz: 1,740, 1,738, 1,738, 1,740, 1,738, 1,739 Nx: 1,730, 1,732, 1,732, 1,731, 1,730, 1,732	Nz: 1,740, 1,738, 1,738, 1,740, 1,738, 1,739 Nx: 1,730, 1,732, 1,732, 1,731, 1,730, 1,732
Laranja (Orange 2)	Nz: 1,740, 1,739, 1,739, 1,740, 1,740, 1,739 Nx: 1,730, 1,731, 1,730, 1,731, 1,730, 1,731	Nz: 1,740, 1,739, 1,738, 1,740, 1,740, 1,737 Nx: 1,730, 1,731, 1,730, 1,731, 1,730, 1,731
Amarelo (Golden Rod 1)	Nz: 1,738, 1,737, 1,736, 1,738, 1,736, 1,738, Nx: 1,725, 1,726, 1,725, 1,727, 1,727, 1,726	Nz: 1,738, 1,737, 1,736, 1,738, 1,736, 1,738, Nx: 1,725, 1,726, 1,725, 1,727, 1,727, 1,726

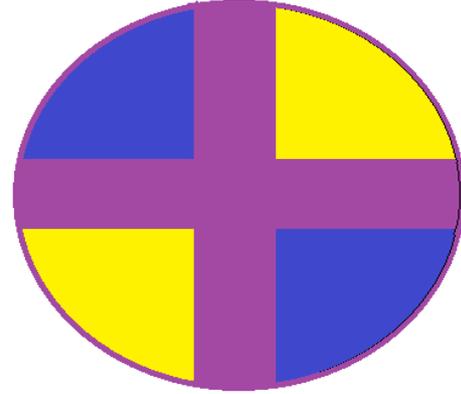
APÊNDICE B - FIGURAS DE INTERFERÊNCIA

FIGURAS DE INTERFERÊNCIA

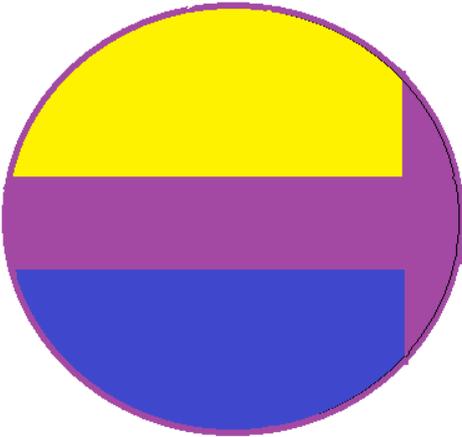
Uniaxiais



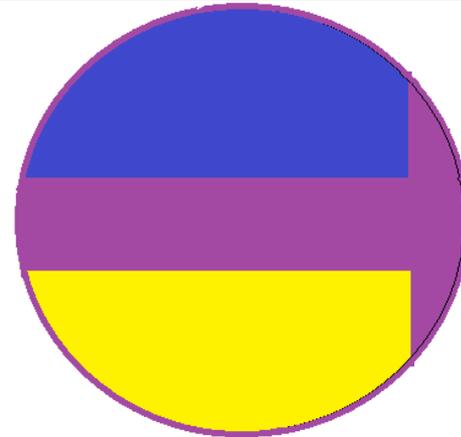
Eixo Óptico Centrado (+)



Eixo Óptico Centrado (-)



Eixo Óptico Descentrado (+)



Eixo Óptico Descentrado (-)

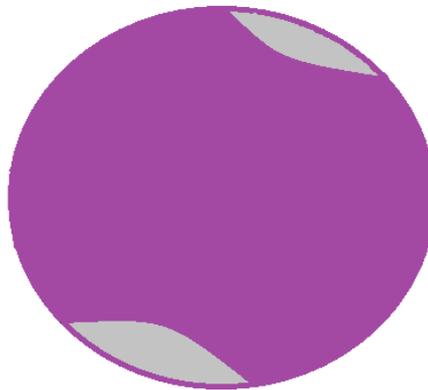
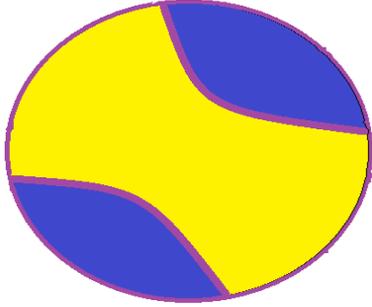


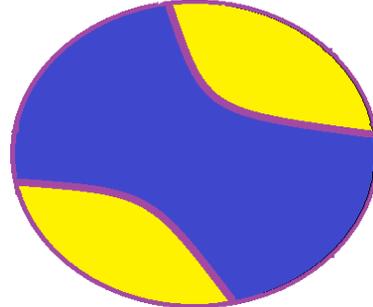
Figura Tipo Relâmpago

FIGURAS DE INTERFERÊNCIA

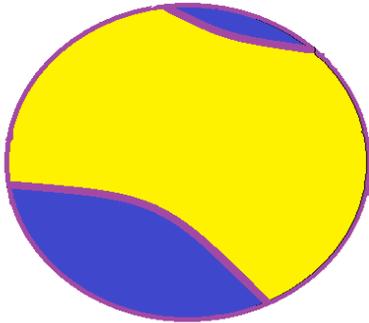
Biaxiais



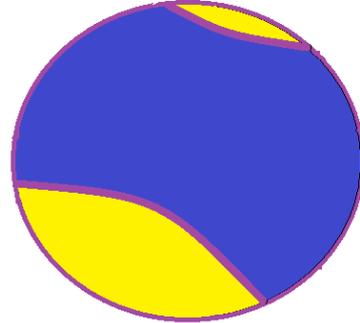
Bissetriz Aguda Centrada (+)



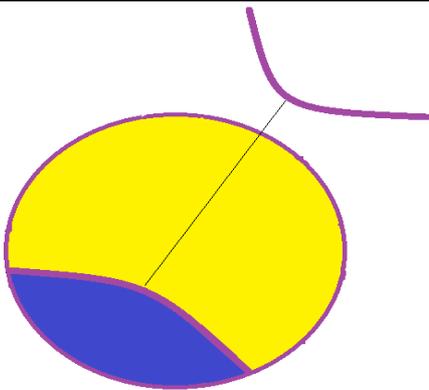
Bissetriz Aguda Centrada (-)



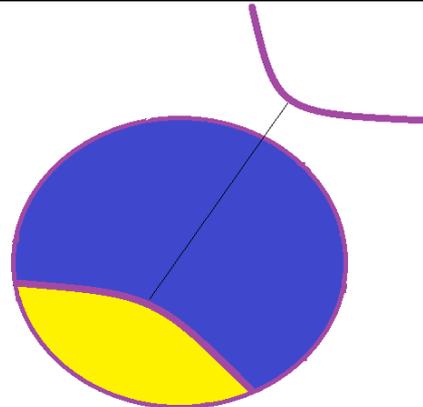
Bissetriz Aguda Descentrada (+)



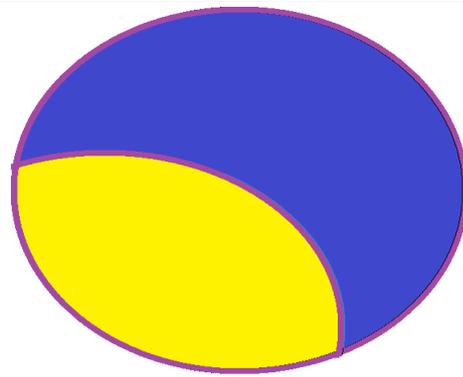
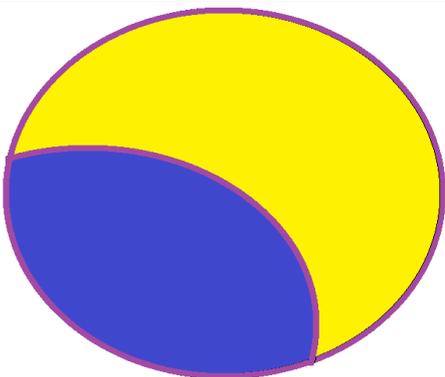
Bissetriz Aguda Descentrada (-)

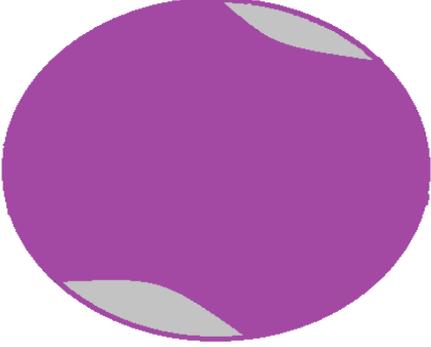
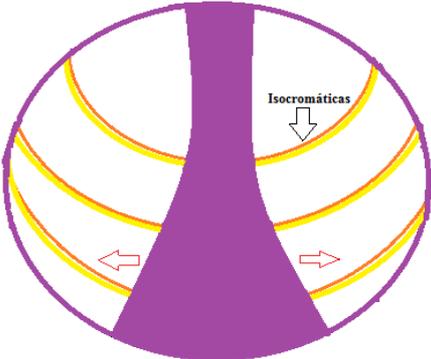
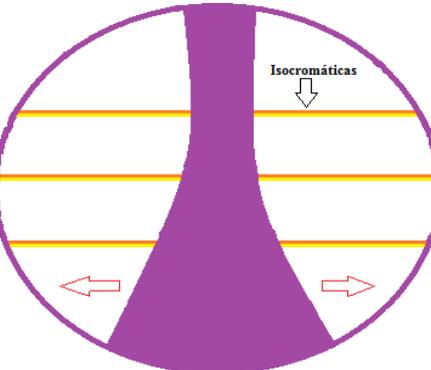


Bissetriz Obtusa (+)

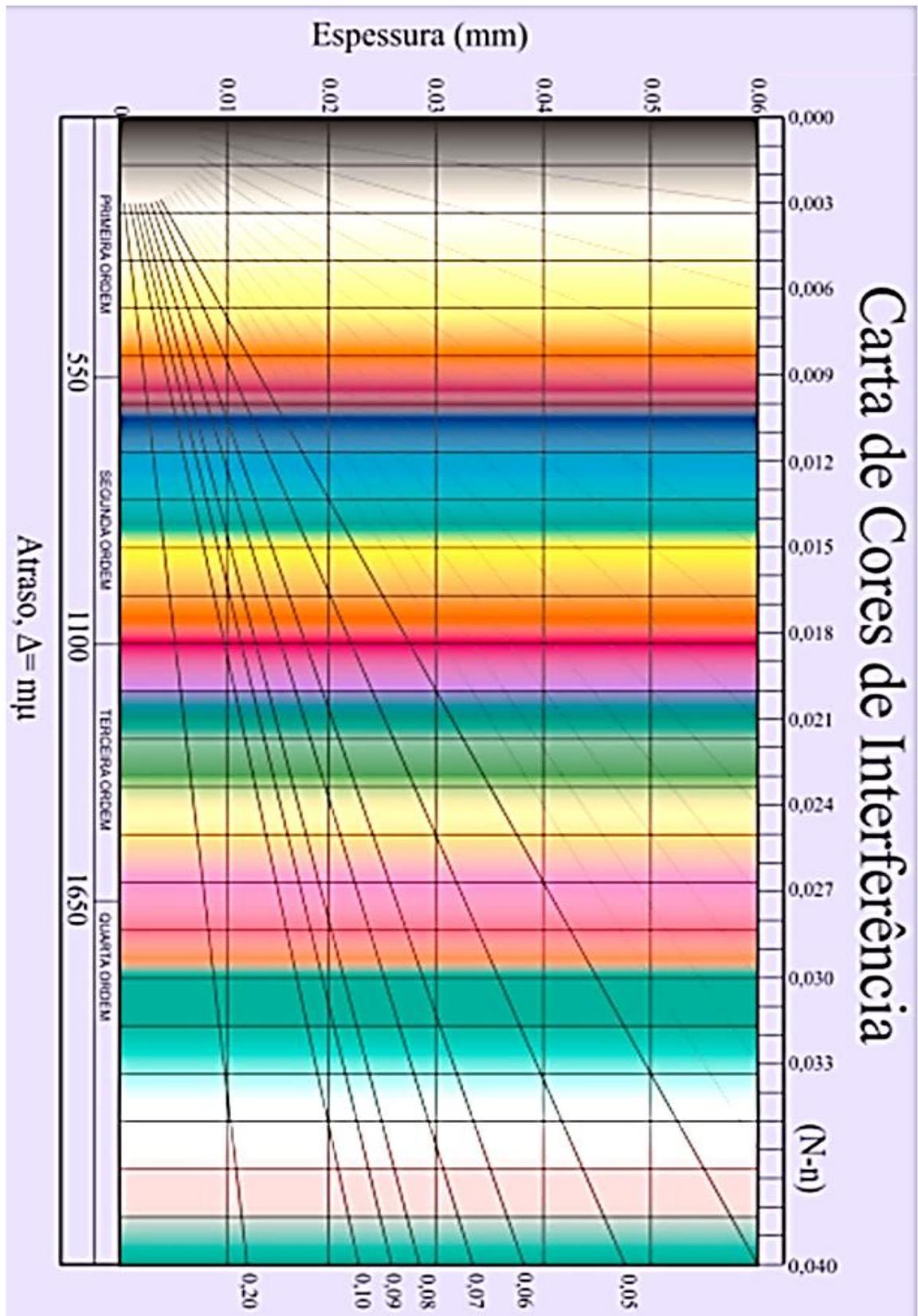


Bissetriz Obtusa (-)

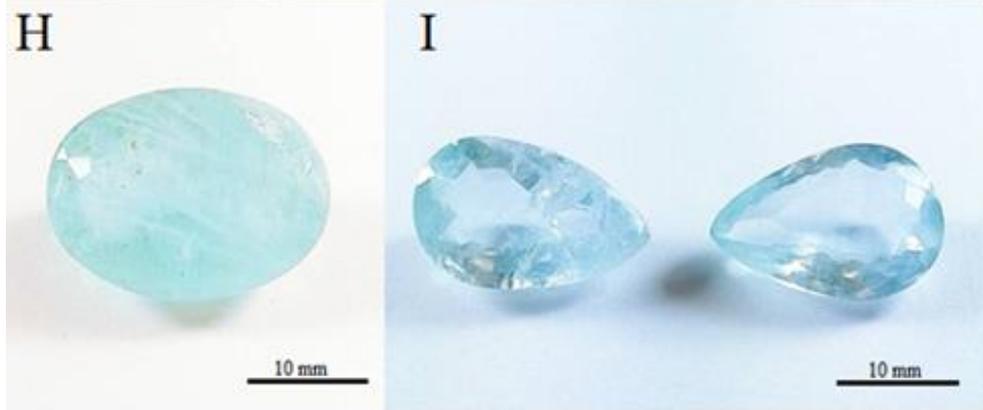


Eixo Óptico (+)	Eixo Óptico (-)
 <p>A circular diagram representing a normal optical axis. It is a solid purple circle with two small grey crescent-shaped areas on the left and right sides, representing the optic chiasm and optic nerves.</p> <p style="text-align: center;">Normal Óptica</p>	
 <p>A circular diagram representing a pendulum type of optic chiasm. A purple vertical structure (the chiasm) is positioned in the center. Yellow curved lines (isochromatic lines) are shown on both sides, curving away from the chiasm. A white arrow labeled 'Isocromáticas' points downwards from the top right. Two red arrows point outwards from the bottom left and bottom right.</p> <p style="text-align: center;">Tipo Pêndulo</p>	
 <p>A circular diagram representing a fan type of optic chiasm. A purple vertical structure (the chiasm) is positioned in the center. Yellow horizontal lines (isochromatic lines) are shown on both sides, extending across the circle. A white arrow labeled 'Isocromáticas' points downwards from the top right. Two red arrows point outwards from the bottom left and bottom right.</p> <p style="text-align: center;">Tipo Leque</p>	

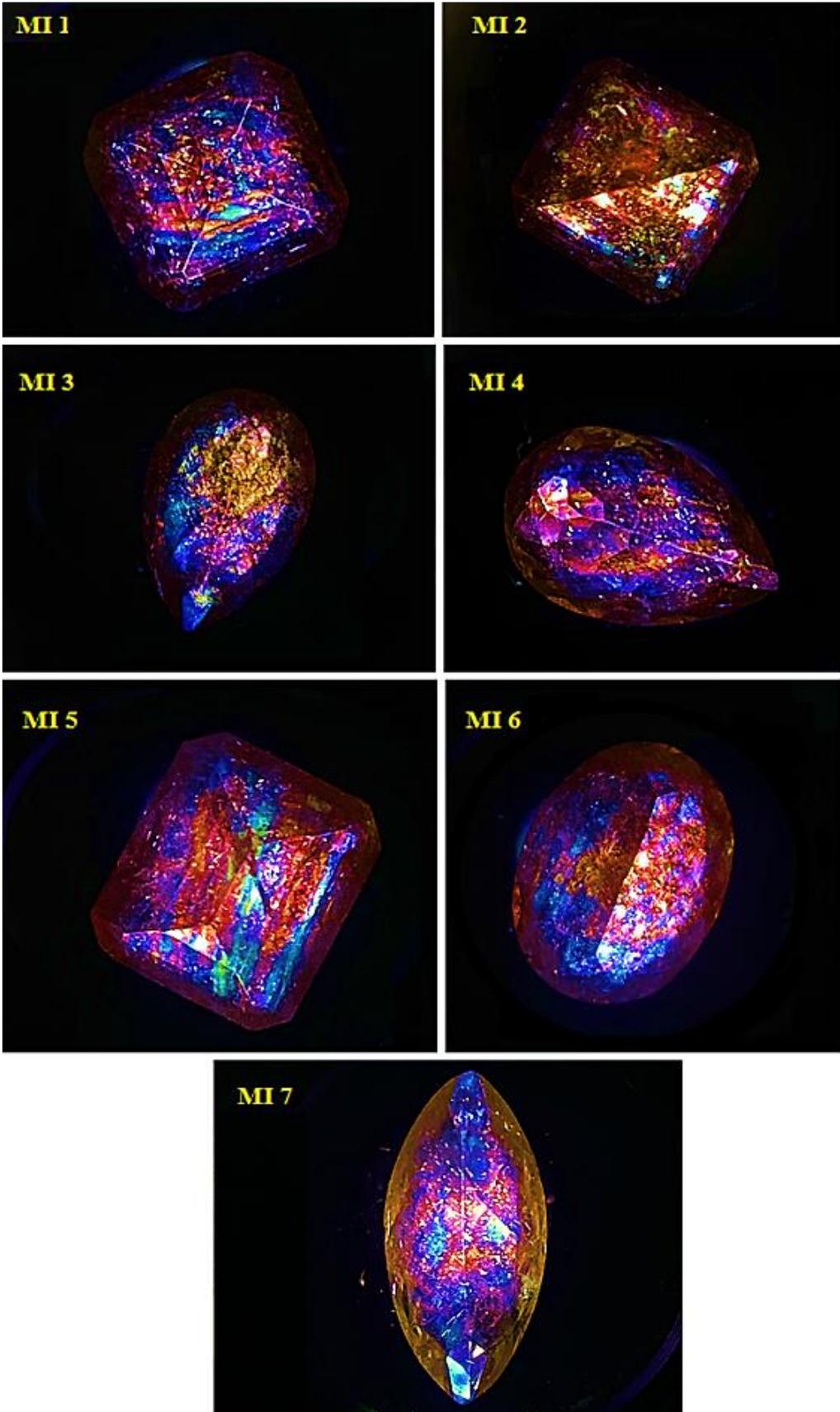
APÊNDICE C - CARTA DE CORES DE INTERFERÊNCIA



APÊNDICE D - ANTES E DEPOIS DAS AMOSTRAS BRUTAS E LAPIDADAS DE ÁGUAS-MARINHAS DE QUIXERAMOBIM



APÊNDICE E - FIGURAS DO TIPO MOSAICO DE INTERFERÊNCIA



**APÊNDICE F - CARTA PATENTE****REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL**
MINISTÉRIO DA ECONOMIA
INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL

CARTA PATENTE Nº BR 202017010901-7

O INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL concede a presente PATENTE DE MODELO DE UTILIDADE, que outorga ao seu titular a propriedade do modelo de utilidade caracterizado neste título, em todo o território nacional, garantindo os direitos dela decorrentes, previstos na legislação em vigor.

**(21) Número do Depósito:** BR 202017010901-7**(22) Data do Depósito:** 24/05/2017**(43) Data da Publicação Nacional:** 18/12/2018**(51) Classificação Internacional:** G02F 1/29.**(54) Título:** DISPOSIÇÃO CONSTRUTIVA INTRODUZIDA EM POLARISCÓPIO PARA ESTUDO E ANÁLISE DE GEMAS**(73) Titular:** ISAAC GOMES DE OLIVEIRA 06818911307, Microempreendedor Individual - MEI. CGC/CPF: 34909399000140. Endereço: AVENIDA PARNAMIRIM, 1001, CASA 10, CENTRO, Eusébio, CE, BRASIL (BR), 61760-000, Brasileira**(72) Inventor:** ISAAC GOMES DE OLIVEIRA.**Prazo de Validade:** 15 (quinze) anos contados a partir de 24/05/2017, observadas as condições legais**Expedida em:** 26/04/2022

Assinado digitalmente por:

Liane Elizabeth Caldeira Lage

Diretora de Patentes, Programas de Computador e Topografias de Circuitos Integrados



RELATÓRIO DESCRITIVO
"DISPOSIÇÃO CONSTRUTIVA INTRODUZIDA EM POLARISCÓPIO PARA
ESTUDO E ANÁLISE DE GEMAS"

[01] O presente modelo de utilidade refere-se a um polariscópio, equipamento de laboratório para análise e estudo de gemas e minerais, e tem o intuito de analisar caráter e sinal óptico, bem como o comportamento isotrópico ou anisotrópico dos objetos em estudo.

[02] Polariscópios conhecidos, atualmente, trabalham realizando apenas a análise de comportamento das propriedades do material de gemas e minerais, ou seja, anisotropia ou isotropia. Na análise, a gema é inserida e após ser atingida pela luz tratada pela lente polarizadora inferior, emite uma luz, a qual é repetidamente tratada pela lente polarizadora superior para que assim possa ser analisada pelo observador.

[03] Os filtros ou lentes polaroides devem ser posicionados de maneira perpendicular, o que pode ser obtido ao se girar a lente polarizadora superior até que a mesma não permita a passagem de luz, já tratada pela lente inferior, para fora do instrumento. Isso é resultado das vibrações características da luz em relação ao posicionamento da lente, ou seja, um filtro permitirá a passagem no sentido Norte-Sul, e outro no sentido Leste-Oeste.

[04] No entanto, esse tipo de instrumento realiza somente uma das análises necessárias em relação ao comportamento óptico.

[05] O modelo de utilidade em questão permite identificar anisotropia ou isotropia, caráter e sinal óptico de gemas e minerais transparentes ou translúcidos, assim agregando duas novas funcionalidades, determinação do sinal e caráter óptico, a um só instrumento.

[06] A primeira nova funcionalidade agregada ao polariscópio é resultado da inserção de uma lente condensadora de altura ajustável no equipamento, o que irá prover a capacidade de identificação do caráter uniaxial ou biaxial do objeto de estudo.

[07] Ademais, a segunda nova funcionalidade agregada foi obtida pela introdução de uma barra acessório, com três alturas pré-definidas reguláveis, com uma lente de quartzo e um espaço vazio, a qual permitirá a partir da análise de coloração da luz tratada, a identificação do sinal óptico do mineral ou gema.

[08] O equipamento possui, também, uma lupa de altura ajustável pelo utilizador, a qual facilitará o estudo sobre o material.

[09] Uma diferença entre os polariscópios atualmente conhecidos e o aqui mencionado é a fixação das lentes em posições pré-determinadas, o que não possibilitará que o observador gire as lentes polarizadoras como nos demais polariscópios, pois já estarão fixadas de maneira a permitir que a luz passe em somente uma direção. Isso é necessário para que o observador descubra se o comportamento óptico do objeto é anisotrópico ou isotrópico.

[10] O presente modelo tem a vantagem de otimizar o trabalho do analisador, o qual é simplificado, pois o mesmo equipamento irá realizar três funções distintas simultaneamente.

[11] A seguir, o modelo de utilidade será descrito em detalhes com o auxílio de exemplos de forma de apresentação apresentados em Figuras.

Apresenta-se: Na figura 1, uma vista tridimensional do conjunto lupa, cuja haste (3) é unida ao suporte (1) para a lupa (2) por meio do parafuso 4 (detalhe A/figura 2). A lupa (2) abriga-se no interior do suporte (1).

[12] A figura 2 remete-se ao detalhe da porção esquerda da vista superior do conjunto-lupa.

[13] Na figura 3, uma vista tridimensional do conjunto lente condensadora, cujo parafuso (7) sustenta e une o suporte ajustável para a lente condensadora (6) ao conjunto lente condensadora. O parafuso (7) é firmado e fixado por uma porca sextavada (8) juntamente a uma arruela lisa (9).

[14] Na figura 4, uma vista tridimensional do conjunto suporte para acessório, cujo suporte principal (10) é unido, através de um orifício, por um pino (11), que, por sua vez, é conectado a um contrapino (12).

[15] Na figura 5, uma vista frontal (à esquerda) e uma lateral esquerda (à direita), nas quais o conjunto lente condensadora (14), o conjunto lupa (6), o conjunto acessório (17) e dois conjuntos suporte para acessório (15) são apoiados sobre a base (1), a qual possui em seu interior uma lâmpada de potência 100W, ligada à mesa (2). Na porção superior da mesa (2), encontram-se os encaixes para lente polarizadora inferior (18) e superior (19), ambas sustentadas por um parafuso (12). O conjunto lente condensadora (14) repousa sobre o encaixe para lente inferior, e o vidro de suporte para gema (16) repousa entre o espaçamento do conjunto suporte para acessório (15). Na parte traseira da base, há o botão liga/desliga (5), que controla o funcionamento da lâmpada do polariscópio.

[16] Na figura 6, o conjunto acessório já ilustrado, composto pelo acessório (16), por dois pinos (24) que o fixarão no conjunto suporte para acessório, por um orifício e duas lentes, sendo uma de 530 nm (26) e outra de 147,3 nm (25). A disposição das lentes será feita de tal modo que, encaixado no conjunto suporte para acessório, a lente de

530 nm (26) permanecerá do lado direito do observador, ao passo que a de 147,3 nm (25) permanecerá na esquerda do observador.

[17] Na figura 7, uma vista isométrica do polariscópio retratado em questão, destacando-se os encaixes para lente superior (13) e para lente inferior (21). Estes abrigarão as lentes superior (1) e inferior (5). Os encaixes são presos por meio de um parafuso (3) à base do polariscópio.

[18] A análise da gema ou mineral com utilização do polariscópio aqui mencionado se dá a partir da introdução da gema, como mostrado na figura 5, sob o vidro de suporte para gema (15).

[19] Abaixo da lente polarizadora inferior (28), como mostrado na figura 5, encontra-se uma lâmpada abrigada dentro da base (20), a qual irá emanar a luz que passará de forma tratada devido a vibração da lente polarizadora inferior no sentido Leste-Oeste.

[20] A luz seguirá sua trajetória sendo condensada pela lente condensadora (5), ilustrada na figura 3, o que a tornará mais nítida para ser observada, provendo também a figura de interferência do mineral, assim possibilitando a interpretação do caráter uniaxial ou biaxial do objeto.

[21] Após essa etapa, a luz emitida chegará a gema ou mineral, o qual, por ser translúcido ou transparente, permitirá a passagem de luz através dele.

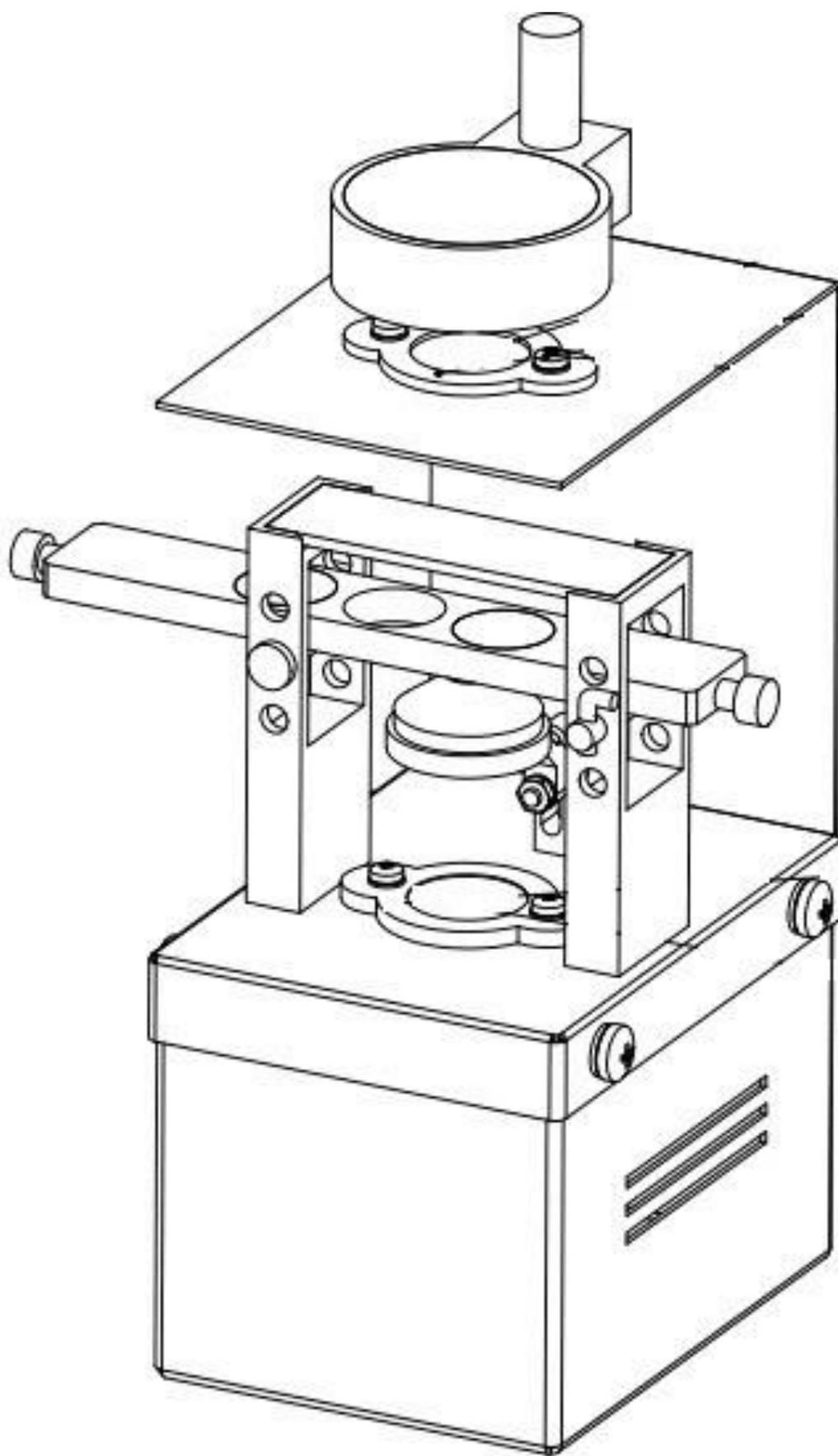
[22] Em seguida, passará pelo acessório (16), exposto na figura 5, o qual pode ser ajustado com três alturas diferentes, a critério do utilizador, a partir do encaixe do pino (11) e contra pino (12) nos suportes principais (10), como mostrado na figura 4.

[23] Além do ajuste de altura, transladando o acessório (16) na direção transversal aos dois suportes (10), como mostrado na figura 5,

pode-se alterar qual dos dois tipos de lentes irá se utilizar. No caso, ou a lente de quartzo, para retardo na luz de 530 nanômetros, posicionada no lado direito do acessório (dará coloração arroxeadada às isóginas do material), ou a de mica, para retardo de 147,3 nanômetros, posicionada no lado esquerdo do acessório (dará coloração amarelada às isóginas do material), ou ainda não se utilizar de nenhuma das duas lentes e optar pela passagem da luz de forma direta pelo orifício circular central do acessório.

[24] Após a passagem da luz pelas lentes ou pelo vão do acessório, a luz é projetada em direção à lente polarizadora superior(27), indicada na figura 5, a qual, devido sua vibração, também só permitirá a sua passagem no sentido Norte-Sul.

[25] Finalmente, a luz será observada na lente da lupa (2) de altura do seu suporte (1) ajustável, como mostrado na figura 1, possibilitando a análise da imagem projetada.



APÊNDICE G - ARTIGO 1

Anuário do Instituto de Geociências

Universidade Federal do Rio de Janeiro

<https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/>

ISSN 0101-9759

e-ISSN 1982-3908

Aspectos Gemológicos de Ametistas de Quixeramobim, Brasil

*Gemological Aspects of Amethysts from Quixeramobim, Brazil*Isaac Gomes Oliveira¹, Thainara Freires¹, Eryckson Maciel², Lucilene Dos Santos¹, William Paschoal³ & Tereza Neri¹¹Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Departamento de Geologia, Fortaleza, CE, Brasil²Universidade Estadual de Campinas, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Campinas, SP, Brasil³Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Departamento de Física, Fortaleza, CE, Brasil

E-mails: isaacgomes_1996@hotmail.com; thainara.freires@gmail.com; eryck.limac@gmail.com; lucilene.santos01@gmail.com; paschoal.william@fisica.ufc.br; tereza.neri@ufc.br

Resumo

Desde o final do século XX tornou-se extremamente comum que os países com uma exploração significativa de gemas, cataloguem e divulguem as propriedades de suas gemas para diversos fins, como por exemplo mercadológicos, acadêmicos ou criminalísticos. No Brasil, existe uma defasagem nesse aspecto; muitas ocorrências minerais não têm suas propriedades gemológicas tabeladas, tampouco divulgadas. Além disto, as propriedades de minerais usados como gemas podem auxiliar ou até mesmo revelar novos aspectos acerca da evolução geológica da região onde um mineral foi encontrado. Este estudo visou à caracterização gemológica de ametistas de Quixeramobim (CE), no qual foram utilizados os equipamentos usuais da gemologia, como: refratômetro, dicroscópio, espectroscópio, polariscópio, balança hidrostática, lâmpada fluorescente e microscópio gemológico. As ametistas de Quixeramobim têm as características padrão das ametistas de diferentes lugares do mundo, porém a abundância de inclusões fluidas e sólidas com orientação requer estudos mais aprofundados. Com exceção desta peculiaridade, as ametistas não possuem anomalias; diferente das ametistas de Santa Quitéria, também do Estado do Ceará, que têm como característica anômala uma birrefringência muito elevada. Isto demonstra a importância da caracterização gemológica não apenas em nível estadual/regional, mas também em escala Municipal, pois em um mesmo Estado podem haver algumas ocorrências do mesmo mineral, mas com características contrastantes. Logo, é importante caracterizar as ocorrências em diferentes contextos geológicos, pois o ambiente de formação interfere nas propriedades dos minerais.

Palavras-chave: Quartzo gemológico; Características gemológicas; Gemas Ceará**Abstract**

Since the end of the 20th century, it has become extremely usual for countries with a remarkable exploration of gems to catalog and disseminate the properties of their gems for various purposes, such as market, academic or criminal. In Brazil, there is a gap in this regard; many mineral occurrences do not have their gemological properties tabulated or disclosed. Globally, gemological studies do not cease and gemological data on minerals are updated frequently; as in the case of tourmalines. In addition, the properties of minerals used as gems can help or even reveal new aspects about the geological evolution of the region where a mineral occurs. For the gemological characterization of amethysts from Quixeramobim (CE), the usual gemology equipment was used, such as: refractometer, dicroscope, spectroscope, polariscope, hydrostatic balance, fluorescent lamp and gemological microscope. Quixeramobim amethysts have the standard characteristics of amethysts from different parts of the world, but the abundance of oriented fluid and solid inclusions requires further study. With the exception of this peculiarity, amethysts have no anomalies; unlike the amethysts from Santa Quitéria, also from the State of Ceará, which have a very high birefringence as an anomalous characteristic. This demonstrates the importance of gemological characterization not only at a State / Regional level, but also at the Municipal scale, as in the same State there may be occurrences of the same mineral, but with divergent properties. Therefore, it is important to characterize the occurrences in different geological contexts, as the formation environment can interfere with the characteristics of minerals.

Keywords: Gemological quartz; Gemological particulars; Ceará gems

Anuário do Instituto de Geociências, 2021, v. 44, 41769

DOI: https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_41769 1

1 Introdução

Em âmbito global, os estudos gemológicos não cessam e os dados gemológicos de minerais são atualizados com frequência. Isto faz-se necessário pois o mercado bilionário de gemas está em constante atualização. Além disto, as propriedades de minerais usados como gemas podem auxiliar ou até mesmo revelar novos aspectos acerca da evolução geológica da região onde ocorre este mineral em específico. Desde o final do século XX tornou-se extremamente usual que os países cuja exploração de gema é ou foi notável, cataloguem e divulguem as propriedades de suas gemas para diversos fins, sejam estes mercadológicos, acadêmicos ou criminalísticos. No Brasil, existe uma defasagem neste aspecto; muitas ocorrências minerais não têm suas propriedades gemológicas tabeladas, tampouco divulgadas, mesmo em regiões que já tiveram uma produção relevante. O país é um dos principais fornecedores de gemas e, paradoxalmente, a gemologia científica brasileira ainda é embrionária (Terra 2020).

A razão desta organização e divulgação dos dados ópticos/gemológicos é auxiliar e facilitar o trabalho dos profissionais que lidam com gemas e as imitações que simulam a aparência destes materiais, principalmente na sua identificação, diminuindo drasticamente a chance de um erro de reconhecimento. O termo “imitações” é usado para designar produtos que imitam as gemas naturais e que são usadas no intuito de reproduzir efeito óptico, cor e aparência das gemas naturais, ou por vezes sintéticas (Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos 2009).

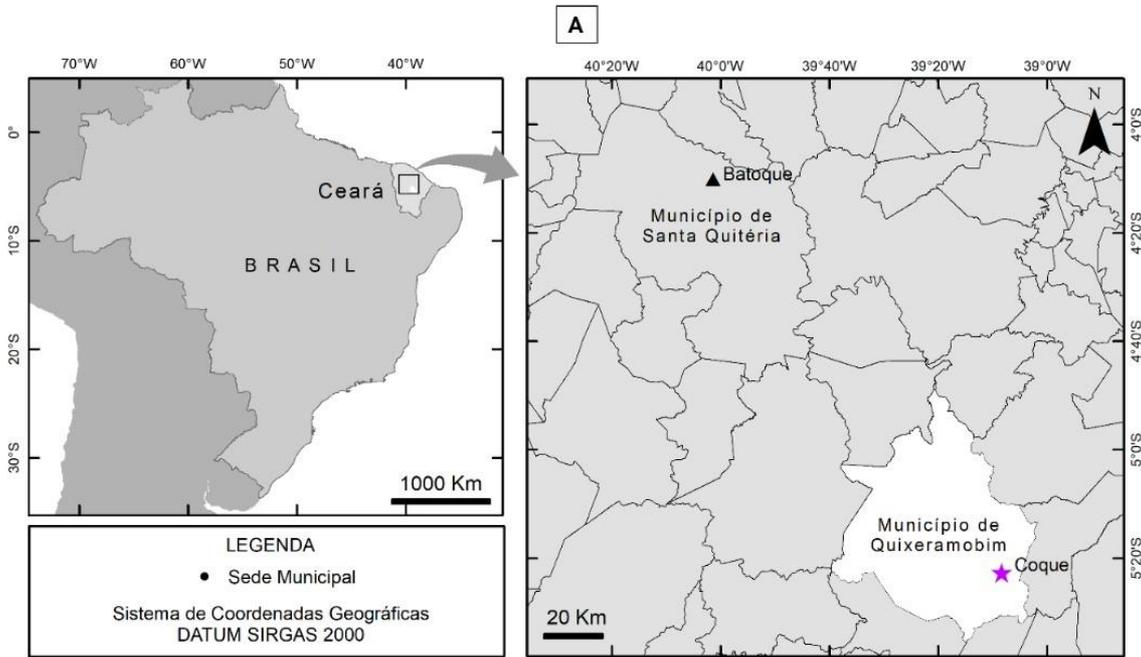
O quartzo é o mineral mais abundante na crosta terrestre. É um constituinte frequente da maioria das rochas ígneas, sedimentares e metamórficas, e também ocorre como material secundário, formando muitas vezes a cimentação dos sedimentos (Deer, Howie & Zussman 2010). A ametista é uma variedade de quartzo que ocorre em cores que variam do lilás claro ao roxo avermelhado profundo e que se cristaliza no sistema cristalino trigonal. Minerais com qualidades inferiores comercialmente podem ser esculpidos e transformados em uma grande variedade de outros objetos ornamentais (Arem 2020). Este mineral recebe sua cor devido a presença de ferro (Fe^{3+} e Fe^{4+}) e outros oligoelementos, bem como da irradiação natural. As ametistas podem mostrar zoneamento de cores. O valor comercial de uma gema, incluindo a ametista, depende, quase inteiramente de sua cor, fator responsável por 50% da qualidade gemológica de um material (Arem 2020; Schumann 2020). Embora as cores mais escuras possuam os maiores valores econômicos, a ametista de cor clara teve um ressurgimento em popularidade. Os tons de violeta rosado

mais claros das ametistas são chamados de “Rosa da França” e também são valorizados no comércio (Arem 2020). As ametistas podem ser fabricadas hidrotermicamente em laboratórios, e os fabricantes também podem obtê-las por meio do bombardeamento do quartzo fumê com raios gama. Uma vez que a ametista natural é tão abundante e de baixo valor econômico, existe pouco incentivo para obtenção de exemplares sintéticos. No entanto, o material bruto sintético, algumas vezes, é vendido como bruto natural (Arem 2020).

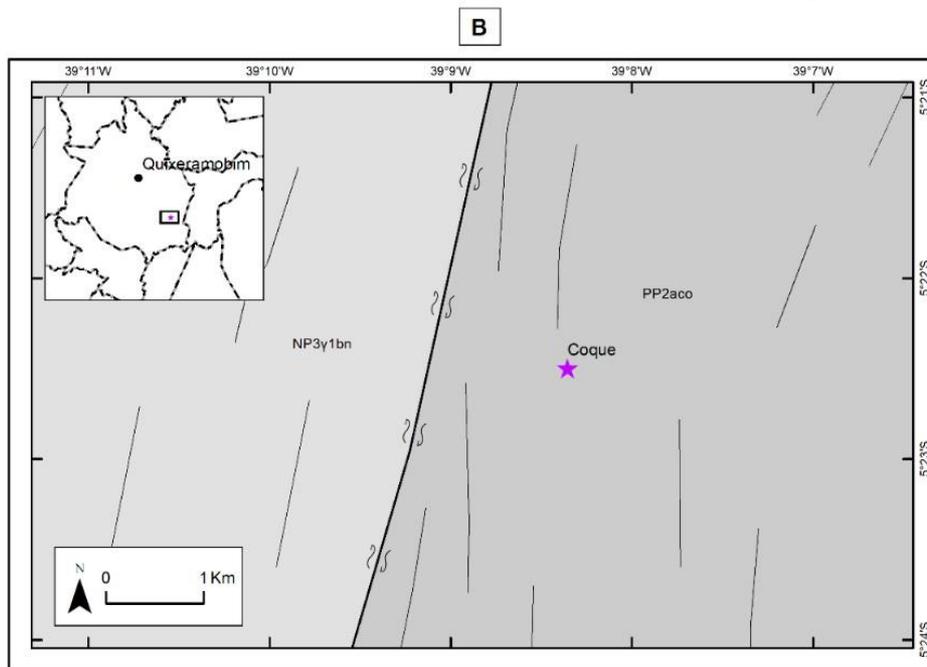
A caracterização gemológica também pode ter como finalidade identificar possíveis proveniências do mineral para valorização comercial (interferindo diretamente no valor econômico, como no caso dos rubis birmaneses e esmeraldas colombianas) e também para casos de perícia e investigação criminal. O art. 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, joias possuem tanto valor quanto o ouro (Brasil 2002).

Apesar de o quartzo ser muito comum, a ametista em qualidade de gema ocorre em regiões mais restritas. As principais fontes de ametistas são Brasil (Rio Grande do Sul), Bolívia, Uruguai e Zâmbia (Schumann 2020). O Brasil pode produzir exemplares de tamanho grande, mas geralmente de cor moderada; além de espécimes pequenos e de cor muito intensa como as ametistas do Rio Grande do Sul e de Santa Quitéria (Ceará) (Oliveira et al 2020). Muitos colecionadores e comerciantes de gemas preferem as gemas de tamanho menor, mas com cores mais ricas e evidentes, da Zâmbia, bem como, mais recentemente, do Uruguai. A região de *Four Peaks* no Arizona (Estados Unidos) também produz ametistas de alta qualidade. Outras fontes relevantes de qualidade de gema incluem os seguintes países: Austrália; Índia; Madagáscar; México; Marrocos; Namíbia; Nigéria; Rússia; Coreia do Sul (Arem 2020).

No Brasil, devido a abundância de ametistas sejam elas de qualidade gemológica ou não, foram realizados estudos por Baggio et al. (2015), Fisher et al. (2010), Gilg et al. (2002), Hartmann (2015), Hartmann et al. (2010), Juchem (2014), Juchem et al. (2001, 1994) e Proust & Fontaine (2007) envolvendo diversas propriedades, como químicas, petrográficas, acerca dos fluidos em quartzos, das rochas hospedeiras e geodos de ametistas. Estudos mais voltados para a gemologia e mineralogia acerca das ametistas, provenientes do Brasil, podem ser encontrados em trabalhos como Correa (2010,2007), Dotto & Isotani (2006), Guttler & Kohigashi (2006), Tononi et al. (2019). No Ceará, as propriedades gemológicas de ametistas na região de Santa Quitéria foram descritas por Oliveira et al. (2020) (Figura 1A).



Fonte: Modificado de IPECE, 2019



Fonte: Modificado de Pinéo, 2020

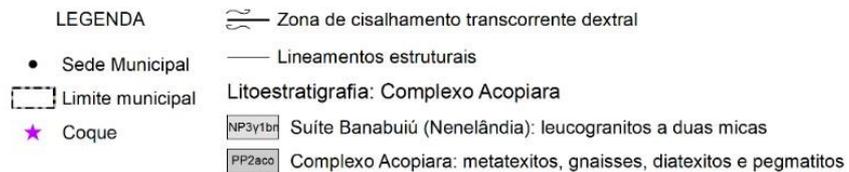


Figura 1 Localização da área de estudo: A. Localidade de Coque, local de proveniência das amostras do presente trabalho; e da Localidade de Batoque, local de proveniências das ametistas de Oliveira et al. (2020); B. Mapa geológico da região de Coque.

Fonte: A. adaptado de Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará 2019; B. Pinéo 2020.

Este trabalho trata da caracterização gemológica de cinco cristais de ametistas provenientes do município de Quixeramobim, no estado do Ceará, geologicamente inserido no Distrito Pegmatítico Solonópole-Banabuiú. As propriedades destas ametistas foram comparadas com dados gerais mundiais como parte da identificação gemológica; procedimento padrão na caracterização de uma ocorrência gemológica de uma localidade estudada pela primeira vez. Em seguida, estas foram comparadas com os dados de ametistas de outra região dentro do Ceará, a fim de encontrar similaridades e divergências em gemas de mesma espécie dentro do mesmo Estado.

2 Contexto Geológico Regional

As ametistas estudadas neste trabalho são provenientes da localidade Coque, no município de Quixeramobim (IPECE 2019), que integra o Distrito Pegmatítico de Solonópole-Banabuiú (DPSB) (Figura 1A). Esse, por sua vez, está situado entre os domínios Ceará Central e Jaguaribeano da Província Borborema.

Especialmente, O DPSB, limitado pelas zonas de cisalhamento Senador Pompeu e Orós, abrange um recorte de litotipos do Complexo Acopiara e corpos graníticos da suíte intrusiva Banabuiú, principalmente (Figura 1B).

O Complexo Acopiara é composto por metatexitos, gnaisses aluminosos, diatexitos, biotita xistos, leucogranitos, pegmatitos, entre outras rochas metassedimentares (Pinéo 2020). Esse complexo corresponde a uma bacia neoproterozoica com deposição iniciada no Toniano (929 Ma) e inversão tectônica brasileira (620 Ma), concomitante a plutonismo sincolisional materializado nos leucogranitos tipo S da suíte Banabuiú. Transcorrências instaladas em 585 Ma são associadas à colocação dos corpos da suíte Rio Quixeramobim e de pegmatitos mineralizados (Palheta 2017).

Os corpos pegmatíticos são intrusivos, em maior quantidade, em xistos, gnaisses, migmatitos e, em menor quantidade, granitos. Segundo Parente et al. (2008) esses corpos possuem geometria tabular, ora lenticular, desde centimétricos a decamétricos e ocorrem preenchendo descontinuidades como fraturas e falhas, refletindo um controle estrutural para as mineralizações; adicionalmente, são orientados obliquamente à foliação regional, com mergulho subvertical. Idades entre 470 e 530 Ma (Almeida et al. 1968) são aceitas para o alojamento dos pegmatitos do Domínio Ceará Central.

3 Material e Métodos

Foram selecionados aleatoriamente cinco cristais de ametistas (Figura 2) provenientes do Município de

Quixeramobim (Ceará) de um montante de exemplares comerciais, sendo assim uma amostra representativa. As amostras foram obtidas em estado bruto e, posteriormente, foram lapidadas em formatos diversos. Adicionalmente, foi utilizada uma tabela de cor empregada pelo comércio que possui 384 cores e códigos hexadecimais (Devmedia 2013) para classificar a cor do mineral.

O método de trabalho aplicado para a caracterização gemológica realizada nas gemas do Distrito Pegmatítico Solonópole- Quixeramobim (Ceará), incluiu a utilização dos instrumentos clássicos das análises ópticas, sendo aplicado o uso de refratômetro, polariscópio, balança hidrostática, espectroscópio, dicrosscópico, lâmpada fluorescente e microscópio gemológico.

3.1 Refratômetro

Este instrumento é um dos mais úteis em gemologia para identificação das gemas. A partir de seus dados, é possível medir o índice de refração do mineral, desde que esse índice esteja entre 1,40 a 1,81 e que o material não seja opaco. É possível ainda determinar a birrefringência, caráter e sinal óptico das gemas analisadas, por meio de equações matemáticas (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 60° graus a cada nova leitura (Anderson 1984). Foi utilizado um refratômetro marca *Rayner Dialdex* sem fonte de luz acoplada.

3.2 Dicrosscópico

Este instrumento é muito útil para o trabalho gemológico, seu funcionamento é simples e com ele é possível visualizar o pleocroísmo das gemas. O pleocroísmo é causado pela absorção distinta da luz nos cristais birrefringentes, que pode ser forte, moderado ou fraco; 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. Esta mudança nas cores da gema analisada é obtida quando se rotaciona o dicrosscópico rente a um mineral. Este fenômeno não ocorre em gemas isotrópicas, amorfas e opacas, tampouco na maioria das translúcidas (Schumann 2020). Esta mudança nas cores da gema aferida é decorrente da falta de compensação dos índices de refração de gemas anisotrópicas, sendo uma consequência de minerais com os índices de refração muito



Figura 2 Ametistas analisadas do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim, Brasil (amostras da esquerda para a direita). Ametista (Dark Orchid 4) com as seguintes dimensões: 15,90 x 10,58 x 6,22 mm. Ametista (Medium Orchid 4) com as dimensões: 15,64 x 9,86 x 6,23 mm. Ametista (Dark Orchid 4) com dimensões: 10,07 x 9,93 x 7,27 mm. Ametista (Dark Orchid 3) com as dimensões: 12,25 x 10,10 x 6,53 mm. Ametista (Plum 3) com dimensões: 14,24 x 10,60 x 7,05 mm.

diferentes. Quando ocorre uma compensação de n_o (raio ordinário) $> n_e$ (raio extraordinário) ou $n_e > n_o$ para os minerais uniaxiais e $n_z > n_x$ ou $n_x > n_z$ para os minerais biaxiais. Foi utilizado um dicoscópio portátil da GIA (Gemological Institute of America).

3.3 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 2020), contudo é um método pouco eficaz para os minerais que possuam elevado teor de ferro em sua composição química, pois este elemento interfere diretamente neste fenômeno óptico. A fluorescência pode ser aferida em laboratório, ao aproximar a gema da fonte de luz ultravioleta e em um ambiente escuro ou com pouca iluminação. Neste trabalho foi utilizada uma lâmpada fluorescente da GIA.

3.4 Espectroscópio

Este instrumento permite observar as bandas de absorção que se formam no espectro luminoso de uma maneira peculiar a cada pedra examinada; 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 (Schumann 2020). De forma muito semelhante ao dicoscópio, o material é analisado por meio do espectroscópio, colocando a gema rente ao

instrumento e analisando as mudanças nos espectros de absorção, para isto necessita-se de luminosidade moderada (artificial ou natural). Foi utilizado um espectroscópio portátil da GIA sem fonte de luz acoplada.

3.5 Microscópio Gemológico

O Microscópio Gemológico permite a leitura imediata dos diversos tipos de zoneamento de cores, inclusões sólidas, fraturas na estrutura do cristal (*healed fractures*), manchas 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 foram analisadas utilizando um fundo claro. O uso deste equipamento é de suma importância na identificação de estruturas internas dos materiais e essencial na caracterização de eventuais características em gemas. Neste trabalho foi usado um microscópio binocular gemológico Meiji EMZ 75339 em fundo branco e com fonte de luz acoplada.

3.6 Balança Hidrostática

A balança hidrostática é um instrumento utilizado para o estudo da força de impulsão exercida por líquidos sobre os corpos neles imersos. O funcionamento se baseia no princípio de Arquimedes. O material a ser investigado é pesado primeiramente no ar (no prato da balança sob a plataforma) e depois na água (na cesta dentro do copo com água). 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 do tamanho da amostra analisadas. Ela é definida como peso por volume, representado em g/cm^3 ou kg/m^3 (Schumann 2020). Foram utilizadas duas balanças, uma hidrostática Marte AD5002 e outra analítica AND HR200 para garantir máxima precisão na densidade das amostras.

3.7 Polariscópio

Este instrumento permite identificar se o material analisado é anisotrópico ou isotrópico. Isto é, se ela se cristaliza em seis dos sete sistemas cristalinos (anisotrópico) ou no sistema cúbico (isotrópico). O instrumento consiste em duas placas de polarização, chamadas de conjunto de polarizadores. Quando mantida sobre uma fonte de luz com estas placas, um mínimo de luz passa pelo analisador (Hurlbut & Switzer 1979). O método consiste em deixar as placas de polarização perpendiculares entre si e rotacionar o mineral (que está entre as placas); caso a luz não passe pelo material é classificado como isotrópico, do contrário o mineral é anisotrópico. Com este instrumento também é possível visualizar a geminação “Lei do Brasil” em quartzos (principalmente em ametistas), que constitui em graus oscilantes de interrupção no espectro em forma de anéis; estes espectros podem ser circulares ou retilíneos e uniformes, podem possuir duas ou mais cores, geralmente de cores intensas e bastante saturadas. Neste trabalho foi utilizado um polariscópio da GIA com fonte de luz acoplada.

4 Resultados e Discussões

Através da comparação com a tabela de cor comercial, determinou-se que as amostras de ametistas de Quixeramobim (Ceará) possuem a cor roxa, mas não com a saturação ideal e valorizada pelo comércio que corresponde a um roxo intenso e vívido (Arem 2020), diferente dos minerais da região de Santa Quitéria que possuem esta cor ideal e também ocorrem no estado do Ceará (Oliveira et al. 2020).

Os índices de refração das ametistas analisadas, obtido com o refratômetro, variaram sutilmente entre 1,530 (amostra Medium Orchid 4) e 1,533 (amostra Dark Orchid 4) para o raio ordinário (no); e entre 1,540 (Medium Orchid 4) e 1,545 (Dark Orchid 4) para o raio extraordinário (ne). A birrefringência dos minerais da região de Quixeramobim (CE) varia entre 0,009 e 0,012, valores dentro da média; diferente dos valores entre 0,017 e 0,020 das ametistas provenientes de Santa Quitéria (Ceará) (Oliveira et al. 2020). Todas as gemas analisadas são uniaxiais positivos e com índice de refração

e birrefringência dentro da normalidade. Usualmente, as ametistas apresentam índice de refração (valores do raio extraordinário, ne) entre 1,540 e 1,555, com birrefringência em torno de 0,009; o caráter e sinal óptico é constante, uniaxial positivo (Arem 2020).

O dicróismo das gemas, ou pleocroísmo, que é analisado com o dicróscópio mostrou a presença do dicróismo com baixa intensidade nas cinco amostras, este aspecto é o mesmo das ametistas de Santa Quitéria (Oliveira et al. 2020). Estas gemas possuem o pleocroísmo classificado como fraco em detrimento da baixa absorção, característica usual nestes minerais. O pleocroísmo das ametistas é, comumente, fraco, embora já tenham sido observados casos moderados em algumas ametistas (Arem 2020).

Não foram observadas fluorescência e bandas de absorção nas ametistas investigadas, características também ausentes nas gemas de Santa Quitéria (Ceará) (Oliveira et al. 2020). Estes resultados eram esperados, pois nestes minerais tanto a fluorescência é, geralmente, inerte ou com baixa intensidade (Arem 2020) (Schumann 2020), assim como o espectro de absorção que é comumente ausente.

A densidade das ametistas é comumente $2,65\text{g}/\text{cm}^3$ (Arem 2020; Deer, Howie & Zussman 2010; Schumann 2020). A densidade relativa, aferida com o uso da balança hidrostática apresentou três (Medium Orchid 4, Dark Orchid 4 e Plum 3) das cinco gemas analisadas neste trabalho com a densidade média de $2,65\text{ g}/\text{cm}^3$ (densidade média das ametistas), uma ametista (Dark Orchid 4) detêm um valor de 2,66 e outra amostra (Dark Orchid 3) possui $2,67\text{ g}/\text{cm}^3$. Estes valores levemente acima da média são normais, atribuídos às inclusões nas gemas, o que leva a uma pequena margem de variação de 0,03 na densidade deste grupo mineral, os valores adquiridos são muito semelhantes aos das ametistas de Santa Quitéria (Oliveira et al. 2020).

Com o uso do polariscópio também foi possível inferir que as ametistas são anisotrópicas, o que era esperado, visto que são birrefringentes. Além da anisotropia, percebeu-se a ausência da geminação “Lei do Brasil” nas cinco amostras, fenômeno cuja presença é relativamente comum para ametistas encontradas em solo brasileiro (Crowningshield et al. 1986) estes aspectos são os mesmos das ametistas de Santa Quitéria (Oliveira et al. 2020).

A análise da diafanidade das gemas se deu por meio da visualização de uma ponta de uma caneta através das ametistas. Enquanto em amostras transparentes a imagem possui contorno e nitidez bem definidos, nas semitransparentes a nitidez não é tão notável, e nas translúcidas o contorno é definido, porém a nitidez é quase ausente. A análise mostrou que todas as cinco amostras são transparentes.

A Tabela 1 mostra uma coletânea dos dados gemológicos das ametistas de Quixeramobim (CE) obtidos neste trabalho.

Ao microscópio gemológico, as amostras foram submetidas a análises em busca de fraturas, inclusões (sólidas, líquidas ou gasosas) e linhas de crescimento, características comuns em ametistas (Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos 2009), os minerais mais comuns encontrados como inclusões em ametistas são hematita e goethita (Arem 2020), estes aspectos e feições internas são importantes para auxiliar quando necessário nos casos de proveniência mineral. As ametistas de Quixeramobim são caracterizadas predominantemente por inclusões sólidas levemente orientadas (Figura 3A), linhas de crescimento e inclusões fluidas orientadas paralelamente entre si e perpendiculares à estas linhas (Figura 3B), recorrentes trilhas de inclusões fluidas orientadas (Figura 3C) e fraturas (Figura 3D).

Minerais da família do quartzo comumente apresentam inclusões fluidas, estas correspondem a preservação de gotículas de um fluido (líquido ou gasoso), que é aprisionado em defeitos cristalinos (Pestelho & Monteiro 2017). Dependendo da sua concentração, organização e distribuição ao longo do cristal, é possível que as inclusões fluidas sejam classificadas em, singenéticas e

epigenéticas, as primeiras se formam durante o crescimento do mineral, enquanto essas últimas se originam após a formação do espécime (Hughes 2017). A maior parte das inclusões citadas apresentam um formato semelhante ao de inclusões singenéticas, formadas ao mesmo tempo que o cristal hospedeiro. Raramente, também são encontradas inclusões fluidas bifásicas (líquido e gás) sem orientação (apenas na amostra Dark Orchid 3); centros de cor com tonalidade roxa, um pouco mais escura e também em cor alaranjada; inclusões sólidas de hematita agrupadas, mas sem orientação. Essas inclusões citadas mostram uma configuração possivelmente protogenética. Diferente das ametistas de Santa Quitéria (Ceará), as gemas de Quixeramobim não possuem as inclusões sólidas orientadas e em forma de agulha (Oliveira et al. 2020), que são comuns nas do município de Santa Quitéria.

Inclusões sólidas são, geralmente, partículas, minerais ou o próprio mineral em tamanho reduzido; formados antes, ao mesmo tempo ou posteriores aos minerais hospedeiros. As linhas de crescimento são uma “marca” do crescimento mineral e as fraturas internas uma consequência de algum esforço, em regime compressivo, distensivo ou cisalhante, ao qual os cristais foram submetidos após a cristalização.

Tabela 1 Características gemológicas das ametistas de Quixeramobim, Brasil

Cor	Roxa	Roxa	Roxa	Roxa	Lilás
Amostra	(Dark Orchid 4)	(Medium Orchid 4)	(Dark Orchid 4)	(Dark Orchid 3)	(Plum 3)
Diafaneidade	Transparente	Transparente	Transparente	Transparente	Transparente
Índice de refração	1,545-1,533	1,540-1,530	1,541-1,532	1,542-1,532	1,542-1,532
Caráter e sinal óptico	Uniaxial positivo	Uniaxial positivo	Uniaxial positivo	Uniaxial positivo	Uniaxial positivo
Birrefringência	0.012	0.010	0.009	0.010	0.010
Pleocroísmo	Presente: Fraco	Presente: Fraco	Presente: Fraco	Presente: Fraco	Presente: Fraco
Espectro de absorção	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Fluorescência	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Densidade relativa	2.66g/cm ³	2.65g/cm ³	2.65g/cm ³	2.67g/cm ³	2.65g/cm ³
Anisotropia	Anisotrópico (Ausência da Geminação Lei do Brasil)	Anisotrópico (Ausência da Geminação Lei do Brasil)	Anisotrópico (Ausência da Geminação Lei do Brasil)	Anisotrópico (Ausência da Geminação Lei do Brasil)	Anisotrópico (Ausência da Geminação Lei do Brasil)
Inclusões e aspectos internos	Fraturas, raramente em paralelo; Inclusões sólidas de hematita por vezes orientadas; Inclusões fluidas ocasionalmente agrupadas e orientadas; por vezes linhas de crescimento; centro de cor alaranjado; linhas de crescimento quase que perpendiculares às inclusões fluidas.	Fraturas, Abundantes inclusões sólidas de hematita; inclusões fluidas com leve orientação.	Inclusões sólidas agrupadas e por vezes com leve orientação; raramente inclusões fluidas com orientação.	Fraturas; Inclusões sólidas raramente agrupadas e com orientação; inclusões fluidas, raramente bifásicas (líquido e gás); por vezes linhas de crescimento; raramente centro de cor roxa mais intensa que o restante do mineral; por vezes inclusões fluidas orientadas.	Fraturas; Centro de cor alaranjado com formato triangular; Inclusões sólidas de hematita, por vezes agrupadas; inclusões fluidas orientadas e paralelas entre si.

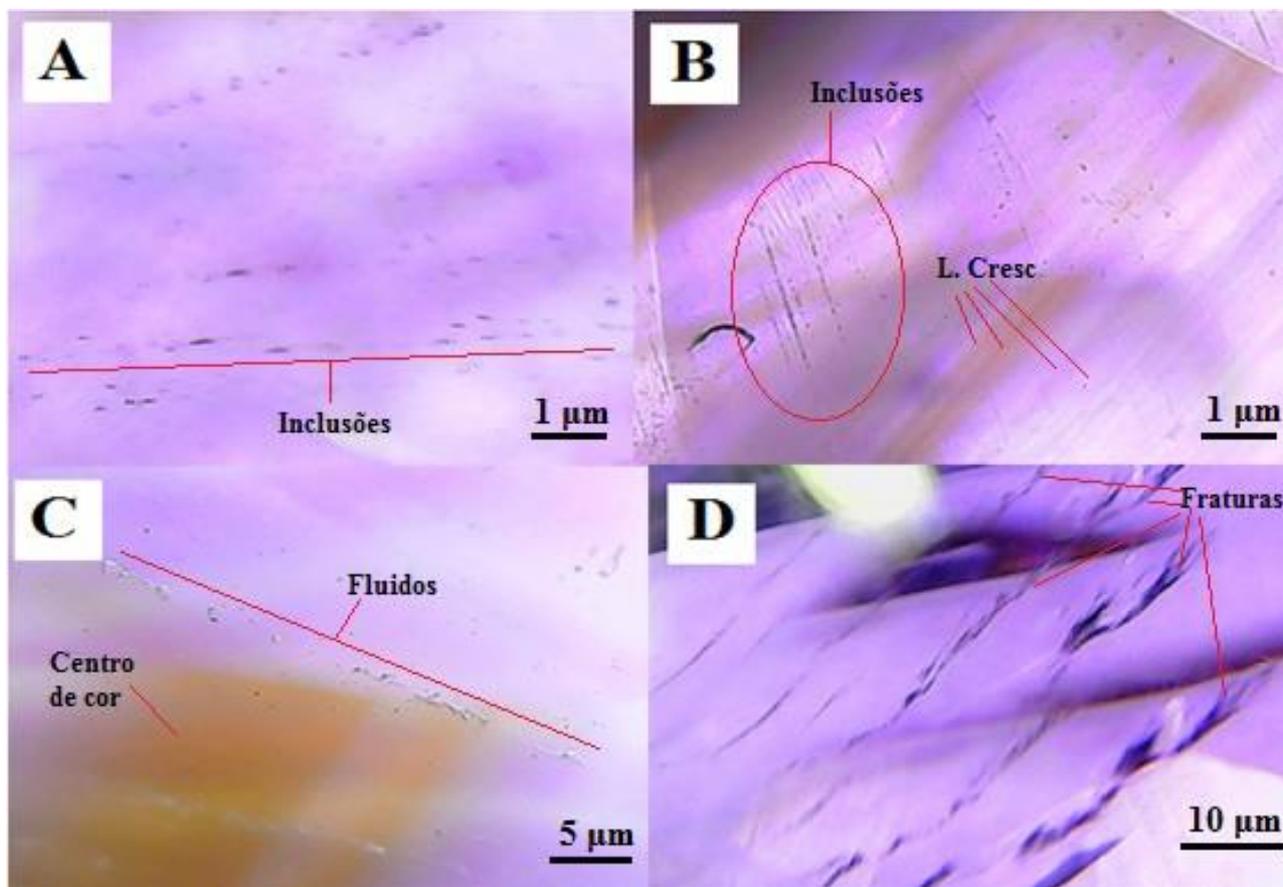


Figura 3 Fotomicrografia em luz transmitida de inclusões em ametistas de Quixeramobim- CE, Brasil; A. Inclusões sólidas e de coloração mais escura mostrando leve orientação; B. Inclusões com orientação, paralelas entre si e perpendiculares as linhas de crescimento da gema; C. Inclusões fluidas (monofásicas) orientadas e centro de cor alaranjado ao fundo; D. Fraturas paralelas entre si.

Este conjunto de aspectos internos quando interpretados com as características ópticas, permitem a identificação das ametistas como sendo provenientes de Quixeramobim (Ceará).

Para fins comparativos as características das ametistas de Quixeramobim e Santa Quitéria, ambas do estado do Ceará, foram compiladas em uma tabela (Tabela 2), junto aos dados das ametistas da localidade de Jacobina (Correa 2010) no estado da Bahia. Isto tem como finalidade evidenciar as diferentes propriedades gemológicas em ametistas, dentro do mesmo estado e na mesma macrorregião do país, mostrando como o ambiente de formação interfere nas propriedades dos minerais.

5 Conclusões

As ametistas do município de Quixeramobim (Ceará) possuem potencial para serem utilizadas como gemas, apesar de não possuírem a cor roxa intensa típica valorizada pelo comércio. O caráter uniaxial positivo representa um

aspecto imutável em ametistas. Além disto, os índices de refração e birrefringência obtidos encontram-se dentro da média para este grupo mineral. Todas as gemas possuem um pleocroísmo classificado como fraco. O espectro de absorção das amostras e a fluorescência estão ausentes. A densidade relativa possui uma leve oscilação, mas com valores dentro da normalidade. Logo, as ametistas de Quixeramobim (Ceará) têm as características padrão das ametistas de diferentes lugares do mundo, não possuindo anomalias. Porém, a abundância de inclusões fluidas e sólidas (principalmente dos fluidos) com orientação requer estudos mais aprofundados.

As ametistas de Santa Quitéria (Ceará) têm cor roxa intensa, característica anômala uma dupla refração (birrefringência) muito acima da média de 0,009; além de possuírem inclusões orientadas em forma de agulha. Características estas citadas que as ametistas de Quixeramobim não possuem. Constituindo propriedades distintas em minerais de mesma espécie, pertencentes ao mesmo

Tabela 2 Características gemológicas de ametistas da região Nordeste, Brasil

Localidade	Índice de refração e birrefringência	Caráter e sinal óptico	Pleocroísmo	Espectro de absorção e Fluorescência	Densidade relativa e Anisotropia	Inclusões e aspectos internos
Quixeramobim (Ceará)	1,545 – 1,530 0,009 – 0,012	Uniaxial positivo	Presente: Fraco	Ausente Ausente	2,65 – 2,67 g/cm ³ Anisotrópico (Ausência da Geminação Lei do Brasil)	Fraturas, raramente em paralelo; inclusões sólidas de hematita, por vezes orientadas; inclusões fluidas, por vezes agrupadas e orientadas; ocasionalmente linhas de crescimento; centro de cor roxa mais intensa; centro de cor alaranjado com formato triangular; linhas de crescimento quase que perpendiculares as inclusões fluidas.
Santa Quitéria (Ceará)	1,550 – 1,525 0,017 – 0,020	Uniaxial positivo	Presente: Fraco	Ausente Ausente	2,65 – 2,68 g/cm ³ Anisotrópico (Ausência da Geminação Lei do Brasil)	Fraturas; faixas de cor; inclusões de turmalina (ocasionalmente orientadas e em forma de agulha); inclusões fluidas, ocasionalmente bifásicas (líquido e gás), por vezes orientadas.
Jacobina (Bahia)	1,550 – 1,541 0,008 – 0,009	Uniaxial positivo	Presente: Moderado a fraco	Ausente Ausente	2,65 g/cm ³ Anisotrópico	Inclusões de goethita em formas de cogumelos; cristais negativos; inclusões fluidas, por vezes bifásicas, ocasionalmente do tipo listas de tigre; microfraturas.

Estado. Enquanto que as ametistas de Jacobina (Bahia), que também constitui a região Nordeste do país, são diferentes em algumas características das ametistas dos municípios do Ceará; possuindo uma refração, densidade relativa e birrefringência com pouca ou nenhuma oscilação, pleocroísmo de baixa até moderada intensidade, além de inclusões do tipo listras de tigre e sólidas em forma de cogumelo. Logo, com estas características é possível identificar e diferenciar as ametistas destas regiões.

Isto demonstra a importância da caracterização gemológica não apenas em nível Estadual/Regional, mas também em escala pontual, pois em um mesmo Estado podem ter algumas ocorrências do mesmo mineral, mas com propriedades e características divergentes. Portanto, mostra-se a importância de caracterizar as ocorrências em diferentes contextos geológicos, pois o ambiente de formação interfere diretamente nas características dos minerais.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio do Laboratório de Gemologia do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará (DEGEO/UFC).

7 Referências

Almeida, F.F.M., Melcher, G.C., Cordani, U.G. & Kawashita, K. 1968, 'Radiometric age determinations from Northern Brazil', *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia*, vol. 18, no. 1, pp. 3-14.

Anderson, B.W. 1984, *Identificação das Gemas*, Livro Técnico S/A, Rio de Janeiro.

Arem, J.E. 2020, *Amethyst Value, Prince and Jewelry Information*, viewed 6 August 2020, <<https://www.gemsociety.org/article/amethyst-jewelry-and-gemstone-information/>>.

Baggio, S.B., Hartmann, L.A., Massonne, H.J., Theye, T. & Antunes, L.M. 2015, 'Silica gossan as a prospective guide for amethyst geode deposits in the Ametista do Sul mining district, Paraná volcanic province, southern Brazil', *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 159, pp. 213-26. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.09.011>

Brasil 2002, *Lei n° 10.406, de 10 de janeiro de 2002*, viewed 6 January 2018, <<http://www.camara.gov.br/sileg/integras/247357.pdf>>.

Correa, M. 2007, 'Geologia e Gemologia das Ametistas de Brejinho das Ametistas, Bahia', Monografia de Graduação, Universidade Federal da Bahia.

Correa, M. 2010, 'Variedades gemológicas de quartzo na Bahia, geologia, mineralogia, causas de cor, e técnicas de tratamento', Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/D.44.2010.tde-20012011-114502>

Crowningshield, R., Hurlbut, C. & Fryer, C.W. 1986, 'A Simple Procedure To Separate Natural From Synthetic Amethyst On The Basis Of Twinning', *Gems and Gemology, Identification of Amethysts*, vol. 22, no. 3, pp. 130-9. <https://doi.org/10.5741/GEMS.22.3.130>

Deer, W.A., Howie, R.A. & Zussman, J. 2010, *Minerais Constituintes das Rochas: uma Introdução*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.

Devmedia 2013, *Código de cor: Infográfico dos códigos das cores em HTML*, viewed 6 August 2019, <<https://www.devmedia.com.br/codigo-cor-infografico-dos-codigos-das-cores-em-html/37238>>.

- Dotto, C.T. & Isotani, S. 2006, 'Irradiation and heating effects in amethyst crystals from Brazil', *Radiation Effects and Defects in Solids*, vol. 117, pp. 355-61. <https://doi.org/10.1080/10420159108220755>
- Fisher, A.C., Berger, G., Polvé, M., Dubois, M., Sardini, P., Beaulfort, D. & Formoso, M. 2010, 'Petrography and chemistry of SiO₂ filling phases in the amethyst geodes from the Serra Geral Formation deposit, Rio Grande do Sul, Brazil', *Journal of South America Earth Sciences*, vol. 29, no. 3, pp. 751-60. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.10.002>
- Gilg, H.A., Morteani, G., Kostitsyn, Y., Preinfalk, C., Gatter, I. & Stieder, A.J. 2002, 'Genesis of amethyst geodes in basaltic rocks of the Serra Geral Formation (Ametista do Sul, Rio Grande do Sul, Brazil): a fluid inclusion, REE, oxygen, carbon, and Sr isotope study on the basalt, quartz and calcite', *Mineralium Deposita*, vol. 28, pp. 1009-25. <https://doi.org/10.1007/s00126-002-0310-7>
- Guttler, S.R. & Kohigashi, H.C. 2006, 'Treated violetish blue to violet quartz from Brazil', *Gems & Gemology*, vol. 42, pp. 285-86.
- Hartmann, L.A. 2015, 'Indicadores geológicos da presença de jazidas de ametista, ágata e cobre em basaltos no Grupo Serra Geral' in Maciel Donato, L. C. Duarte & L. A. Hartmann. (eds), *Inovação, design e pesquisas aplicadas em gemas, joias e mineração*, 1 edn, IGEO/UFRGS, Porto Alegre, vol. 1, pp. 6-13
- Hartmann, L.A., Duarte, L.C., Massonne, H.J., Michelin, C., Rosenstegel, L.M., Bergman, M., Theye, T., Pertille, M., Arena, K.R., Duarte, S.K., Pinto, V.M., Barboza, E.G. & Wildner, W. 2010, 'Sequential opening and filling of cavities forming vesicles, amygdalae and giant amethyst geodes in lavas from the southern Paraná volcanic province, Brazil and Uruguay', *International Geology Review*, vol. 54, no. 1, pp. 1-14. <https://doi.org/10.1080/00206814.2010.496253>
- Hughes, R.W. 2017, *Ruby & sapphire: A Gemologist's guide*, RWH Publishing/Lotus Publishing, Bangkok.
- Hurlbut Jr. C.S. & Switzer, G.S. 1979, *Gemology*, John Wiley & Sons, New York.
- Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos 2009, *Manual Técnico de Gemas*, Brasília.
- Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará 2019, 'Limites municipais e distritais - Região de planejamento Sertão Central - 2019' 1 mapa.
- Juchem, P.L. 2014, 'Mineralizações De Ametista Em Riodacitos Do Grupo Serra Geral, Província Vulcânica Paraná' in L.A. Hartmann & S.B. Baggio, *Metalogenia e Exploração Mineral no Grupo Serra Geral*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pp. 41-54
- Juchem, P.L., Fischer, A.C., Svisero, D.P., Silva, A.O. 2001 'Características químicas dos minerais de sílica de geodos mineralizados a ametista da região do Alto Uruguai, RS, Brasil', *Anais del XI Congreso Latinoamericano de Geologia*, pp. 1-6.
- Juchem, P.L., Fischer, A.C., Bello, R.M.S., Svisero, D.P. 1994, 'Inclusões fluidas em ametistas da região do Alto Uruguai, Rio Grande do Sul', *Boletim de Resumos Expandidos do 38º Congresso Brasileiro de Geologia*, pp. 649-50.
- Oliveira, I.G., Maciel, E.L., Rodrigues, T.F., Mattos, I.C., Neri, T.F.O. 2020, 'Caracterização Gemológica das Ametistas com Alta Birrefringência de Santa Quitéria', *Anuário do Instituto de Geociências - IGEO*, vol. 43, no. 3, pp. 137-44. https://doi.org/10.11137/2020_3_137_144
- Palheta, E.S.M. 2017, 'Geologia e recursos minerais da folha Senador Pompeu - SB.24-V-D-VI: estado do Ceará', 1 mapa, escala 1:100.000, CPRM, Fortaleza.
- Parente, C.V., Almeida, A.R., Arthaud, M.H. 2008, 'Nota explicativa das folhas Quixeramobim (SB.24-V-D-III), Boa Viagem (SB.24-V-D-II) e Itaitira (SB.24-V-B-V), escala 1:100.000', CPRM, Fortaleza.
- Pestelho, A.L.S. & Monteiro, L.V.S. 2017, 'Uma revisão dos fundamentos do estudo de inclusões fluidas aquosas e de petróleo', *Terra Didática*, vol. 13, no. 2, pp. 71-92. <https://doi.org/10.20396/td.v13i2.8650084>
- Pinéo, T.R.G., Palheta, E.S.M., Costa, F.G., Vasconcelos, A.M., Gomes, I.P., Gomes, F.E.M., Bessa, M.D.M.R., Lima, A.F., Holanda, J.L.F. & Freire, D.P.C. 2020, 'Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Ceará' 1 mapa, escala 1:500.000, CPRM, Fortaleza.
- Proust, D. & Fontaine, C. 2007, 'Amethyst-bearing lava flows in the Paraná Basin (Rio Grande do Sul, Brazil): cooling, vesiculation and formation of the geodic cavities', *Geological Magazine*, vol. 144, no. 1, pp. 53-65. <https://doi.org/10.1017/S001675680600269X>
- Schumann, W. 2020, *Gemstones of the world*, Sterling Editor, Nova York.
- Terra, C. 2020, Gemologia: a ciência de mil cores, *Terra Didática*, vol. 16, pp. 1-13. <https://doi.org/10.20396/td.v16i0.8658362>
- Tononi, L.L., Duarte, L.C., Juchem, P.L., Menezes, M.T.F., Schnellrath, J. 2019, 'Tratamento por radiação gama em cristais de ametista da região de Progresso/RS', *Revista de Ciências Exatas Aplicadas e Tecnológicas da UPF*, vol. 11, pp. 10-18. <https://doi.org/10.5335/ciatec.v11i1.9290>

Recebido em: 26/02/2021

Aprovado em: 28/04/2021

Como citar:

Oliveira, I.G., Freires, T., Maciel, E., Santos, L., Paschoal, W. & Neri, T. 2021, 'Aspectos Gemológicos de Ametistas de Quixeramobim, Brasil', *Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 44: 41769. https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_41769

APÊNDICE H - ARTIGO 2

OCORRÊNCIAS DE TURMALINAS EM QUIXERAMOBIM, CEARÁ*TOURMALINE OCCURRENCES IN QUIXERAMOBIM, CEARÁ*

Isaac GOMES DE OLIVEIRA¹, Laryssa de Sousa CARNEIRO², Jéssica de Souza CARDOSO¹, Narjara Maria Araujo CARNEIRO¹, Carlos William de Araújo PASCHOAL³, Tereza Falcão de Oliveira NERI¹

¹Universidade Federal do Ceará – Centro de Ciências, Departamento de Geologia, Avenida Humberto Monte, s/n, Fortaleza, CE, Brasil. E-mails: isaacgomes_1996@hotmail.com; jessica95@gmail.com; narjaramaria@gmail.com; tereza.neri@ufc.br

²UNICAMP - Instituto de Geociências, Departamento de Geologia e Recursos Naturais, Rua Carlos Gomes, 250, Campinas, SP, Brasil. E-mail: laryssa.s.carneiro@gmail.com

³Universidade Federal do Ceará - Centro de Ciências, Departamento de Física, Avenida Av. Humberto Monte, s/n, Fortaleza, CE, Brasil. E-mail: paschoal.william@fisica.ufc.br

Introdução
Localização da área
Contexto geológico regional
Domínio Ceará Central
Pegmatitos da região de Quixeramobim
Materiais, métodos e técnicas
Refratômetro
Dicroscópio
Lâmpada de luz ultravioleta
Espectroscópio
Balança hidrostática
Microscópio gemológico
Discussões, interpretações e resultados
Conclusões
Agradecimentos
Referências

RESUMO - A turmalina pertence a um grupo de minerais que possuem a mesma estrutura cristalina, mas variam em composição química, cor e outras propriedades. 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 octaetricamente; os três octaedros envolvem o eixo ternário e cada tetraedro compartilha uma aresta com cada um dos outros dois tetraedros vizinhos equivalentes. Jazidas deste grupo mineral são encontradas especialmente em pegmatitos e depósitos aluvionares. Este trabalho visa à caracterização gemológica de exemplares de difícil aquisição de turmalina oriundos do município de Quixeramobim (CE) que possuem potencial para serem utilizados como gemas. Turmalinas nas cores vermelha e bicolor (azul e verde) provenientes do Ceará são pouco utilizadas no comércio cearense por existirem poucos exemplares gemológicos e pouco conhecidas no meio acadêmico. Para a caracterização das turmalinas de Quixeramobim foram utilizados: refratômetro, balança hidrostática, dicroscópio, espectroscópio, lâmpada ultravioleta (UV) e microscópio gemológico. Os exemplares vermelhos e bicolores possuem majoritariamente as mesmas características gemológicas das turmalinas de outras regiões, porém com uma variação no pleocroísmo e espectro de absorção de alguns exemplares. Os minerais possuem bom grau de cor de acordo com as normas do “Boletim Referencial de Preços de Diamantes e Gemas de Cor”, e inclusões fluidas perceptíveis com auxílio de equipamento óptico. Logo, por meio dos instrumentos gemológicos listados e análises acuradas foi possível realizar uma excelente caracterização e compilação dos dados dos minerais desta região, além de comprovar que os exemplares possuem boas a excelentes características para serem utilizados como gemas.

Palavras-chave: Turmalina vermelha. Quixeramobim. Caracterização gemológica.

ABSTRACT - Tourmaline is a group of minerals that have the same crystalline structure, but vary in chemical composition, color and other properties. In tourmalines, the general chemical formula $XY_3Z_6B_3Si_6(O, OH)_3(OH, F)$ is used. The ions in the Y position (Boron) are surrounded by oxygen ions and octahedrally arranged; the three octahedrons surround the ternary axis and each tetrahedron shares an edge with each of the other two equivalent neighboring tetrahedrons. Deposits of this mineral group are found especially in pegmatites and alluvial deposits. This work aims at the gemological characterization of specimens that are difficult to acquire tourmaline from the municipality of Quixeramobim (CE) that have the potential to be used as gems. Tourmaline in red and bicolor colors (blue and green) from Ceará are seldom used in Ceará commerce because there are few gemological specimens and little known in academia. For the characterization of Quixeramobim tourmalines, a refractometer, hydrostatic balance, dichroscope, spectroscope, ultraviolet lamp (UV) and gemological microscope were used. The red and bicolor specimens mostly have the same gemological characteristics as tourmalines from other regions, but with a variation in pleochroism and absorption spectrum of some specimens. The minerals have a good degree of color in accordance with the rules of the "Price List for Diamonds and Color Gems", and noticeable fluid inclusions with the aid of optical equipment. Therefore, through the listed gemological instruments and accurate analyzes, it was possible to perform an excellent characterization and compilation of mineral data from this region, in addition to proving that the specimens have good to excellent characteristics to be used as gems.

Keywords: Red tourmaline. Quixeramobim. Gemological characterization.

INTRODUÇÃO

As nações em que a exploração de gemas foi ou ainda continua forte, realizam uma caracterização gemológica de todos os seus materiais comercializados, desde os que são abundantes até os mais raros. É usual que estes países publiquem e organizem estes dados gemológicos de acordo com as regiões geográficas da nação.

Estes estudos são extremamente necessários, pois características como: índice de refração, birrefringência, pleocroísmo, fluorescência e densidade relativa podem variar bastante; como é o caso dos rubis, no qual o dicroísmo e a fluorescência variam de forte até fraco e em algumas vezes até ausente, causando erros na classificação se as fontes de referência utilizadas forem desatualizadas.

O motivo desta organização e divulgação dos dados ocorre para ajudar e facilitar o trabalho dos profissionais (gemólogos, pesquisadores e outros) que lidam com gemas e imitações destas, principalmente para a sua identificação, diminuindo exponencialmente a chance de um erro no reconhecimento do material.

Desse modo, a caracterização gemológica é de extrema importância, uma vez que características como índice de refração, birrefringência, pleocroísmos, fluorescência e densidade relativa podem variar bastante dentro de um mesmo grupo mineral, dependendo de sua proveniência. Essa variação é muito comum no grupo do coríndon, por exemplo, em que o dicroísmo e a fluorescência variam de forte até fraco, estando por vezes ausente.

A ocorrência dessas variações em posições geográficas específicas pode ser usada como traçador de proveniência, situação comum para o caso do rubi, que possui peso específico médio que varia entre 3.90 e 4.00 g/cm³, enquanto os rubis provenientes do Sri Lanka detêm uma densidade de 3.97 g/cm³ (Pehrson, 2017). O termo imitações é usado para designar produtos que imitam as gemas naturais e que são usadas pelo homem no intuito de reproduzir efeito óptico, cor e aparência das gemas naturais, ou por vezes sintéticas (DNPM/IBGM, 2009); uma imitação deve ser descrita pelo nome correto do material do qual é composto, ou pelo nome do material natural que imita, imediatamente precedido pela expressão “imitação de” (ABNT/NBR 10630, 2016).

As turmalinas de baixa ocorrência em Quixeramobim (CE) não possuem as suas propriedades

gemológicas tabeladas; estes minerais podem ser utilizados como “substitutos” de outros minerais de maior valor econômico como berilo vermelho, rubi e piedmonita, por não possuírem suas propriedades ópticas bem definidas (Oliveira et al., 2019)

O grupo da turmalina tem um grande valor e importância comercial, tanto para joalheria quanto para a indústria. Nenhuma gema possui uma gama de cores tão rica como a turmalina. Apesar de na antiguidade ter sido reconhecida inicialmente na região mediterrânea, foram os holandeses que a introduziram na Europa ao trazê-la do Ceilão (atual Sri Lanka), em 1703 (Schumann, 2006).

A composição química deste mineral pode ser descrita como um borossilicato de alumínio contendo quantidades variáveis de magnésio, ferro, cálcio, e metais alcalinos (Anderson, 1984); esta composição tão oscilante é a responsável por conferir uma grande diversidade em suas características ópticas. As complexas variações composicionais e estruturais cristalinas, deste mineral são responsáveis pela intensa variedade de cores e outras características ópticas da turmalina (Hawthorne & Dirlam, 2011). Como toda turmalina tem dureza entre 7 e 7,5 na escala de Mohs, ela se torna um exemplar muito adequado para produção de joias. Contudo, turmalinas com qualidade gemológica não são relativamente raras, com exceção da turmalina Paraíba (Phichaikamjornwut et al. 2019).

Uma grande variedade destas gemas apresenta um pleocroísmo notável, que varia em intensidade, no entanto, a turmalina é marcada por um pleocroísmo particularmente forte, resultante geralmente de seu conteúdo em ferro. Algumas características físicas e ópticas da turmalina, tais como o índice de refração, a birrefringência e a densidade aumentam com o incremento do teor em Fe²⁺, Fe³⁺, Mn e Ti (Deer, 2010).

A região do município de Quixeramobim (Ceará) comumente apresenta para o comércio turmalinas nas cores azuis, verde, rosa e preta; porém raramente estes minerais da região podem exibir e serem comercializados na cor vermelha e exemplares bicolors bem definidos (verde e azul, verde e rosa); fazendo com que estas amostras de cores raras (vermelhas e bicolors) para o município (região do Condado) sejam desconhecidas do grande público e de até mesmo pesquisadores.

A caracterização gemológica é de suma importância para a atualização dos dados ópticos das gemas, o que permite a identificação e diferenciação entre um material e eventuais imitações, principalmente quando o material é cortado, desbastado e polido, não sendo possível identificar suas propriedades externas. A caracterização gemológica também é usada em estudos de proveniência mineral e casos de investigação e perícia criminal. Esta análise utiliza especialmente técnicas não-invasivas e não-destrutivas que são capazes de fornecer informações confiáveis, rápidas e baratas quanto à classificação estrutural e mineralógica de gemas (tipologia, defeitos etc.), bem como a procedência (Mazzoleni et al., 2016). São extremamente usuais as várias tentativas de fraude e golpes relacionados a gemas, sendo

comuns o superfaturamento de gemas e a atividade comercial que envolva materiais sem nenhum valor econômico.

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 dez distritos: Lacerda, Manituba, Passagem, Uruquê, Panabibu, Belém, Nenelândia, Damião Carneiro, Encantado e São Miguel. 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).

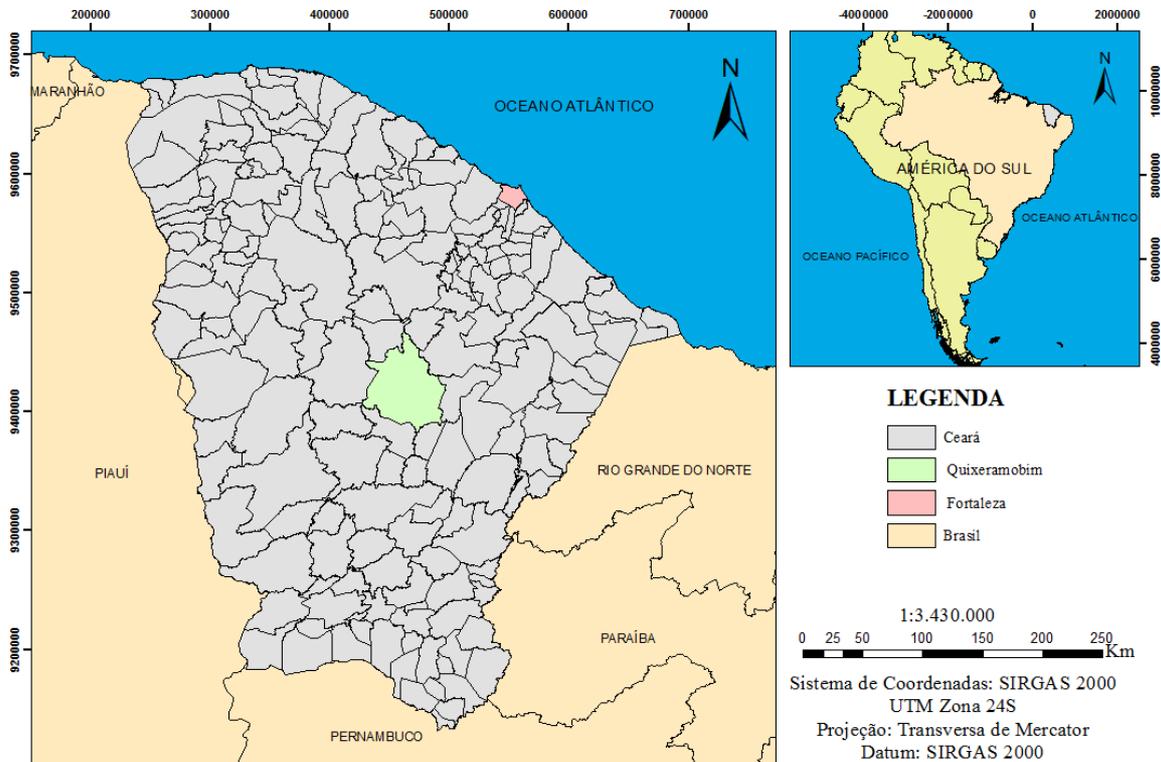


Figura 1 - Área de Pesquisa, situada no interior no Ceará. Limita-se com os municípios de Madalena (Norte); Quixadá, Banabuiú e Choró (Leste); Senador Pompeu, Sonolópole e Pedra Branca (Sul); Boa Viagem (Oeste).

Contexto geológico regional

A área de estudo está inserida dentro do contexto geológico da Província Borborema (Figura 1). Primeiramente assim chamada por Almeida (1981) se trata de uma unidade geotectônica estruturada durante o Ciclo Brasileiro, está localizada na parte oriental da região nordeste da Plataforma Sul-Americana. A Província Borborema é dividida em 5 domínios geológicos: DMC – Médio Coreau, DZT – Zona Transversal, DM – Meridional e DRGN – Rio Grande do Norte, e DCC – Ceará Central.

Domínio Ceará Central

O Domínio Ceará Central é limitado pela Província Costeira e pela zona de cisalhamento Sobral–Pedro II, a norte, pela Província Sedimentar do Parnaíba, a oeste e pelas zonas de cisalhamento de Orós e de Aiuaba, a leste e a sul.

No DCC, os terrenos mais antigos afloram no Bloco de Tróia – Pedra Branca, constituindo o chamado Grupo Cruzeta. São compostos por rochas arqueanas das séries granito-greenstone e granitos-gnáissicos, com 2.8-2.5 Ga (Torquato et al., 1989; Arthaud, 2007).

Para além deste conjunto, o DCC compreende ainda a Faixa Ceará Central que ocupa a maior parte da sua extensão. A Faixa Ceará Central é dominada por rochas metassedimentares proterozoicas que se distribuem pelas seguintes unidades: Canindé, Independência, Quixeramobim, Arneiroz, Acopiara, Grupo Novo Oriente e Choro. Com exceção da unidade de Canindé, todas as outras unidades apresentam características de ambiente de plataforma marinha de margem passiva, sendo formadas por metaconglomerados, quartzitos, metapelitos, mármore e menores proporções de

anfíbolitos e ortognaisses. Mostram metamorfismo da fácies anfíbolítica de grau alto (zona da sillimanita) e atingem localmente as condições de fusão parcial com produção de migmatitos, principalmente na unidade de Canindé. As idades U-Pb obtidas por Fetter (1999) nos ortognaisses e migmatitos da unidade Canindé permitem datá-las com 2.15-2.10 Ga (Paleoproterozoico médio). Além disso, durante o ciclo orogénico Brasileiro, o Domínio Ceará Central foi intrudido por abundantes volumes de granitóides pré, sin e pós colisionais, agrupados por Arthaud (2007).

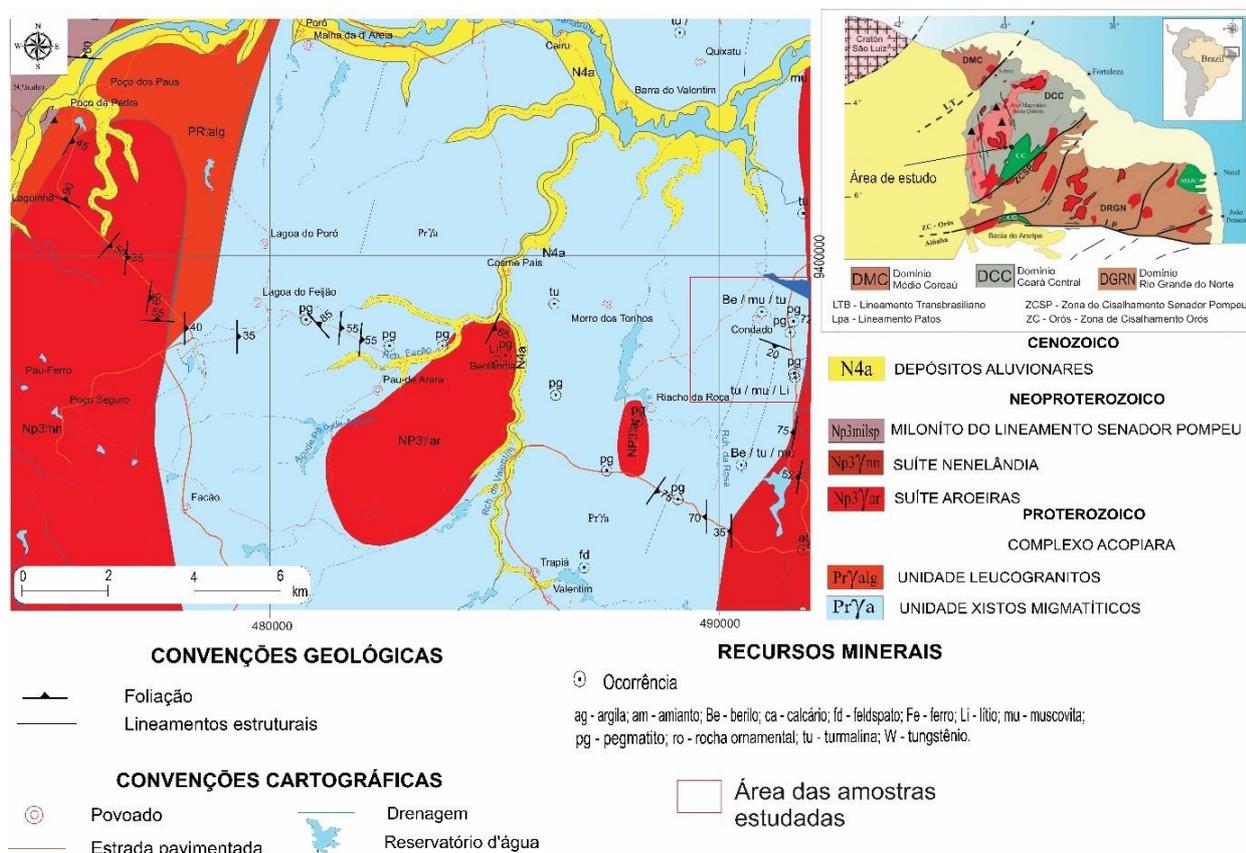


Figura 2 - Mapa geológico simplificado de região do DPQ de onde derivam as amostras estudadas e contexto geotectônico em que se insere na porção Setentrional da Província Borborema. Região de proveniência das turmalinas (Condado) em vermelho. Modificado de Parente et al. (2008).

Pegmatitos da região de Quixeramobim

Estão inseridos no Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim (Figura 1), localizado na região centro-oeste do estado do Ceará, que corresponde ao distrito com maior concentração em pegmatitos economicamente mineralizados. Sendo uns dos principais campos o de Berilândia, composto por pegmatitos produtores de pedras coradas, principalmente, água-marinha e turmalina gemológica; e o de Rinaré – Banabuiú, onde ocorrem pegmatitos mineralizados em berilos e turmalinas gemológicas.

Com base em critérios mineralógicos e texturais, Marques Júnior, 1992; Almeida &

Ulbrich, 2001 distinguiram três grandes grupos de pegmatitos no Nordeste do Brasil: (a) os pegmatitos homogêneos, com textura uniforme e mineralogia simples e (b) os pegmatitos heterogêneos, apresentando zoneamento bem marcado e especialização metalogénica e (c) os pegmatitos mistos, com características intermédias entre os dois tipos anteriores.

Os pegmatitos homogêneos exibem relações bruscas e intrusivas tanto com os gnaisses e migmatitos do embasamento quanto com supracrustais e granitos brasileiros. Apresentam quartzo, feldspato e micas como constituintes essenciais, granulação variável (cm a dm) e só raramente são

mineralizados (Vidal & Nogueira Neto, 2005). Em contraste, os pegmatitos heterogêneos estão preferencialmente associados aos complexos gnáissico-migmatíticos do embasamento e mostram um zoneamento regular, definido pela ocorrência das seguintes zonas (Marques Júnior, 1992; Vidal & Nogueira Neto, 2005):

- Zona I (marginal ou de borda) – contendo quartzo + feldspato potássico (microclina + intercrescimento gráfico) + plagioclásio (albita) + muscovita como fases principais e afrisita, cassiterita e granada como acessórios comuns. A textura é predominantemente aplítica e a espessura fina;

- Zona II (parede) – com composição e textura semelhantes às dos pegmatitos homogêneos. Ocupa, em geral, um volume significativo dos corpos pegmatíticos;

- Zona III (intermédia) – caracterizada pela presença de cristais de feldspato de grandes dimensões e um cortejo variado de fases acessórias (apatita, ambligonita, berilo, columbita-tantalita, cassiterita, turmalina, espodumênio, petalita e lepidolita);

- Zona IV (axial) – formada por um núcleo de quartzo maciço de cores variadas, ao qual se podem associar diferentes minerais acessórios.

No contato entre a zona III e o núcleo de quartzo, desenvolve-se, em muitos casos, uma “zona de substituição metassomática” (ZS). As zonas de substituição metassomática” (ZS) são constituídas por albita sacaroidal, muscovita esverdeada, lepidolita e quartzo e ocorrem em corpos lenticulares ou cavidades miarolíticas, de dimensões métricas a decimétricas, frequentemente designados por “bolsões” (Leal Neto, 2004).

Alguns pegmatitos heterogêneos mostram um zoneamento incipiente, definido pelo predomínio

de texturas aplíticas nas bordas e texturas grosseiras nas regiões centrais. Estes corpos estão muitas vezes mineralizados em turmalina, berilo, apatita e ambligonita.

A tectônica exerceu uma influência significativa na forma, dimensão e disposição dos corpos pegmatíticos (Marques Júnior, 1992). Estudos realizados no campo pegmatítico de Banabuiú – Solonópole mostram que a grande maioria dos filões pegmatíticos apresentam direções variando entre N5°E e N15°E que parecem ter sido controladas pelas duas importantes zonas de cisalhamento que limitam a área: Senador Pompeu e Orós (Marques Júnior, 1992).

Essas zonas deformam não só as rochas do embasamento como também todo o conjunto plutônico (Marques Júnior, 1992). Com efeito, os granitos e granodioritos exibem, por vezes, uma foliação tectônica subvertical, com direção N15E. A grande maioria dos pegmatitos ocorrem nos espaços gerados em fraturas e falhas, com caráter frágil ou frágil/dúctil, o que aponta para uma instalação mais tardia destes corpos (Arthaud, 2007).

Com base em dados geocronológicos Rb-Sr e K-Ar em biotitas e muscovitas, Almeida et al. (1968) propõem um intervalo de idades entre 470 e 530 Ma para a formação dos corpos pegmatíticos do Distrito Solonópole-Quixeramobim. Datações K-Ar mais recentes obtidas por Lima (2008) em muscovitas (K-Ar) de pegmatitos homogêneos e heterogêneos que interceptam as rochas encaixantes do DCC (granito e gnaisses migmatíticos, respectivamente) da região de Banabuiú (DPSQ), apresentam um intervalo de valores de idades compreendidas de 519,8 Ma a 529,8 Ma, confirmando e sobrepondo aos valores do intervalo de idade estabelecido por Almeida et al. (1968).

MATERIAIS, MÉTODOS E TÉCNICAS

Foram selecionadas de modo aleatório cinco amostras da região do Condado (Quixeramobim) de turmalina sendo três vermelhas (Figuras 3A, 3B e 3C) e duas bicolores (Figuras 3D e 3E); em um montante de exemplares que seriam utilizados no comércio, estes já estavam separados previamente por não serem opacos; os exemplares foram escolhidos de modo aleatório para que estas fossem uma representação daquela população mineral. Para a caracterização gemológica destes cinco minerais foram utilizados diversos instrumentos gemológicos, sendo aplicado o uso de refratômetro, balança hidrostática, dicrosscópico, espectroscópico,

lâmpada fluorescente e microscópio gemológico. Para constatação da qualidade gemológica das amostras foi utilizado o “Boletim Referencial de Preços de Diamantes e Gemas de Cor” (DNPM/IBGM, 2009), adicionalmente, foi usada uma tabela empregada pelo comércio que possui 384 cores e códigos hexadecimais (Código de cor: Infográfico dos códigos das cores em HTML, 2013) para avaliação da cor das gemas.

Refratômetro

Este instrumento é um dos mais úteis e precisos em gemologia para identificação das gemas, com ele é possível medir o índice de refração da gema,



Figura 3 - Turmalina do Distrito Pegmatítico Solonópole-Quixeramobim analisadas; A. Turmalina vermelha (Dark Red), com as seguintes dimensões: 13.24 x 10.44 x 4.67 mm; B. Turmalina vermelha (Red 3), com as seguintes dimensões: 9.83 x 7.22 x 4.23 mm; C. Turmalina vermelha (Red 3), com as seguintes dimensões: 12.50 x 13.00 x 6.19 mm; D. Turmalina bicolor (Azul e Verde) (Deep Sky Blue 3 / Chartreuse 3), com as seguintes dimensões: 8.11 x 5.06 x 3.68 mm; E. Turmalina bicolor, melancia (Rosa e Verde) (Deep Pink 4 / Chartreuse 4) analisada, com as seguintes dimensões: 14.46 x 10.17 x 4.99 mm.

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 dos materiais analisados, estas últimas são obtidas por meio de cálculos matemáticos simples. Foi utilizado um refratômetro marca *Rayner Dialdex* sem fonte de luz acoplada.

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 com diferentes direções e valores (Anderson, 1984).

Ao se obter dois raios (n_o (raio ordinário) e n_e (raio extraordinário)) nos minerais uniaxiais e três nos biaxiais (n_x , n_y e n_z) (índices de refração (mínimo, médio e máximo, respectivamente)) e, com

estes dados, pode ser obtido o elipsóide e determinar de forma gráfica ou matemática se é uniaxial ou biaxial e o caráter óptico (Schumann, 2006).

Dicroscópio

Com este instrumento é possível visualizar o pleocroísmo das gemas. Foi utilizado um dicroscópio portátil da GIA (Gemological Institute of America). 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, quando se rotaciona o dicroscópio rente a uma gema, é decorrente da falta de compensação dos índices de refração de gemas anisotrópicas. É considerada uma consequência de gemas 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.

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). A fluorescência pode ser aferida em laboratório através do uso de lâmpadas de luz ultravioleta e em um ambiente escuro ou com pouca iluminação. Foi utilizada uma lâmpada fluorescente da GIA (Gemological Institute of America).

Espectroscópio

Foi utilizado um espectroscópio portátil da GIA sem fonte de luz acoplada. Este instrumento 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 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 pedras coloridas, transparentes e de tons intensos. (Schumann, 2006).

Balança Hidrostática

Uma balança hidrostática é um instrumento utilizado para o estudo da força de impulsão exercida por líquidos sobre os corpos neles imersos. O funcionamento se baseia no princípio de Arquimedes, (densidade é igual à massa sobre o volume exercido do objeto em meio líquido) esta é especialmente concebida para a determinação de densidades de sólidos. O mineral a ser determinado é pesado primeiramente no ar (no prato da balança sob a plataforma) e depois na água (na cesta dentro do copo com água). 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). Foram utilizadas duas balanças, uma hidrostática Marte AD5002 e outra analítica AND HR200 para garantir máxima precisão no peso das amostras.

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, faixas de cor, resquícios do fundente e bolhas de ar, torna-se possível discernir substâncias de origem natural ou sintética.

As amostras 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. Foi usado um microscópio binocular gemológico Meiji EMZ 75339 em fundo branco e com fonte de luz acoplada.

DISCUSSÕES, INTERPRETAÇÕES E RESULTADOS

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, pleocroísmo de fraco a forte, fluorescência quase sempre inerte e nas poucas vezes que se faz presente pode ser classificada como 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 ou cor deste mineral possui valores mais exatos e poucos variáveis.

Estas amostras possuem as propriedades ópticas dentro dos limites do grupo da turmalina, exceto por uma peculiaridade. Para a caracterização gemológica destes minerais, o refratômetro teve um papel fundamental, provando que os minerais são uniaxiais negativos; com *no* e *ne* apresentando valores dentro da normalidade de cada cor, com os maiores valores do raio ordi-nário (1,640) ocorrendo tanto nos exemplares vermelhos como em um bicolor (verde e rosa), bem como os menores valores do raio extraor-dinário (1.605) para uma amostra vermelha e uma bicolor (verde e rosa). As gemas analisadas possuem uma birrefringência elevada, possuindo valores (0.029-0.035) muito próximos da média máxima (0.032) do grupo (Schumann, 2006); enquanto que uma amostra bicolor (azul e verde) possui um valor de 0.021 que é considerado mediano (Arem & Clark, 2019).

O uso da balança hidrostática apresentou resultados dentro das expectativas. As amostras vermelhas detêm uma densidade de 3.13 g/cm³ para o exemplar mais denso (*Red 3*) e 3.02 g/cm³ para o menos denso (*Red 3*), já as turmalinas bicolores possuem 3.10 g/cm³ para o mineral de maior densidade (verde e rosa) e 3.07 g/cm³ para o de menor densidade (azul e rosa). As gemas apresentaram densidades dentro da normalidade de sua cor e do grupo da turmalina (IBGM, 2009; Arem & Clark, 2019).

A utilização do dicróscópio para análise do pleocroísmo foi o terceiro passo; esta característica é presente e classificada como forte em três amostras (*Red 3*, *Red 3* e (*Deep Sky Blue 3* / *Chartreuse 3*), como moderada em uma bicolor (*Deep Pink 4* / *Chartreuse 4*) e fraca em uma vermelha (*Dark Red*), que possui pleocroísmo classificado com fraco em detrimento da baixa absorção, sendo essa uma característica incomum em turmalina (Arem & Clark, 2019).

O uso de uma lâmpada de luz ultravioleta permitiu a observação da quinta característica comum para todas as amostras: a fluorescência, que não pôde ser identificada em nenhuma turmalina estudada.

O espectro de absorção captado pelo espectroscópio se aproxima muito da característica padrão da turmalina; o valor obtido comumente é de 458 e 451 nm para os exemplares vermelhos.

Para as amostras vermelhas foram aferidos valores de 490-492 e 460 nm; enquanto que a turmalina bicolor (azul e verde) apresentou 500 nm, valor próximo de um dos picos dos exemplares vermelhos; já a outra bicolor (rosa e verde) possui três faixas no espectro, 480, 440 e 420 nm.

Ao microscópio gemológico, as amostras foram submetidas a análises em busca de fraturas, inclusões de várias feições, faixas de cor, cristais fantasmas e linhas de crescimento. Os cristais de turmalinas vermelhas estudados são caracterizados por fraturas sem preenchimento, linhas de crescimento concentradas e bem marcadas, além de inclusões. Na figura 4A foram visualizadas fraturas, inclusões bifásicas (sólido e líquido), monofásicas e linhas de crescimento na amostra *Dark Red*.

Na gema *Red 3* foram identificadas fraturas, inclusões sólidas e líquidas (Figura 4B); no outro exemplar *Red 3* visualizou-se fraturas; inclusões sólidas raramente, fluidas que ocasionalmente exibem uma pseudo-orientação (possuem uma orientação curta e que se interrompe mudando de ângulo) (Figura 4C). O exemplar bicolor (azul e verde) exibiu fraturas; inclusões fluidas agrupadas (sugerindo uma origem protogenética); inclusões sólidas orientadas em posição perpendicular às estrias do mineral (Figura 4D); também foram identificadas inclusões fluidas (agrupadas) perpendiculares as inclusões sólidas com orientação (Figura 4E).

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 nítida, enquanto que nas translúcidas o contorno é definido e a nitidez é quase ausente.

Logo, estes dados foram compilados em uma tabela (Tabela 1) com dados gemológicos e ópticos, como parte da caracterização gemológica das turmalinas raras de Quixeramobim – CE.

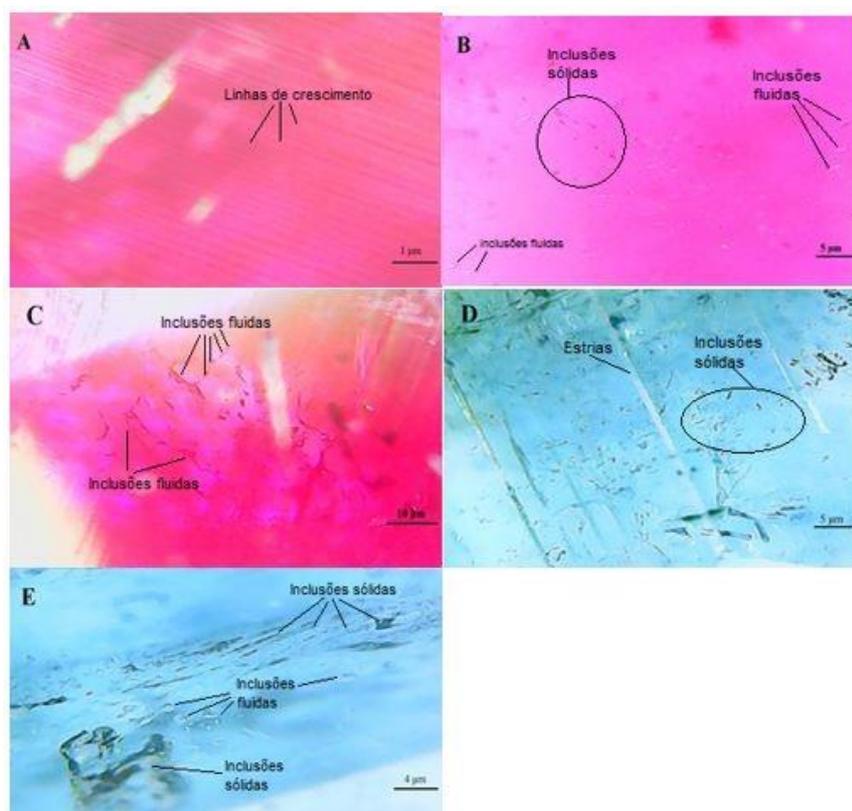


Figura 4 - Inclusões nas amostras do Município de Quixeramobim; A. Linhas de crescimento na amostra vermelha (Dark Red); B. Inclusões sólidas (escuras) e fluidas (transparentes) no exemplar vermelho (Red 3); C. Inclusões fluidas com falsa orientação (transparentes e anastomosadas) na amostra vermelha (Red 3); D. Inclusões sólidas (escuras) orientadas e perpendiculares às estrias da gema na amostra bicolor (azul e verde); E. Inclusões sólidas (escuras) bem orientadas, inclusões fluidas agrupadas na amostra bicolor (azul e verde).

Tabela 1 - Características gemológicas dos cristais de turmalina de Quixeramobim - CE.

Cor da amostra	Vermelho (Dark Red)	Vermelho (Red 3)	Vermelho (Red 3)	Bicolor (Azul e Verde) (Deep Sky Blue 3 /Chartreuse 3)	Bicolor (Verde e Rosa) (Deep Pink 4/ Chartreuse 4)
Qualidade Gemológica	Boa	Boa	Excelente	Excelente	Boa
Diafaneidade	Semitransparente	Transparente	Transparente	Transparente	Translúcida
Índice de refração	1.640 – 1.607	1.639– 1.610	1.640 – 1.605	1.640 – 1.619	1.638 – 1.605
Caráter e sinal óptico	Uniaxial negativo	Uniaxial negativo	Uniaxial negativo	Uniaxial negativo	Uniaxial negativo
Birrefringência	0.033	0.029	0.035	0.021	0.033
Pleocroísmo	Presente: Fraco	Presente: Forte	Presente: Forte	Presente: Forte	Presente: Moderado
Espectro de absorção	490 e 460 nm	490 e 460 nm	492 e 460 nm	500 nm	480, 440 e 420 nm
Fluorescência	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Densidade relativa	3.06g/cm ³	3.02g/cm ³	3.13g/cm ³	3.07g/cm ³	3.10g/cm ³
Microscópio gemológico	Fraturas; linhas de crescimento; inclusões sólidas e fluidas; inclusões bifásicas (sólido e líquido).	Fraturas; inclusões sólidas e fluidas.	Fraturas; inclusões sólidas (raras) e fluidas que ocasionalmente exibem uma pseudo-orientação.	Fraturas; inclusões fluidas; inclusões sólidas orientadas e por vezes com leve orientação, ocasionalmente perpendicular as estrias do mineral.	Fraturas; inclusões sólidas e fluidas.

CONCLUSÕES

Pode-se notar por meio da caracterização gemológica, que as ocorrências raras para a região de Quixeramobim (região do Condado) possuem potencial gemológico em razão da cor intensa, boa diafanidade e teor de inclusões moderado; sendo presentes na região, exemplares nas cores vermelha e bicolores (azul/rosa com verde); além dos já conhecidos da região como exemplares pretos, azuis, verdes e rosas. Notadamente parâmetros analíticos para a caracterização gemológica usual forneceram resultados dentro do padrão; porém perceptivelmente uma característica peculiar foi constatada, o dicroísmo.

O caráter uniaxial negativo representa um aspecto imutável para turmalina, além disso, os índices de refração e birrefringência (elevada) obtidos encontram-se dentro do intervalo para este grupo mineral.

Uma amostra vermelha (*Dark Red*) possui uma baixa absorção, o que a caracteriza como um espécime de pleocroísmo fraco, sendo este um atributo incomum para turmalina, que é caracterizada habitualmente por pleocroísmo

forte e por uma nítida absorção de *no > ne*; um exemplar bicolor (rosa e verde) possui um dicroísmo classificado como moderado, algo não tão corriqueiro para este grupo, mas ainda sim dentro da normalidade.

O espectro de absorção das amostras é padrão para este grupo. A fluorescência está dentro do que era cogitado, a ausência de luminescência das amostras de turmalina analisadas. A densidade relativa ficou dentro do estimado e com baixa variação. O interior dos cristais de turmalina é rico em inclusões fluidas e com presença relativamente acentuada de fraturas, linhas de crescimento e inclusões bifásicas também se fazem presentes; a ausência de inclusões orientadas e do tipo epigenéticas demonstram que estas não passaram por regimes compressivos após a sua formação. Portanto, estas amostras gemológicas encontradas em Quixeramobim possuem características padrão para a turmalina; entretanto, a baixa absorção (pleocroísmo fraco) de uma amostra não é usual, este aspecto necessita de estudos mais detalhados e específicos para embasar esta peculiaridade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio do Laboratório de Gemologia do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará (DEGEO/UFC) e ao apoio financeiro e bolsa de mestrado concedida ao autor principal deste artigo pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Gemas de cor - Terminologia e classificação**. NBR10630, 2ª EDIÇÃO, 2016.
- ALMEIDA, A.R. & ULBRICH, H.H.G.J. O Papel da Mistura de Magmas na Gênese do Magmatismo Granítico Cálcio-Alcalino Quixeramobim-CE. **Revista de Geologia**, v. 14, n. 1, p. 49-80, 2001.
- ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B.B.; FUCK, R.A. Brazilian structural provinces: an introduction. **Earth-Science Reviews**, v. 17, n. 1-2, 1-29, 1981.
- ALMEIDA, F.F.M., MELCHER, G.C., CORDANI, U.G., KAWASHITA, K; VANDOROS, P. Radiometric Age Determinations from Northern Brazil. **Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia**, v. 18, n. 1, p. 3-14, 1968.
- ANDERSON, B.W. **Identificação das Gemas**. Rio de Janeiro, Livro Técnico S/A. 460 p. 1984.
- AREM, J.E. & CLARK D. **Tourmaline Value, Price, and Jewelry Information**. 2019. IGS (International Gem Society). Disp. em: <<https://www.gemsociety.org/article/tourmaline-jewelry-and-gemstone-information/>>. Acesso em 2 de fevereiro de 2019 e 06 de agosto de 2019.
- ARTHAUD, M. H. **Evolução neoproterozoica do Grupo Ceará (Domínio Ceará Central, NE Brasil): da sedimentação à colisão continental brasileira**. Brasília, 2007. 117 p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade de Brasília.
- Código de cor: Infográfico dos códigos das cores em HTML, 2013. Disp. em: <<https://www.devmedia.com.br/codigo-cor-infografico-dos-codigos-das-cores-em-html/37238>>. Acesso em 6 de agosto de 2019.
- DEER, W.A. **Minerais Constituintes das Rochas uma Introdução**. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian. 727 p. 2010.
- DNPM/IBGM. **Boletim Referencial de Preços de Diamantes e Gemas de Cor**. 2009
- 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, Kansas. 164 p. Tese (Doutorado), Department of Geology, Kansas University, Lawrence.
- HAWTHORNE, F.C. & DIRLAM, D.M. Tourmaline the indicator mineral: from atomic arrangement to viking navigation. **Elements**, v. 7, n. 5, p. 307-312, 2011.
- HUGHES, R.W. **Ruby & sapphire: A Gemologist's guide**. Bangkok, RWH Publishing/Lotus Publishing. 816 p. 2017.
- IBGM. Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos. Manual Técnico de Gemas, 2009.
- LEAL NETO, A. **Pegmatito Várzea Torta: caracterização geoquímica e relações com os granitos de anatexia adjacentes**. Fortaleza, 105p. 2004. Dissertação (Mestrado), Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará.
- LIMA, M.N. **Caracterização litogeoquímica do granito Banabuiú e seu encaixante (Brasil)**. Aveiro-Portugal. 168 p.

2008. Dissertação (Mestrado), Universidade de Aveiro.
- MARQUES JÚNIOR, F. **Geologia do Campo Pegmatítico de Berilândia, CE**. São Paulo. 173 p. 1992. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo.
- MAZZOLENI, P.; BARONE, G.; RANERI, S.; AQUILIA, E.; BERSANI, D.; CIRRINCIONE, R. Application of micro-raman spectroscopy for the identification of unclassified minerals preserved in old museum collections. **Pliniu**, v. 42, p. 112-124, 2016.
- OLIVEIRA, I.G.; CARNEIRO, L.S; SARAIVA, C.E.R.; DE NERI, T.F.O. Identificação Gemológica dos Coríndons e Diferenciação de suas Imitações. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 2, p. 456-465, 2019.
- PARENTE, C.V.; ALMEIDA, A.R.D.; ARTHAUD, M.H. **Geologia da folha Quixeramobim SB. 24-VD-III**. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - PLGB. Parceria com a Universidade Federal do Ceará – UFC. 2008.
- PEHRSON, E.A.K. **Identification Methods of Sri Lankan Corundum in comparison to Other Common Gemstones**. Uppsala 42 p. 2017. Department of Earth Sciences, Uppsala University, Disciplinary Domain of Science and Technology, Independent thesis Basic level (degree of Bachelor)
- PHICHAIKAMJORNWUT, B.; PONGKRAPAN, S.; INTARASIRI, S.; BOOTKUL, D. Conclusive comparison of gamma irradiation and heat treatment for color enhancement of Rubellite from Mozambique. **Vibrational Spectroscopy**, v. 103, p. 102926, 2019.
- SCHUMANN, W. **Gemas do Mundo**. São Paulo, DISAL Editora. 279 p. 2006.
- TORQUATO, J.R.; SIDRIM, A.C.G.; MARANHÃO, C.M.L.; PARENTE C.V.; NOGUEIRA NETO, J.A.; ANDRADE FILHO, J.F.; SOUSA, J.V.; SOUZA, M.J.N.; ARTHAUD, M.H.; ALMEIDA, A.R. Granitóides do Ceará, Região de Quixadá–Solonópole. **Revista de Geologia**, v. 2, n (1/2), 143 p., 1989.
- VIDAL, F.W.H. & NOGUEIRA NETO, J. A. Minerais de pegmatitos. In: VIDAL, F.W.H.; SALES, F.A.C.B.; ROBERTO, F.A.C.; SOUSA, J.F.; MATTOS, I.C (ed.). **Rochas e Minerais Industriais do Estado do Ceará**. Realce Editora & Indústria Gráfica, p. 67-81, 2005.

*Submetido em 15 de setembro de 2021
Aceito para publicação em 15 de fevereiro de 2022*