UNIVERSIDADE EDUADO MONDLANE
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

GEMOLOGIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

MINERAIS-GEMAS DE MOÇAMBIQUE: *OCORRÊNCIAS E CARACTERIZAÇÃO DOS ASPECTOS FÍSICOS, GEMOLÓGICOS, GEOLÓGICOS E DAS INCLUSÕES.*

por

Enoque Lopes Malate

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física da Faculdade de Ciências da Universidade Eduardo Mondlane, em cumprimento do requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Física, Área de Gemologia.

Maputo – Março / 2011

UNIVERSIDADE EDUADO MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

GEMOLOGIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

MINERAIS-GEMAS DE MOÇAMBIQUE: *OCORRÊNCIAS E CARACTERIZAÇÃO DOS ASPECTOS FÍSICOS, GEMOLÓGICOS, GEOLÓGICOS E DAS INCLUSÕES.*

Autor: Enoque Lopes Malate

Supervisor: Prof. Doutor Akil Askarhodjaev

(Universidade Eduardo Mondlane, Faculdade de Ciências, Departamento de Física)

Maputo – Março / 2011

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

MINERAIS-GEMAS DE MOÇAMBIQUE: *OCORRÊNCIAS E CARACTERIZAÇÃO DOS ASPECTOS FÍSICOS, GEMOLÓGICOS, GEOLÓGICOS E DAS INCLUSÕES.*

Autor: Enoque Lopes Malate

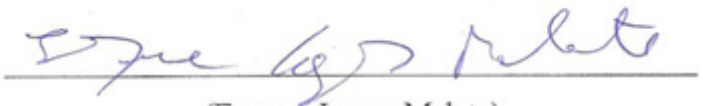
Supervisor: **Prof. Doutor Akil Askarhodjaev**

Declaração de Honra

Este trabalho foi realizado com base no material que ao longo do mesmo se faz referência. As ideias originais nele expressas são de inteira responsabilidade do autor.

Maputo, Março de 2011

O autor



(Enoque Lopes Malate)

Dedicatória

Dedico esta dissertação à Melody

Agradecimentos

Ao Conselho de Pós-Graduação em Física da Universidade Eduardo Mondlane pela oportunidade da realização deste trabalho.
À Direcção Científica da Universidade Eduardo Mondlane, pela concessão de Bolsa de Matrícula e Propina de Mestrado.

Este trabalho não teria sido realizado sem os conselhos, encorajamentos e assistência de muitas pessoas a quêm gostaria de expressar sincera gratidão e apreciação. Esses nomeados abaixo foram de particular ajuda em tornar este trabalho uma realidade e desculpar-me daqueles que tenha esquecido mencionar. Nenhuma dessas pessoas podem ser culpadas por algum erro ou omissão porque eu não soube incorporar suas sugestões ou revisões.

Os meus agradecimentos vão:

- Ao meu Supervisor Prof. Doutor Akil Askarhodjaev, pela orientação e ao apoio prestado nas diversas etapas deste trabalho.
- Ao Prof. Doutor Rogério Uthui, pelas críticas frutuosas e sugestões, e especialmente por todo o apoio material e suporte financeiro na aquesição do equipamento e material do trabalho, através do Projecto da Física Nuclear, que coordena.
- Ao Dr. Genito Maure, pelas sugestões frutuosas ao longo do curso e da elaboração deste trabalho.
- Ao colega, Dr. Eduardo Siquela (Departamento de Geologia-UEM), pela participação e auxílio no Projecto de Pesquisa e viagem de campo (Niassa).
- Ao Director do Museu Nacional de Geologia, Luís Costa Jr., pela colaboração institucional, pela permissão de visita e estudos realizados no Museu.
- Aos funcionários da Direcção Provincial de Geologia da Província de Niassa, pelo apoio dado nas várias etapas de trabalho de campo, nos Distritos de Cuamba e Nipepe.
- Em particular, aos meus colegas do Curso de Mestrado, pela disponibilidade, discussão e auxílio permanente desde o primeiro dia do curso até a realização deste trabalho.
- Aos docentes do Departamento de Física de Pós-Graduação em Física, pelos ensinamentos, assistência e sugestões ao longo do curso e do trabalho.
- Ao Corpo Técnico e Administrativo do Departamento de Física, pelo apoio prestado ao longo do curso.
- `A minha querida mãe, Adélia, que apesar da distância está sempre presente nas nossas vidas, a dar conselhos e a insentivar-nos para o melhor.
- Em especial, às minhas manas Sissi e Ruthinha e a mãe Silvina, pelo suporte familiar.
- `A família Malate e Dumangane, meus progenetores.

`A todos vai o meu MUITO, MUITO OBRIGADO!

Lista de Abreviaturas e Siglas

AGS – American Gem Society

AzAcEs – AzAcMe – Azul acinzentada escura para azul acinzentada média

CaEs – VeMe – Castanha escura para verde média

CGA – Canadian Gemmlogical Association)

CiViEs – AzVeMe - Cinzenta violeta escura para azul verdeada média

DD – valor médio de variação relativa do coeficiente de transmissão das amostras no TT dado

DR – Dupla Refracção

EsM – percentagem das amostras que mudaram suas cores e tonalidades escuras para as médias

GAGB – Gemmological Association of Great Britain

GIA – Gemolological Institute of America

IBGM – Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos

IDC – International Diamond Council

IR – Índice de Refracção

LG – Laboratório Gemológico

LGDF/FC/UEM – Laboratório Gemológico de Departamento de Física, da Faculdade de Ciências, da Universidade Eduardo Mondlane

LiAcEs – Lilaje acinzentada escura

LW – Ondas Longas

MDS – percentagem das amostras com os microdefeitos superficiais que apareceram no TT dado

MnC – percentagem das amostras nos quais apareceram as manchas castanhas

NR – percentagem das amostras rachadas no TT dado

PE – Peso Específico

Scan.D.N. – Scandinavian Diamond Nomenclature

SR – Simples Refracção

SW – Ondas Curtas

TmP – produto de temperatura máxima do TT por seu plato temporal

TT – Tratamento Térmico

UEM – Universidade Eduardo Mondlane

UV – Ultra Violeta

VeAcEs – VeAcMe – Verde acinzentada escura para verde acinzentada média

VeAmEs – Verde amarelada escura

Lista de Tabelas

Tabela 4.1.1: Sistemas cristalinos **10**

Tabela 5.1: Características da Gema, procedimentos e ensaios que se realizam nos principais Laboratórios Gemológicos de renome internacional **44**

Tabela 5.2: Esquema de Procedimento geral de Estudo, Diagnóstico, Avaliação e Sistematização de minerais de gemas, no LG-UEM **45**

Tabela 5.3: Critérios de graduação de pureza (linpeza) nas Gemas **47**

Tabela 6.1: Designações das mudanças de cores e tonalidades ocorridas no TT **70**

Tabela 6.2: Comparação das características das amostras de turmalina antes e depois do TT **71**

Tabela 7.1: Amostras de granadas (Cuamba) e de águas-marinhas (Nipepe) **75**

Tabela 7.2: Resultados de medição dos índice de refracção (**IR**) e dupla refracção (**DR**) de granadas **81**

Tabela 7.3: Resultados de uso de polariscópio no diagnóstico das amostras de granadas..... **81**

Tabela 7.4: Resultados de medição de peso específico (**PE**) por meio do método hidrostático de granadas **82**

Tabela 7.5: Resultados da luminescência observada pela acção da radiação UV das ondas curtas (**SW**) e ondas longas (**LW**) de granadas **82**

Tabela 7.6: Resultados de observação de simples refracção (**SR**) e dupla refracção (**DR**) de granadas a partir do Dicroscópio **83**

Tabela 7.7: Resultados de medição dos índice de refracção (**IR**) e dupla refracção (**DR**) de águas-marinhas **83**

Tabela 7.8: Resultados de uso de polariscópio no diagnóstico das amostras de águas-marinhas **84**

Tabela 7.9: Resultados de medição de peso específico (PE) por meio do método hidrostático de águas-marinhas **84**

Tabela 7.10: Resultados da luminescência observada pela acção da radiação UV das ondas curtas (SW) e ondas longas (LW) de águas-marinhas **85**

Tabela 7.11: Resultados de observação de simples refracção (**SR**) e dupla refracção (**DR**) de águas-marinhas a partir do Dicroscópio **85**

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Localização das áreas onde se encontram vários pegmatitos portadores de minerais-gema, distribuídos nas províncias de Manica, Tete, Zambézia, Nampula, Cabo Delgado e Niassa (Seg. Marques, 1998)..... **2**

Figura 2.1 - Mapa dos principais bens econômicos (minerais-gemas, rochas ornamentais e industriais) de Moçambique (Seg. Marques, 1998)..... **5**

Figura 4.1 - Caracterização da forma de um cristal, em amostra de mão. a. **Cristis euédricos.** b. **Cristais subédricos.** c. **Cristais anédricos** (*seg. Borges, 1996*)..... **11**

Figura 4.2 - Representação esquemática de alguns defeitos pontuais. **a.** Estrutura cristalina idealmente perfeita. **b.** Estrutura com defeitos de Frenkel. **c.** Estrutura com defeitos de Schottky (*seg. Borges, 1996*)..... **12**

Figura 4.3 - Representação esquemática da formação de um centro-F na halite, por aquecimento em presença de um metal alcalino (o sódio). O processo envolve a migração de auto-intersticiais para a superfície do cristal, onde reagem com o metal, de acordo com a equação $\mathbf{Cl^- + Na \rightarrow NaCl + 1\ e}$; os electrões libertados acabam por ser captados pelas lacunas aniónicas, originando centros-F (*seg. Borges, 1996*)..... **13**

Figura 4.4 - Cristais e agrupamentos cristalinos. **A.** Agrupamento paralelo de cristais: é um edifício estruturalmente homogéneo e, portanto, é um cristal único, embora, em consequência da sua morfologia, aparente ser um agrupamento de cristais distintos, interpenetrando-se. **B.** Agrupamento de dois cristais: edifício não homogéneo, constituido por duas regiões homgéneas (cristais), justapostas de forma acidental; a estabilidade da junção intergranular é, neste caso, conseguida pela coincidência parcial de dois planos reticulares, (100) e (110). **C.** Macla: edifício não homogéneo, constituido por duas regiões homogéneas, justapostas de forma simétrica, relativamente a um plano estrutural comum. (*seg. Borges, 1996*)..... **14**

Figura 4.5 - Nos diagramas (1), (2), (3) vêm-se gémeos. Neste caso, um dos cristais penetrou na parte lateral do outro cristal. As vezes um fenómeno deste género é claramente evidente mas noutras vezes o mesmo é observado apenas como uma pequena saliência nos lados do outro cristal. Como é difícil localizar e determinar o grau de penetração, cuidados especiais devem ser observados ao manejar tais espécies. Um problema mais sério ainda envolve "sheaves" de cristal tal como os retratados no diagrama (4), devido ao grande número de cristais, pode pensar-se que este é um cristal único com rachas ao longo do seu comprimento. Porém, as faces do cristal devem ser cuidadosamente examinadas com uma lupa para certificar-se que estas rachas são cristais ligados uns aos outros..... **14**

Figura 4.6 - Nos diagramas (5), (6) e (7) mostram-se alguns exemplos simples de tais cristais. Parece que um "prato" está descançando sobre o outro e o resultado é uma massa insignificantemente desviada. Mais uma vez, deve ser entendido que as fronteiras entre os cristais são muito sensíveis, e eles tendem a separar-se..... **15**

Figura 4.7 – Gémeos repitidos. Os agregados no lado esquerdo parecem largos e importantes, mas são compostas de um número de massas que tendem a quebrar no corte ou lapidação da gema..... **15**

Figura 4.8 - Reação de gémeos num polariscópio **15**

Figura 4.9 - Classificação das inclusões quanto ao seu tipo..... **16**

Figura 4.10 - Classificação descritiva das das inclusões **17**

Figura 4.11 - Refractómetro com escala externa **24**

Figura 4.12 - Polarização da onda electromagnética **25**

Figura 4.13 - Efeitos da polarização da luz por um polarizador e analizador..... **25**

Figura 4.14 - Desdobramento de um feixe de luz transmitido, em raio ordinário (**o**) e raio extraordinário (**e**) dando origem ao fenómeno de dupla refracção..... **26**

Figura 4.15 - Representação de uma indicatriz isotrópica, que corresponde a uma esfera cujo raio é proporcional ao índice de refracção do mineral (n)..... **28**

Figura 4.16 - Incidência normal ou perpendicular à superfície de um mineral isotrópico de raios de luz polarizado (B) e não polarizado (A). Observe que a face onde ocorre a incidência secciona o centro da indicatriz resultando um círculo cujo raio é proporcional ao índice de refracção do mineral (n). Para ambos os raios, não há mudança nem na trajectória nem na direcção de polarização da luz..... **28**

Figura 4.17 - Raio de luz não polarizado que incide num cristal de calcita e sofre o fenómeno da dupla refracção. O raio ordinário (O) vibra perpendicularmente ao plano de incidência e é aquele que não sofre desvio ao atravessar o mineral, ao contrário do extraordinário (E), cuja direcção de vibração é perpendicular àquele plano..... **29**

Figura 4.18 - Figura esquemática que mostra a fórmula pleocróica da turmalina. Observe que quando o cristal de turmalina fica com sua direcção "E", paralela a direcção do polarizador, o mineral mostra cor verde e clara (absorção fraca) e quando a direcção "O" fica paralela ao polarizador inferior, o cristal de turmalina mostra cor verde escura (absorção forte). Acha-se também representado um modelo óptico cristalográfico de um cristal de turmalina, indicando as faces e a disposição das direcções "E'' e "O". A Turmalina tem $\mathbf{n_E = 1{,}610}$ **e** $\mathbf{n_O = 1{,}631}$. Como $\mathbf{n_E < n_O}$, o seu sinal óptico é negativo..... **30**

Figura 4.19 - Efeito de Dicroismo **31**

Figura 4.20 - direcções da cor numa pedra **31**

Figura 4.21 - Modos possíveis de cortar a massa áspera para a exploração máxima da cor nas gemas **32**

Figura 4.22 - Processos de excitação e desexcitação de um átomo no fenómeno de fluorescência **33**

Figura 4.23 - Processos de excitação e desexcitação de um átomo no fenómeno de fosforescência **33**

Figura 4.24 - Algumas das características de uma onda **34**

Figura 4.25 - Resultado da interferência entre duas ondas **35**

Figura 4.26 - Espalhamento e difracção de raios X por um átomo (a) e por um cristal (b) [57] **36**

Figura 4.27 - Interacção (a) construtiva e (b) destrutiva de feixe de raios X em material cristalino [57] **36**

Figura 4.28 - Processo de emissão de raio X característico **37**

Figura 4.29 - Diagrama das Razões de Transmissão (I∅/ I) para diversos minerais onde incidem luz de cor branca (lB). No caso A, o mineral é incolor, em B o mineral é vermelho (lV) e em C o mineral é negro **38**

Figura 4.30 - Variedades de Águas-marinhas **42**

Figura 4.31 - Variedades de Granadas **43**

Figura 4.32 - Variedades de Turmalinas **43**

Figura 5.1 - Inclusões típicos no interior dumCristal de turmalina, observados por meio da lupa de amplificação 10X **46**

Figura 5.2 - Estrutura da fibra óptica **48**

Figura 5.3 - Fonte de luz halogéneo e Fibras ópticas de diferentes formas e diâmetro... **48**

Figura 5.4 - Sistema para visualizar inclusões e obténção das suas fotomicrografias: **(a) -** microscópio Binocular (esquerdo), monitor(centro) e microscópio Trinocular video zoom (direito);**(b) –** microscópio Gemológico **49**

Figura 5.5 - Técnicas de iluminação de um Miccroscópio Gemológico **50**

Figura 5.6 - Refractómetro de Rayner com uma lâmpada amarela acoplada, líquido de contacto (IR=1,79) e um polarizado **52**

Figura 5.7 - Polariscópio de Rayner com a célula de imersão acoplada **53**

Figura 5.8 - Dispositivo de pesagem hidrostática, balança analítica digital **54**

Figura 5.9 - Lâmpada UV de curtos e longos comprimentos de onda e óculos de protecção exigidos **55**

Figura 5.10 - Dicroscópio de Rayner **55**

Figura 5.11 - Lápis de testagem de dureza na escala de Mohs, usados no Laboratório... **57**

Figura 5.12 – Tabela e representação gráfica da Escala de Dureza de Mohs **57**

Figura 6.1 - Escala de graduação de tonalidades das gemas **59**

Figura 6.2 – Tamborador usado na preparação das amostras antes do TT..... **60**

Figura 6.3 – Diagrama que mostra o perfíl típico de um ciclo de tratamento térmico de uma pedra colorida: **a -** Regime de aquecimento; **b -**.Plateão; **c -** Regime de arrefecimento..... **62**

Figura 6.4 – Forno programável e os respectivos cadinhos usados no processo de tratamento térmico da turmalina..... **63**

Figura 6.5 - Dispositivo para medição dos espectros de transmissão e absorção das amostras sólidas e seu esquema de instalação: 1-Computador; 2-PC2000 Plug-in Fiber Optic Spectrometer; 3-Célula com amostra; 4-Lâmpada halogénica **65**

Figura 6.6 - Os espectros de transmissão da turmalina escura antes e depois do TT..... **65**

Figura 6.7 - (Diagrama 1) Dados estatísticos das mudanças nas amostras da turmalina em função das condições do TT. Designações usadas **66**

Figura 6.8 - Imagens de inclusões internas de algumas amostras de turmalinas antes (**a, c, e, g** e **i**) e depois (**b, d, f, h** e **j**) do seu Tratamento Térmico **67**

Figura 6.9 - (Diagrama 2) Resultados do TT das turmalinas coloridas locais e avaliação das mudanças das cores e tonalidades em termos de variação relativa do coeficiente de transmissão DD. Os exemplos das designações das mudanças no Diagrama 2 são dadas na Tabela 1..... **70**

Figura 7.1 - ***Mapa de Divisão Administrativa da Provincia de Niassa*** *(Direcção Nacional de Geologia, 2007) [15]*..... **73**

Figura 7.2 **-** Métodos empíricos e insustentáveis para o ambiente **74**

Figura 7.3 - Aquisição de amostras de granadas em Cuamba e de águas marinhas em Nipepe **75**

Figura 7.4 - Características Físicas da Zona de Garimpo-I e Garimpo-II de Nipepe **76**

Figura 7.5 - Cavidades abandonadas, Zona de Garimpo-I e Garimpo-II de Nipepe **76**

Figura 7.6 - Mapa Geológico de Nipepe (Direcção Nacional de Geologia, 2007) **77**

Figura 7.7 - Características/Traços Geologicas do Garimpo-I de Nipepe e Acessórios de formação de agua-marinha **77**

Figura 7.8 - Exploração de granadas em Cuamba **78**

Figura 7.9 - Mapa Geológico de Cuamba (Direcção Nacional de Geologia, 2007)[15].. **78**

Figura 7.10 - Características/Traços Geologicas da Mina de Cuamba e Acessórios de formação de granada **79**

ÍNDICE

Declaração de Honra ..... **ii**
Dedicatória ..... **iii**
Agradecimentos ..... **iv**
Lista de Abreviaturas e Siglas ..... **v**
Lista de Tabelas ..... **vi**
Lista de Figuras ..... **vii**
Índice ..... **xi**
Resumo ..... **xiii**
1. Introdução **1**
2. Contexto Geológico **3**
3. Apresentação do Problema **6**
3.1. Objectivos Gerais **8**
3.2. Objectivos Específicos **8**
4. Revisão Bibliográfica **9**
4.1. Estrutura e propriedades dos minerais (de gemas) **9**
4.1.1. Defeitos na Estrutura dos Cristais **11**
4.2. Inclusões nos minerais **16**
4.3. Densidade Relativa (Peso Específico) **20**
4.4. Interacção da luz com minerais de gemas **21**
4.4.1. Índice de refracção **22**
4.4.2. Polarização **25**
4.4.2.1. Polarização por placas paralelas **25**
4.4.2.2. Polarização por refracção (dupla refracção) **26**
4.5. Minerais isotrópicos e anisotrópicos **27**
4.5.1. Minerais Isotrópicos **27**
4.5.2. Minerais Anisotrópicos **29**
4.6. Pleocroismo ou Absorção Selectiva **30**
4.7. Luminescência **32**
4.8. Difracção e Fluorescência de Raios X **34**
4.9. Cor **38**
4.9.1. Os elementos responsáveis pela coloração dos minerais de gemas **39**
4.9.2. Melhoramento de cor dos minerais de gemas **41**
4.10. Minerais de Gemas em Estudo **42**
4.10.1. Água-marinha **42**
4.10.2. Granadas **42**
4.10.3. Turmalinas **43**

5. Equipamento e Metodologia 44
5.1. Lupas de Amplificação **46**
5.2. Fonte de luz Halogéneo e Fibras Ópticas **47**
5.3. Microscópios Binocular, Trinocular e Gemológico **48**
5.4. Refractómetro Dialex de Rayner **51**
5.5. Polariscópio **53**
5.6. Dispositivo de Pesagem Hidrostática **53**
5.7. Lâmpada de Radiação UV(SW/LW) **55**
5.8. Dicroscópio de RAYNER **55**
5.9. Lapís de Determinação de Dureza Relativa **56**
6. Tratamento Térmico da Turmalina Escura Local 58
6.1. Anotação do Trabalho **58**
6.2. Introdução **58**
6.3. Parte Experimental **60**
6.3.1. Selecção do Material **60**
6.3.2. Regime Dinâmico do TT **61**
6.3.3. Forno para TT da Turmalina **62**
6.3.4. Natureza do Material que Está em Contacto com Pedras **63**
6.4. Avaliação Quantitativa da cor das Amostras **63**
6.5. Discução dos Resultados **66**
7. Caracterização dos Minerais de Gemas de Moçambique 73
7.1. Generalidades **73**
7.2. Áreas de Estudo **74**
7.3. Colheita de Amostras e Caracterização Geológica (AMOSTRAGEM) **74**
7.3.1. Geologia das Mineralisações de Niassa **76**
7.3.2. A Garripagem de Nipepe **76**
7.3.3. Geologia das Mineralisações de Nipepe **76**
7.3.4. Exploração de Granadas em Cuamba **77**
7.3.5. Geologia das Mineralisações de Cuamba – Granadas **78**
7.4. Preparação das Amostras **79**
7.5. Análises Físicas, Gemológicas e das Inclusões das Amostras **80**
7.6. Resultados e Análise dos Dados **81**
8. Conclusões Gerais e Recomendações 89
8.1. Conclusões Gerais **89**
8.2. Recomendações **90**
9. Referências Bibliográficas 91

RESUMO

A partir do pressuposto de que minerais de gemas provenientes de diferentes regiões de exploração possuem características mineralógicas, físicas, gemológicas e geológicas típicas, propõem-se um estudo de que venha a contribuir na identificação das características dos minerais de gemas de diferentes regiões de ocorrência em Moçambique. Sabe-se que, nos últimos anos, aumentou consideravelmente a importação, em Moçambique, de cristais sintéticos, fabrícadas na Europa e Ásia. Hoje em dia em Maputo e Nampula, por exemplo, podem-se encontrar imitações artificiais de vários tipos de gemas que não são distinguíveis, a olho nu, das pedras naturais. Os preços das pedras naturais e suas imitações artificiais podem diferenciar-se por dezenas ou até centenas de vezes, o que apresenta um perigo potencial para várias instituições, empresas, empresários, associações e singulares que se dedicam à joalharia e ao comércio de minerais de gemas.

Deste modo, elaborou-se um projecto para o estudo sistemático dos diferentes minerais de gemas nas regiões de maior ocorrência em Moçambique. O estudo que se realiza de momento refere-se a ***granada*** no Distrito de Cuamba, ***águas-marinhas*** no Distrito de Nipepe, Província de Niassa, e ***Turmalinas*** de diferentes regiões do país, com base nos resultados obtidos de investigações realizadas. Todas as análises foram realizadas no Departamento de Física, com o auxílio do equipamento existente no Laboratório Gemológico e do Microscópio Gemológico adquirido ao longo deste projecto. Foram realizadas, para cada amostra, diferentes análises de propriedades físicas nomeadamente: peso específico, índice de refracção, dupla refracção, dispersão, pleocróismo, espectro de absorção, dureza, Fluorescência UV. Com o auxilio do Microscópio Gemológico foi observada a estrutura (camada) interna das amostras, que permite um conhecimento das inclusões com bases científicas, para uma melhor caracterização das diferentes regiões de ocorrência das gemas na província do Niassa.

A cor é a mais importante característica das pedras de gemas na sua avaliação. Segundo Catálogos internacionais de avaliação de custo das gemas, a contribuição da cor da pedra na formação do seu preço constitui, geralmente, cerca de 60%. Sabe-se também, que maior parte da Turmalina, explorada no tempo presente em Moçambique, é demasiadamente escura para sua lapidação e aproveitamento posterior na joalharia. Isto desvaloriza muito o custo comercial desta pedra semipreciosa. Tendo em conta a existência de recursos abundantes da Turmalina escura em Moçambique, apresenta-se importante a elaboração de métodos tecnológicos de melhoramento da cor deste material, o que vai dar um valor acrescentado para o seu aproveitamento na joalharia.

O Tratamento Térmico (TT) é um dos poucos aceitados e legitimados métodos usados para melhoramento de cor das pedras de gemas. A legitimidade é baseada na consideração que este é um processo que pode acontecer naturalmente durante vários estágios da formação do cristal. Portanto, sob condições de que nenhum material de coloração é usado durante o aquecimento, e que a cor obtida depois do aquecimento é estável, não há restrições acerca da utilização do TT. Geralmente, os métodos do TT das gemas constituem segredos comerciais e, como regra, os pormenores tecnológicos não se publicam.

A ampla variedade de cores da Turmalina está relacionada com mais de 15 factores de natureza físico-química, em particular com absorção por ressonância de uma parte da luz branca que atravessa o cristal e fenómenos de vibração e rotação das moléculas de água na rede cristalina. A causa de cor e tonalidade escura da Turmalina envolve, geralmente, a presença de alguns elementos químicos particulares, impurezas, tais como Fe^{3+}, Fe^{2+}, Mn, Cr, e defeitos ou irregularidades na rede cristalina. Por exemplo, as cores (azul, verde, castanha, preta) e tonalidades da Turmalina que contém Ferro (Fe), estão relacionadas com o ião Fe^{2+}, pares de troca de Fe^{2+} e Fe^{3+} e, também, com faixas de transporte de carga $Fe^{2+} \rightarrow Ti^{4+}$, $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$. Provocando alterações da largura destas faixas de transporte por meio do TT, a cor ou tonalidade da pedra pode ser alterada, reforçada ou eliminada**.**

No presente estudo foi elaborado o esquema tecnológico do **TT** da Turmalina local escura, que permite consideravelmente melhorar as cores e tonalidades em mais de 10 variedades de Turmalina escura. A particularidade principal do método elaborado consistiu na combinação de três segmentos principais do ciclo do tratamento (aquecimento, processamento e arrefecimento) segundo um esquema, em que se efectuam as alterações da largura das faixas de transporte de carga na rede cristalina, uma "treinagem" essencial das pedras para lentamente evaporar a água acumulada e atenuar as tenções internas na rede cristalina. Em relação às granadas e águas-marinhas, os resultados obtidos das investigações realizadas comparadas com as tabeladas, mostram algumas diferenças que ajudam a compreender que é possível encontrar, para as diferentes regiões de ocorrência, diferenças nas características entre minerais de gemas dessas regiões.

1- Introdução

O reforço das actividades de investigação, extensão e prestação de serviços considera-se como uma das componentes principais do Plano Estratégico da nossa universidade na sua estabilização e desenvolvimento. Sendo uma instituição de grande potencial científico, a Universidade Eduardo Mondlane (UEM) e, em particular, a Faculdade de Ciências, desenvolve esforços no sentido de melhorar a qualidade de serviços prestados à sociedade.

Com o objectivo de ampliar as actividades de investigação e prestação de serviços, no Departamento de Física, foi elaborado e montado um Laboratório Gemológico (LGDF/FC/UEM), no ano 2000. A prática mundial demonstra que os Laboratórios Gemológicos, actualmente, se tornaram tanto os organismos de investigação, como os elementos importantes da indústria e mercado de ***minerais de gemas*** e da joalharia. A complexidade principal do problema a tratar consiste na ampla variedade das composições, cores, qualidade e similaridade dos ***minerais de gemas*** e suas imitações sintéticas, e diferentes tipos de tratamento que elas podem sofrer o que dificulta a sua caracterização e identificação, que condicionam o seu custo e aproveitamento na joalharia. Com o desenvolvimento em Moçambique da indústria de extracção dos ***minerais de gemas*** e formação do mercado local de comércio de gemas e joalharia, vai crescer cada vez mais a necessidade de prestação de serviços competentes na área de Gemologia.

Este projecto tem como objecto estudar os ***minerais de gemas*** de Moçambique das regiões de maior ocorrência no país, nas províncias de Manica, Tete, Zambézia, Nampula, Niassa e Cabo Delgado (ver ***Figura 1.1***). Os ***minerais de gemas*** são materiais da crusta terrestre que são utilizados em jóias ou para fins ornamentais, em consequência da sua beleza, raridade e dureza. Ao longo dos milénios, homens e mulheres têm admirado a beleza das gemas e, devido à qualidade e raridade de muitas delas, colocaram um alto valor nas espécies de boa qualidade. Isto levou à proliferação de imitações artificiais das gemas (sintéticas), bem como à alteração de materiais naturais (tratadas) para realçar sua beleza e seu valor aparente. Pela mesma razão, surgiram as fábricas de gemas sintéticas e, como resultado, surgiu a necessidade da identificação e classificação precisa de gemas naturais, sintéticas e tratadas. São conhecidas cerca de 4.400 espécies minerais. Cerca de 90 tipos são consideradas gemas – dentre estas, 20 tipos são bastante conhecidas e comercializadas no dia-a-dia. Estas 20 espécies se subdividem em variedades, como por exemplo: as variedades dos berilos, das turmalinas, dos quartzos e etc.

Esta proposta insere-se nas linhas de pesquisa do Programa de Pós-Graduação da UEM, pois o objecto de estudo, os ***minerais de gemas***, ainda não foram caracterizados nas regiões definidas e no país em geral. Pois, no território moçambicano, a investigação científica (ou pesquisa) sobre gemas não está muito aprofundada, embora haja relatórios inéditos dispersos sobre o assunto.

Um país em vias de desenvolvimento como Moçambique precisa de desenvolver a sua indústria mineira, de lapidação e de joalharia, não só para captar o investimento estrangeiro, como também para desenvolver a sua indústria interna. É com este objectivo imperativo que se apresenta este projecto de investigação cujos seus resultados têm por finalidade incentivar o desenvolvimento da indústria mineira de gemas, de lapidação e de joalharia e, também criar áreas de investigação para cientistas de Moçambique.

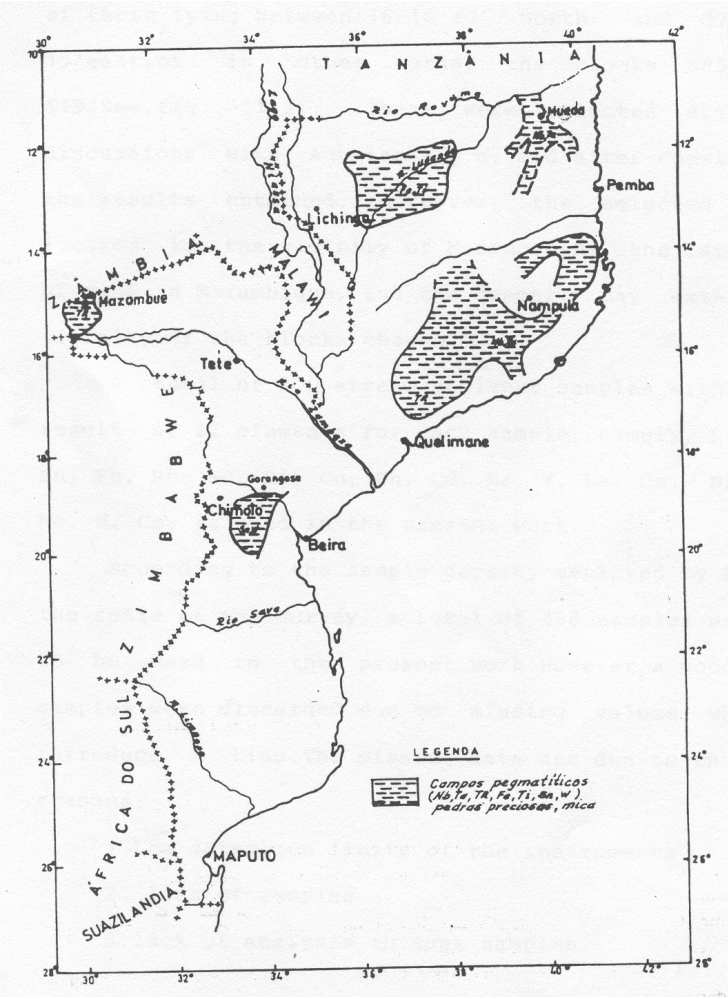


Figura 1.1 - *Localização das áreas onde se encontram vários pegmatitos portadores de minerais-gema, distribuídos nas províncias de Manica, Tete, Zambézia, Nampula, Cabo Delgado e Niassa .[30]*

2- Contexto Geológico

A gemologia estuda diversas substâncias naturais, ou não, denominadas gemas, em seu estado bruto, polidas ou lapidadas. É um trabalho de pesquisa onde o gemólogo é capaz de distinguir e identificar entre duas ou mais gemas semelhantes externamente, diferentes origens, se natural, sintética, tratadas ou simples imitação.

O objecto de estudo deste projecto são ***minerais de gemas*** de origem geológicas. Encontram-se descritos, para Moçambique, ocorrências dos seguintes tipos de jazidas: **pegmatítico-pneumatolíticos** – berilo (esmeralda, água-marinha, morganita, heliodoro, goshenita), diversas turmalinas (variedades gemológicas: rubelita, verdelita, indicolita, siberita, dravita, acroíta), topázio, quartzo hialino (cristal de rocha), ametista, quartzo fumado, quartzo citrino, quartzo róseo, coríndon, amazonita, adulária e dumortierita), **hidrotermais** (opala, ágatas, calcedônia e jaspe), **metamórficos** (granadas), **sedimentares** (granadas, ágatas, coríndon, etc.). O diamante, que geralmente está relacionado com jazidas magmáticas e sedimentares, até agora não foi encontrado em grandes quantidades, embora ocorram quimberlitos em Moçambique. Estas localizam-se sobretudo nas províncias Centro e Norte de Moçambique (Manica, Tete, Zambézia, Nampula e Niassa). [30]

A rocha é um agregado natural, formado de um ou mais minerais, que constituem a parte essencial da crosta terrestre. O movimento das placas continentais força o material em fusão existente no interior da terra a subir `a superfície através das rochas. Este material ou arrefece e solidifica sob a superfície, ou irrompe numa espectacular erupção vulcânica antes de arrefecer e solidificar, num processo que constitui a primeira parte do ciclo rochoso, onde encontramos rochas ígneas, sedimentárias e metamórficas.

O material em fusão que provém do interior da terra acaba por arrefecer e solidificar. A massa sólida resultante chama-se rocha ígnea e divide-se em dois tipos principais (a extrusiva e a intrusiva). As intrusivas forma-se `a medida que a lava vai subindo através das rochas e solidifica antes de chegar `a superfície. Se arrefecerem lentamente, serão grosseiras, com cristais minerais suficientemente grandes para serem vistos a olho nu. Se arrefecerem rápido, serão mais finamente granuladas. As rochas extrusivas são as que se formam quando a lava irrompe `a superfície através de um vulcão, são sempre mais finas do que as intrusivas.

Tal como acontece com as rochas ígneas, há diversas espécies de rochas sedimentares, identificando-se três tipos. Primeiro, as clásticas, resultado da desintegração de uma rocha preexistente e de nova simentação dos respectivos fragmentos para formar uma nova rocha. O

segundo tipo de rocha sedimentar é a biogenética, feita de material produzido por organismos vivos. O carvão é a mais conhecida, consistindo em carbono proveniente de massas de antiga matéria vegetal. O terceiro tipo é o da rocha sedimentar química, produzida por matéria química inorgânica depositada no leito de um mar ou de um lago e que se acumula até constituir uma massa sólida.

Sob condições de pressão ou temperaturas extremamente elevadas, os minerais e as partículas em rochas ígneas e sedimentares alteram-se e recristalizam numa nova substância, o que constitui a terceira e ultima parte do ciclo rochoso que forma a rocha metamórfica. Há dois tipos de rocha metamórfica. O primeiro é a regional, em que a força transformadora é a pressão e não a temperatura. O segundo tipo de rocha metamórfica é a rocha metamórfica termal, por vezes designada rocha metamórfica de contacto. O calor é a influência mais importante na formação desta rocha.

Textura pegmatitica corresponde aos casos em que a rocha é formada por cristais muito desenvolvidos e frequentemente de grande perfeição morfológica. É característica de rochas denominadas pegmatiticas, que proporcionam um local ideal para o crescimento dos cristais (***minerais de gemas***). Estas encontram-se muitas vezes formando filões ou veios na bordadura de "stocks" e batolitos, ou cortando estas formações.[45]

Os minerais encontrados em grandes depósitos podem ser explorados e assumem um interesse particular em diversos níveis: económico, científico e amador. Durante o estudo será efectuado um levantamento das principais ocorrências dos ***minerais de gemas*** de Moçambique. A partir da informação da base de dados geo-referências e bibliografia existente, mapas geológicos e de ocorrências minerais de Moçambique, serão recolhidas amostras nos respectivos locais para posterior estudo. Todo o tipo de informação geológica relevante deverá ser recolhida nessas campanhas, para uma boa compreensão dos fenómenos de origem e formação dos ***minerais de gemas***. Serão também feitos estudos das inclusões nos minerais, que são normalmente vestígios do seu ambiente de crescimento, ou seja, são reflexo da história das condições geológicas vigentes durante a sua génese.

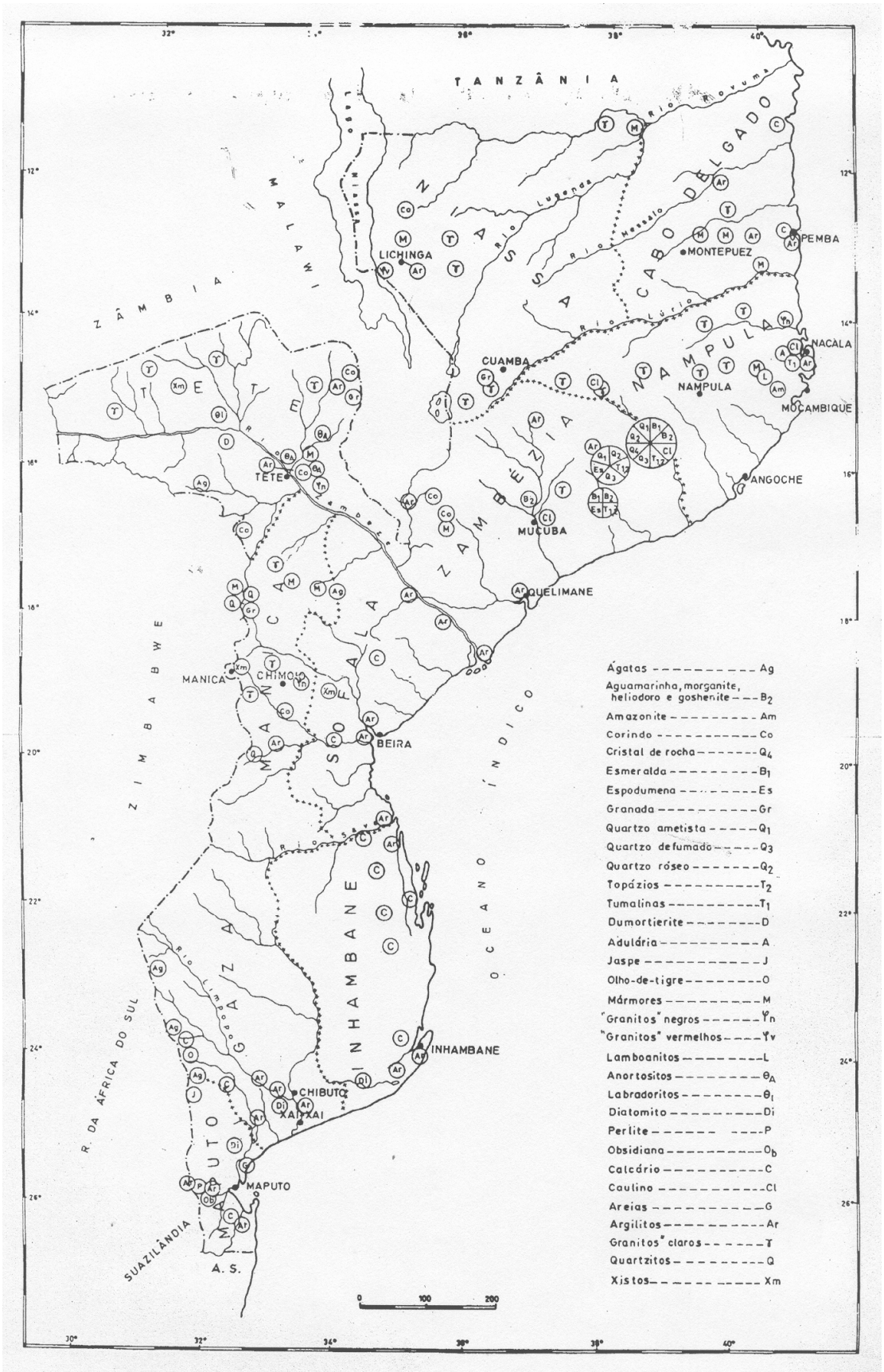


Figura 2.1 - *Mapa dos principais bens econômicos (minerais-gemas, rochas ornamentais e industriais) de Moçambique.*[30]

3 – Apresentação do Problema

Moçambique, pelos seus recursos minerais prospectados, é considerado como um dos importantes fornecedores de ***minerais de gemas*** coloridos (pedras preciosas e semi-preciosas), a nível mundial. A existência desses minerais em Moçambique é conhecida desde períodos remotos. Encontram-se descritos, para Moçambique, ocorrências de esmeraldas, águas-marinhas, granadas, turmalinas, ametista, amazonita, entre outros minerais. Essas ocorrências localizam-se sobretudo nas províncias Centro e Norte de Moçambique (Manica, Tete, Zambézia, Nampula e Niassa). Contudo esses recursos não são aproveitados no seu potencial total, sendo desenvolvida alguma actividades económica formal em alguns pegmatitos e informal por pequenos "garimpeiros" desse tipo de material. Para se potencializar o seu valor e procurar obter uma maior valia, além do desenvolvimento de uma economia organizada em torno desses materiais, e para uma boa aceitação no mercado é necessário caracterizar e certificar a origem e carácter natural das gemas.

As gemas, que são utilizadas como adornos (jóias), objectos ornamentais e na indústria, actualmente possuem um valor comercial apreciável e a sua valorização é uma fonte de rendimento para qualquer país que tenha estes recursos minerais. Daí que a certificação da proveniência e origem natural dos ***minerais de gemas*** é um factor importante para a sua valorização nos mercados internacionais e uma garantia para o reconhecimento regional, nacional e internacional do mercado moçambicano de gemas. Outros factores são os reduzidos estudos de inventariação e caracterização das regiões de ocorrência de ***minerais de gemas*** na República de Moçambique. Neste âmbito, carece pois de se estudar as ocorrências de gemas, sobretudo no que diz respeito às suas características dos aspectos **físicos**, **gemológicos**, **mineralógicos**, **geológicos** e das **inclusões**. O conhecimento que se tem deste tipo de minerais de Moçambique foi fundamentalmente desenvolvido no período colonial, e pouco mais se investigou sobre eles em termos gemológicos. Sendo uma matéria prima extremamente abundante no país, qualquer conhecimento adicional que se tenha deles constitui uma mais valia, em termos científico e económico dos ***minerais de gemas*** de Moçambique.

Actualmente, o sector das gemas encontra-se numa situação de grande sofisticação tecnológica, não só na área da fabricação de imitações e sintéticas, como também, e mais importante, na área de tratamentos para melhoramento da qualidade do material, quer seja na cor, transparência ou consistência. Essa realidade é claramente um sinal da relação existente entre recursos disponíveis e a procura de mercado, é que a produção de gemas, de qualidade

da mercadoria nacional existente, não responde às necessidades do mercado consumidor mundial. Essa realidade coloca novas questões de fundo ao gemólogo profissional e que não o dispensa de conhecimento profundo das disciplinas científicas tais como Mineralogia, Cristalografia, Física Moderna, Geologia. É que, nos últimos anos, aumentou consideravelmente a importação, em Moçambique, de cristais e pedras sintéticas, fabricadas na Europa e Ásia. Hoje em dia, nas províncias de Maputo e Nampula (centros de negócio de gemas), por exemplo, podem-se encontrar imitações artificiais de, praticamente, todos tipos de gemas que não são distinguíveis a olho nu das gemas naturais. O problema reside nos preços das gemas naturais e suas imitações sintéticas que podem diferenciar-se por dezenas ou até centenas de vezes, o que apresenta algum perigo potencial para várias instituições, empresas e empresários que se dedicam ao comércio de gemas e à joalharia. Para além disso, a importação ilegal das pedras sintéticas dificulta as actividades das instituições estatais no registo, controlo do movimento, avaliação, fiscalização e exportação dos recursos minerais explorados em Moçambique.

Uma das linhas orientadoras do Plano Estratégico da UEM, compreende a necessidade de assegurar a excelência e qualidade nas áreas de ensino e de extensão. É nesse contexto que se pretende que as actividades de pesquisa, deste projecto, sejam o reflexo das necessidades e perspectivas de desenvolvimento nacional e regional nos diversos domínios de conhecimento na área da Gemologia, de tal modo que, a partir delas, a UEM possa desencadear uma participação activa e dignificante no desenvolvimento científico e tecnológico de Moçambique.

3.1. Objectivos Gerais

1) Potenciar o conhecimento sobre as ocorrências de minerais-gemas de Moçambique através de investigação nas áreas de Física Aplicada, Gemologia e Geologia;

2) Dar um valor acrescentado a matéria-prima de minerais-gemas de Moçambique, mostrando o seu grau de qualidade, sua diversidade e aproveitamento, através dos resultados de investigação sobre as suas propriedades físicas, gemológicas e geológicas.

3.2. Objectivos Específicos

i. Efectuar um levantamento do potencial da província do Niassa, no que diz respeito aos minerais- gemas (granada e águas-marinhas);

ii. Organizar expedições de recolha de amostras de minerais-gemas, nas regiões de ocorrência na província do Niassa, com base na informação previamente recolhida;

iii. Estudar as características gemológicas, físicas, geológicas e das inclusões das amostras recolhidas;

iv. Estudar as gemas pelas diferentes ocorrências, em relação às suas características gemológicas, físicas, geológicas e das inclusões fluídas, como base de identificação/certificação de origem destes materiais;

v. Realizar Tratamento Térmico de variedades de Turmalina escura local, para melhorar sua cor.

4 – Revisão Bibliográfica

4.1. Estrutura e propriedades dos minerais (de gemas)

Os minerais são substâncias naturais não orgânicas que têm uma composição química e certa estrutura cristalina. Todas as substâncias cristalinas crescem e aumentam o seu tamanho devido à formação das novas camadas e planos atómicos. Todos os cristais são constituidos de átomos de um ou mais elementos químicos. Destes elementos só alguns encontram-se frequentemente. Por exemplo, o oxigénio e silício constituem mais que 74% dos minerais da terra. Os diferentes tipos de minerais são classificados pela sua composição química e estrutura atómica. Se um mineral foi formado às condições "normais", os àtomos dos elementos que a constituem encontram-se numa certa rede cristalina, característica para esse mineral. Numa formação rápida do mineral, quando pela alguma razão não se formou a estrutura cristalina, tal substância não tem nenhuma forma, chama-se amorfa.

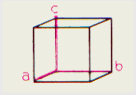
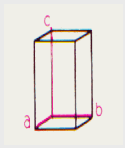
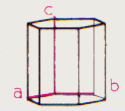
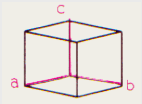
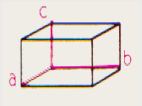
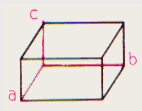
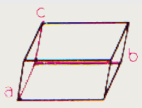
Gema é o nome colectivo (é sinónimo) para todas pedras preciosas e semi - preciosas. O termo gema adquiriu o significado de mineral de ocorrência natural, desejável pela sua beleza, valioso pela sua raridade e suficientemente resistente por forma a proporcionar um prazer duradouro. Idealmente, as pedras de gemas devem manter-se duras e inalteráveis às diferenças de temperatura, pressão e `as poeiras abrasivas e aos produtos químicos encontrados no nosso quotidiano.

A maioria das gemas são silicatos (esmeralda, água - marinha, amitista, etc); alguns são óxidos (Rubi, Safira, Espinela e Crisoberilo); o diamante é único entre as pedras de gema pelo facto de ser constituído de um só elemento (o carbono); existem agregados de um ou mais minerais (rochas).

A composição química dos minerais é mostrada por meio de uma formula, onde as impurezas não são incluídas. Quase todos os minerais crescem em certas formas de cristal, isto é, eles são corpos homogéneos com uma forma regular de átomos, iões e moléculas. Idealmente as substâncias cristalinas são constituidas por unidades idênticas (células unitárias) na forma, no tamanho e na composição química. O tamanho destas unidades básicas controla a simetria e a forma global dos cristais. Para descrição das formas dos cristais é necessário considerar a existência de algumas linhas básicas imaginárias, análogas ao eixo imaginário do Globo Terrestre. Na forma ideal do cristal estas linhas têm um certo comprimento uma em relação a outra, passam em certas direcções e intersectam no centro geométrico do cristal (início). Tais linhas imaginárias são chamadas eixos do cristal. Para a descrição dum cristal são necessários pelo menos 3 eixos, e em alguns casos 4 eixos. Um

mineral pode cristalizar-se num dos sete sistemas de simetria: **isométrico (cúbico), tetragonal, hexagonal, trigonal, ortorômbico, monoclínico e triclínico**. Cada sistema tem diferentes eixos cristalinos e diferentes ângulos com que esses eixos se intersectam, segundo a **Tabela 4.1**.

Tabela 4.1: Sistemas cristalinos.

POLIEDRO FUNDAMENTAL	SISTEMA	CARACTERÍSTICAS CRISTALOGRÁFICAS
	Isométrico ou Cúbico	$\alpha = \beta = \gamma = 90^o$ $a = b = c$
	Tetragonal	$\alpha = \beta = \gamma = 90^o$ $a = b \neq c$
	Hexagonal	$\alpha = \beta = 90^o, \gamma = 120^o$ $a = b \neq c$
	Trigonal	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^o$ $a = b = c$
	Ortorômbico	$\alpha = \beta = \gamma = 90^o$ $a \neq b \neq c$
	Monoclínico	$\alpha = \gamma = 90^o, \neq \beta$ $a \neq b \neq c$
	Triclínico	$[\alpha \neq \beta \neq \gamma] \neq 90^o$ $a \neq b \neq c$

Sumarizando, podemos definir matéria cristalina, como toda a matéria dotada homogeneidade periódica, caracterizada por manifestar propriedades direccionais descontínuas, em mais de uma direcção. Qualquer massa homogénea (isto é, onde as propriedades físicas são as mesma em todos os seus pontos) de matéria cristalina diz-se ser um cristal. A palavra cristal pode ser tomada num sentido mais restrito. Por exemplo, ao descrever uma amostra de mão, (que é comum na gemologia) quando se fala em cristal de calcite, cristal de quartzo, etc., está-se a implicar uma forma poliedrica natural. Se se usar o

termo cristal na sua acepção mais alta, correspondente a definição acima dada, a especificação da forma natural assumida pode ser conseguida usando um adjectivo, como *euédrico (idiomorfo), subédrico e anédrico (xenomorfo)*. Os significados destes adjectivos estão ilustrados na ***Figura 4.1***. [46]

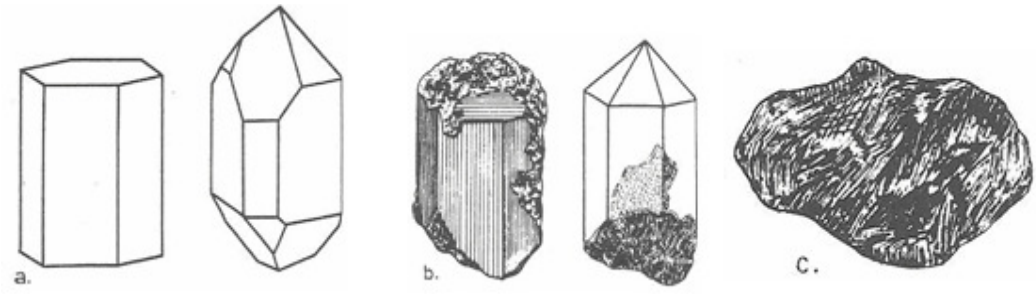


Figura 4.1 – *Caracterização da forma de um cristal, em amostra de mão:* ***a.*** *Cristais euédricos.* ***b.*** *Cristais subédricos.* ***c.*** *Cristais anédricos. [46]*

A estrutura interna e a rede cristalina determinam as propriedades físicas do cristal: suas formas externas, dureza, clivagem, tipo de fractura, peso específico e propriedades ópticas (polarização, índice de refracção, dupla refracção, espectro de absorção, fluorescência UV, raios-X, raios catódicos) . Na identificação e avaliação de pedras de gema há mais e mais concentração nos efeitos ópticos.

4.1.1. Defeitos na Estrutura dos Cristais

Diversos tipos de imperfeições pontuais têm sido descritos. Essas imperfeições estruturais podem ocasionar uma variabilidade da composição química dos cristais e, outrolado, permitir a difusão da matéria no estado sólido, fenómeno extremamente importante para a compreensão de muitas estruturas geológicas. São exemplos de imperfeições pontuais, a mobilidade atómica, a substituição de átomos, a existência de átomos intersticiais e a carência de átomos. Quando presentes em elevado número e aglutinadas, as imperfeições pontuais constituem defeitos tridimensionais. Estes defeitos podem ser primários, isto é, formados durante o crescimento do cristal, ou secundários, isto é, gerados num cristal já formado (designadamente, por agitação térmica, por irradiação, ou por deformação).

Em certos cristais, é habitual a ocorrência de posições atómicas não ocupadas (lacuna). Tais compostos têm, consequentemente, uma composição não estequiométrica, variável dentro de certos limites. A génese de uma lacuna num cristal já formado origina o aparecimento de um auto-intersticial, não havendo, então, qualquer variação composicional da

substância cristalina. No entanto, dado que a energia associada a uma lacuna, por esta introduzir uma menor distorção estrutural, é menor que a energia associada a um auto-intersticial, o número de lacunas num cristal tende a ser maior que o número de intersticiais, e, daí, a ocorrência de variações de composição.

Defeitos de Frenkel

Um par de Frenkel (***Figura 4.2-b***) consiste na associação de uma lacuna com o correspondente átomo auto-intersticial. O número de lacunas formadas igual ao das posições intersticiais, isto é, os átomos deslocados não saem da estrutura, pelo que a composição do cristal não é afectada. Como se compreende, é um mecanismo que contribui para a difusão de matéria num sólido.

Defeitos de Schottky

Estes defeitos consistem na associação de lacunas, resultantes da migração de átomos para o exterior do cristal (***Figura 4.2-c***). Dado que a neutralidade do edifício cristalino tende a ser mantida, a migração de catiões induz a migração de aniões, de modo que a composição do cristal não é afectada.

Habitualmente, defeitos de Frenkel e de Schottky coexistem nos cristais, embora haja tendência para um daqueles tipos de imperfeições predominar, pois as energias de activação requeridas pelos dois processos são, em geral, diferentes. Por exemplo, enquanto que nos halogénios alcalinos predominam defeitos de Schottky, nos halogénios de prata são os defeitos de Frenkel que mais abundam. [46]

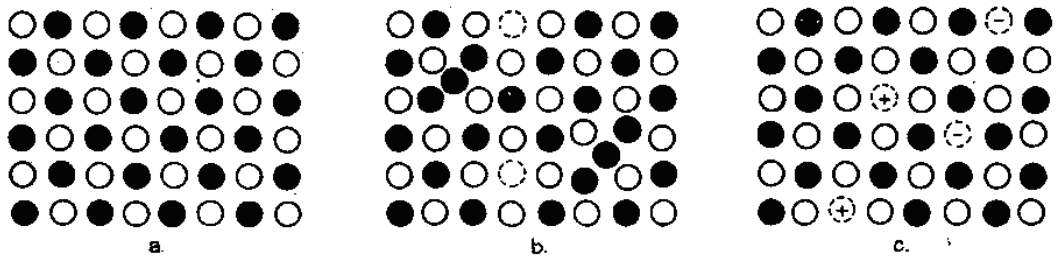


Figura 4.2 – *Representação esquemática de alguns defeitos pontuais.* ***a.*** *Estrutura cristalina idealmente perfeita.* ***b.*** *Estrutura com defeitos de Frenkel.* ***c.*** *Estrutura com defeitos de Schottky.[46]*

Desde que numa estrutura se tenha formado uma lacuna, muito pouca energia (geralmente térmica) é requerida para que um átomo vizinho se desloque e a ocupe. Deste modo se processa a migração de iões (e, concomitamente, de lacunas) o que possibilita a difusão de matéria, através de um sólido, e também o fenómeno da condutividade electrolítica.

Um tipo particular de defeitos associados a lacunas são os chamados centros-F (do alemão Farbenzenter, centro de cor). Um centro-F resulta da captura de um electrão por uma lacuna deixada por um anião, podendo ser produzido por irradiação do cristal com raios-X ou raios ultravioletas, por electrólise, ou por aquecimento (a várias centenas de graus centigrados) de compostos, como o NaCl, na presença do vapor de um metal alcalino (***Figura 4.3***)

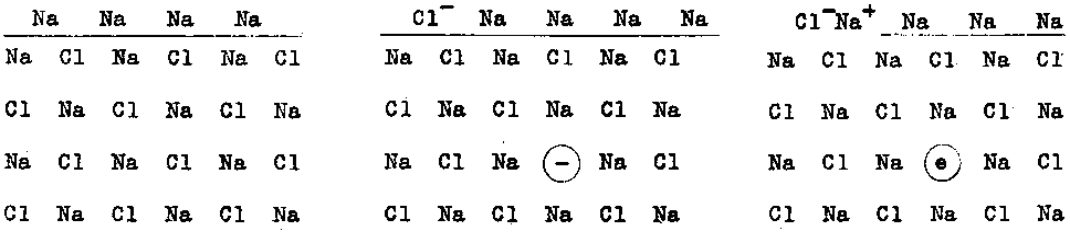


Figura 4.3 – *Representação esquemática da formação de um centro-F na halite, por aquecimento em presença de um metal alcalino (o sódio). O processo envolve a migração de auto-intersticiais para a superfície do cristal, onde reagem com o metal, de acordo com a equação* ***Cl⁻ + Na→ NaCl + 1 e****; os electrões libertados acabam por ser captados pelas lacunas aniónicas, originando centros-F.[46]*

A designação original destes defeitos resulta de eles conferirem aos cristais uma cor «anómala». Essa cor é devida à absorção, pelos cristais, das radiações (cores) componentes da luz branca, capazes de excitar os electrões dos centros-F. Por exemplo, o KCl (incolor, quando puro) adquire uma cor violeta; o NaCl, amarelo a castanha; o LiF, cor rosa; o ZnO, amarela. A excitação dos electrões dos centros de cor também pode dar lugar à luminescência de certos minerais, fenómeno geralmente associado à presença de impurezas. A presença, em quantidades vestigiais, de elementos como Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni e Cu, que facilmente perdem os seus electrões de valência, podem induzir a formação de centros-F. Assim se formam certas variedades de minerais, caracterizadas por cores peculiares ou por serem luminescentes. Por outro lado, podendo apresentar-se em diferentes estados de valência, aqueles elementos, mesmo como constituintes próprios da estrutura de um cristal, podem dar lugar a variações de cor do mesmo. Por exemplo, a vivianite $Fe_3(PO_4)_2.8H_2O$, que é incolor na altura de extracção, torna-se intensamente azul ou verde após contacto com o ar, devido à oxidação de Fe^{2+}, com a consequente libertação de electrões e formação de centros-F.[46]

Geminação (Multi – cristais)

As geminações (ou maclas) constituem um tipo especial de imperfeições estrutural dos cristais. Seguindo a Escola francesa, uma macla pode ser definida como um edifício cristalino não homogéneo, constituido por duas ou mais porções homogéneas da mesma espécie cristalina, justapostas de acordo com leis bem definidas. Cada porção homogénea é, muitas vezes, incorrectamente designada por cristal individual; daí a falácia de definir macla

como uma «associação mútua, regular, de cristais da mesma espécie cristalina». Igualmente falacioso é a descrição de macla como um «edifício policristalino».

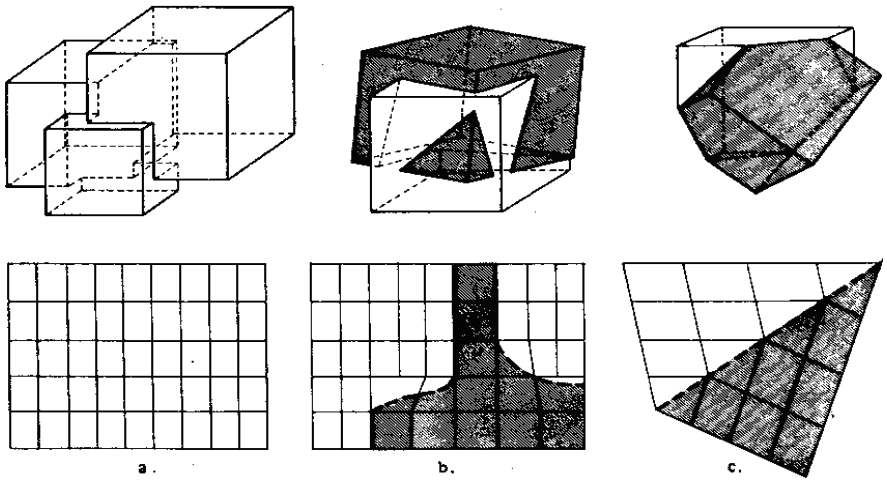


Figura 4.4 – *Cristais e agrupamentos cristalinos.* ***A.*** *Agrupamento paralelo de cristais: é um edifício estruturalmente homogéneo e, portanto, é um cristal único, embora, em consequência da sua morfologia, aparente ser um agrupamento de cristais distintos, interpenetrando-se.* ***B.*** *Agrupamento de dois cristais: edifício não homogéneo, constituido por duas regiões homgéneas (cristais), justapostas de forma acidental; a estabilidade da junção intergranular é, neste caso, conseguida pela coincidência parcial de dois planos reticulares, (100) e (110).* ***C.*** *Macla: edifício não homogéneo, constituido por duas regiões homogéneas, justapostas de forma simétrica, relativamente a um plano estrutural comum.[46]*

Estes defeitos estruturais são cristais penetrantes, que se caracterizam por ser impossível medir o grau ao qual uma massa entra noutra. As vezes a gema aparece como uma única massa, ou de feixes de cristais. A qualidade de tais cristais é inferior a uma única massa de mesmo tamanho. Elas tende a separa-se no processamento.

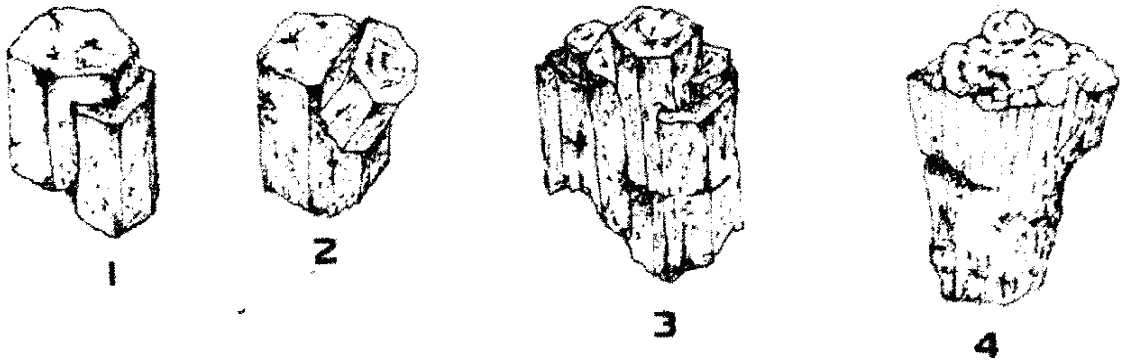


Figura 4.5 *– Nos diagramas (1), (2), (3) vêm-se gémeos. Neste caso, um dos cristais penetrou na parte lateral do outro cristal. As vezes um fenómeno deste género é claramente evidente mas noutras vezes o mesmo é observado apenas como uma pequena saliência nos lados do outro cristal. Como é difícil localizar e determinar o grau de penetração, cuidados especiais devem ser observados ao manejar tais espécies. Um problema mais sério ainda envolve "sheaves" de cristal tal como os retratados no diagrama (4), devido ao grande número de cristais, pode pensar-se que este é um cristal único com rachas ao longo do seu comprimento. Porém, as faces do cristal devem ser cuidadosamente examinadas com uma lupa para certificar-se que estas rachas são cristais ligados uns aos outros.[40]*

Outros tipos de defeitos estruturais para procurar, nos minerais de gemas, são devido a geosrepetidos. Entre estas pode-se incluir gémeos de fatia, partilhando uma fronteira muito fina entre elas o que é geralmente invisível. A gema pode quebrar-se ao longo deste plano.

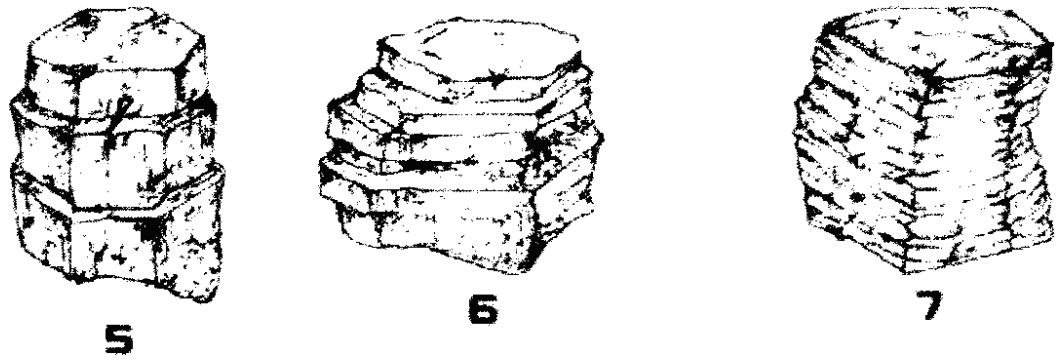


Figura 4.6 *– Nos diagramas (5), (6) e (7) mostram-se alguns exemplos simples de tais cristais. Parece que um "prato" está descançando sobre o outro e o resultado é uma massa insignificantemente desviada. Mais uma vez, deve ser entendido que as fronteiras entre os cristais são muito sensíveis, e eles tendem a separar-se.[40]*

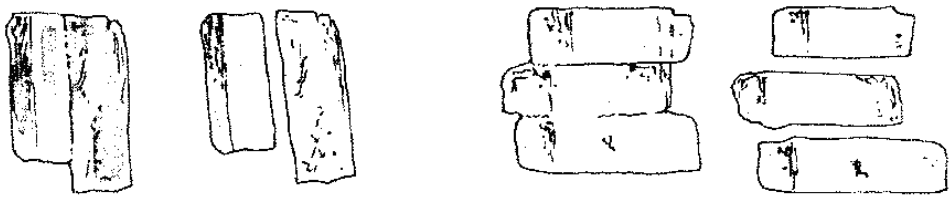


Figura 4.7 *– Gémeos repitidos. Os agregados no lado esquerdo parecem largos e importantes, mas são compostas de um número de massas que tendem a quebrar no corte ou lapidação da gema.[40]*

A superficie do cristal deve ser examinada para verificar se ela é composta por uma única massa, e que não tem colisão ou outras marcas identificando grupos de cristais. O meio mais eficiente para testar o material, áspero neste aspecto em geral, é o polariscópio.

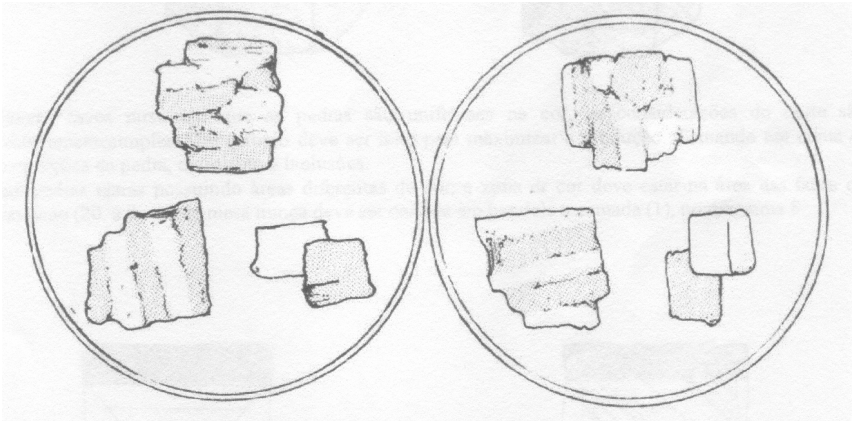


Figura 4.8 – *Reação de gémeos num polariscópio.[40]*

Cristais gémeos são compostos de poucos cristais individuais, cada cristal transmitindo luz vibrando em certas direcções. Quando examinados no polariscópio, a massa parecerá estar composta por muitos cristais, alguns podem acender (para transmitir luz) enquanto outros

tornar-se-ão escuros. Ao virar a pedra as partes escuras podem transmitir luz, enquanto aquelas partes da massa que antes transmitiam a luz tornar-se-ão escuras.[40]

4.2. Inclusões nos minerais

As **inclusões** são pequenos cristais, geralmente, de diferentes espécies minerais, originários de rochas hospedeiras. As inclusões cristalinas podem ser perfeitas ou arredondadas, em forma de tubos ocos ou agulhas orientados em uma ou mais direcções do cristal. Também podem desenvolver-se nos minerais fracturas e clivagens como resposta a tensões ocorridas durante a sua cristalização ou durante os movimentos posteriores da terra. Há também inclusões de minerais que são novos do que o cristal hospedeiro, estes são formados fora dos líquidos que entram no cristal através de fendas ou rachas. Irregularidades na estrutura do cristal e marcas de fases de cristalização são classificados como inclusões. Também cavidades, quando enchidos com líquidos (água, ácido silícico líquido) ou gases (dióxido de carbono ou monóxido de carbono), são classificados como inclusões fluídas. Onde inclusões líquidos e gasosos ocorrem juntos, eles são chamados inclusões de duas ou três fases. Cavidades completamente vazias não são conhecidas. Seus tamanhos variam de submicroscópicas até várias centenas de micrómetros de diâmetro, e suas massas são tipicamente da ordem de nanogramas até femtogramas.[28]

Em gemologia, define-se inclusão como qualquer partícula de matéria estranha ou defeito estrutural presente na gema. Em relação ao mineral hospedeiro, as inclusões podem se formar antes (protogenéticas), simultaneamente (singenéticas) ou depois (epigenéticas) dele. As inclusões protogenéticas são sempre sólidas, enquanto as demais podem ser sólidas, líquidas ou gasosas. Quanto ao número de fases ou estados físicos, podem ter apenas uma (monofásicas), duas (bifásicas), três (trifásicas) ou mais de três (polifásicas).

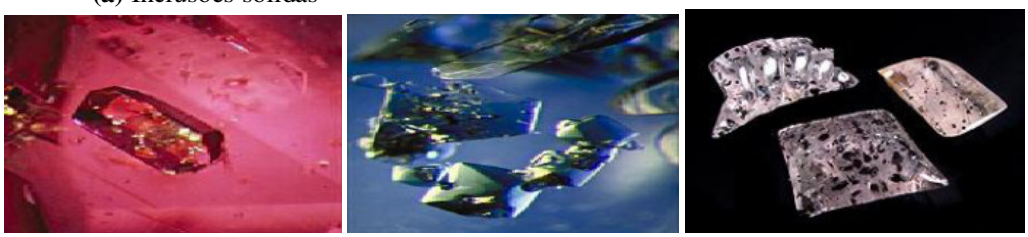
Tipos de Inclusões:

(a) Inclusões sólidas (b) Inclusões cristalinas (c) Inclusões fluidas

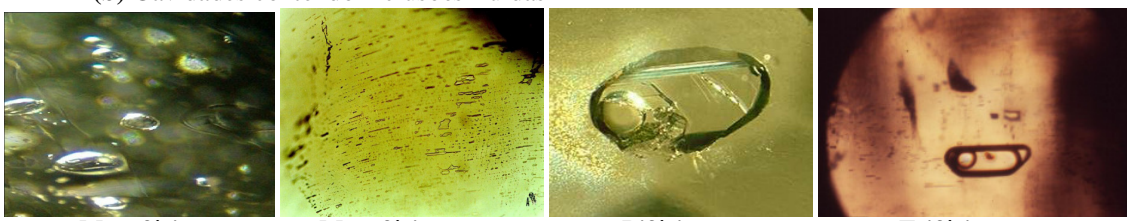
Figura 4.9 – *Classificação das inclusões quanto ao seu tipo.[51]*

Classificação descritiva das inclusões

(a) Inclusões sólidas



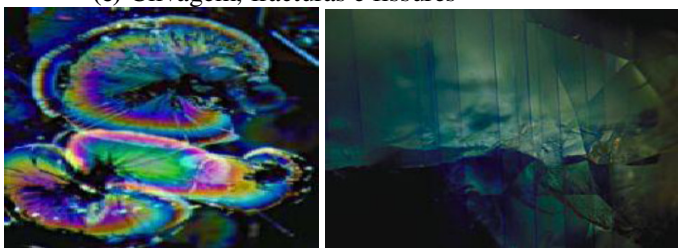
(b) Cavidades contendo inclusões fluidas



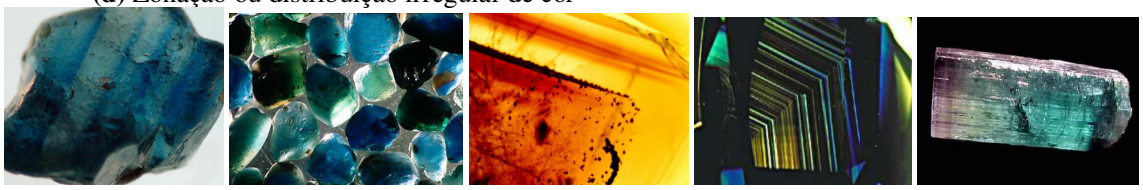
Monofásicas **Monofásicas** **Bifásicas** **Trifásicas**

Trifásicas **Trifásicas** **Polifásicas**

(c) Clivagem, fracturas e fissures



(d) Zonação ou distribuição irregular de cor



(e) Falhas estruturais

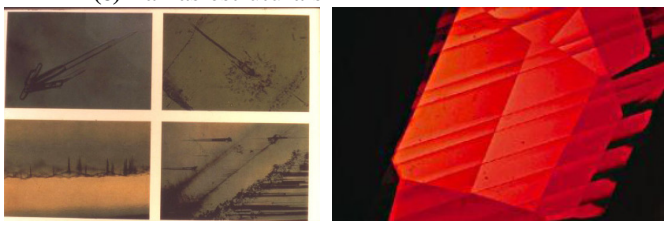


Figura 4.10 – *Classificação descritiva das das inclusões.[51]*

Importância do estudo de inclusões nos minerais de gemas:

- •Informações sobre a génese – condições de formação ou processo de fabricação
- •Procedência da gema
- •Classificação comercial
- •Formação de efeitos ópticos especiais
- •Valorização

As inclusões num mineral são normalmente vestígios do seu ambiente de crescimento, ou seja, são reflexo da história das condições geológicas vigentes durante a sua génese. Assim, não é difícil, à partida, esperar diferenças marcantes no tipo de inclusões e, também, na cor entre espécimens (do mesmo mineral) de origem geológica diferente e, dentro do mesmo tipo de processo geológico, de localidades diferentes, se admitirmos que há variações que se relacionam com as condições genéticas particulares de ocorrência para ocorrência (rochas encaixantes, quimismo, tempo de cristalização, gradientes de pressão e temperatura, etc.). Entende-se portanto que diferentes minas, separadas geograficamente, possam exibir espécimens com características internas também diferentes. Por exemplo, uma esmeralda da Colômbia apresenta normalmente inclusões ditas trifásicas, ou seja, um cristal (sólido), líquido e uma bolha de gás (três fases), sendo muito raro ocorrerem esmeraldas de outras localidades com estas características. As safiras de Kashmir, as mais valiosas do mundo, apresentam uma grande profusão de minúsculos cristais de rútilo que lhe conferem uma aparência aveluda e que é muito apreciada. Várias fontes de evidência sugerem que muitas inclusões fluidas preservam as propriedades químicas e físicas dos fluidos hospedeiros ou original da qual se formaram. inclusões fluidas são, portanto, consideradas amostras directa das fases voláteis que circulou através da litosfera, ao longo da história da Terra, e sua análise físico-química fornece informações sobre a composição e a densidade dessas fases geologicamente importante. Consequentemente, os resultados da investigação de inclusões fluidas são relevantes para a compreensão de muitos processos naturais sub-superfície.

Na detecção de tratamentos a correcta identificação das caraterísticas internas das gemas é de grande valor gemológico, já que nestas podem estar as provas e as evidências de processos térmicos, radiocativos ou de simples impregnação que, hoje em dia, abundam nas gemas do mercado. O tratamento térmico das safiras e rubis, por exemplo, pode ser detectado pela presença de agulhas de rútilo intermitentes e pela presença de halos de tensão em torno de antigas inclusões fluidas. Os diamantes com fracturas preenchidas também são detectados pelos efeitos ópticos de flash que o agente impregnador emite em determinadas condições de

iluminação. O mesmo se passa com as esmeraldas impregnadas com óleos e resinas que apresentam, por vezes, características identificativas nas fracturas preenchidas.

As inclusões têm uma importância na gemologia actual tão grande, que qualquer gemólogo profissional tem que estar à vontade, tanto na utilização do ***microscópio gemológico***, nas várias técnicas de iluminação (envolvendo fibras ópticas, luz transmitida e reflectida, campo escuro, etc.) como também na identificação das características internas, e também externas, das pedras naturais e sintéticas, passando pelos vidros, pedras tratadas, pedras compostas (dobletes, por exemplo), etc.. Aqui vamos exemplificar alguns casos típicos de identificação de materiais gemológicos com o auxílio de inclusões, na distinção entre pedras naturais e sintéticas, na determinação da origem geográfica das gemas e, por fim, na detecção de tratamentos.

- No caso da identificação dos materiais gemológicos, temos, por exemplo, o caso do vidro que, quase invariavelmente, apresenta ou bolha de gás ou figuras de fluência; o caso da moissanite sintética e do zircão onde se observa visivelmente a duplicação das facetas e arestas; e, finalmente, a turmalina onde são normalmente observadas fracturas alteradas típicas, com o nome de *trichites*, e que, aliadas a outras propriedades gemológicas, são identificativas desta gema.
- Na distinção de pedras sintéticas dos seus parentes naturais, as inclusões são, também, bastante importantes: por exemplo, o rubi sintético de fusão (produzido pelo antigo método de Verneuil) apresenta estrias curvas e pequenas bolhas, resultantes do processo de síntese, que são inexistentes nos naturais; o rubi sintético de fluxo (mais moderno) tem inclusões sólidas dispostas de forma peculiar que consistem em resíduos do material fundente onde o rubi foi sintetisado. A esmeralda sintética hidrotermal apresenta quase sempre estruturas de crescimento que indicam a sua natureza sintética.
- Na classificação dos rubis e das safiras no que respeita à sua proveniência geográfica, as inclusões dão informações preciosas e, por vezes, até suficientes.

Todas estas considerações exigem um gemólogo com anos de experiência prática e em permanente contacto com as características das gemas, seus sintéticos, proveniências geográficas, tratamentos, etc.. [47];[51]

4.3. Densidade Relativa (Peso Específico)

Entre os diversos meios de identificação de gemas soltas, sejam brutas ou lapidadas, a determinação da densidade relativa pode ser considerada o mais útil, além de não requerer métodos de ensaio destrutivos e dispensar o uso de instrumentos ópticos dispendiosos. Esta propriedade física, também conhecida como peso específico, pode ser definida como o valor numérico que exprime a relação entre o peso de um determinado volume de uma substância qualquer (em nosso caso uma gema) e o peso de igual volume de água. A densidade teórica ideal, de um cristal pode calcular-se mediante a expressão:

$$D = \frac{massa\ da\ malha}{volume\ da\ malha} = \frac{ZM}{VN_A}(gcm^{-3}) \qquad \textbf{(4.1)}$$

Sendo,

Z, número de moleclas por malha;

M, massa molecular da substância;

V, volume da malha em cm^3 (V = a . b x c);

$N_A = 6{,}02x10^{23}$ /mole, número de moléculas por mole (número de Avogadro).

Por exemplo, a densidade da halite (NaCl: Z=4, a=b=c=5,64 A, alfa=beta=gama=90º; Na=022,99; Cl=35,453) é

$d=4(22{,}99+35{,}453)/[(5{,}64x10^{3}x10^{-24}).(6{,}02x10^{23})]=2{,}1645\ g/cm^3$

A presença de impurezas num cristal é outro factor, bem mais dificil de avaliar (*pois impuresas constituem geralmente 10^{-6} da parte do volume da amostra. Por exemplo, erro de determinação do peso específico por meio da lei de Arquimedes é de ordem de $\Delta \approx 10^{-2}$. Por isso, na avaliação do peso específico contribuição das impuresas é despresivel*), que faz com que as densidades, experimentalmente determinadas, difiram dos valores ideais. Todos os factores acabados de referir concorrem, em maior ou menor grau, para que as densidades tabeladas (determinadas Experimentalmente) sejam diferentes dos valores que teoricamente se calculam. Por exemplo, a densidade da halite é tabelada como sendo 2,1 – 2,6 g/cm^3. A influência do arranjo dos átomos sobre o peso específico está bem ilustrada no caso dos minerais polimorfos, isto é, aqueles que possuem a mesma composição química, mas diferem quanto às demais propriedades. O exemplo mais notório pode ser constatado ao compararmos as densidades relativas do diamante e da grafita, ambos constituídos unicamente de carbono. Por ter os átomos arranjados de forma mais compacta e unidos por ligações mais fortes, o diamante apresenta um peso específico (3,52 g/cm^3) muito superior ao da grafita (2,20 g/cm^3).

O peso específico é expresso em g/cm^3 e, para se obter resultados precisos, a doptou-se como padrão a água pura, destilada, à temperatura de 4ºC, ponto crítico na qual ela é mais densa. Na prática gemológica diária, utiliza-se água corrente, eventualmente fervida, à temperatura ambiente. Assim sendo, quando se diz, por exemplo, que o peso específico de um diamante é 3,52 g/cm^3, isto significa que ele pesa 3,52 vezes mais que um volume igual de água. Nos minerais, o peso específico depende basicamente de dois factores: o(s) tipo(s) de átomo(s) presente(s) e a maneira como eles estão arranjados entre si na estrutura cristalina. Deste modo, quanto mais estreitamente unidos e mais fortes as ligações entre eles, maior será a densidade relativa do mineral.[52]

A densidade relativa é constante para cada substância pura, porém as substituições isomórficas ou a presença de impurezas, inclusões e/ou defeitos na estrutura cristalina podem fazê-la variar, ligeiramente, dentro de certos limites. Existem diversos métodos de determinação do peso específico, sendo que, em gemologia, dois mostraram-se úteis: o método hidrostático e o método dos líquidos densos. O processo para obtenção da densidade relativa pelo método hidrostático fundamenta-se no princípio estabelecido por volta de 250 a.C. pelo matemático grego Arquimedes, segundo o qual qualquer corpo submerso em um líquido recebe um empuxo igual ao peso do volume do líquido deslocado [52].

4.4. Interacção da luz com minerais de gemas

Luz é onda electromagnética com certos comprimentos de onda. O olho humano só pode identificar comprimentos de onda entre 4000Å até 7000Å (1 Å = 10^{-10} m). Esta luz visível alinha-se em sete partes, cada de uma cor particular (espectro de cores: vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, anil e violeta). A mistura de todas estas produz luz branca [3].

Todos os minerais interactuam com a luz de uma forma constante e mensurável, por isso estas propriedades podem ser instrumentos úteis para a sua correcta identificação. A luz que penetra num mineral é abrandada e refractada (desviada) do seu trajecto original. A beleza das gemas depende inteiramente da luz, que as tornam únicas e cobiçadas. Quando um raio de luz incide sobre uma delas, com ela se interage e nos transmite cor, brilho, fogo, efeitos ópticos e transparência.

Os minerais que fazem parte do sistema cúbico e os minerais amorfos (não cristalinos) são refringentes simples, isto é, nestes dois grupos de minerais a luz é abrandada e refractada de igual modo em todas as direcções do mineral. Os minerais cristalinos, que constituem

todos os outros sistemas, são birrefringentes, isto é, a luz que os atravessa é dividida em dois raios, que são abrandados e refractados diferentemente, percorrendo trajectórias diferentes ao longo da estrutura cristalina (veja fig.4.14, Cap.4, Sec.4.3.2.2) [3].

Um factor importante na avaliação de maior parte de gemas é sua ***Transparência***. A quantidade de luz transmitida depende da estrutura da gema e das suas inclusões que se encontram no percurso da luz. A trajectória da luz através do cristal pode também ser prejudicada por fortes absorções no cristal. Se a gema não tiver nenhumas inclusões no seu interior, ela acha-se absolutamente transparente (na prática tais gemas não se encontram). A luz pode passar através do cristal sem perturbações, entretanto, se a substância absorver uma parte da luz, esta gema pode ser classificada como parcialmente transparente. A quantidade de luz absorvida mede-se em percentagem (%): de 0,2÷0,6% no Diamante (*visualmente puro*), Quartzo branco, até 95÷99,9% na Calcedónia. Para descrever o grau de transparência utilizam-se os termos seguintes: 1- transparente; 2- semitransparente; 3- translúcido; 4- semitranslúcido; 5- opaco.

1- Transparentes: aquelas que se deixam atravessar pela luz, permitindo distinguir perfeitamente o contorno de um objecto visto através delas.

2- Semitransparente: aquelas que se deixam atravessar quase totalmente pela luz, mas o contorno de um objecto visto através delas não é inteiramente nítido.

3- Translúcidas: aquelas que, apenas parte da luz é transmitida, mal permitindo ver um objecto através delas.

4- Semitranslúcida: aquelas que transmitem apenas uma ínfima parte da luz, não permitindo que vejamos um objecto através delas.

5- Opacas: aquelas que impedem totalmente a transmissão da luz.

Outro factor importante na interacção da luz com os minerais de gema é o ***Brilho***, que é aparência externa da superfície da gema sob acção da luz reflectida. O ***Brilho*** depende da estrutura (lisa ou não) da superfície e índice de refracção, que por sua vez, determina a quantidade de luz reflectida.

4.4.1. Índice de refracção

O desvio que a luz sofre quando passa de um meio para outro, depende da velocidade da luz nos dois meios. A grandeza física que relaciona as velocidades nos dois meios, é o índice de

refração relativo (n_{21}), que é definido como sendo a razão entre a velocidade da luz no primeiro meio (v_1) e a velocidade da luz no segundo meio (v_2):

$$n_{21} = \frac{V_1}{V_2} \qquad \textbf{(4.2)}$$

Quando o primeiro meio é o vácuo ($v_1 = c$), o índice de refração que relaciona a velocidade da luz no vácuo com a velocidade em outro meio (v), é denominado índice de refração absoluto (n):

$$n = \frac{c}{V} \qquad \textbf{(4.3)}$$

A velocidade da luz no vácuo é c = 300 000 km/s e em outro meio qualquer é menor do que este valor. Consequentemente, o valor do índice de refração em qualquer meio, excepto o vácuo, é sempre maior que a unidade (n > 1).

Segundo Snell, define-se o índice de refracção como sendo a razão entre os senos dos ângulos de incidência α e de refracção β [3]:

$$IR = n_{21} = \frac{sen\alpha}{sen\beta} \quad , \qquad \textbf{(4.4)}$$

onde a constante n_{21} é chamada de índice de refracção de meio (2) em relação ao meio (1). O seu valor numérico depende da natureza da onda e das propriedades dos meios.

O índice de refração é também chamado de refringência. Diz-se que mais refringente é o meio com maior índice de refração; menos refringente, o meio com menor índice de refracção.

Quando um raio de luz incide na superfície de uma gema, parte dele se reflecte e parte se refracta, isto é, penetra e se transmite no interior da gema, mas em uma direcção diferente à de incidência. Este desvio sofrido pelo raio de luz ao passar de um meio menos denso (ar) para um meio mais denso (um sólido transparente, no caso uma gema) é uma das mais importantes propriedades ópticas aplicadas em gemologia, uma vez que a luz se desvia de modo distinto no interior das espécies minerais, possuindo, então, cada qual seu índice de refracção. O IR corresponde à relação entre a velocidade da luz no ar e na gema, contudo, na prática, não é necessário efectuar qualquer cálculo, uma vez que o valor é medido por um instrumento de simples operação denominado refractómetro.

Figura 4.11 *- Refractómetro com escala externa*
(Foto do Autor)

Existem gemas que possuem somente um índice de refracção, no entanto, este é o caso apenas daquelas que se cristalizam no sistema cúbico e dos materiais amorfos (aqueles cujos átomos estão dispostos de maneira aleatória, em contraposição aos cristalinos, nos quais estão arranjados de forma ordenada), que se denominam isótropos ou monorrefringentes. Quando um raio de luz penetra em um cristal de qualquer sistema que não seja o cúbico e em qualquer direcção que não seja a do eixo óptico, divide-se em 2 raios de luz polarizada. Eles se propagam no interior do cristal com velocidades distintas e, portanto, são refractados e absorvidos com diferentes intensidades, de modo que emergem com distintas cores ou tons. Para as gemas que assim se comportam, há um índice de refracção mínimo e outro máximo e a diferença entre eles é denominada birrefringência. Assim sendo, as gemas que cristalizam nos sistemas que não sejam o cúbico são ditas birrefringentes ou anisótropas. Para se detectar e medir a dupla refracção, coloca-se um filtro polarizador sobre a ocular do refractómetro. Ao mantermos o filtro em posição fixa, obtemos um índice de refracção e, ao girá-lo, captamos o raio correspondente ao outro índice.

O valor de refracção do cristal é constante nos vários tipos de gemas. Isto pode portanto ser usado na identificação do tipo de gema. Um decréscimo na velocidade de luz no cristal provoca um desvio do raio de luz. Por exemplo, o índice de refracção do diamante:

$$n_{Diamante} = \frac{V_1}{V_2} = 2,4$$

onde

V_1 = 300000 km/s (Velocidade da luz no ar);
V_2 = 125000 km/s (Velocidade da luz no diamante);

O significado físico deste resultado é que a velocidade da luz no ar é 2,4 vezes maior do que a velocidade da luz no diamante. Os índices de refracção de gemas variam entre 1,2 e 2,6. Estes índices variam um tanto com a cor e acontecimento.

4.4.2. Polarização

Considerações gerais

A luz bem como todas outras radiações electromagnéticas é uma onda transversal. A direcção de vibração dos campos eléctricos e campos magnéticos é perpendicular a direcção de propagação de onda.Quando as vibrações do vector campo eléctrico, são paralelos entre sí, em todos os pontos ao longo da onda diz-se que a onda é plano polarizada. Em cada um desses pontos o vector campo eléctrico e a direcção de propagação determinam um plano chamado plano de vibração. Os efeitos de polarização da luz não dependem meramente do facto de a luz ser um fenómeno ondulatório. Eles são observaveis porque a luz é uma onda transversal.

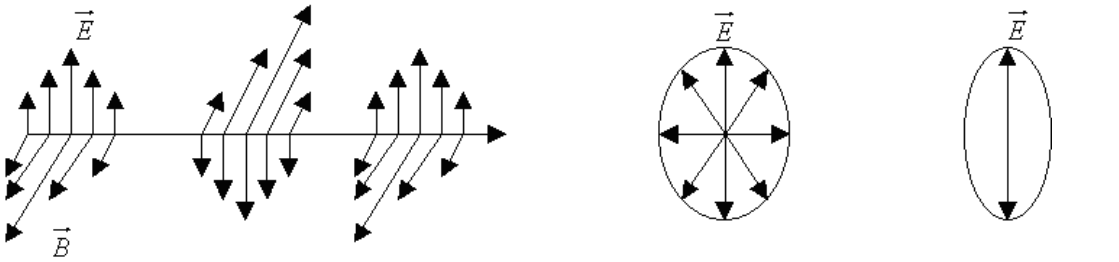


Figura 4.12 - *Polarização da onda electromagnética.*

4.4.2.1. Polarização por placas paralelas

Certos materiais, têm a capacidade de polarizar a luz. Um destes materias é conhecido por polaroide. Esta placa possui uma direcção característica de polarização indicada pelas linhas paralelas. Por isso, transmite apenas componentes de trens de onda cujos vectores eléctricos vibram paralelamente a essa direção e absorve aqueles cujos vectores eléctricos vibram normalmente aos primeiros. Deste modo, a luz emergente será plano polarizada. A direcção de polarização é estabelecida durante o processo de fabricação.

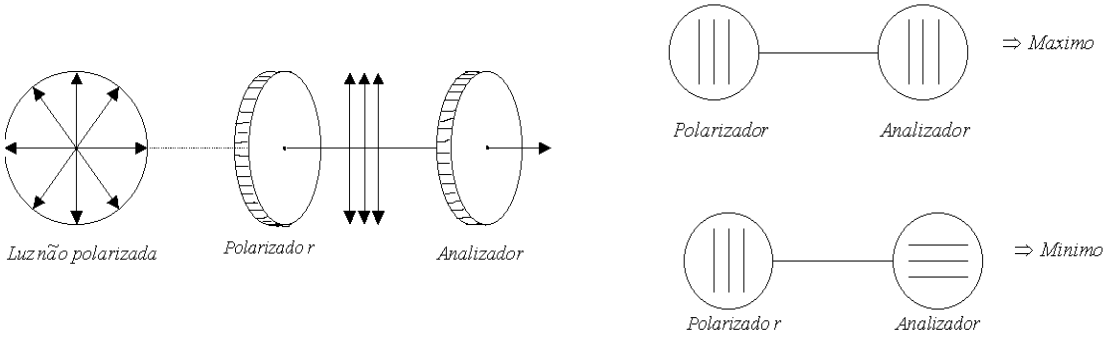


Figura 4.13 - *Efeitos da polarização da luz por um polarizador e analizador.*

A intensidade de luz transmitida será nula se as direcções de polarização do polarizador e do analizador forem ortogonais e máxima quando forem paralelas. Seja $\mathbf{E_m}$ amplitude de luz plano-polarizada que incide o analizador, a amplitude de luz que atinge o observador (detector) é dado por :

$$E_m = E\cos\theta\,, \qquad \textbf{(4.5)}$$

onde θ é o ângulo entre as linhas do polarizador e do analizador. A intensidade da luz transmitida é proporcional ao quadrado da amplitude:

$$I = I_o \cos^2\theta\,, \qquad \textbf{(4.6)}$$

4.4.2.2. Polarização por refracção (dupla refracção)

A velocidade da luz, portanto o índice de refracção de certos materias, não dependem da direcção de propagação, estes materiais são opticamente isotrópicos. Em outros materiais a velocidade da luz assim como o índice de refracção dependem da direcção de propagação, portanto são meios anisotrópicos. Para os meios anisotrópicos o feixe de ondas dá origem a ondas secundárias constituidas por superfícies esféricas e ondas secundárias constituidas por superfícies elípticas. Os dois conjuntos são tangentes entre si numa direcção que se chama eixo óptico do cristal.

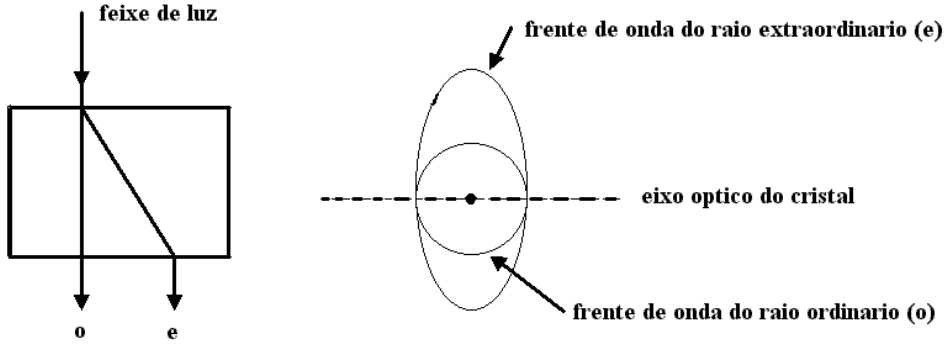


Figura 4.14 - *Desdobramento de um feixe de luz transmitido, em raio ordinário (**o**) e raio extraordinário (**e**) dando origem ao fenómeno de* ***dupla refracção.***

Da ***Figura 4.14*** explica-se o seguinte:

O feixe transmitido desdobra-se em dois raios: raio ordinário (**o**) e raio extrordinário (**e**) – este fenómeno é conhecido por **dupla refração**.

- Os dois feixes ("**o**" e "**e**") são plano-polarizados com os respectivos planos de polarização perpendiculares entre si – polarização cruzada.
- O raio ordinário obedece `a lei de Snell de refracção na superfície do cristal (como um raio luminoso comum ao passar de um meio isotrópico para o outro).
- O raio extraordinário não obedece a lei de Snell.
- A onda ordinária propaga-se a partir do cristal com uma única velocidade $\mathbf{V_o}$ e em todas as direcções, isto signfica, que para a onda "**o**" o cristal tem um só índice de refração, $\mathbf{n_o}$, como se fosse um sólido isotrópico.
- A onda "**e**", propaga-se através do cristal com uma velocidade variável e com a direcção desde $\mathbf{V_o}$ até $\mathbf{V_e}$, isto significa, que o índice de refração varia com a direcção desde $\mathbf{n_o}$ até $\mathbf{n_e}$. As grandezas $\mathbf{n_o}$ e $\mathbf{n_e}$ são chamadas de índices principais de refracção do cristal [3].

4.5. Minerais isotrópicos e anisotrópicos

Definição: Indicatriz é uma figura geométrica tridimensional que mostra a variação dos índices de refracção nas diferentes direcções do interior de um mineral. Assim, cada raio vector da indicatriz representa uma direcção de vibração cujo comprimento é proporcional ao índice de refracção do cristal para as ondas de luz que vibram paralelamente àquela direcção. Observe que as indicatrizes dos minerais mostram as diferenças entre os índices de refracção enquanto as superfícies de velocidade de onda (ou de raio), a variação da velocidade. Assim estes dois tipos de representação geométrica serão iguais mas representando grandezas inversamente proporcionais (pois V=1/n).

As indicatrizes dos minerais são figuras abstractas, ou seja, não podem ser observadas. Por outro lado esta abstracção nos permite localizar e determinar os índices de refracção associados as diferentes faces ou secções de um mineral.

4.5.1. Minerais Isotrópicos

Em um mineral isotrópico, ou seja um mineral opticamente homogéneo, o índice de refracção é constante, independente da direcção considerada, ou seja, o raio de luz se propaga com a mesma velocidade em todas as direcções. Assim as indicatrizes destes minerais serão esferas cujos raios vectores são proporcionais aos seus índices de refracção, conforme mostra

a ***Figura 4.15***. Dada a homogeneidade do mineral somente aqueles que se cristalizam em um sistema de maior simetria serão isotrópicos, ou seja aqueles do sistema isométrico ou cúbico. No outro extremo, substâncias homogéneas que não possuem nenhum arranjo cristalino, também serão isotrópicas.

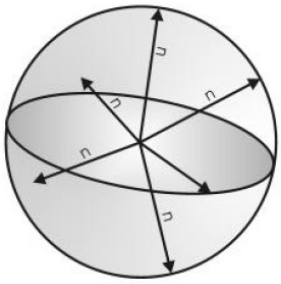


Figura 4.15 *- Representação de uma indicatriz isotrópica, que corresponde a uma esfera cujo raio é proporcional ao índice de refracção do mineral (n).[56]*

A propagação de um raio de luz que atravessa um mineral isotrópico é bastante simples de se avaliar, pois eles não promovem o fenómeno da dupla refracção e assim, o raio de luz que parte do polarizador, atravessa o mineral sem mudar sua direcção de vibração. Mesmo que o raio incidente não seja polarizado, ao atravessar o mineral ele continuará da mesma forma, conforme mostrado na ***Figura 4.16***. Observe que a superfície onde incide o raio de luz secciona a indicatriz passando por seu centro geométrico. Como a incidência deste raio se faz com um ângulo de incidência igual a zero em relação à normal à superfície do mineral, o mesmo irá atravessa-lo sem sofrer nenhum desvio ou polarização.

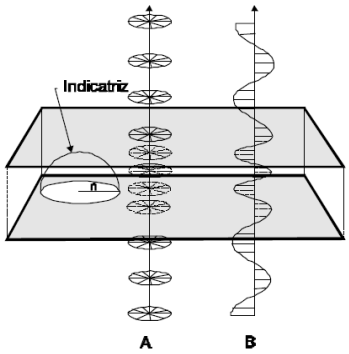


Figura 4.16 - *Incidência normal ou perpendicular à superfície de um mineral isotrópico de raios de luz polarizado (B) e não polarizado (A). Observe que a face onde ocorre a incidência secciona o centro da indicatriz resultando um círculo cujo raio é proporcional ao índice de refracção do mineral (n). Para ambos os raios, não há mudança nem na trajectória nem na direcção de polarização da luz.[56]*

4.5.2. Minerais Anisotrópicos

Os minerais anisotrópicos são aqueles que apresentam mais do que um índice de refracção nas diferentes direcções de propagação da luz no seu interior, e assim, suas indicatrizes são representadas por elipsóides de revolução de dois ou três eixos, onde cada um deles (também chamados de raios vectores) representa um índice de refracção. Toda vez que um raio de luz incide sobre a superfície de um mineral anisotrópico transparente este sofre o chamado "fenómeno da dupla refracção", ou seja, ao se refractar são produzidos dois raios de luz distintos, que vibram em planos perpendiculares entre si e se propagam no interior do mineral, ***Figura 4.17***.

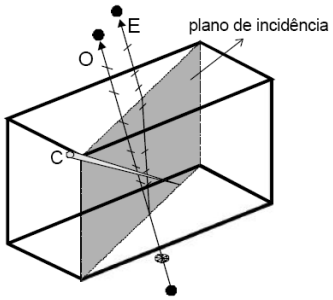


Figura 4.17 - *Raio de luz não polarizado que incide num cristal de calcita e sofre o fenómeno da dupla refracção. O raio ordinário (O) vibra perpendicularmente ao plano de incidência e é aquele que não sofre desvio ao atravessar o mineral, ao contrário do extraordinário (E), cuja direcção de vibração é perpendicular àquele plano.[56]*

Via de regra os raios refractados produzidos por este fenómeno são chamados de ordinário "O" e extraordinário "E" sendo que o ordinário segue a lei de Snell para a refracção (no caso r = 0), enquanto o extraordinário não (uma vez que r≠0). A direcção de polarização (ou vibração) do raio extraordinário está contida no plano de incidência (que também contém o eixo cristalográfico "c" do mineral) enquanto que a do ordinário é perpendicular a ele, ***Figura 4.17***. Os minerais anisotrópicos são divididos em dois grandes grupos denominados: **Uniaxiais:** com dois índices de refracção principais que compreendem os minerais que se cristalizam nos sistemas trigonal, tetragonal e hexagonal e, **Biaxiais:** com três índices de refracção principais e compreendem os minerais que se cristalizam nos sistemas ortorrômbico, monoclínico e triclínico.

4.6. Pleocroísmo ou Absorção Selectiva

A cor de um mineral é função de sua absorção por certos comprimentos de onda que compõe a luz branca. Esta absorção (ou dispersão dos índices de refracção), ocorre tanto para minerais isotrópicos quanto para os anisotrópicos, visto que este fenómeno ocorre em nível atómico. Entretanto, para minerais coloridos e anisotrópicos (cristais não cúbicos – tetragonal, hexagonal, trigonal, etc.) a cor poderá variar dependendo da direcção de vibração da luz que os atravessa, enquanto o mesmo não é observado em cristais isotrópicos (amorfos ou cúbicos). Assim, a luz ao transmitir-se através do mineral pode ser absorvida de maneira selectiva dependendo da direcção de sua vibração e, consequentemente, o mineral apresentará cores diferentes. A este fenómeno dá-se o nome de *pleocroísmo*, ou seja, *é o fenómeno que certos minerais não opacos, transparentes e coloridos apresentam, de absorverem a luz de maneira diferente (selectiva) segundo diferentes direcções de vibração (ou cristalográficas) no seu interior.* As gemas que exibem este efeito têm cores compostas de duas ou mesmo três cores, uma próxima a outra [3]. Desta forma, quando um mineral é pleocróico, girando-se a platina do microscópio ou dicroscópio ele muda de cor. Na direcção de vibração para a qual se verifica a *máxima absorção*, *a cor do mineral será escura* e na de *absorção menor a cor será clara,* ***Figura 4.18***. Chama-se *fórmula pleocróica* a identificação das cores e intensidades de absorção com as respectivas direcções de vibração dos seus índices de refracção.[53]

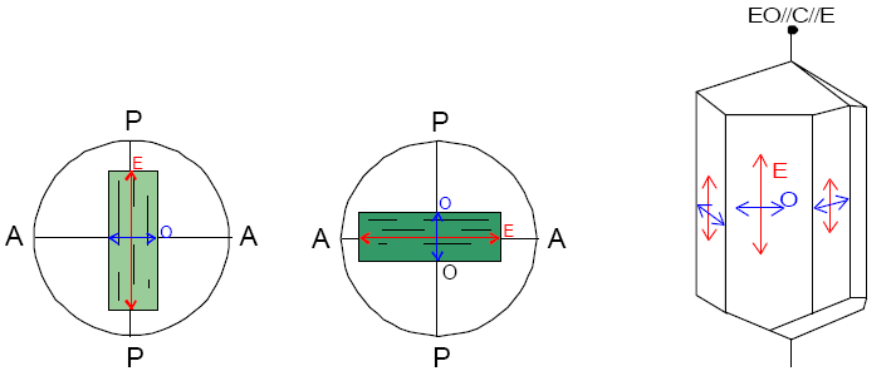


Figura 4.18 - Figura esquemática que mostra a fórmula pleocróica da turmalina. Observe que quando o cristal de turmalina fica com sua direcção "E", paralela a direcção do polarizador, o mineral mostra cor verde e clara (absorção fraca) e quando a direcção "O" fica paralela ao polarizador inferior, o cristal de turmalina mostra cor verde escura (absorção forte). Acha-se também representado um modelo óptico cristalográfico de um cristal de turmalina, indicando as faces e a disposição das direcções "E'' e "O". A Turmalina tem $\mathbf{n_E = 1{,}610}$ **e** $\mathbf{n_O = 1{,}631}$. Como $\mathbf{n_E < n_O}$, o seu sinal óptico é negativo.[56]

Algumas substâncias anisotrópicas absorvem a onda extraordinária e ordinária em proporções muito diferentes. Nessas condições, uma onda electromagnética, propagando-se

através de uma espessura suficientemente grande dessas substâncias, torna-se gradualmente polarizada em um plano. Esse efeito é chamado **dicroismo** e é ilustrado na ***Figura 4.19***, onde $\mathbf{E_o}$ é a amplitude do campo eléctrico da onda incidente. A onda incidente, `a medida que penetra na substância, separa-se nas ondas ordinária e extraordinária, polarizadas paralelamente aos eixos **Y** e **Z**. Suas amplitudes são $\mathbf{E_{oy}}$ e $\mathbf{E_{oz}}$. Se $\mathbf{E_{oz}}$ é mais absorvida do que $\mathbf{E_{oy}}$, então, após as ondas atravessarem uma certa espessura, temos somente $\mathbf{E_{oy}}$, dando como resultado luz linearmente polarizada. O **dicroísmo,** sendo o resultado de uma diferença de coeficientes de absorção, depende da frequência da onda electromagnética, e a substância poderá exibir esse fenómeno com maior intensidade em determinadas frequências do que em outras [3].

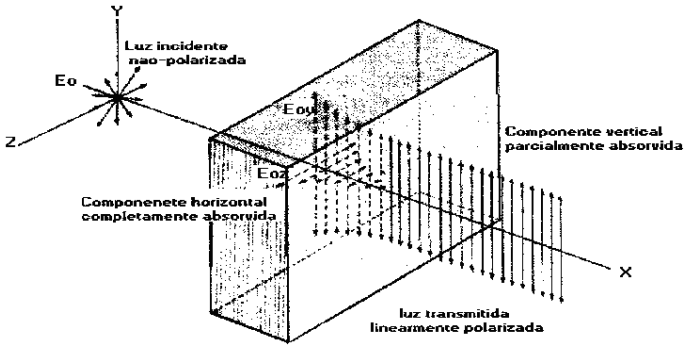


Figura 4.19 - *Efeito de Dicroísmo.[3]*

O pleocroismo pode ser fraco, definido ou forte. Isto deve ser tomado em consideração, quando se lapida a gema, de forma a evitar cores pobres, ou tonalidades que são muito escuras ou muito claras. Num mineral de gema anisotrópica o efeito do pleocroismo tem uma influência muito importante na cor da pedra quando ela for vista a partir de diferentes direcções. Isto deve influenciar a decisão do lapidador. O pleocroismo, não é necessariamente o resultado de várias quantidades de elementos corantes mas é o resultado da absorção selectiva diferencial de raios de luz nas pedras que possuem a birrefringência.

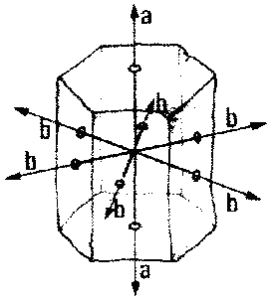


Figura 4.20 - *direcções da cor numa pedra.[40]*

Na esmeralda a cor da gema na direcção do eixo óptico – C (do topo até `a base do hexágono, refere-se como eixo "**a**" ou direcção "**a**") é diferente da cor observada através das faces do prisma do cristal na direcção "**b**". Geralmente, todos os eixos-b têm o mesmo efeito de cor. As vezes a cor desejada é localizada numa direcção imediata, tal como num ângulo entre o eixo-a e o eixo-b. A ***Figura 4.21*** descreve o modo como as gemas destas três variedades são cortadas: Gemas com boa qualidade de cor, observadas através do eixo-A são cortadas com a sua mesa no ângulo de 90^{o} com o eixo-A. Geralmente, a qualidade da cor de muitas pedras é melhor quando observada nesta direcção. Gemas em que a boa qualidade da cor é observada através do eixo-B são cortadas de modo que a sua mesa seja paralela `a uma das faces do cristal, ou ao eixo longitudinal do cristal. Deste modo, geralmente é possível obter uma gema mais larga, uma vez que por todas as direcções B a cor é semelhante. A faceta da mesa da gema pode ser formada paralela ao eixo longitudinal ou entre as duas faces do cristal. Esta decisão é feita depois de considerar as inclusões internas da gema e qualidade.

Deve ser tomado cuidado para que as menores inclusões possíveis existam na coroa, e que a gema seja uniforme na cor. [40]

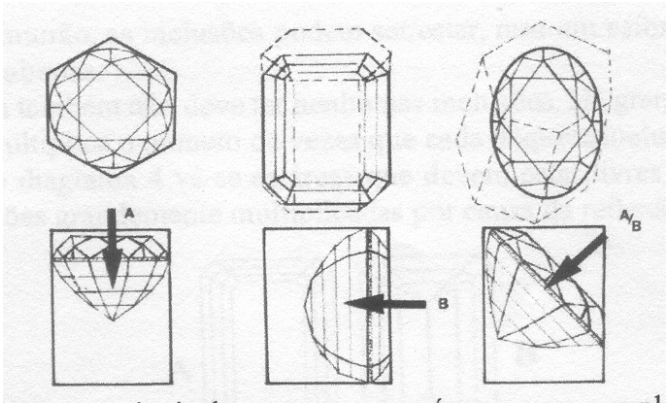


Figura 4.21 - *Modos possíveis de cortar a massa áspera para a exploração máxima da cor nas gemas.[40]*

4.7. Luminescência

Luminescência, é uma definição colectiva para a emissão de luz visível sob influência de certas radiações, assim como por algumas reacções físicas ou químicas, mas não incluindo emissão de calor puro. O comprimento de onda da radiação luminescente é sempre maior que a da radiação excitadora. A luminescência que cessa com a interrupção da fonte excitadora dá-se o nome de **fluorescência** e a que continua a emitir luz depois da irradiação ter cessado, o efeito é chamado **fosforescência** [3]. Não existe, contudo, uma demarcação nítida entre os dois fenómenos.

A energia excitadora apresente-se sob diversas formas, tais como: raios UV, iões, raios-x, raios catódicos, ou ainda sob forma de perturbações mecânicas. O processo básico da luminescência consiste na excitação de um electrão atómico, do seu estado energético fundamental $\mathbf{E_o}$ para um estado excitado $\mathbf{E_1}$, seguida do processo de desexcitação para o estado fumdamental com a emissão de um fotão geralmente luminescente. Durante o processo de desexcitação, uma emissão fluorescente tem lugar se o electrão excitado retornar directamente para o seu estado fundamental:

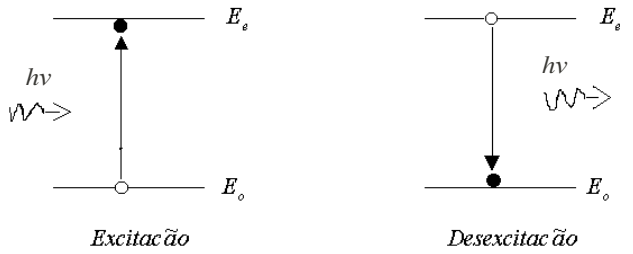


Figura 4.22 - *Processos de excitação e desexcitação de um átomo no fenómeno de fluorescência.*

No processo de desexcitação que envolve um estado meta-estável $\mathbf{E_m}$, dá-se a fosforescência. De acordo com este mecanismo, o electrão excitado é "armadilhado" no estado meta-estável, em que a transição espontânea, de $\mathbf{E_m}$ para $\mathbf{E_o}$, é proibida. Neste caso, o sistema manter-se-á neste estado a não ser que absorva uma energia suficiente (esta energia pode ser obtida sob forma de calor da vizinhça) para atingir o estado excitado, com o possível retorno ao estado fundamental:

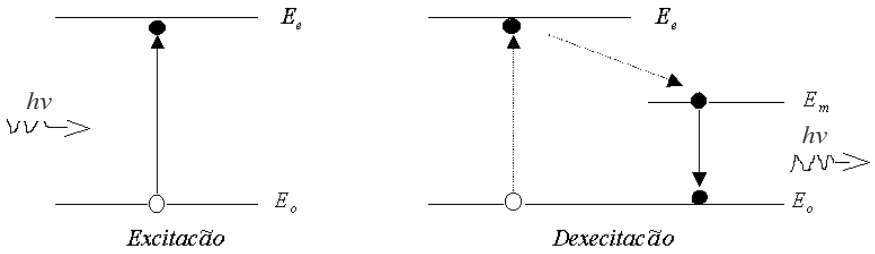


Figura 4.23 - *Processos de excitação e desexcitação de um átomo no fenómeno de fosforescência.*

A luminescência nos minerais pode ser intrinseca, resultante da periodicidade da rede cristalina, ou extrínsica, devida `a presença de impureza na rede (átomos ou iões estranhos). No diagnóstico das gemas usa-se frequentemente a análise comparativa da sua luminescência que se encontra descrita em publicações [3].

Na gemologia, a fluorescência é emitida por determinados minerais, quando expostos às radiações de comprimentos de onda muito curtos e menores que os da luz visível, tais

como a luz ultravioleta e os raios X. A observação desta propriedade conhecida como fluorescência é um ensaio complementar eficaz na identificação de materiais gemológicos e na distinção entre algumas gemas naturais, sintéticas e tratadas. A fluorescência à luz ultravioleta é a mais amplamente utilizada e para observá-la, requer-se uma fonte de luz ultravioleta normalmente constante de duas lâmpadas, uma de ondas curtas (253,7 nm) e outra de ondas longas (365 nm), pois há gemas que respondem apenas às radiações de determinados comprimentos[3].

4.8. Difracção e Fluorescência de Raios X

Para entendermos o que é difracção, precisamos saber como uma onda interfere com outra onda. A ***Figura 4.24-(a)*** mostra o que chamamos uma onda bem comportada, onda dos físicos. É um padrão de altos e baixos que se sucedem e se deslocam em conjunto. Vemos algumas das características de uma onda. O **comprimento de onda**, designado pela letra grega *lambda* (λ), mede o comprimento do padrão que se repete. A **amplitude** (A) mede o tamanho de cada máximo da onda. A **velocidade** (v) mede a distância percorrida pelo padrão em uma unidade de tempo.

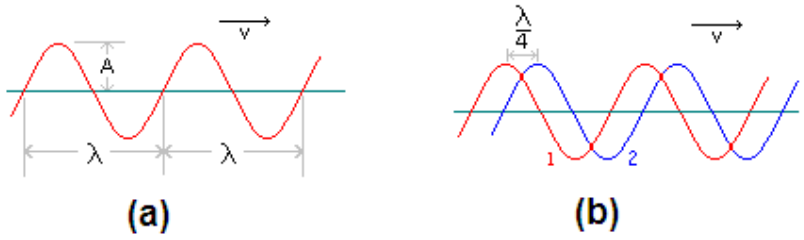


Figura 4.24 - *Algumas das características de uma onda.*

Existe outra propriedade de uma onda, a **fase**. Na ***Figura 4.24-(b)***, as ondas (1) e (2) têm a mesma amplitude, o mesmo comprimento e a mesma velocidade, mas, a onda (2) está adiantada em relação à onda (1). Para distinguir uma da outra, diz-se que elas têm fases diferentes. Diremos, então, que as ondas (1) e (2) têm uma diferença de fase de $\lambda/4$, isto é, de um quarto do comprimento de onda. Quase sempre o importante é a diferença de fase entre duas ou mais ondas; o valor da fase de cada uma delas não interessa (a fase de uma onda, também é apresentada como um ângulo).

Quando duas ondas resolvem ocupar a mesma região do espaço dá-se a **interferência**. O resultado da interferência entre duas ondas depende da diferença de fase entre elas. Na ***Figura 4.25-(a)***, vemos duas ondas, uma pintada de azul e a outra, de vermelho, praticamente

coincidentes. As duas têm a mesma amplitude, o mesmo comprimento e **a mesma fase**; a diferença de fase entre elas é zero. Nesse caso, a interferência é chamada de **construtiva**: uma onda soma-se à outra e o resultado é uma única onda cuja amplitude é a soma das duas amplitudes.

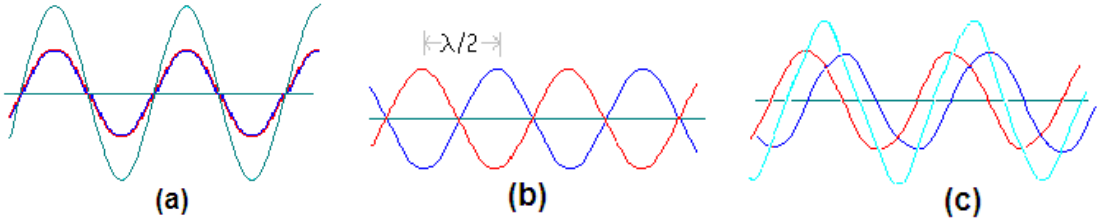


Figura 4.25 - *Resultado da interferência entre duas ondas.*

Na ***Figura 4.25-(b)*** as duas ondas têm uma diferença de fase de meio *lambda*. Isso faz com que uma crista de uma delas coincida com um vale da outra. Acontece, então, uma **interferência destrutiva** entre elas. O resultado é que uma anula completamente o efeito da outra. Nessa região não haverá mais onda nenhuma.

Na ***Figura 4.25-(c)***, as duas ondas têm uma diferença de fase genérica. A interferência entre elas não é totalmente construtiva nem totalmente destrutiva. O resultado é uma onda única cuja amplitude tem qualquer valor entre zero e a soma das amplitudes das ondas, dependendo da diferença de fase entre elas. Deu para entender?

A difracção é, em última análise, uma interferência entre várias ondas. No caso que nos interessa, a difracção de raios-X, veremos que a interferência será causada por diferenças de fases entre as ondas causadas por diferenças nos caminhos que elas percorrem. Elas começam em fase, mas, por razões que veremos a seguir, umas se atrasam das outras, surgindo uma diferença de fase entre elas. Por causa dessa diferença de fase elas interferem entre si. Informações a respeito da estrutura cristalina de materiais podem ser obtidas utilizando-se difracção de raios X. O fenómeno da difracção ocorre quando a onda electromagnética incidente interage com uma série de obstáculos regularmente posicionados com espaçamentos comparáveis em magnitude ao comprimento da onda. Além disso, a difracção é uma consequência de relações de fase específicas estabelecidas entre duas ou mais ondas que foram dispersas pelos obstáculos.[57]

Raios X, por possuírem comprimento de onda da ordem de magnitude do espaçamento atómico nos sólidos, são utilizados na elucidação da estrutura cristalina em materiais sólidos. Quando um feixe de raios X incide sobre um sólido cristalino, esse é espalhado em todas as direcções pelos electrões presentes em átomos e iões que se encontram na trajectória do feixe.

Parte da radiação espalhada por um dado átomo interage de forma destrutiva com a espalhada por outros átomos (ver ***Figura 4.26***). Entretanto, raios X que incidem sobre certos planos cristalográficos em ângulos específicos são reforçados ao invés de aniquilados. Bragg notou que feixes de raios X são reforçados, ou difractados, quando a seguinte condição é satisfeita

$$n\lambda = 2dsen\theta, \qquad \textbf{(4.7)}$$

onde **n** é um número inteiro, **λ** é o comprimento de onda da radiação incidente, **d** é o espaçamento interplanar entre os planos atómicos que provocam a interacção construtiva e **θ** é a metade do ângulo entre as direcções do feixe incidente e do difractado. A relação 4.7 é denominada lei de Bragg. A ***Figura 4.27*** exibe esquema de interacção destrutiva e construtiva de feixes de raios X em material cristalino.

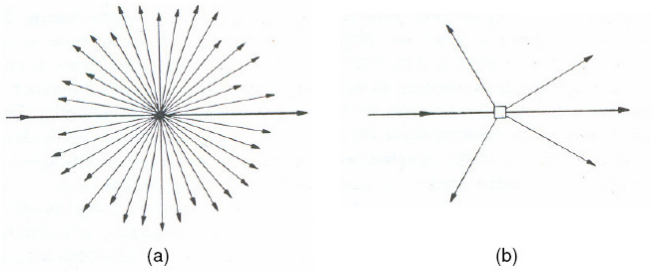


Figura 4.26 - Espalhamento e difracção de raios X por um átomo (a) e por um cristal (b).[57]

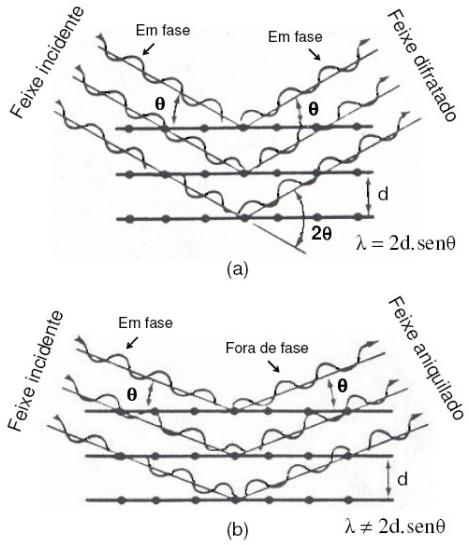


Figura 4.27 - Interacção (a) construtiva e (b) destrutiva de feixe de raios X em material cristalino.[57]

A lei de Bragg é uma condição necessária, porém insuficiente para a difracção em cristais reais, pois essa especifica quando a difracção ocorrerá em células unitárias que

possuem átomos posicionados apenas nos vértices. Átomos situados em outras posições, por exemplo nas faces e no interior das células unitárias, actuam como centros de dispersão adicionais que podem produzir dispersões fora de fase em certos ângulos de Bragg.[57]

A utilização de um feixe de raio X para excitação de radiação fluorescente em materiais foi proposta por Glocker e Schreiber em 1928. Actualmente, esse método é empregado como uma técnica analítica não-destrutiva no controle de processo em diversas áreas de investigação, uma delas a Gemologia. O fenómeno da fluorescência de raios X se divide em duas etapas: a primeira consiste na ejecção de um electrão do átomo-alvo mediante incidência de fotão de alta energia (raio X ou gama) e a segunda no preenchimento da lacuna deixada pelo electrão ejectado por outro electrão proveniente de uma camada electrónica mais externa. A ***Figura 4.28*** mostra o esquema desse processo. A energia do fotão emitido, também denominado raio X característico, é dada pelas diferenças de energia entre a camada inicial e final do electrão. Cada elemento químico possui um raio X característico com energia bem definida.

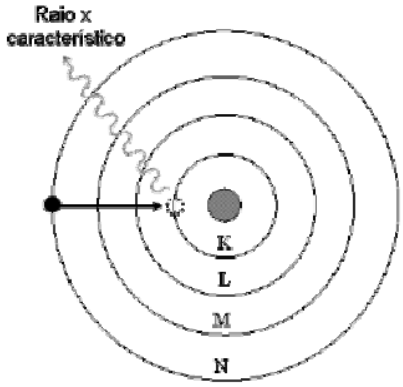


Figura 4.28 - Processo de emissão de raio X característico.

Espectrómetros de raios X são basicamente compostos por uma fonte de radiação e um sistema de detecção. A fonte irradia a amostra com fotões de alta energia e o sistema de detecção colecta e discrimina a radiação fluorescente de acordo com o comprimento de onda dos fotões que a compõem. Dependendo da presença ou não de monocristais no sistema de detecção, a técnica pode ser classificada como "Fluorescência de Raios X por Dispersão de Comprimento de Onda" ou "Fluorescência de Raios X por Dispersão de Energia", respectivamente. Cada técnica possui vantagens e desvantagens. Assim, a técnica mais apropriada para cada análise dependerá das necessidades do usuário.[57]

4.9. Cor

A cor é a mais importante característica dos minerais de gemas. Nem por isso, na maior parte das gemas não é "diagnosticada" na identificação, por nelas ocorrerem muitas cores. Muitas gemas são coloridas porque parte da luz branca que os atravessa é absorvida dentro da estrutura mineral. A luz branca é uma mistura de muitas cores, mas só quando uma dessas cores é absorvida, por ressonância, é que a luz emergente da gema se apresenta colorida. Se todos os comprimentos de onda passam através da gema, esta apresenta-se sem cor; se toda luz é absorvida a gema se apresenta preta; se só certos comprimentos de onda são absorvidos, a gema terá a cor resultado da restante mistura espectral [3].

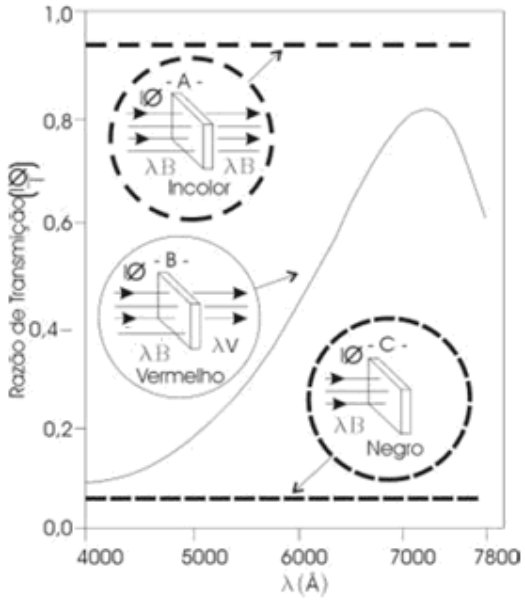


Figura 4.29 - Diagrama das Razões de Transmissão (IØ/ I) para diversos minerais onde incidem luz de cor branca (lB). No caso A, o mineral é incolor, em B o mineral é vermelho (lV) e em C o mineral é negro.[56]

Analiticamente, a intensidade de um raio de luz decresce ao atravessar um meio material qualquer, devido a parte da energia luminosa ser transformada em calor. Este efeito é denominado de absorção e é mais acentuada em alguns meios do que em outros. Assim pode-se definir o coeficiente de absorção relativa como a razão entre as intensidades da luz refractada (I) e incidente (IØ) em um mineral (IØ/I). Deste modo, a cor de um mineral transparente em uma secção delgada depende da absorção pelo mineral dos diferentes comprimentos de onda que compõe a luz branca incidente sobre a sua superfície. Um certo mineral que apresenta cor branca, ou é incolor, não absorve nenhuma cor específica (ou radiação visível), conforme mostra a ***Figura 4.29-A***. Ao contrário, se um mineral iluminado absorver todos os comprimentos de onda da luz branca nele incidente, o mineral mostrará cor

negra, como é o caso da ***Figura 4.29-C***. Da mesma forma, a absorção de algumas radiações, ou certos comprimentos de onda (λ) e transmissão de outras, fazem com que as cores dos minerais sejam aquelas transmitidas, conforme se observa na ***Figura 4.29-B***, onde o mineral transmite mais intensamente a cor vermelha.[56]

A causa da absorção é complexa, envolvendo, geralmente a presença de elementos químicos particulares e defeitos ou irregularidades na estrutura cristalina. Na maioria das gemas estes elementos metálicos (Fe, Mn, Ti, Cu, Cr, etc), são impurezas, em geral em quantidades diminutas. Essas gemas podem apresentar uma grande variedade de cores. Porque contém essas quantidades reduzidas de impurezas, a cor de algumas delas pode ser alterada, reforçada ou eliminada por aquecimento ou por irradiação com raios-γ ou raios-x [3]. Enquanto que em algumas gemas os elementos que originam a cor constituem parte essencial da composição química, isto significa que estas gemas possuem uma gama limitada de cores, geralmente tons de uma única cor. Estas cores são muito estáveis e impossível de alterar significativamente sem destruir o próprio mineral [10]. Desta forma, a cor observada para uma substância não é uma propriedade intrínseca sua, ou seja, se um mineral à luz do sol apresentar cor branca e for iluminado por uma luz azul, ele será azul; se for por uma luz amarela, ele será amarelo, pois estes serão os únicos comprimentos de onda disponíveis para serem transmitidos. Minerais coloridos quando forem iluminados por fontes monocromáticas, poderão se mostrarem negros se o comprimento de onda empregado for aquele que é absorvido por ele.

4.9.1. *Os elementos responsáveis pela coloração dos minerais de gemas*

As pedras transparentes, com certeza, não dão bandas de absorção. Antes de descrever os espectros individuais, apresentamos uma característica geral dos tipos de espectros e sua ligação com os iões dos metais responsáveis pela coloração dos minerais. Todos estes metais pertencem aos elementos de transição na Tabela Periódica: **Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co Ni, Cu**. Em alguns casos o **U** e alguns outros elementos podem aumentar o número das bandas de absorção, mas praticamente não influem sobre a cor (a cor do diamante está condicionada pelos defeitos na rede cristalina do mineral, em particular, pela presença dos átomos de **N** na rede de **C**).

A maioria das gemas não tem cor na forma pura, e a cor destas está condicionada pela presença na rede cristalina dos "rostos dos elementos - pintores" (Centros-F), a esta categoria pertencem quartzo, berilo, corundo, turmalina, topázio, espinela, zircão, e outros.

O **Cr** desempenha um grande papel na "pintura" das gemas. **Cr** ou óxido de **Cr** dão as melhores cores vermelha e verde nos minerais. As linhas de absorção, condicionadas pelo **Cr** são muito características e têm mesmas propriedades nas gemas vermelhas e verdes. Na parte vermelha do espectro observam-se duas linhas estreitas de intensidade máxima que formam um duplete na extremidade. Há também duas linhas na zona de cor de laranja do espectro e uma banda larga na zona central do espectro, quer dizer na zona verde amarela. A largura e intensidade desta banda determinam, de facto, a cor da gema. Observa-se também a absorção forte na parte violeta e as vezes na parte azul. O **Cr** geralmente entra na rede dos cristais, trocando uma quantidade pequena do **Al**, que é um dos componentes principais das gemas (a título de exemplo podemos citar o rubi, esmeralda, alexandrita), outro elemento de troca pode ser também o **Mn**. As cores condicionadas pelo **Cr** são limpas e ricas (intensas), pois as bandas e linhas de absorção são muito nítidas e as cores não absorvidas atravessam as gemas com intensidade máxima.

As cores condicionadas pelo **Fe** são lindas, embora sejam menos "saciadas", pois além de absorção das bandas principais, tem lugar absorção geral em quase todas as partes do espectro. O **Fe** tem dois tipos de espectros: o primeiro é condicionado por **FeO** (de valência 2) e o segundo por $\mathbf{Fe_2O_3}$ (de valência 3). Em geral o **Fe** dá as cores vermelha e verde, mas na espinela azul, a cor de tinta também está condicionada pelo **Fe**. As bandas do **Fe** ficam nas zonas verde e azul do espectro.

Os minerais que contém **Mn** têm as cores de rosa ou de laranja fraca. As bandas destes elementos ficam na parte azul do espectro, mas as mais intensas encontram-se na zona violeta, continuando-se à zona UV.

Os minerais que têm **Co** não se usam na joalharia. No vidro e espinela sintética que se usam para a imitação da safira, a cor é condicionada pela presença do **Co**. Os espectros destes minerais são muito característicos: têm três bandas largas intensas nas zonas amarela, verde e azul - verde.

Outros elementos não têm as bandas características, embora o **V** tenha única linha na parte azul do espectro e se usa na "pintura" do corundo artificial que pode ser confundido com alexandrita.

As bandas condicionadas por **U** encontram-se só no espectro de zircão. **U** dá um espectro muito especial com várias linhas nítidas e estreitas, uniformemente distribuidas pelo espectro, portanto pouco influem na cor [11].

4.9.2. Melhoramento de cor dos minerais de gemas

Algumas cores de gemas são preferidas em relação as outras. Deste modo, é razoável assumir que, mesmo a milhares de anos atrás as pessoas tentaram melhorar a aparência dos minerais de gema que extraíam usando os meios primitivos `a sua disposição. Os métodos foram melhorados com o desenvolvimento do comércio de gemas. O objectivo era de mudar a cor para uma mais desejada, melhorar o brilho ou mesmo mudar o carácter de uma gema particular, de modo a tornar-se mais preciosa. O tratamento era para ser levado a cabo de tal modo que os traços da mesma seriam difíceis de detectar. Alguns destes métodos tornaram-se muito largamente aceites no comércio de gemas, e hoje são considerados legítimos. Porém, deve-se repisar que de acordo com as regras éticas aceites, hoje, por muitos países e instituições gemológicas, obriga-se a descoberta de qualquer tratamento que o mineral de gema sofreu (outro a não ser por processo de corte regular e limpeza) [43].

As gemas são melhoradas pelos seguintes métodos:

- **Tratamento Térmico:** mudança de cor como resultado da destruição dos centros coloridos da gema. Em tais casos os elementos de cor da gema sofrem uma mudança drástica, que por sua vez pode alterar a cor total da gema. Geralmente, a cor torna-se mais clara ou desaparece completamente,
- **Materiais de impregnação (óleo ou cera, várias coberturas, tratamento de difusão):** o tratamento mais comum é levado a cabo introduzindo vários materiais na gema ou sua cobertura, para fazer fendas ou poros desaparecer, ou para melhorar a cor e brilho. Há um número dos tipos principais de impregnação:
  a) Olear com óleo claro ou cera;
  b) Olear com óleo colorido;
  c) Introdução de plástico, vidro ou outros materiais;
  d) Cobertura com uma camada de tinta, laca, plástico ou material sintético;
  e) Difusão de cor.
- **Tratamento por irradiação:** é confinado para um pequeno grupo de gemas, este processo pode ocorrer, por bombardeamento ou exposição, numa variedade de caminhos:
  1. Raios X;
  2. Raios UV;
  3. Raios gama.

4.10. Minerais de Gemas em Estudo

4.10.1. Água-marinha

A água-marinha é uma variedade azul-verde da classe dos **Silicatos** e subclasse-ciclossilicatos do **Berilo** ($\mathbf{Be_3Al_2Si_6O_{18}}$), a de melhor qualidade possui uma cor azul. Os cristais de água-marinha são frequentemente grandes e sem falhas; podem ser estriados, assemelhando-os a cilindros com arestas, e cónicos devido à erosão; pertencem ao sistema cristalino hexagonal; dureza de Mohs 7,5; peso específico de 2,69. O brilho é vitreo e a clivagem é basal fraca. A água-marinha é dicróica em azul ou incolor. O espectro de absorção é fraco e não tem luminescência. Os melhores cristais de águas-marinhas são desagregados dos pegmatitos e surgem em depósitos de aluvião numa camada de cascalho castanho.[25]

Figura 4.30 - *Variedades de Águas-marinhas.[58]*

4.10.2. Granadas

A granada é o nome de uma classe de silicatos com diversas quantidades de magnésio, ferro ou cálcio ($\mathbf{XAl_2Si_3O_{12}}$), em que $\mathbf{X = Ca_3}$, $\mathbf{Mg_3}$, $\mathbf{Fe_3}$, $\mathbf{Mn_3}$, $\mathbf{Fe_2}$, $\mathbf{Cr_2}$. Podem dividir-se em duas séries, a ***piropo-almandina- espessartite*** e a ***uvarovite-grossularite-andradite***. Dentro de cada série há uma contínua transformação das características físicas e ópticas de um extremo ao outro. Pertencem ao sistema cristalino isométrico; dureza de Mohs 6,5-7,2; peso específico de 3-4. A sua ocorrência é comum em muitas rochas, alguns dos melhores cristais surgem em xisto, serpentinas, calcários metamórficos, gneisses e pegmatitos graníticos. Apresenta uma variedade de cores desde o vermelho vivo a vermelho amarelado pálido, preto, verde vivo ou verde escuro (***Grossularite***, que varia de verde pálido a âmbar e a castanho carregado; ***Piropo***, de vermelho de sangue a preto; ***Almandina***, que vai de vermelho acastanhado a preto; ***Espessartite***, que varia de vermelho escuro a vermelho acastanhado; ***Andradite***, que existe em

tons de vermelho, amarelo, verde, castanho e preto; ***Uvarovite***, de cor verde-esmeralda); é transparente a translúcido e opaca.[25]

Almandina, Piropo, Espessartite, Grossularite, Andradite, Uvarovite.

Figura 4.31 - *Variedades de Granadas.[58]*

4.10.3. Turmalinas

Este mineral possui talvez a maior gama de cores de qualquer gema e muitas das diferentes cores têm os seus próprios nomes, daí a sua complexa formula química, é da classe dos silicatos **$Na(Mg,Fe,Mn,Li,Al)_3Al(Si_6O_{18}).(BO_3)_3.(OH,F)_4$**. Os cristais são geralmente prismas longos e compridos, estriados na vertical. Pertencem ao sistema cristalino hexagonal; dureza de Mohs 7-7,5; peso específico de 3,02-3,26. Os índices de refracção são diferentes para cada cor, a birrrefringência é alta; o dicroísmo é mais obvio em gemas escuras com dois tons da cor base visíveis nas principais direcções ópticas. Apresenta uma variedade de cores preto, castanho escuro, violeta, verde e cor-de-rosa; formas bicolores (vermelhos, rosa e verde). A sua ocorrência é comum em muitas xistos, pegmatitos, granitos e gneisses. As diversas variedades incluem vermelho e cor-de-rosa (**rubilite**), azul (**indicolite**), incolor (**dravite**), violeta (**sibertite**), amarelo, verde e preto (**turmalina preta**).[25]

Figura 4.32 - *Variedades de Turmalinas.[58]*

5 – Equipamento e Metodologia

As metodologias da gemologia moderna pressupõem a aplicação dum complexo de testes diagonósticos à gema investigada para determinar sua natureza com maior exactidão. Tomando como base os procedimento e ensaios realizados nos principais Laboratórios Gemológicos de renome internacional (GIA, Gemolological Institute of America; AGS, American Gem Society; Scan.D.N., Scandinavian Diamond Nomenclature; IDC, International Diamond Council; U.K., United Kingdom; IBGM, Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos; GAGB, Gemmological Association of Great Britain; CGA, Canadian Gemmlogical Association), apresentados na Tabela 5.1, foi elaborado, no LG-UEM, um esquema de diagnóstico, avaliação e sistematização baseado em todo potencial técnico-científico do laboratório. Segundo este esquema a gema a investigar é submetida a uma série dos métodos independentes de diagnóstico e o conjunto dos dados obtidos são processados no software, daí tirando conclusões do tipo e natureza do material em estudo. O esquema elaborado é apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.1: Características da Gema, procedimentos e ensaios que se realizam nos principais Laboratórios Gemológicos de renome internacional.

Características da Gema	**Procedimentos e Ensaios**
Cor	Macroscopia: transparência(diafaneidade), brilho, fratura, clivagem, traço e dureza(Mohs).
Estilo e forma de lapidação (p/ gema lapidada) ou menção do estado (p/ gema bruta).	Densitometria: peso específico
Peso, expresso em quilates métricos (ct), obtido através de uma balança eletrônica pré-calibrada, com precisão de duas casas decimais (centésimo de quilate).	Refratometria: caráter óptico, sinal óptico, índice(s) de refração e birrefringência.
Dimensões, expressas em milímetros (mm), obtidas através de um micrômetro, com precisão de duas casas decimais (centésimo de milímetro).	Dicroscopia: pleocroísmo (intensidade e matizes ou tons).
Dureza - Escala de dureza relativa e absoluta	Espectroscopia: espectro de absorção na região da luz visível.
Clivagem e fratura	Absorção seletiva: reação aos filtros de luz especiais.
Transparência	Fluoroscopia: fluorescência à luz ultravioleta de ondas longas e curtas: matiz(es) e intensidade.
Mudança de cor	Microscopia: inclusões, estruturas e características externas, mencionando seu caráter diagnóstico, se for o caso.
Inclusões	Fotomicrografia ou fotografia digitalizada

Tabela 5.2: Esquema de Procedimento geral de Estudo, Diagnóstico, Avaliação e Sistematização de minerais de gemas, no LG-UEM.

<table>
<tr><td colspan="6">Estudo da aparência externa</td></tr>
<tr><td colspan="3">Gemas não lapidadas</td><td colspan="3">Gemas lapidadas</td></tr>
<tr><td colspan="3">Cor, propriedades ópticas, brilho, propriedades de superfície, inclusões, transparência, dureza relativa.</td><td colspan="3">Cor, propriedades ópticas, brilho, propriedades de superfície, inclusões, imersão, tipo de lapidação, polimento, simetria, proporções.</td></tr>
<tr><td colspan="3">Índice de refracção.</td><td colspan="3">Índice de refracção.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Refracção simples.</td><td>Dupla refracção</td><td rowspan="2">Dupla refracção anormal</td><td rowspan="2">Refracção simples</td><td>Dupla refracção</td></tr>
<tr><td>Dicroísmo</td><td>Dicroísmo</td></tr>
<tr><td colspan="3">Peso específico</td><td colspan="3">Peso específico</td></tr>
<tr><td colspan="6">Espectros de transmissão</td></tr>
<tr><td colspan="6">Estudo de várias características físicas dos cristais de jóias:
• coeficiente de absorção de raios X;
• poder de reflexão dos cristais;
• luminescência sob acção de radiação UV (SW e LW), raios X e catódicos;
• fenómenos de interferência de radiação monocromática do laser nos cristais;
• inclusões e irregularidades típicas, outros indícios característicos das gemas.</td></tr>
<tr><td colspan="6">Diagnóstico final</td></tr>
<tr><td colspan="6">Avaliação e certificação das amostras</td></tr>
<tr><td colspan="6">Tratamento e estudo da informação obtida</td></tr>
<tr><td colspan="6">Armazenamento dos dados para estudo científico e elaboração dum Atlas de minerais de gemas de Moçambique</td></tr>
</table>

Este procedimento apresenta uma informação relativamente nova para pedras de gemas locais e bastante ampla, que deve ser acumulada e sistematizada. É que no tempo actual não existem trabalhos onde se fazem alguns estudos científicos sistematizados de minerais de gemas de Moçambique.

O presente projecto tem como objecto estudo gemológico dos minerais de gemas nas regiões de maior ocorrência em Moçambique, nas províncias de Manica, Tete, Zambézia, Nampula e Niassa. Porque as gemas abrangem material orgânico e inorgânico, para este estudo vai-se tratar apenas dos minerais de gemas, e nesta primeira fase de: águas-marinhas, turmalinas e granadas.

Foi efectuado um levantamento bibliográfico de referências que existem nos acervos bibliográficos do **Departamento de Geologia da UEM**, do **Museu Nacional de Geologia,** da **Direcção Nacional de Geologia** e da **Direcção Nacional de Minas** sobre minerais de gemas em Moçambique. Nessa fase, toda a informação relevante sobre tipo, localização e quantidade foi colectada e introduzida numa base de dados.

A partir da informação recolhida foi organizada uma visita ao campo, na **província do Niassa, distritos de Cuamba e Nipepe**, para a colecta de amostras e o geo-referenciamento das respectivas lavras. Para uma boa compreensão das géneses dos minerais de gemas, foi

recolhido todo o tipo de informação geológica relevante. Em relação ao Tratamento Térmico da Turmalina Escura Local, para melhorar a sua cor e tonalidade, foi acumulado uma variedade de amostras de turmalinas escuras, de diferentes cores e tonalidades, provenientes de diferentes regiões do país.

Para se alcançar os objectivos estabelecidos foram utilizados diferentes instrumentos que se encontram no **Laboratório Gemológico do Departamento de Física da UEM** (refractómetro, dicroscópio, polariscópio, lâmpada UV, microscópios ópticos e gemológico conectado ao computador via câmara digital, dispositivo de raios X, espectrómetro de absorção de luz visível, etc.) e algumas amostras foram preparadas no **Departamento de Geologia da UEM** (sala de preparação de amostras e laminação).

5.1. Lupas de Amplificação

A lupa é uma lente que pode ter um dos seguintes poderes de amplificação: 6X, 10X, 14X, 20X ou 24X. Com ela, a estrutura interior da gema pode ser observada com o fim da sua determinação. As lentes usadas no LG têm propriedades especiais que não são encontradas nas lentes comuns. Estas têm correcções para várias aberrações de cor. Para tal, uma lente adicional é "cimentada" `as outras. Esta lente causa todo o campo de visão localizado no plano focal. Deste modo o resultado final é um sistema de três lentes juntas e chamadas de **triplete**, que está corrigido para todos os tipos de aberrações esféricas e cromáticas.

Figura 5.1 - *Inclusões típicos no interior dumCristal de turmalina, observados por meio da lupa de amplificação 10X.*

Sabe-se, que quanto maior for a força da lente mais próximo será a distância focal. Portanto, quanto maior for a força da lente, menor será a área que pode ser investigada. Isto torna difícil a descoberta das pequenas inclusões. É preferível encontrar primeiro as imperfeições sob uma amplificação de 10X, e em seguida examiná-la bem sob uma amplificação mais alta. Na avaliação da qualidade e selecção usa-se uma gradação elaborada

pelas instituições internacionais especializadas [3]. As inclusões são analisadas segundo: **Tamanho** (quanto menor, melhor); **Quantidade** (quanto menos, melhor); **Contraste (cor e relevo)** (quanto menor, melhor); **Localização** (quanto mais escondido, melhor); **Natureza** (quanto menos impactar na durabilidade, melhor). As categorias de qualidade determinam-se pelos critéros apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Critérios de graduação de pureza (linpeza) nas Gemas.

GRAU DE PUREZA	DESCRIÇÃO DO GRAU DE PUREZA
SI	Sem inclusões e sem imperfeições externas quando examinada sob a luz difusa, com lupa 10 x.
IL	Inclusões leves ou muito pequenas quando examinada com lupa 10 x. Pequenas imperfeições externas. A categoria IL é descrita como muito próxima da categoria anterior, SI.
IM	Inclusões moderadas que podem ser vistas facilmente com lupa 10 x e com pouca dificuldade a olho nu. Pequenas imperfeições externas. Nesta categoria, as inclusões ou imperfeições não podem afetar a mesa da gema.
IA	Inclusões acentuadas, facilmente vistas a olho nu. Imperfeições externas também são facilmente encontradas.
IE	Inclusões excessivas. Esta categoria envolve todas as gemas que apresentam muitas inclusões e imperfeições externas, afetando seriamente a beleza, a transparência e a durabilidade do material. As gemas desta categoria são quase sempre translúcidas ou opacas.

Estabelecidos pela **ISO –** Internacional Organization for Standardization.

5.2. Fonte de luz Halogéneo e Fibras Ópticas

Fibras ópticas (**F.O.**) são dispositivos de vidro ou de materiais poliméricos usados para a transmissão efeciente da luz entre dois pontos de espaço. O processo de transmissão obedece as leis da óptica geométrica**.** Os diâmetros das fibras podem variar desde 2 µm até cerca de 6 mm, mas raras vezes são utilizados fibras de diâmetro inferior a 10 µm. O espectro de radiação da luz halogéneo maximalmente aproxima-se do espectro da luz natural que se exige na avaliação e gradação das cores das gemas. A transmissão da luz pela fibra segue um princípio único, independentemente do material usado ou da aplicação: é lançado um feixe de luz numa extremidade da fibra e, pelas características ópticas do meio (fibra), esse feixe percorre a fibra por meio de reflexões sucessivas.

As fibras ópticas são constituídas basicamente de materiais dieléctricos (isolantes) que, permitem total imunidade a interferências electromagnética; uma região cilíndrica

composta de uma região central, denominada núcleo, por onde passa a luz; e uma região periférica denominada casca que envolve o núcleo. O índice de refracção do material que compõe o núcleo é maior do que o índice de refracção do material que compõe a casca.

Veremos agora a estrutura do cabo de fibra óptica (ver ***Figura 5.2***).

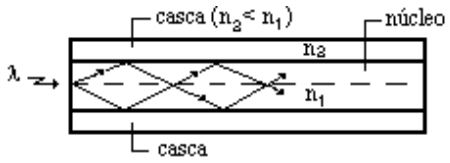


Figura 5.2 - *Estrutura da fibra óptica.*

- **Núcleo**: O núcleo é um fino filamento de vidro ou plástico, por onde passa a luz. Quanto maior o diâmetro do núcleo mais luz ele pode conduzir.
- **Casca**: Camada que reveste o núcleo. Por possuir índice de refracção menor que o núcleo ela impede que a luz seja refractada, permitindo assim que a luz chegue ao dispositivo receptor.
- **Capa**: Camada de plástico que envolve o núcleo e a casca, protegendo-os contra choques mecânicos e excesso de curvatura.

Obs.: As fibras ópticas transmitem luz com um comprimento de onda invisível ao olho humano. Portanto, nunca devemos olhar directamente para uma fibra óptica enquanto ela estiver transmitindo, pois corremos um risco sério de ficarmos cego.

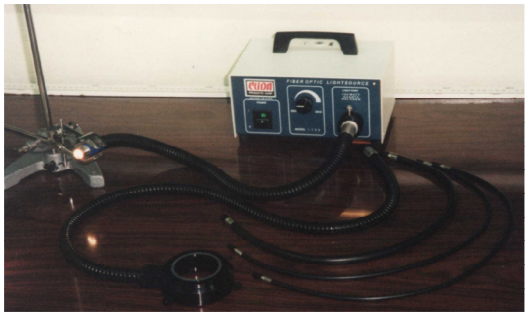


Figura 5.3 - *Fonte de luz halogéneo e Fibras ópticas de diferentes formas e diâmetro (foto do autor, 2010)*

5.3. Microscópios Binocular, Trinocular e Gemológico

O uso do microscópio é de grande importância nas investigações gemológicas. Os microscópios no LG estão designados para utilizar uma variedade de técnicas de iluminação, video e fotografia. (iluminação de campo escuro, luz polarizada, luz transmitida, iluminação obliqua, iluminação de ponto de alfinete, iluminação UV, etc).

O ***microscópio trinocular*** possui um sistema óptico básico, um poder de amplificação de 20X e 40X, adicionando a possibilidade de aceitar equipamento de video ou fotográfico via tubo extra e o seu sistema óptico acompanhante. Um botão converte o ponto de visão para foto/video. O sistema microscópio inclui estereoscópio trinocular com uma obidiência exacta na plataforma em relevo e uma base laboratorial que permite para o palco superior de ilumiação incidente ou palco inferior de iluminação transmitida, ou ambas em combinação [3].

O ***microscópio Binocular Nikon***, modelo L-Ke, é usado em várias combinações com diferentes objectivas, oculares, condensadores, tubos oculares e plataformas. Consiste de iluminação base incorporado, tubo ocular binocular e uma plataforma rectangular mecânica. Os condensadores são designados para concentrar o feixe de luz para melhor iluminação do campo de imagem e profundidade dos focos. Ele tem amplificação que vai de 40X até 1000X. Este microscópio permite a obtenção conveniente e excelente de fotomicrografia pela adição de uma câmara conectada na ocular do microscópio [3].

(a)

(b)

Figura 5.4 - *Sistema para visualizar inclusões e obténção das suas fotomicrografias:* ***(a) -*** *microscópio Binocular (esquerdo), monitor(centro) e microscópio Trinocular video zoom (direito);* ***(b) –*** *microscópio Gemológico. (foto do autor, 2010)*

O ***microscópio Gemológico Motic***, modelo GM-168, é usado em várias combinações com diferentes objectivas, oculares, condensadores, tubos oculares e plataformas. Este tipo de microscópio difere dos outros por consistir de uma variedade de técnicas de iluminação (iluminação de campo escuro, luz polarizada, luz transmitida, iluminação obliqua, iluminação de campo difuso, iluminação de ponto de alfinete, iluminação UV, etc), para serem usadas, cada uma, especificamente na observação de cada tipo de inclusão nos minerais de gemas.

Técnicas de iluminação

- campo escuro, útil para inclusões sólidas e linhas de crescimento;
- luz polarizada,

- campo claro (luz transmitida), útil para inclusões transparentes e zonas de cor;
- iluminação Obliqua (fibra óptica), útil para feições superficiais;
- campo difuso (luz sombreada), útil para linhas de crescimento;

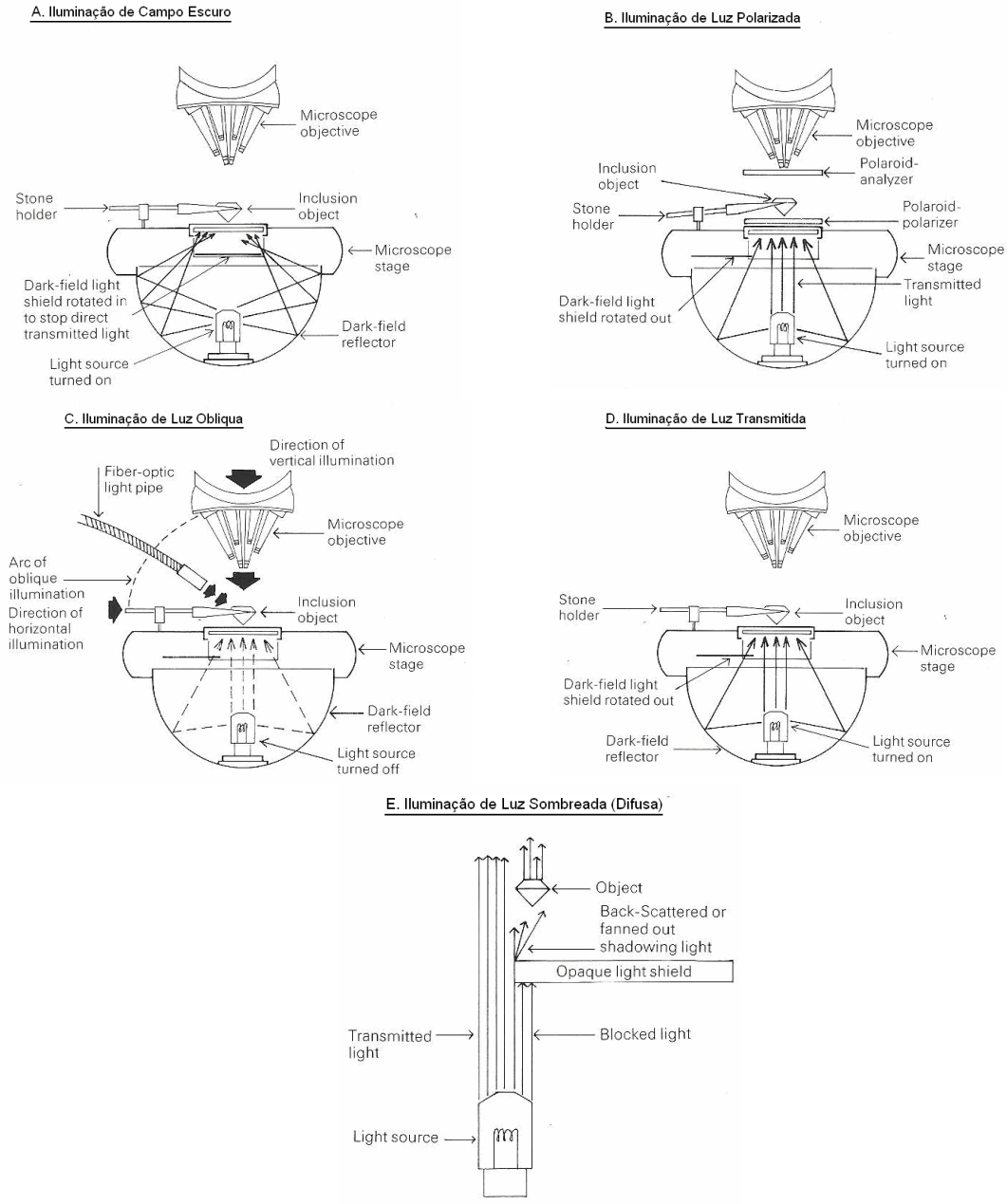


Figura 5.5 - *Técnicas de iluminação de um Miccroscópio Gemológico.[5]*

Actualmente, nos LG's as gemas naturais e sintéticas identificam-se, também, pelas suas inclusões características. Por isso, aproveita-se a metodologia de uso dos microscópios para obtenção das fotografias de inclusões, as chamadas **fotomicrografias.** Estas requerem técnicas combinadas de microscopia, fotografia e várias técnicas especializadas de iluminação que ajudam a captar as imagens do interior de uma gema no filme. Estas, quando

propriamente identificadas e com catálogos bem feitos servem em LG como uma biblioteca de referência visual que ajudam grandemente na rotina de identificação das gemas e na determinação das suas origens especialmente naturais ou sintéticas. Por exemplo, se uma gema é refacetada (relapidada), desde momento que as inclusões sejam profundas dentro da gema e não na superfície, a gema pode ser identificada através das fotomicrografias anteriores [3].

A experiência mostrou que as amplificações mais práticas para a investigação das amostras estão no diapasão de 25X÷70X. As amplificações mais baixas são vantajosas, pois consegue-se maior campo de observação e imagens mais nítidas na profundidade (interior) do cristal. Os microscópios usam-se também para estudo da superfície da amostra, em particular, do caracter das rachas e quebras ou avaliação da qualidade do polimento das facetas nas pedras lapidadas.[3]

5.4. Refractómetro Dialex de Rayner

Este aparelho é usado para medir o índice de refracção (**IR**) das pedras. Os princípios de refracção interna total de luz e do ângulo crítico são aplicaveis neste instrumento. O ângulo crítico é a base para todas as medidas de IR da pedra.

O Refractómetro é só direccionado para testar pedras lapidadas ou pelo menos pedras com uma face lisa. Similarmente, o teste usando este instrumento é limitado ao IR do hemisferio (prisma) e do líquido de contacto (em ordem a atingir um contacto óptico perfeito, uma solução especial chamada de líquido de contacto ou solução de IR deve ser usado. Esta solução tem um IR de 1,81, mais baixo do que o do hemisfero (1,962), isto permite uma leitura de calibração a ser obtida no instrumento). Portanto, num refractómetro regular, é impossível de analisar pedras que tenham IR mais alto que 1,80.

Como foi dito antes, em todas as pedras transparentes, com a excepção daquelas que se cristalizam no sistema cúbico, observa-se o fenómeno de dupla refracção (birefringência)**.** É que nestes cristais a onda electromagnética incidente divide-se em duas ondas linearmente polarizadas, para as quais os índices de refracção são diferentes. Uma vez que os intervalos entre os valores dos índices de refracção são pequenos, torna-se importante avaliar os erros sistemáticos e corrigir a sua contribuição. As fontes principais dos erros sistemáticos neste caso, acham-se seguintes:

1. Dilatação do cilíndro da escala em função da temperatura do ambiente. A avaliação mostra que o erro sistemático relacionado com este efeito, nas nossas condições, é da ordem $\sigma_d = 0{,}001$ (achando que o material do cilindro é ferro), o coeficiente de dilatação linear é $\alpha = 11 \cdot 10^{-6} \cdot 1\ /^{o}C$, daqui vê-se que no aquecimento `a $T = 10^{o}$ C o aumento do comprimento da escala do cilindro pode ser:

$$\mathbf{\Delta l = \alpha \, x \, T,} \qquad \mathbf{(5.1)}$$

$$\Delta l = 0{,}001$$

onde T é temperatura de aquecimento e o Δl corresponde ao valor de sigma de dilatação para o nosso caso.

2. Erro sistemático de leitura do valor **n** na escala do refractómetro, é que a precisão da escala do aparelho, conforme as suas divisões, contribui com 0,01. Para as medições mais exactas, como exige a experiência, temos que avaliar, `a vista, o dígito seguinte. Sabe-se que uma leitura a vista mais ou menos certa corresponde á 0,2 parte de divisão da escala. por isso, a contribuição deste erro foi avaliado como sendo $\sigma_l = 0{,}002$. Deste modo, o nível dos erros sitemáticos na medição do índice de de refracção, por meio de refractómetro avalia-se com [3]:

$$\sigma_n = \sqrt{\sigma_d^{\,2} + \sigma_l^{\,2}} \approx 0{,}002\,, \qquad \mathbf{(5.2)}$$

Quanto aos erros casuais σ_{cas}, nas medições, o número das medições K deve ser tal que satisfaça `a condição:

$$\sigma_{cas} \le \sigma_{sist.} \quad , \quad onde \quad \sigma_{cas} = \sqrt{\frac{\sum (\bar{n} - n_i)^2}{K - 1}}\,, \qquad \mathbf{(5.3)}$$

Algumas medições foram obtidas com uso do filtro de polarização para aumentar o contraste entre a zona sombreada e a zona iluminada. No estudo das amostras não lapidadas, foi necessário, no mínimo, produzir uma faceta e polir para que fosse possível a realização das medições dos índices de refracção.[3]

Figura 5.6 - *Refractómetro de Rayner com uma lâmpada amarela acoplada, líquido de contacto(IR=1,79) e um polarizado. (foto do autor, 2010)*

5.5. Polariscópio

O polariscópio usado no LG é constituído por dois filtros circulares polarizados, um directamente em cima do outro, com uma fonte de luz não polarizada que serve para iluminação da amostra. O filtro superior pode ser rodado para obter-se a "polarização cruzada" (posição escura dos dois filtros sem a amostra ente ambos). Este está geralmente cerca de 3 polegadas acima do filtro abaixo, que é estacionário.

Figura 5.7 - *Polariscópio de Rayner*
com a célula de imersão acoplada.. (foto do autor, 2010)

Se entre os filtros, de "polarização cruzada", coloca-se uma amostra amorfa, por exemplo vidro, na rotação desta amostra não se manifesta nenhum efeito. No caso de um cristal com dupla refracção, uma rotação completa (360^o) entre os filtros polarizados permite encontrar 4 posições de escurecimento e 4 posições de iluminação máxima. O polariscópio, como regra, usa-se para obtenção duma informação suplementar, qualitativa que permite, `as vezes, confirmar os resultados de diagnósticos quantitativos realizados nos minerais de gema.

5.6. Dispositivo de Pesagem Hidrostática

Para determinar o peso específico (**PE**) das amostras no laboratório usa-se um dispositivo de pesagem hidrostática. PE é um número que expressa a relação entre o peso da substância comparada com o peso de um volume igual de água para `a 4^o C. A determinação da PE da pedra é um passo importante na identificação final do material.

O **método hidrostático** é baseado no principio de Arquimedes – "um corpo quando mergulhado num fluido, perde peso igual ao peso do volume do fluido deslocado". Isto significa que o peso do corpo na água, por exemplo, será menos que o seu peso no ar. O seu

peso no ar menos o seu peso na água,`a 4^{o} C, é igual ao peso do volume da água deslocada . Para encontrar a PE, derivamos a seguinte formula:

$$PE = \frac{P_{ar}}{P_{ar} - P_{liq}} . \rho_{liq} \, , \qquad \textbf{(5.4)}$$

onde, P_{ar} é peso da pedra no ar; P_{liq} é peso da pedra no líquido; ρ_{liq} é densidade do líquido.

Pesar no ar não constitui problema, mas para pesar não é necessário usar um dispositivo especial montado numa balança electrónica. Na pesagem na água a amostra é colocada num suporte de arame metálico muito fino, para evitar o aparecimento das bolhas de ar na superfície e diminuir a influência da tensão superficial do líquido no humidecimento do suporte. A precisão da balança digital, que constitui a base do dispositivo, $\sigma_b \approx 10^{-4}$, praticamente dá uma contribuição desprezível, nos erros sistemáticos, em comparação com as outras fontes de erros.

Para aumentar a precisão das medições, e consequentemente a precisão do diagnóstico das amostras foi usado uma balança analítica digital na determinação do PE. As principais fontes dos erros sistemáticos identificados e calculados neste método são:

1. influência da tensão superficial da água sobre o arame do suporte, que para as condições de medições contribui com o seguinte valor: $\sigma_t \approx 0{,}001$ g;
2. dependência da variação da densidade da água em função da temperatura. Este efeito foi atenuado pelo aquecimento da água destilada para deminuir a viscosidade, e foi avaliado com o seguinte valor: $\sigma_a \approx 0{,}002$ g;
3. o erro sitemático da balança é: $\sigma_b \approx 0{,}0001$ g.

Tomando em comta os erros sistemáticos parciais foi avaliado o erro sistemático resultante σ_r como sendo [3]:

$$\boldsymbol{\sigma_r = [\sigma_t^2 + \sigma_a^2 + \sigma_b^2]^{1/2} \approx 0{,}002 \text{ g},} \qquad \textbf{(5.5)}$$

Figura 5.8 - *Dispositivo de pesagem hidrostática, balança analítica digital. (foto do autor, 2010)*

5.7. Lâmpada de Radiação UV(SW/LW)

No LG, a Lâmpada UV é usada para revelar a presença ou ausência de luminescência nas gemas. As vezes, serve para identificação das gemas e inclusive como detector de alguns tipos de tratamentos. A Luminescência refere-se `a reacção da cor produzida pela gema quando exposta `a radiação – uma cor vista só quando a gema é observada sobre a radiação.

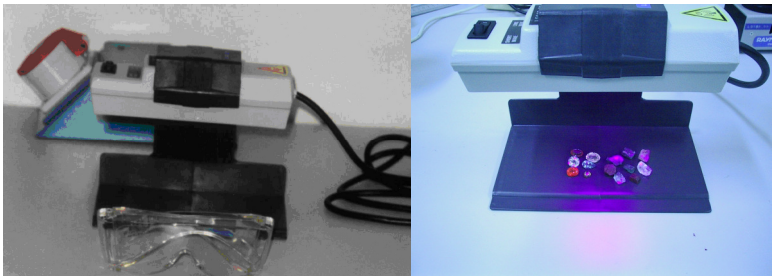


Figura 5.9 - *Lâmpada UV de curtos e longos comprimentos de onda.. (foto do autor, 2010)*

Ao observar gemas com luz UV, num campo escuro, é possível ver diferentes reacções dependendo do tipo de gema e, em alguns casos, determinar se foi ou não tratada. No laboratório usa-se uma lâmpada que produz separadamente ambas radiações, de curto (λ_s=253,7 nm) e longo (λ_l=365 nm) comprimentos de onda, e de intensidade adequada a vários tipos de gemas. A análise dos resultados obtidos com o uso da radiação UV permite confirmar o complexo dos diagnósticos, quantitativo, realizados nos outros aparelhos.[3]

5.8. Dicroscópio de RAYNER

É um dos mais importantes instrumentos gemológicos portateis, destinado para diagnóstico qualitativo dos minerais de gemas. Olhando dentro do dicroscópio tendo justamente o instrumento acima da luz, sem nenhuma gema ou pedaço de gema, vê-se um par de janelas rectangulares no ponto oposto. O dicroscópio é constituido por um tubo com uma lente em uma das extremidades e com janela na outra. Entre as extremidades é fixado um pedaço de calcite com alta dupla refracção. Ela cria duas imagens das janelas, observados através da ocular. A luz dessas imagens conjugadas oscila em planos diferentes e mutuamente perpendiculares, por isso, observam-se cores diferentes ou mesma cor mas de tonalidades diferentes (dicroismo).

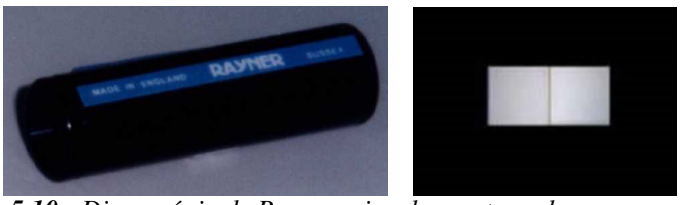


Figura 5.10 - *Dicroscópio de Rayner e janelas rectangulares numa das extremidades. (foto do autor, 2010)*

No laboratório, o dicroscópio é usado só para o estudo das gemas coloridas transparentes. Este providência rápidos caminhos para diferenciar gemas transparentes de alguma cor a partir de uma outra. Quando gemas coloridas são examinadas com o dicroscópio, algumas mostrarão mesma cor em ambas janelas rectangulares enquanto outras gemas mostrarão duas cores, ou dois tons diferentes ou tonalidade da mesma cor. Este fenómeno, bem conhecido na física, tem o nome de dicroismo. Se observarmos uma gema com forte refracção dupla, através do dicroscópio, vê-se de facto duas imagens ao mesmo tempo. Gemas de refracção simples são aquelas que sempre mostrarão a mesma cor em ambas janelas rectangulares do dicroscópio.

i) No uso de Dicroscópio a rotação da amostra é um factor importante para determinação do seu dicroismo. Em todas as gemas de dupla refracção existe uma ou duas direcções, conhecidas como eixos ópticos, ao longo dos quais não há nenhum dicroismo. Entretanto, este fenómeno pode não ser observado em outras direcções, se os planos de oscilações das ondas electromagnéticas das imagens da janela casualmente encontram-se sob ângulo de 45^{o} em relação a direcção da luz que sai da pedra.

ii) Na observação do dicroismo é melhor usar a luz natural e a pedra deve ser rodada para conseguir o melhor efeito. O diagnóstico só por meio do Dicroscópio não se apresenta ser seguro e o método dado deve ser usado em conjunto com os outros independentes.[3]

5.9. Lapís de Determinação de Dureza Relativa

Dureza relativa é grau de resistência que uma superfície de um mineral oferece ao ser riscado. A dureza é avaliada, geralmente, pela escala de Mohs, que definiu-a como sendo a resistência dum mineral quando aranhado com uma ponta do objecto testado. Esta escala, consiste de 10 minerais tomados como padrão, cujas designações e respectivas durezas são: Talco(1), Gesso(2), Calcite(3), Flourite(4), Apatite(5), Ortoclásio(6), Quartzo(7), Topázio(8), Corundo(9) e Diamante(10). Cada mineral nesta série arranha o anterior, e pode ser arranhado pelos seguintes. Minerais de igual dureza não se arranham. Por aplicação da escala da dureza de Mohs, a dureza de todas as gemas pode ser determinada. Gemas com dureza de arranhão 1 e 2 são fracas, de 3 até 6 duras médias e acima de 6 duras. Algumas gemas apresentam

anisotropia de dureza em diferentes superfícies e diferentes direcções. Na escala de Mohs, o aumento da dureza dentro dela difere substancialmente como pode ser visto na ***Figura 5.12***. [3]

Figura 5.11 - *Lápis de testagem de dureza na escala de Mohs, usados no Laboratório (foto do autor, 2010).*

Dureza	Mineral
1	Talc ($Magnésio_3Silicone_4O_{10}(OH)_2$)
2	Gypsum ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)
3	Calcite ($CaCO_3$)
4	Fluorite (CaF_2)
5	Apatite ($CA_5(PO_4)_3(OH\text{-}, Cl\text{-}, f)$)
6	Orthoclase ($KAlSi_3O_8$)
7	Quartzo (SiO_2)
8	Topaz ($Al_2SiO_4(OH\text{-}, f)_2$)
9	Corindo (Al_2O_3)
10	Diamante (C)

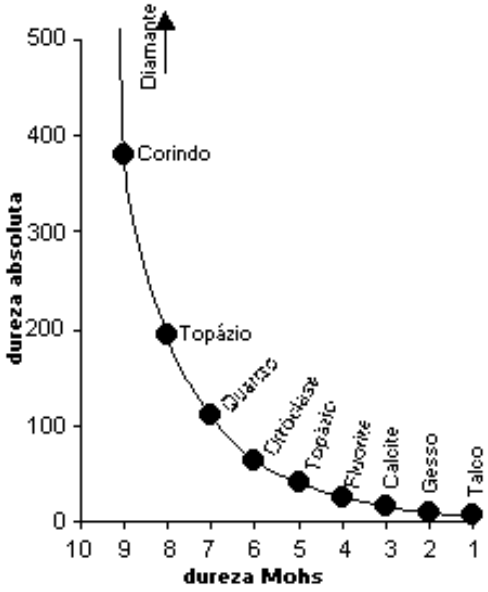


Figura 5.12 – *Tabela e representação gráfica da Escala de Dureza de Mohs.*

.

6 –Tratamento Térmico da Turmalina Escura Local

6.1. Anotação do Trabalho

Considera-se a análise estatística dos resultados experimentais dum ciclo de estudos, relacionados com o melhoramento de cor da turmalina escura moçambicana. São representados os métodos de avaliação quantitativa das mudanças das características ópticas das gemas no seu tratamento térmico. Metodologia elaborada, resoluções tecnológicas e os resultados obtidos podem ser utilizados no nível industrial. O trabalho foi realizado no Laboratório Gemológico do Departamento de Física da Universidade Eduardo Mondlane (Maputo, Moçambique).

6.2. Introdução

A cor é a mais importante característica das gemas na sua avaliação. Segundo Catálogos internacionais de avaliação do custo das gemas, a contribuição da cor da pedra na formação do seu preço constitui, geralmente, cerca de 60% [3].

As cores das pedras preciosas podem diferir por três parâmetros principais: ***tonalidade***, ***coloração*** e ***intensidade***. A tonalidade compreende-se como o grau de luminosidade que nas extremidades da sua escala se aproxima à branca de um lado, e à preta por outro. A coloração consiste em tal particularidade da pedra, pela qual ela pode ser descrita como, por exemplo, azul, verde ou vermelha. No termo intensidade trata-se da luminosidade da cor, isto é, do grau com que esta difere da cor cinzenta da mesma tonalidade.

A transparência duma gema é uma função da composição e quantidade de luz transmitida através do seu volume, da estrutura do cristal e "obstáculos", por exemplo, pequenas inclusões ou outros defeitos que a luz encontra na sua passagem. Se a luz atravessa o cristal sem absorção e sem perturbações quaisquer, este pode ser classificado como. A luz pode passar uma amostra sem nenhuma perturbação, porém ao ser, por exemplo, absorvida parcialmente pelo cristal, neste caso é classificado como semitransparente.

A avaliação do grau de tonalidade das gemas faz-se por uma escala especial (***Figura 6.1***), graduada de 0, para pedras sem cor, até 100 para as opacas. O diapazão sombreado de 60 á 70 nesta escala, corresponde à tonalidade óptima para a maioria das pedras coloridas [3].

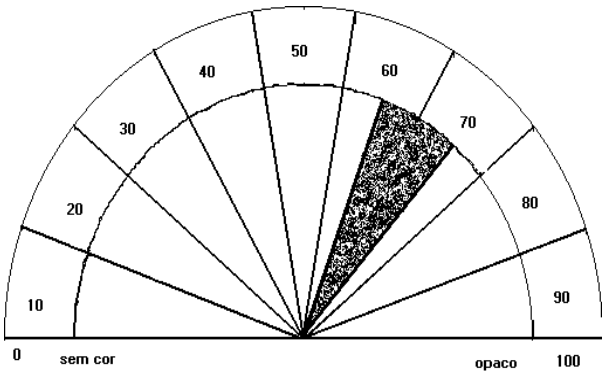


Figura 6.1 - *Escala de graduação de tonalidades das gemas.*

A ampla variedade de cores da turmalina está relacionada com mais de 15 factores da natureza físico-química, em particular com absorção por ressonância de uma parte da luz branca que atravessa o cristal e fenómenos de vibração e rotação das moléculas de água na rede cristalina [3]. A causa de absorção envolve, geralmente, a presença de alguns elementos químicos particulares, impurezas, tais como Fe^{3+}, Fe^{2+}, Mn, Cr, e defeitos ou irregularidades na rede cristalina. Por exemplo, as cores (azul, verde, castanha, preta) e tonalidades da turmalina que contém Fe, estão relacionadas com o íon Fe^{2+} , pares de troca de Fe^{2+} e Fe^{3+} e, também, com faixas de transporte de carga $Fe^{2+} \rightarrow Ti^{4+}$, $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$. Provocando alterações da largura destas faixas de transporte por meio de aquecimento ou irradiação com raios gamma, raios-X, etc., a cor ou tonalidade da pedra pode ser alterada, reforçada ou eliminada.

O tratamento térmico (por adiante **TT**) é um dos poucos aceitados e legitimados métodos usados para melhoramento de cor das pedras de gemas. A legitimidade é baseada na consideração que este é um processo que pode acontecer naturalmente durante vários estágios da formação do cristal. Portanto, sob condições de que nenhum material de coloração é usado durante o aquecimento, e que a cor obtida depois do aquecimento é estável, não há restrições acerca da utilização do TT.

Geralmente, os métodos do TT das gemas constituem segredos comerciais e, como regra, os pormenores tecnológicos não se publicam.

Sabe-se, que maior parte da turmalina, explorada no tempo presente em Moçambique, é demasiadamente escura para sua lapidação e aproveitamento posterior na joalharia. A partir de escala de graduação a tonalidade deste material pode ser avaliada de 80 á 90 que, por sua vez, desvaloriza muito o custo comercial desta pedra semipreciosa. Tendo em conta a existência dos recursos abundantes da turmalina escura em Moçambique, apresenta-se importante para necessidade presente e futura a elaboração do método tecnológico de melhoramento da cor deste material tornando-a aproveitável na joalharia.

6.3. Parte Experimental

A práctica mostra que existe um conjunto de factores que determinam o resultado do TT da turmalina. Consideremos os factores mais importantes.

6.3.1. Selecção do Material

Selecção do material é uma das etapa mais trabalhosa na preparação da turmalina escura para o TT. Antes do TT as superfícies das pedras devem ser limpadas das substâncias estranhas da turmalina (micas, silicates, etc). É que, durante o TT as substâncias estranhas podem sofrer algumas mudanças estruturais e estas irregularidades superfíciais provocam o rachamento da turmalina. Por exemplo, o TT dos cristais de turmalina em bruto, não limpados, resulta o rachamento de 70 á 90% do material. A análise das microimagens mostra que as rachas superficiais com maior frequência aparecem nos cristais que têm algumas irregularidades na sua superficie. Por isso, antes do TT foram tiradas dos cristais as rachas não profundas e outras irregularidades superficiais. Entretanto, no desbastamento rugoso da superfície do cristal podem ser criados novos microdefeitos que no TT provocam a formação das rachas. Dos vários métodos físico-químicos de limpeza da superfície das pedras em bruto nós escolhemos a tamboração que além de limpeza rigorosa permite também:

- Assegurar o tamanho dos cristais (perde-se apenas de 8 a 10% do peso do material) e evitar a criação de novos defeitos;
- Visualizar a cor e várias impurezas dentro dos cristais que é muito importante na etapa de selecção.

O desbastamento, sending e polimento das amostras no tamborador vibracional faz-se com pó de diamante de 80 até 5000 grits.

Figura 6.2 – *Tamborador usado na preparação das amostras antes do processo de Tratamento Térmico. (foto do autor, 2010)*

Geralmente, as amostras da turmalina local, devido a sua composição química muito complexa, $(Na,Ca)(Li,Mg,Fe,Al)_9B_3Si_6(OH)_{31}$ e tendo sido exploradas de várias minas, podem ter características ópticas e gemológicas diferentes. Por isso, para excluir a influência do factor de variedade do material sobre os resultados experimentais, foram preparados conjuntos de amostras e padrões idênticos pela origem, isto é, cortados dos mesmos cristais. Para o corte foram escolhidos cristais grandes, não deformados, sem impurezas, visíveis através de lupa de amplificação 10x (manchas, inclusões, rachas e canais internas de ar, cristais-gémeas etc) que podem provocar o rachamento das amostras ou mudança indesejavel da sua cor.[3]

Como mostra a prática, às condições diferentes de iluminação ou observação, mesma gema pode manifestar várias intensidades e tonalidades de cor. Acha-se que uma iluminação ideal para distinguir visualmente as variedades de cores é luz natural do Sol de lado de Norte.

Dado que luz natural do Sol não fica permanente com o tempo, para avaliação das cores das amostras nós usamos a lâmpada de luz halogénea com fibras ópticas que por suas características ópticas se aproxima da luz natural. Como fundo de observação usa-se um material branco que não cria reflexos, por exemplo, o papel branco.

A partir de comparação com os padrões graduados foram escolhidas as amostras de turmalina local escura de 10 - 12 cores diferentes cujas tonalidades variam de 80 a 90, segundo o diagrama de gradação de tonalidades. Para diminuir os erros sistemáticos, relacionados com dependência da absorção de luz da grossura dos cristais de turmalina, as amostras tinham mesma forma de chapas polidas e de grossura de $(2 \pm 0,1)$ mm, cortadas na direcção do eixo principal do cristal e polidas dos dois lados. Depois da selecção as amostras pesam-se na balança electrónica (precisão de 10^{-4} g) para marcação e codificação. Na selecção usam-se lâmpada halogênica, microscópio com câmara vídeo, conectada com computador, lupas e outro equipamento gemológico [3]. Na base da prática acumulada foi elaborado um Guia de selecção e sorteamento da turmalina local escura termicamente "tratável" por alguns indícios específicos.

6.3.2. Regime Dinâmico do TT

Geralmente este factor, é um dos mais importantes no processo do TT de gemas. Nas monografias [3 e 5] têm sido reportados algumas indicações que turmalina verde-azul pode ser clareada por aquecimento às temperaturas de 500 a quase 750^o C. No nosso trabalho foi experimentalmente mostrado que para turmalina local escura este diapazão é muito amplo e

não é prático. Por exemplo, já às temperaturas cerca de 650^{o} C dentro dos cristais criam-se manchas castanhas, que indica o início do processo de carbonização. O estudo mostra que o efeito é função do regime dinámico de aquecimento e arrefecimento do forno, por exemplo, de número das etapas de subida e descida da temperatura, da temperatura máxima do TT e plato temporal de sua manutenção etc. Por isso, nós consideramos o efeito como função dum factor específico, determinado como o produto da temperatura por seu plato temporal (**factor TmP**).

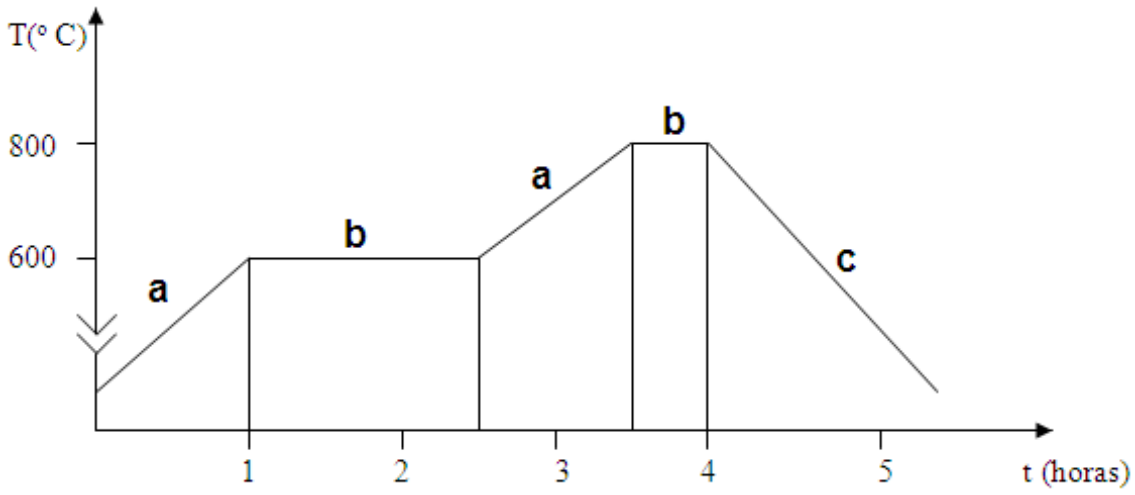


Figura 6.3 – *Diagrama que mostra o perfíl típico de um ciclo de Tratamento Térmico de uma pedra colorida:* ***a*** *- Regime de aquecimento;* ***b*** *- Plateão;* ***c*** *- Regime de arefecimento.*

6.3.3. Forno para TT da Turmalina

Para o TT da turmalina foi usado um forno especializado que permite programar e realizar vários regimes de funcionamento. No programa para todo conjunto de etapas de aquecimento e arrefecimento são definidos a temperatura a atingir, o tempo e caracter de subida (ou descida) da temperatura, o tempo de plato á temperatura desejada.

O gradiente de temperatura para as etapas de aquecimento do forno é função da temperatura a atingir e o tempo de espera estabelecido. O gradiente para as etapas de arrefecimento depende, em geral, da temperatura do ambiente. Os erros relativos de estabilicimento da temperatura indicada e tempo ajustado são, respectivamente, ± 0,3% e ±0,5%.

6.3.4. Natureza do Material que Está em Contacto com Pedras

No trabalho foi mostrado que no TT a quantidade das amostras rachadas diminui se metermos as pedras no forno em cadinhos de cerâmica e usar o jesso em pó como material de contacto entre as amostras dentro do cadinho. É que as microinclusões líquidas e multifases no volume das pedras podem explodir durante o TT e rachar não só mesmo cristal, mas também e os outros que estão na sua vizinhança.[3]

Figura 6.4 – *Forno programável e os respectivos cadinhos usados no processo de Tratamento Térmico da turmalina. (foto do autor, 2010)*

6.4. Avaliação Quantitativa da cor das Amostras

Os métodos visuais de avaliação das cores e tonalidades das pedras de gemas consistem na comparação da amostra em estudo com um padrão. Notemos que a avaliação visual é um processo bastante subjectivo e aproximado. Além disso, a diferença entre as cores das amostras ou suas alterações na experiência podem ser bastante pequenas e não distinguíveis visualmente. Isto condicionou a necessidade de estandartização das medições e elaboração dum método quantitativo de avaliação das cores das gemas.

Consideremos a radiação luminosa no diapazão de luz visível de comprimentos de onda $\lambda = 400 \div 760$nm. Intensidade de radiação $I(\lambda)$ compreende-se como um fluxo dF da energia luminosa, passado durante tempo dt através duma pequena área de superfície ***ds*** dentro dum ângulo sólido $d\Theta$:

$$I = \frac{dF(\lambda)}{dtdsd\Theta} = \int_0^\infty I(\lambda)d\lambda, \qquad \textbf{(6.1)}$$

A intensidade de radiação transmitida através duma substância homogénea é função das suas características ópticas e comprimento de onda desta radiação. Por isso, a avaliação quantitativa dos parâmetros ópticos dum cristal, em particular, de sua cor, tonalidade, transparência, etc., podem ser feitas na base da análise do seu coeficiente de transmissão D(λ), determinado como

$$D(\lambda) = \frac{I(\lambda) - I_f}{I_0(\lambda) - I_f}, \qquad \textbf{(6.2)}$$

onde $I_f, I_0(\lambda)\ e\ I(\lambda)$ são as intensidades espectrais, respectivamente, do fundo, radiação incidente e transmitida.

Para avaliação quantitativa das mudanças quaisquer em características do cristal, submetido ao TT, é mais cómodo analisar a variação relativa do seu coeficiente de transmissão na experiência dada. A variação relativa do coeficiente de transmissão obtem-se da expressão (2) e por meio das transformações elementares pode ser expressa através de intensidades respectivas:

$$DD(\lambda) = \frac{D_t(\lambda) - D_p(\lambda)}{D_p(\lambda)} = \frac{I_t(\lambda) - I_p(\lambda)}{I_p(\lambda) - I_f(\lambda)}, \qquad \textbf{(6.3)}$$

onde $D_t(\lambda), I_t(\lambda), D_p(\lambda), I_p(\lambda), I_f(\lambda)$ são os coeficientes de transmissão e intensidades de luz, passada através da amostra tratada e amostra-padrão, respectivamente. $I_f(\lambda)$ é intensidade do fundo.

Então, para investigação quantitativa dos parâmetros ópticos da turmalina escura e suas mudanças no TT, foram medidas os espectros de transmissão das amostras antes e depois do seu tratamento. A comparação dos espectros das amostras tratadas com os espectros das amostras-padrões permite investigar o efeito acumulado nos TT repetidos também. Os espectros de transmissão das amostras foram medidas no dispositivo cujo esquema é ilustrado na ***Figura 6.5***.

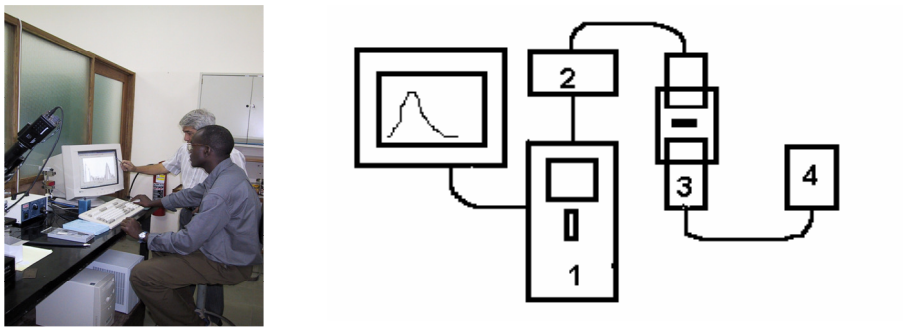


Figura 6.5 - *Dispositivo para medição dos espectros de transmissão e absorção das amostras sólidas e seu esquema de instalação: 1-Computador; 2-PC2000 Plug-in Fiber Optic Spectrometer; 3-Célula com amostra; 4-Lâmpada halogénica (foto do autor com suprvisor, 2004).*

As características principais do espectrómetro são seguintes: a resolução de 1,5 nm para o diapazão λ = 360nm - 860nm; sensibilidade- 0,001; diapazão dinâmico - 2000:1; tempo de scanagem - 0,005 s. Software operacional do espectrometro permite no regime "Real time graph display" obter os espectros de transmissão e absorção com a subtração do espectro do fundo. Antes de medições faz-se a calibração do espectrómetro na base de medição do espectro de transmissão do padrão que é uma chapa óptica de vidro colorido. Os dados de calibração tratam-se e controlam-se no computador por meio do programa, elaborado para esses fins.

Na ***Figura 6.6*** são representados os espectros típicos de transmissão duma das amostras da turmalina local escura, recebidos para luz branca da lâmpada halogénica com as fibras ópticas de transmissão de tipo UV/VIS.

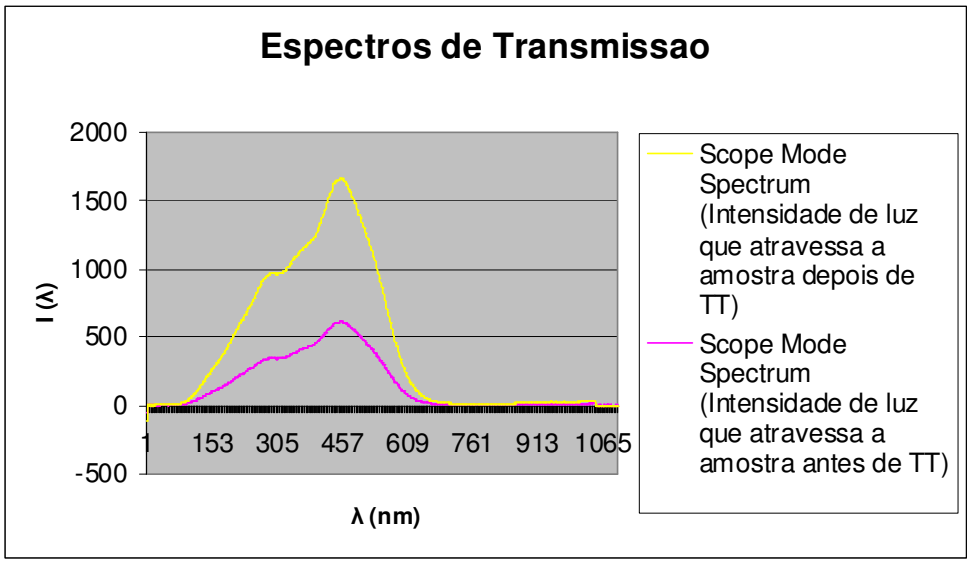


Figura 6.6 - *Os espectros de transmissão da turmalina escura antes e depois do TT.*

6.5. Discução dos Resultados

No trabalho foi realizado uma série dos TT de mais de 270 amostras de turmalina escura local de 24 variedades de cores e tonalidades. Em cada um dos ciclos experimentais foram alteradas algumas condições do TT com o fim de elaborar um esquema tecnológico óptimo na base do estudo estatístico das mudanças, observadas nas amostras. Os resultados principais deste estudo são representados no diagrama da ***Figura 6.7***.

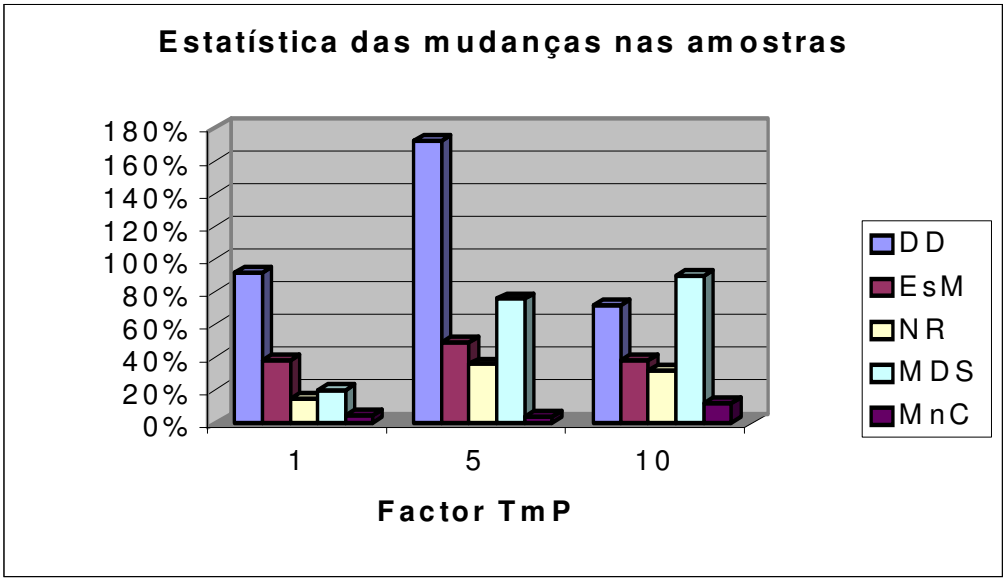


Figura 6.7 – *(Diagrama 1) Dados estatísticos das mudanças nas amostras da turmalina em função das condições do TT. Designações usadas:*

TmP - produto de temperatura máxima do TT por seu plato temporal;

DD - valor médio de variação relativa do coeficiente de transmissão das amostras no TT dado;

EsM - percentagem das amostras que mudaram suas cores e tonalidades escuras para as médias;

NR - percentagem das amostras rachadas no TT dado;

MDS - percentagem das amostras com os microdefeitos superficiais que apareceram no TT dado;

MnC - percentagem das amostras nos quais apareceram as manchas castanhas.

Do estudo dos resultados, obtidos pode-se tirar as conclusões seguintes:

- Foi elaborado o esquema tecnológico do TT da turmalina local escura, que permite consideravelmente melhorar as cores e tonalidades em mais de 10 variedades (cerca de 50% do número total das amostras investigadas). O efeito pode ser bem observado visualmente também, como se vê nas imagens video a) e b) da ***Figura 6.8***, onde as colunas esquerda e direita representam mesmas amostras antes e depois do TT.

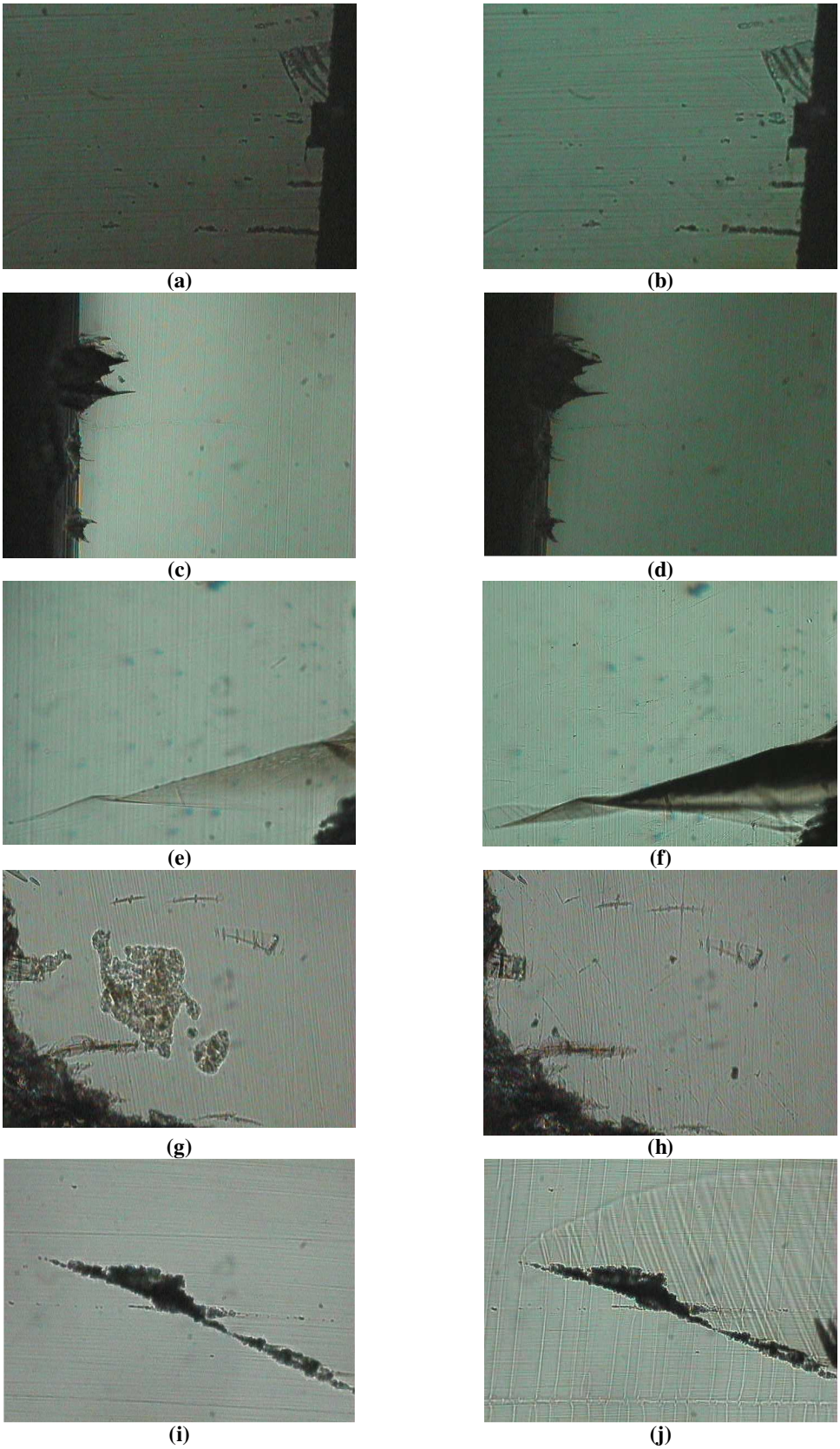


Figura 6.8 - *Imagens de inclusões internas de algumas amostras de turmalinas antes (**a, c, e, g** e **i**) e depois (**b, d, f, h** e **j**) do seu Tratamento Térmico (Fotomicrografias do autor, 2010)*

- Quantitativamente o efeito óptico resultante das mudanças nas amostras avalia-se pela variação relativa do seu coeficiente de transmissão (**factor DD** no Diagrama 1.). Assim, no TT, às condições óptimas, o factor DD promediado por todas as amostras atingiu 172%.

- Em função das condições do TT de 5 a 20% do número total das amostras podem mudar sua tonalidade para mais escura, como se vê nas microimagens c) e d) da ***Figura 6.8***. Esse fénomeno provoca a diminuição respectiva do coeficiente de transmissão destas amostras que por sua vez, baixou a variação relativa média do factor DD para todas amostras, como se vê no diagrama da ***Figura 6.7.***

- Em 10-12% dos cristais da turmalina o TT provocou criação das novas microinclusões internas. Um caso típico está mostrado nas imagens video e) e f) da ***Figura 6.8***. A análise estatístico mostra que geralmente as inclusões provocadas aparecem naquelas zonas dentro dos cristais, onde antes do TT foram registadas as irregularidades estruturais quaisquer (manchas, "nuvens", "curtinas" etc.).

- Em 5% das amostras tratadas foi observado o desaparecimento de algumas inclusões internas. Estas inclusões, provavelmente, de fase líquida, desaparecem por causa de evaporação da água do volume do cristal. Nas microimagens g) e h) da ***Figura 6.8*** é representado um conjunto das inclusões na mesma zona do cristal antes e depois do TT. Entertanto, a perda rápida da água por cristal causa aparecimento das rachas e outros macrodefeitos que leva à perda da sua transparência e custo comercial, pois este material já não se aproveita na joalharia.

- O número das amostras rachadas no TT (NR no diagrama da ***Figura 6.7***.) é função do factor TmP, embora a estatística acumulada não permitiu relacionar funcionalmente os dados obtidos com temperatura máxima do TT e seu plato temporal. Da análise das microimagens não se observa a dependência alguma do número das amostras rachadas da sua cor também. É evidente que o rachamento das amostras depende da sua origem (da mina), particularidades estruturais dos cristais, das tensões internas, inclusões e outras irregularidades, tanto existentes como formadas durante o TT. Isto é, a percentagem das amostras rachadas no TT dependerá de muitos factores, de facto incontrolaveis na experiência. Entretanto, como mostra a prática, o rachamento do material pode ser consideravelmente reduzido (até 15-20%) por meio de um ciclo de procedimentos especiais. Notemos que na tecnologia elaborada o número médio dos cristais, estragados

(de ponto de vista de joalharia) por causa de seu rachamento, constitui apenas 10-12% de todo volume do material.

- Nas amostras submetidas ao TT aparecem microdefeitos superficiais de forma característica, parecidos com redes, que cobrem toda superfície polida, microimagens i) e j) na ***Figura 6.8***. A profundidade destes defeitos não supera, como regra, alguns microns e eles tiram-se facilmente por meio de polimento da superficie da amostra. A percentagem das amostras com esses defeitos (MDS no diagrama da ***Figura 6.7***.) e sua densidade superficial crescem com aumento do factor TmP.

- Durante o TT no volume de algumas amostras observa-se o aparecimento de zonas de cor castanha escura. Estudo da dinâmica do processo mostra que essas zonas têm a tendência do crescimento com aumento do factor TmP (coluna MnC no diagrama da ***Figura 6.7***.). Em 10-14% das amostras o efeito referido resultou o escurecimento dos cristais e diminuição respectiva dos seus coeficientes de transmissão. Na elevação da temperatura até 700-750^{o} C nestas zonas, como regra, começam os processos de carbonização dos cristais.

- Foi mostrado que as características ópticas atingidas no primeiro TT das amostras, podem ser ainda melhoradas por meio dos TT repetidos. A acumulação da outra cor e tonalidade observa-se para algumas espécies da turmalina, embora com repetição dos TT das mesmas amostras observa-se a saturação do efeito, quer dizer, ele diminui. Assim, em cada TT posterior o fator DD para mesmas amostras cresce em relação ao resultado, obtido no TT anterior, em média, por 40%. Por exemplo, para algumas amostras por meio dos TT repetidos conseguiu-se elevar o valor de DD resultante até 225%. Uma vez que com os TT repetidos devem adequadamente crescer as despesas e volume de refugo também, a rentabilidade deste procedimento não será sempre evidente.

- No diagrama da ***Figura 6.9***. (Diagrama 2) são representadas as mudanças de algumas cores e tonalidades das amostras no TT para o factor TmP = 5. Vê-se que o efeito geral do TT das turmalinas depende muito das suas cores originais. Os melhores resultados foram obtidos para as turmalinas azul acinzentada ou verdeada, cinzenta e verde escuras. Entretanto, para as cores verde amarelada, castanha e lilaje acinzentada escuras, não foi atingido um efeito visualmente razoável, embora a mudança geral das propriedades ópticas em algumas amostras (factor DD) também foi bastante grande.

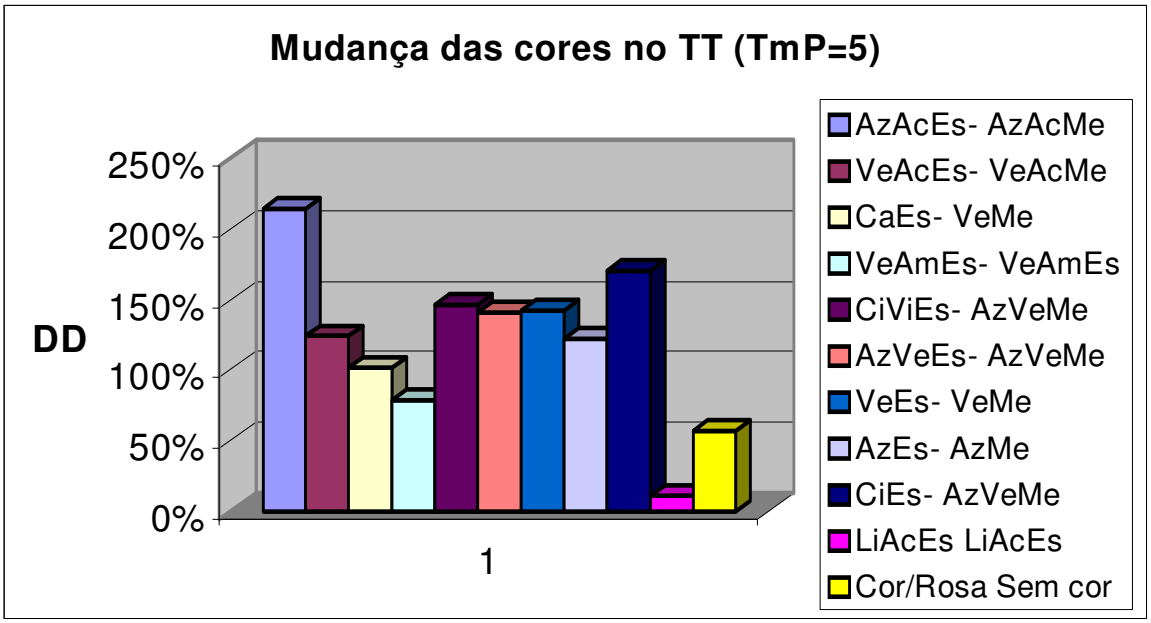


Figura 6.9 – *(Diagrama 2) Resultados do TT das turmalinas coloridas locais e avaliação das mudanças das cores e tonalidades em termos de variação relativa do coeficiente de transmissão DD. Os exemplos das designações das mudanças no Diagrama 2 são dadas na Tabela 6.1.*

Tabela 6.1: Designações das mudanças de cores e tonalidades ocorridas no TT.

AzAcEs - AzAcMe	Azul acinzentada escura para azul acinzentada média
VeAcEs - VeAcMe	Verde acinzentada escura para verde acinzentada média
CaEs - VeMe	Castanha escura para verde média
VeAmEs	Verde amarelada escura
CiViEs - AzVeMe	Cinzenta violeta escura para azul verdeada média
LiAcEs	Lilaje acinzentada escura

- Os resultados das medições dos indícios gemológicos principais das amostras, submetidas ao TT, são representados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2: Comparação das características das amostras de turmalina antes e depois do TT

Indícios gemológicos principais	**Antes do TT**		**Depois do TT**
Dureza	7,5 ± 0.5		7,5 ± 0.5
Índice de refracção	(1.621 – 1.640) ± 0.002		(1.622 – 1.640) ± 0.002
Dupla refracção	0.019 ± 0.002		0.018 ± 0.002
Dicroismo	distinguível		distinguível
Peso específico (g/cm^3)	3.125 ± 0.002		3.112 ± 0.002
Luminescência	SW	Inerte	Inerte
	LW	Inerte	Inerte

Da Tabela 6.2. vê-se que o TT nem alterou as características gemológicas da turmalina, nem levou às mudanças significativas na composição química e estrutura cristalina do material (as propriedades físicas e ópticas, que são determinadas pela composição química e estrutura cristalina, permanecem inalterados depois do TT) .

- Para verificar a durabilidade temporal das cores e tonalidades adquiridas pela turmalina no TT, foram medidos os espectros de transmissão das amostras, conservadas durante um ano

depois do seu tratamento. As medições foram feitas no mesmo dispositivo, ilustrado na ***Figura 6.5***. Dos resultados de medições conclui-se que as cores e tonalidades das turmalinas, adquiridas no TT, não sofreram alterações e permanecem estáveis.

- A particularidade principal do método elaborado do TT das turmalinas consistiu na alternação de três segmentos principais do ciclo do tratamento (aquecimento, processamento e arrefecimento) segundo um esquema, em que se efectua uma "trenagem" essencial das pedras para lentamente evaporar a água acumulada e atenuar as tenções internas da rede cristalina.
- Segundo experiência, às temperaturas acima de 650^{o} C as cores adquiridas das amostras começam a mudar para castanha, que indica o início do processo de carbonização dos cristais. A partir de 700^{o} C começam os processos irreversíveis que levam a destruição da rede cristalina. Durante estudo algumas amostras foram aquecidas até 950^{o} C que resultou no aumento de volume do cristal, perda de transparência e solidez, aparecimento de rachas numerosas em todo volume. Conclui-se que às temperaturas de $900 \div 950^{o}$ C evaporam-se alguns elementos que constituem a composição química da turmalina e alguns outros entram em mineração, isto é, em combinação química com o oxigénio, resultando em defeitos macroscópicos.

As perspectivas do desenvolvimento da metodologia referida no Laboratório estão relacionadas com elaboração de tecnologias do TT dos outros tipos de pedras coloridas locais, tais como berilos, pedras do grupo de quartzo e corundos (rubi e safira). Sabe-se, por exemplo, que 80% de aguamarinha e 60% de safiras, rubi e tanzanite, comercializadas hoje em dia no mercado mundial, foram submetidas ao TT para o melhoramento da sua cor. [39]

7 Caracterização dos Minerais de Gemas de Moçambique

7.1. Generalidades

Neste capítulo considera-se a ***"Caracterização Gemológica, Geológica e das Inclusões das Granadas e águas-marinhas das Regiões de Ocorrência na Província de Niassa".*** Foi implementado no **Laboratório Gemológico do Departamento de Física da UEM**, com base nos resultados de investigações obtidos através dos métodos tradicionais de gemologia e da física aplicada elaborados no laboratório, e no **Departamento de Geologia da UEM,** das amostras recolhidas, nas diferentes regiões de ocorrência de minerais de gemas, na província de Niassa.

O projecto em questão necessitou de trabalho de campo para colheita de amostras e características geológicas das regiões de ocorrência. Fez-se uma viagem **Maputo-Niassa-Maputo** via aérea, **Lichinga-Cuamba-Nipepe-Cuamba-Lichinga** via terrestre, estrada terra batida, **Lichinga-Cuamba** (600 Km) e **Cuamba-Nipepe** (600 Km), totalizando 1200 Km.

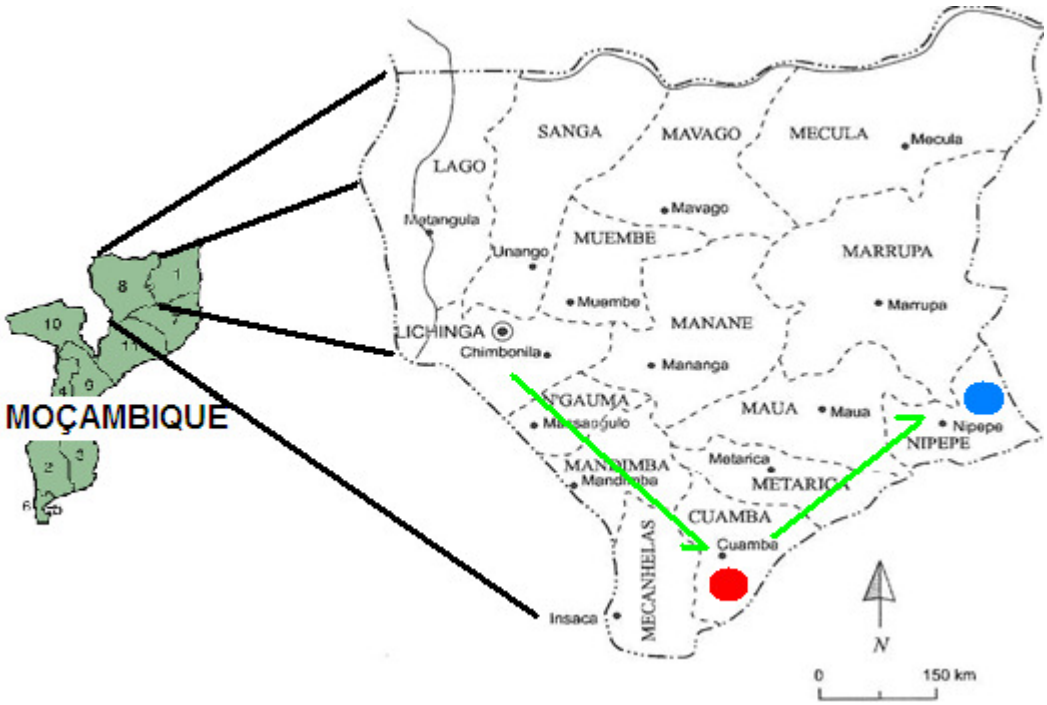


Figura 7.1 - *Mapa de Divisão Administrativa da Provincia de Niassa.[4]*

7.2. Áreas de Estudo

A Província de Niassa, a norte de Moçambique, é uma das províncias do país que apresentam a maior diversidade litológica do país, bem como apresenta uma variedade de recursos minerais exploráveis economicamente.

A maior parte dos recursos desta província são explorados através de métodos empíricos e insustentáveis para o ambiente. Como exemplo apresentamos a exploração de Granadas e águas marinhas, que são objecto de estudo neste projecto de investigação. O estudo que se realizou, de momento, refere-se a ***granada do Distrito de Cuamba*** e ***águas-marinhas do Distrito de Nipepe***, Província de Niassa.

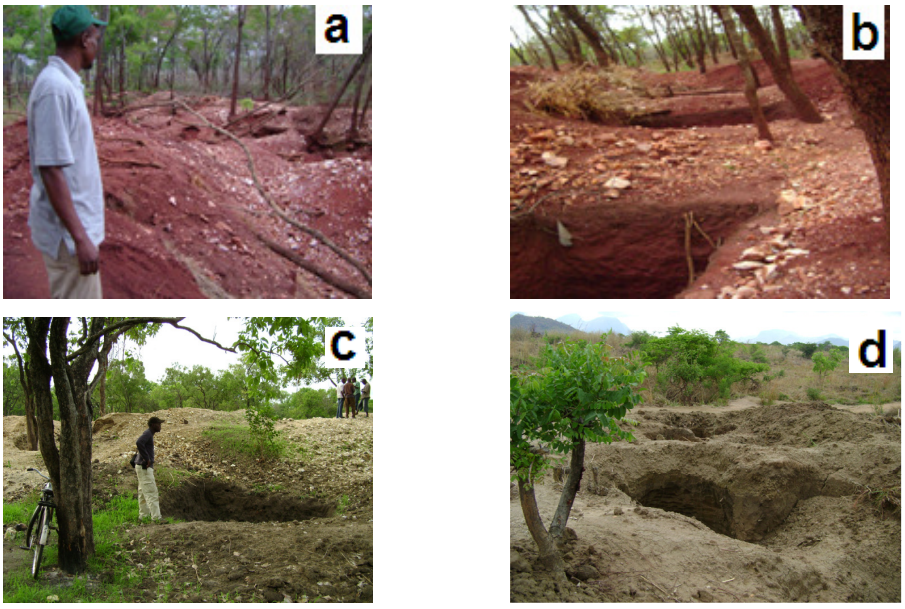


Figura 7.2 - *Métodos empíricos e insustentáveis para o ambiente, covas abertas e abandonadas depois do garrimpo:* ***a*** *e* ***b*** *- zona de garrimpo de* ***Nipepe-II; c*** *- zona de garrimpo de* ***Nipepe-I; d*** *- zona de exploração de* ***Cuamba*** *(fotos do autor).*

7.3. Colheita de Amostras e Caracterização Geológica (AMOSTRAGEM)

As amostras de ***granada*** e ***águas-marinhas*** foram essencialmente colhidas nos locais de ocorrência e de exploração na **Província de Niassa,** acompanhado de caracterização geológica, nomeadamente em **Cuamba** e **Nipepe**. As amostras de **águas-marinhas** foram adquiridas nas produções diárias de diferentes garimpeiros no **distrito de Nipepe**, no local de garimpagem. As amostras de **granadas** foram adquiridas num operador formal de mineração no **distrito de Cuamba**.

(*a*) *Aquisição de amostras de granada em Cuamba*

(*b*) *Aquisição de amostras de águas−marinhas em Nipepe*

Figura 7.3 - *Aquisição de amostras de granadas em Cuamba e de águas marinhas em Nipepe (fotos do autor).*

Foram condicionantes para selecção de local de amostragem bem como a quantidade das amostras os seguintes:

- ✓ Disponibilidade das amostras
- ✓ Necessidades do projecto

Tabela 7.1: Amostras de granadas (Cuamba) e de águas-marinhas (Nipepe).

Designação da amostra	Referência	Peso (g)	Quantidade Amostras	Local	Coordenadas	
Granada	SM/ 07-C-01	-0,5	6	Cuamba	14 49 33	36 22 08
Granada	SM/ 07-C-02	+0,5	34	Cuamba	14 49 33	36 22 08
Granada	SM/ 07-C-03	+1,0	11	Cuamba	14 49 33	36 22 08
Granada	SM/ 07-C-04	+1,5	7	Cuamba	14 49 33	36 22 08
Granada	SM/ 07-C-05	+2,0	4	Cuamba	14 49 33	36 22 08
Granada	SM/ 07-C-06	+2,5	3	Cuamba	14 49 33	36 22 08
Granada	SM/ 07-C-07	+6,0	1	Cuamba	14 49 33	36 22 08
Granada	SM/ 07-C-08	+20,0	1	Cuamba	14 49 33	36 22 08
Granada	SM/ 07-C-09	Várias1	9	Cuamba	14 49 33	36 22 08
Granada	SM/ 07-C-10	Várias2	13	Cuamba	14 49 33	36 22 08
Agua-marinha	SM/ 07-N-01	-0,5	2	Nipepe	14 03 39	37 49 09
Agua-marinha	SM/ 07-N-02	+0,5	8	Nipepe	14 03 39	37 49 09
Agua-marinha	SM/ 07-N-03	+1,0	28	Nipepe	14 03 39	37 49 09
Agua-marinha	SM/ 07-N-04	+1,5	22	Nipepe	14 03 39	37 49 09
Agua-marinha	SM/ 07-N-05	+2,0	8	Nipepe	14 03 39	37 49 09
Agua-marinha	SM/ 07-N-06	+2,5	8	Nipepe	14 03 39	37 49 09
Agua-marinha	SM/ 07-N-07	+3,0	8	Nipepe	14 03 39	37 49 09
Agua-marinha	SM/ 07-N-08	+4,0	3	Nipepe	14 03 39	37 49 09
Agua-marinha	SM/ 07-N-09	+6,0	2	Nipepe	14 03 39	37 49 09
Agua-marinha	SM/ 07-N-10	+12,0	1	Nipepe	14 03 39	37 49 09
Agua-marinha	SM/ 07-N-11	+17,0	1	Nipepe	14 03 39	37 49 09
Agua-marinha	SM/ 07-N-12	Berilo	4	Nipepe	14 03 39	37 49 09

SM/ 07-C-xx: S-siquela; M-malate; 07-ano; C-cuamba; xx-ordem.
SM/ 07-N-yy: S-siquela; M-malate; 07-ano; N-nipepe; yy-ordem.

7.3.1. Geologia das Mineralizações de Niassa

Os pegmatitos férteis da província de Niassa situam-se na região designada **"Msawize"** a ENE da cidade de Lichinga. Esta região compreende uma área cujos limites se situam entre **Mavago-Icoco-Mecula**, e é constituída por pegmatitos de ferro, titânio, mica e outros minerais.[4]

7.3.2. A Garimpagem de Nipepe

Vários são os garimpeiros de diferentes proveniências que dedicam o seu dia a dia, exploração de pedras semi-preciosas em Nipepe. A exploração consiste na abertura de cavidades enormes ±2m sem obediência de nenhuma medida de segurança e a consequente extracção de minerais, na circunstância quartzo e água marinha. As águas-marinhas apresentam (grosso modo) de 5 a 10 mm de diâmetro.

Figura 7.4 - *Características Físicas da Zona de Garimpo-I e Garimpo-II de Nipepe (fotos do autor).*

Após a exploração, o produto é vendido no local e as cavidades são abandonadas e passa-se para próximos garimpos deixando a região repleta de buracos perigosos.

Figura 7.5 - *Cavidades abandonadas, Zona de Garimpo-I e Garimpo-II de Nipepe (fotos do autor).*

7.3.3. Geologia das Mineralizações de Nipepe

Litologicamente o distrito de Nipepe é formado por manchas do gnaisses e edembergitos gnaissicos de super grupo do Lúrio. Formado por milonitos alóctones, blastomilanitos, granitos sincinemáticos e granitos porfiróides sienitos do super grupo de Nampula, e quartzitos e ultramafitos do super grupo de Chiúre.[4]

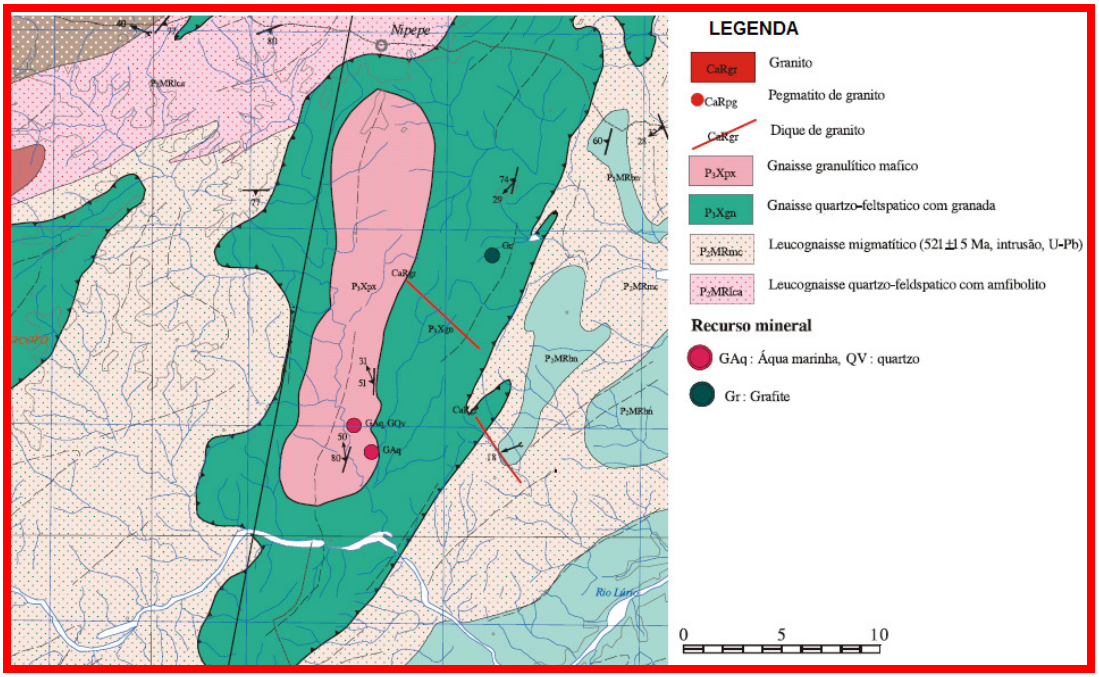


Figura 7.6 - *Mapa Geológico de Nipepe.[15]*

A água-marinha ocorre num filão pegmatítico. Ocorrem igualmente cristais enormes de quartzo e mica. São acessórios os feldspatos e a Turmalina preta.

Figura 7.7 - *Características/Traços Geológicos do Garimpo-I de Nipepe e Acessórios de formação de agua-marinha (fotos do autor).*

7.3.4. Exploração de Granadas em Cuamba

A exploração de granadas consiste na abertura de pequenas trincheiras por processos mecanizados. O produto é posteriormente transportado até a uma pequena planta de processamento onde é lavado. O processo de selecção e dimensionamento é manual (uso de fibra óptica). A seguir o produto seleccionado é vendido e o preço varia de acordo com a dimensão e homogeneidade dos minerais (cor, limpeza, ...). As granadas apresentam (grosso modo) de 3 a 10 mm de diâmetro. Na mesma área de concessão há vários operadores artesanais cujo processo foi descrito a cima.

Figura 7.8 - *Exploração mecanizada de granadas em Cuamba (fotos do autor).*

7.3.5. Geologia das Mineralisações de Cuamba - Granadas

Litologicamente o Distrito de Cuamba é formado por Granitóides com sienitos, monzonitos e mangeritos e gnaisses edembergiticos da formação de Cuamba.

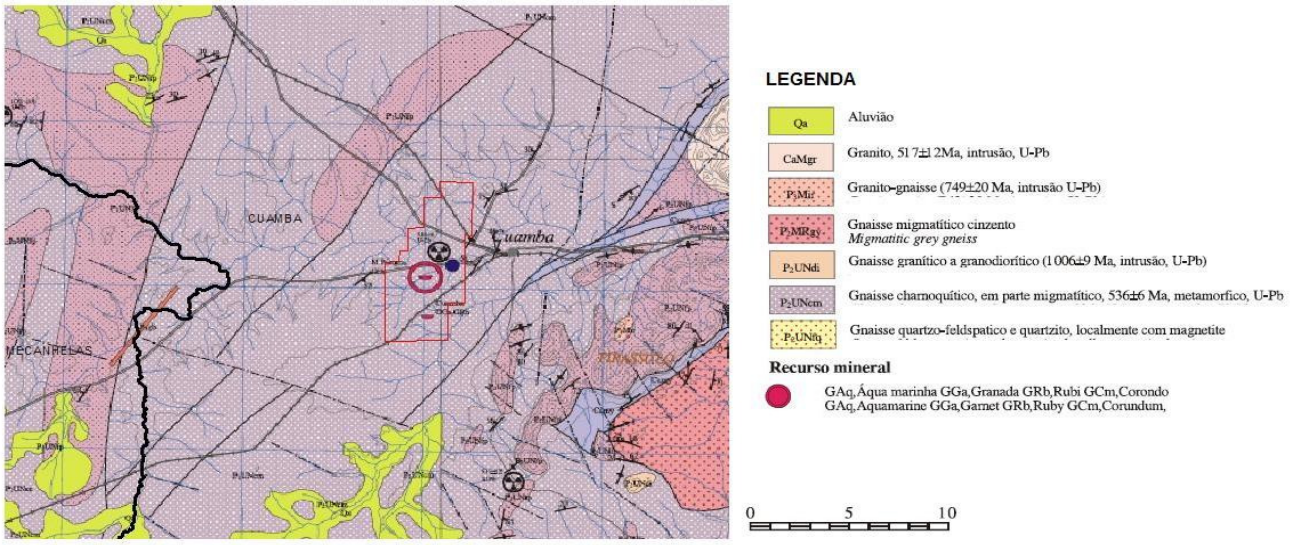


Figura 7.9 - *Mapa Geológico de Cuamba.[15]*

Granada é um grupo de minerais que compreende seis variedades. Na região de Cuamba, a considerar as propriedades físicas, ocorre o mineral almandite com a fórmula $FeOAl_2O_3SiO_2$ que apresenta uma cor vermelha escura a castanho escuro, dureza 7 a 7.5, cristaliza no sistema cúbico a dodecaedro formando graus grosseiros. As granadas exploradas em Cuamba são fundamentalmente aluvionares. Ocorrem numa espessa camada de sedimentos com indícios de meteorização de gnaisse. Pelo aspecto angular das granadas sugere uma curta distância de transporte. O transporte e deposição poderá estar associado à história do ***rio Namwana***. São acessórios os quartzo, feldspato e mica, o que sugere uma origem pegmatítica.

Figura 7.10 - *Características/Traços Geologicas da Mina de Cuamba e Acessórios de formação de granada.*

7.4. Preparação das Amostras

Foram seleccionados cerca de 30 amostras de granadas e águas-marinhas, para serem desbastadas e posterior polimento, condições necessárias para realização de análises gemológicas. Este serviço foi realizado no laboratório de Departamento de Geologia da UEM, Secção de Laminação.

As amostras foram, primeiro desbastadas para formarem superfícies planas, usando um disco para este fim. Seguidamente, foram usados diferentes pós de diamante para polimento até atingir-se o polimento ideal/desejado.

Dizer que no processo de desbastamento e polimento das amostras, para processos de investigação, perde-se cerca de 0.2-0.5% de cada amostra, o que difere dos métodos geológicos onde as amostras são moídas e crivadas a diferentes pressões, o que resulta em não aproveitamento posterior da amostra, para fins de joalharia – ***a gemologia usa métodos físicos não destrutivos para análise de minerais de gemas.***

7.5. Análises Físicas, Gemológicas e das Inclusões das Amostras

Todas as análises foram realizadas no Departamento de Física, com o auxílio do equipamento existente no Laboratório Gemológico e do Microscópio Gemológico adquirido ao longo deste projecto.

Foram realizadas, para cada amostra, diferentes análises de propriedades físicas nomeadamente: peso específico, índice de refracção, dupla refracção, dispersão, pleocroísmo, espectro de absorção, dureza, fluorescência UV. Para este fim, foi usado o seguinte equipamento tradicional gemológico: balança analítica, refractómetro, polariscópio, dicroscópio, espectroscópio, lápis de dureza de Mohs, lâmpada UV.

Com o auxílio do Microscópio Gemológico foi observada a estrutura interna das amostras, que permitirá um conhecimento das inclusões com bases científicas, para uma melhor caracterização das diferentes regiões de ocorrência das gemas na província do Niassa.

7.6. Resultados e Análise dos Dados

Tabela 7.2: Resultados de medição dos índice de refracção (**IR**) e dupla refracção (**DR**) de granadas.

Amostra	*Valor Medido*		*Valor Tabelado de pedra natural*	
	IR	***DR***	***IR***	***DR***
SM/001-Cuamba	1,762±0,002	0,0	1,78 – 1,80	0,0
SM/002-Cuamba	1,770±0,002	0,0	1,78 – 1,80	0,0
SM/003-Cuamba	1,762±0,002	0,0	1,78 – 1,80	0,0
SM/004-Cuamba	1,762±0,002	0,0	1,78 – 1,80	0,0
SM/005-Cuamba	1,756±0,002	0,0	1,78 – 1,80	0,0
SM/006-Cuamba	1,755±0,002	0,0	1,78 – 1,80	0,0
SM/007-Cuamba	1,755±0,002	0,0	1,78 – 1,80	0,0
SM/008-Cuamba	1,760±0,002	0,0	1,78 – 1,80	0,0
SM/009-Cuamba	1,760±0,002	0,0	1,78 – 1,80	0,0
SM/010-Cuamba	1,755±0,002	0,0	1,78 – 1,80	0,0
Uth/011-Cuamba	1,758±0,002	0,0	1,78 – 1,80	0,0
Uth/012-Cuamba	1,760±0,002	0,0	1,78 – 1,80	0,0
Uth/013-Cuamba	1,764±0,002	0,0	1,78 – 1,80	0,0
Uth/014-Cuamba	1,762±0,002	0,0	1,78 – 1,80	0,0

Índice de Refracção do Líquido = 1,79

Uth/ yy: Uth-Uthui; yy-ordem.

Tabela 7.3: Resultados de uso de polariscópio no diagnóstico das amostras de granadas.

Amostra	**Resultado bservado**	**Resultado Tabelado**
SM/001-Cuamba	Sem efeito	SR
SM/002-Cuamba	Sem efeito	SR
SM/003-Cuamba	Sem efeito	SR
SM/004-Cuamba	Sem efeito	SR
SM/005-Cuamba	Sem efeito	SR
SM/006-Cuamba	Sem efeito	SR
SM/007-Cuamba	Sem efeito	SR
SM/008-Cuamba	Sem efeito	SR
SM/009-Cuamba	Sem efeito	SR
SM/010-Cuamba	Sem efeito	SR
Uth/011-Cuamba	Sem efeito	SR
Uth/012-Cuamba	Sem efeito	SR
Uth/013-Cuamba	Sem efeito	SR
Uth/014-Cuamba	Sem efeito	SR

Tabela 7.4: Resultados de medição de peso específico (PE) por meio do método hidrostático de granadas.

Amostra	Valor medido de PE(g/cm^3)	Valor tabelado de PE (g/cm^3)
SM/001-Cuamba	3,750± 0,002	3,95 – 4,20
SM/002-Cuamba	3,710± 0,002	3,95 – 4,20
SM/003-Cuamba	3,864± 0,002	3,95 – 4,20
SM/004-Cuamba	3,947± 0,002	3,95 – 4,20
SM/005-Cuamba	3,800± 0,002	3,95 – 4,20
SM/006-Cuamba	4,063± 0,002	3,95 – 4,20
SM/007-Cuamba	4,000± 0,002	3,95 – 4,20
SM/008-Cuamba	4,000± 0,002	3,95 – 4,20
SM/009-Cuamba	4,063± 0,002	3,95 – 4,20
SM/010-Cuamba	4,231± 0,002	3,95 – 4,20
Uth/011-Cuamba	3,947± 0,002	3,95 – 4,20
Uth/012-Cuamba	4,138± 0,002	3,95 – 4,20
Uth/013-Cuamba	3,947± 0,002	3,95 – 4,20
Uth/014-Cuamba	3,850± 0,002	3,95 – 4,20

Tabela 7.5: Resultados da luminescência observada pela acção da radiação UV das ondas curtas (**SW**) e ondas longas (**LW**) de granadas.

Amostra	Resultado observado		Resultado tabelado de pedra natural	
	SW	LW	SW	LW
SM/001-Cuamba	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte
SM/002-Cuamba	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte
SM/003-Cuamba	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte
SM/004-Cuamba	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte
SM/005-Cuamba	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte
SM/006-Cuamba	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte
SM/007-Cuamba	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte
SM/008-Cuamba	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte
SM/009-Cuamba	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte
SM/010-Cuamba	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte
Uth/011-Cuamba	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte
Uth/012-Cuamba	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte
Uth/013-Cuamba	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte
Uth/014-Cuamba	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte

Tabela 7.6: Resultados de observação de simples refracção (**SR**) e dupla refracção (**DR**) de granadas a partir do Dicroscópio.

Amostra	Resultado observado		Dados tabelados de pedra natural
	Pleocroismo	**Cor observada**	**Pleocroismo**
SM/001-Cuamba	SR	Vermelho-Castanho	SR
SM/002-Cuamba	SR	Vermelho-Castanho	SR
SM/003-Cuamba	SR	Vermelho-Castanho	SR
SM/004-Cuamba	SR	Vermelho- Castanho	SR
SM/005-Cuamba	SR	Vermelho- Castanho	SR
SM/006-Cuamba	SR	Vermelho- Castanho	SR
SM/007-Cuamba	SR	Vermelho- Castanho	SR
SM/008-Cuamba	SR	Vermelho- Castanho	SR
SM/009-Cuamba	SR	Vermelho- Castanho	SR
SM/010-Cuamba	SR	Vermelho- Castanho	SR
Uth/011-Cuamba	SR	Vermelho- Castanho	SR
Uth/012-Cuamba	SR	Vermelho- Castanho	SR
Uth/013-Cuamba	SR	Vermelho- Castanho	SR
Uth/014-Cuamba	SR	Vermelho- Castanho	SR

Tabela 7.7: Resultados de medição dos índice de refracção (**IR**) e dupla refracção (**DR**) de águas-marinhas.

Amostra	***Valor Medido***		***Valor Tabelado de pedra natural***	
	IR	***DR***	***IR***	***DR***
SM/001-Nipepe	1,578 – 1,581	0,003±0,002	1,570 – 1,590	0,006 – 0,008
SM/002-Nipepe	Não medido	----------	1,570 – 1,590	0,006 – 0,008
SM/003-Nipepe	1,580 – 1,578	0,002±0,002	1,570 – 1,590	0,006 – 0,008
SM/004-Nipepe	1,581 – 1,578	0,003±0,002	1,570 – 1,590	0,006 – 0,008
SM/005-Nipepe	1,580 – 1,578	0,002±0,002	1,570 – 1,590	0,006 – 0,008
SM/006-Nipepe	1,578 – 1,581	0,003±0,002	1,570 – 1,590	0,006 – 0,008
SM/007-Nipepe	1,580 – 1,581 – 1,579	0,002±0,002	1,570 – 1,590	0,006 – 0,008
SM/008-Nipepe	1,582 – 1,590	0,008±0,002	1,570 – 1,590	0,006 – 0,008
SM/009-Nipepe	1,579 – 1,581	0,003±0,002	1,570 – 1,590	0,006 – 0,008
SM/010-Nipepe	1,578 – 1,581	0,003±0,002	1,570 – 1,590	0,006 – 0,008
SM/011-Nipepe	1,581 – 1,579	0,002±0,002	1,570 – 1,590	0,006 – 0,008
SM/012-Nipepe	1,575 – 1,581	0,006±0,002	1,570 – 1,590	0,006 – 0,008
SM/013-Nipepe	1,580 – 1,577	0,003±0,002	1,570 – 1,590	0,006 – 0,008
SM/014-Nipepe	1,575 – 1,573 – 1,580	0,007±0,002	1,570 – 1,590	0,006 – 0,008
SM/015-Nipepe	Não medido	----------	1,570 – 1,590	0,006 – 0,008
SM/016-Nipepe	Não medido	----------	1,570 – 1,590	0,006 – 0,008
SM/017-Nipepe	Não medido	----------	1,570 – 1,590	0,006 – 0,008
SM/018-Nipepe	Não medido	----------	1,570 – 1,590	0,006 – 0,008
SM/019-Nipepe	Não medido	----------	1,570 – 1,590	0,006 – 0,008

Índice de Refracção do Líquido = 1,79

Tabela 7.8: Resultados de uso de polariscópio no diagnóstico das amostras de águas-marinhas.

Amostra	Resultado observado	Resultado Tabelado
SM/001-Nipepe	DR	DR
SM/002-Nipepe	DR	DR
SM/003-Nipepe	DR	DR
SM/004-Nipepe	DR	DR
SM/005-Nipepe	DR	DR
SM/006-Nipepe	DR	DR
SM/007-Nipepe	DR	DR
SM/008-Nipepe	DR	DR
SM/009-Nipepe	DR	DR
SM/010-Nipepe	DR	DR
SM/011-Nipepe	DR	DR
SM/012-Nipepe	DR	DR
SM/013-Nipepe	DR	DR
SM/014-Nipepe	DR	DR
SM/015-Nipepe	DR	DR
SM/016-Nipepe	DR	DR
SM/017-Nipepe	DR	DR
SM/018-Nipepe	DR	DR
SM/019-Nipepe	DR	DR

Tabela 7.9: Resultados de medição de peso específico (**PE**) por meio do método hidrostático de águas-marinhas.

Amostra	Valor medido de PE(g/cm^3)	Valor tabelado de PE (g/cm^3)
SM/001-Nipepe	2,789± 0,002	2,68 – 2,75
SM/002-Nipepe	2,725± 0,002	2,68 – 2,75
SM/003-Nipepe	2,851± 0,002	2,68 – 2,75
SM/004-Nipepe	2,679± 0,002	2,68 – 2,75
SM/005-Nipepe	2,660± 0,002	2,68 – 2,75
SM/006-Nipepe	2,733± 0,002	2,68 – 2,75
SM/007-Nipepe	2,700± 0,002	2,68 – 2,75
SM/008-Nipepe	2,789± 0,002	2,68 – 2,75
SM/009-Nipepe	2,703± 0,002	2,68 – 2,75
SM/010-Nipepe	2,689± 0,002	2,68 – 2,75
SM/011-Nipepe	2,871± 0,002	2,68 – 2,75
SM/012-Nipepe	2,690± 0,002	2,68 – 2,75
SM/013-Nipepe	2,782± 0,002	2,68 – 2,75
SM/014-Nipepe	2,692± 0,002	2,68 – 2,75
SM/015-Nipepe	2,759± 0,002	2,68 – 2,75
SM/016-Nipepe	2,619± 0,002	2,68 – 2,75
SM/017-Nipepe	2,677± 0,002	2,68 – 2,75
SM/018-Nipepe	2,851± 0,002	2,68 – 2,75
SM/019-Nipepe	1,944± 0,002	2,68 – 2,75

Tabela 7.10: Resultados da luminescência observada pela acção da radiação **UV** das ondas curtas (**SW**) e ondas longas (**LW**) de águas-marinhas.

Amostra	Resultado observado		Resultado tabelado de pedra natural	
	SW	**LW**	**SW**	**LW**
SM/001-Nipepe	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte
SM/002-Nipepe	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte
SM/003-Nipepe	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte
SM/004-Nipepe	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte
SM/005-Nipepe	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte
SM/006-Nipepe	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte
SM/007-Nipepe	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte
SM/008-Nipepe	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte
SM/009-Nipepe	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte
SM/010-Nipepe	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte
SM/011-Nipepe	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte
SM/012-Nipepe	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte
SM/013-Nipepe	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte
SM/014-Nipepe	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte
SM/015-Nipepe	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte
SM/016-Nipepe	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte
SM/017-Nipepe	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte
SM/018-Nipepe	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte
SM/019-Nipepe	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte

Tabela 7.11: Resultados de observação de simples refracção (**SR**) e dupla refracção (**DR**) de águas-marinhas a partir do Dicroscópio.

Amostra	Resultado observado		Dados tabelados de pedra natural	
	Pleocroismo	**Cor observada**	**Pleocroismo**	**Cor observada**
SM/001-Nipepe	DR (médio)	Variedade de azul	DR, (médio até fraco)	Variedade de azul; azul-verde
SM/002-Nipepe	DR (médio)	Variedade de azul	DR, (médio até fraco)	Variedade de azul; azul-verde
SM/003-Nipepe	DR (médio)	Variedade de azul	DR, (médio até fraco)	Variedade de azul; azul-verde
SM/004-Nipepe	DR (médio)	Variedade de azul	DR, (médio até fraco)	Variedade de azul; azul-verde
SM/005-Nipepe	DR (médio)	Variedade de azul	DR, (médio até fraco)	Variedade de azul; azul-verde
SM/006-Nipepe	DR (médio)	Variedade de azul	DR, (médio até fraco)	Variedade de azul; azul-verde
SM/007-Nipepe	DR (médio)	Variedade de azul	DR, (médio até fraco)	Variedade de azul; azul-verde
SM/008-Nipepe	DR (médio)	Variedade de azul	DR, (médio até fraco)	Variedade de azul; azul-verde
SM/009-Nipepe	DR (médio)	Variedade de azul	DR, (médio até fraco)	Variedade de azul; azul-verde
SM/010-Nipepe	DR (médio)	Variedade de azul	DR, (médio até fraco)	Variedade de azul; azul-verde
SM/011-Nipepe	DR (médio)	Variedade de azul	DR, (médio até fraco)	Variedade de azul; azul-verde
SM/012-Nipepe	DR (médio)	Variedade de azul	DR, (médio até fraco)	Variedade de azul; azul-verde
SM/013-Nipepe	DR (médio)	Variedade de azul	DR, (médio até fraco)	Variedade de azul; azul-verde
SM/014-Nipepe	DR (médio)	Variedade de azul	DR, (médio até fraco)	Variedade de azul; azul-verde
SM/015-Nipepe	DR (médio)	Variedade de azul	DR, (médio até fraco)	Variedade de azul; azul-verde
SM/016-Nipepe	DR (médio)	Variedade de azul	DR, (médio até fraco)	Variedade de azul; azul-verde
SM/017-Nipepe	DR (médio)	Variedade de azul	DR, (médio até fraco)	Variedade de azul; azul-verde
SM/018-Nipepe	DR (médio)	Variedade de azul	DR, (médio até fraco)	Variedade de azul; azul-verde
SM/019-Nipepe	DR (médio)	Variedade de azul	DR, (médio até fraco)	Variedade de azul; azul-verde

❖ **Dos resultados de estudo de índice de refracção, com uso do Refractómetro, para granadas (Tabela 7.2) e águas-marinhas (Tabela 7.7), podem tirar-se as seguintes conclusões:**

i) Vê-se dos valores obtidos das experiências realizadas com o refractómetro, comparados com os valores tabelados, permitiram caracterizar a maior parte das amostras em estudo. Alguns resultados apresentados na Tabela 7.7 foram obtidos com o uso do filtro de polarização para aumentar o contraste entre a zona sombreada e a zona iluminada, devido a dupla refracção das amostras de águas-marinhas. Da tabela 7.2 pode se observar a não existência de dupla refracção nas granadas de Cuamba, o que vai de encontro com os valores tabelados.

ii) Uma vez que os intervalos entre os valores dos índices de refracção são pequenos, torna-se importante avaliar os erros sistemáticos e corrigir a sua contribuição. As fontes principais dos erros sistemáticos neste caso, acham-se seguintes:

1. Dilatação do cilindro da escala em função da temperatura do ambiente. A avaliação mostra que o erro sistemático relacionado com este efeito, nas nossas condições, é da ordem $\sigma_d = 0{,}001$ (achando que o material do cilindro é ferro), o coeficiente de dilatação linear é $\alpha = 11 \cdot 10^{-6} \cdot 1\ /^{o}C$, daqui vê-se que no aquecimento `a $T = 10^{o}$ C o aumento do comprimento da escala do cilindro pode ser:

$$\Delta l = \alpha \times T \quad => \quad \Delta l = 0{,}001$$

onde T é temperatura de aquecimento e o Δl corresponde ao valor de sigma de dilatação para o nosso caso.

2. Erro sistemático de leitura do valor **n** na escala do refractómetro, é que a precisão da escala do aparelho, conforme as suas divisões, contribui com 0,01. Para as medições mais exactas, como exige a experiência, temos que avaliar, `a vista, o dígito seguinte. Sabe-se que uma leitura a vista mais ou menos certa corresponde á 0,2 parte de divisão da escala. por isso, a contribuição deste erro foi avaliado como sendo $\sigma_l = 0{,}002$. Deste modo, o nível dos erros sistemáticos na medição do índice de de refracção, por meio de refractómetro avalia-se com [3]:

$$\sigma_n = \sqrt{\sigma_d^{\,2} + \sigma_l^{\,2}} \approx 0{,}002$$

❖ **Dos resultados de uso do Polariscópio para o diagnóstico das amostras de granadas (Tabela 7.3) e águas-marinhas (Tabela 7.8) permitiu tirar as seguintes conclusões:**

i) O polariscópio, no LG como regra, usa-se para obtenção duma informação suplementar, qualitativa que permite, `as vezes, confirmar os resultados de diagnósticos quantitativos realizados nas pedras de gema.

ii) No caso de amostras de águas-marinhas, com dupla refracção, uma rotação completa (360^o) entre os filtros polarizados permitiu encontrar 4 posições de escurecimento e 4 posições de iluminação máxima, o que vai de acordo com o tabelado. Também, observa-se alguma diferença no carácter de escurecimento do campo de observação das amostras. É que para a água-marinha a absorção da luz depende da direcção do vector eléctrico na onda luminosa. Por causa disto, nestes cristais a absorção da luz ordinária é mais forte que a extraordinária. Deste modo, uma luz natural que atravessa a água-marinha torna-se parcialmente polarizada no plano da secção geral. Este efeito aumenta com o crescimento de espessura da amostra.

iii) No caso das amostras de granada, na rotação completa (360^o) entre os filtros polarizados não se manifesta nenhum efeito de escurecimento e de de iluminação máxima, o que mostra estarmos na presença de amostras amorfas, de refracão simples, e vai de acordo com os dados tabelados de granadas.

❖ **Dos resultados de medição de peso específico (PE) por meio do método hidrostático de granadas (Tabela 7.4) e águas-marinhas (Tabela 7.9), tiram-se as conclusões seguintes:**

i) O método de pesagem hidrostático é de extrema importância na actualidade para a identificação das PG, por isso o uso da balança analítica digital na determinação do PE permitiu aumentar a precisão das medições, e consequentemente a precisão do diagnóstico das amostras. Na avaliação do peso específico, no geral, os resultados são significativos, em relação aos valores tabelados. Há uma variação de valores medidos, mas sempre dentro dos parâmetros aceitáveis de variação. Em geral, esta variação pode ser causada pela diferença do tamanho entre as amostras medidas, as que apresentam PE igual ou aproximado, são de tamanho maior. A experiência mostrou, que quanto menor fôr o peso da amostra menos exacto é o resultado obtido. Este facto explica-se pelo crescimento dos erros sistemáticos de medições das amostras de tamanho menor.

ii) As principais fontes dos erros sistemáticos identificados e calculados neste método são:

1. influência da tensão superficial da água sobre o arame do suporte, que para as condições de medições contribui com o seguinte valor: $\sigma_t \approx 0{,}001$ g;
2. dependência da variação da densidade da água em função da temperatura. Este efeito foi atenuado pelo aquecimento da água destilada para diminuir a viscosidade, e foi avaliado com o seguinte valor: $\sigma_a \approx 0{,}002$ g;
3. o erro sistemático da balança é: $\sigma_b \approx 0{,}0001$ g.

Tomando em conta os erros sistemáticos parciais foi avaliado o erro sistemático resultante σ_r como sendo:

$$\sigma_r = [\sigma_t^2 + \sigma_a^2 + \sigma_b^2]^{1/2} \approx 0{,}002 \text{ g},$$

- **Dos resultados da luminescência observada pela acção da radiação UV das ondas curtas (SW) e ondas longas (LW), de granadas (Tabela 7.5) e águas-marinhas (Tabela 7.10), tiram-se as conclusões seguintes:**

i) A análise dos resultados obtidos com o uso da radiação UV permite confirmar o complexo dos diagnósticos, quantitativo, realizados nos outros aparelhos. Os resultados observados correspondem comparativamente aos resultados tabelados de literatura, o que possibilita a caracterização destas amostras. No geral, elas são inertes sob acção da radiação UV das ondas curtas e ondas longas.

- **Dos Resultados de observação de simples refracção (SR) e dupla refracção (DR) a partir do Dicroscópio, de granadas (Tabela 7.6) e águas-marinhas (Tabela 7.11), tiram-se as conclusões seguintes:**

i) No caso de granadas, observa-se sempre uma cor Vermelho-Castanho em ambas janelas rectangulares do dicroscópio, o que vem confirmar tratar-se de amostras de refracção simples, o raio de luz percorre a amostra sem se dividir, característica das granadas.

ii) No caso de águas-marinhas, observa-se duas imagens ao mesmo tempo de uma Variedade de azul, o que mostra estarmos na presença de amostras de refracção dupla, pois o raio de luz que atravessa a amostra divide-se e percorre como dois raios, característica das águas-marinhas.

8 Conclusões Gerais e Recomendações

8.1. Conclusões Gerais

- Em relação ao TT da turmalina local, de acordo com os resultados do tratamento estatístico dos dados (média de 40% das amostras tratadas melhoraram a sua tonalidade), o método utilizado é eficaz, tomando em conta que a colheita/recolha das amostra foi aleatória. Entretanto, a aleatoriedade é muito importante, pois garante que a amostra seja representativa de toda a população de quase todas as principais regiões de ocorrência no país. Uma boa representatividade é essencial para que se produzam resultados concretos.

- Foi elaborado um método de melhoramento da tonalidade escura da turmalina verde-azul através do seu tratamento térmico. O método permite diminuir a tonalidade escura da turmalina local por 30% , isto é, atingir a óptima que resulta na subida do preço base desta pedra no mercado local entre 2 à 3 vezes. As particularidades principais do método consistem na alternação dos regimes do tratamento por um esquema especial (específico) que foi elaborado por meio de experiências, feitas em várias condições e procedimentos, para atenuar as tensões internas no volume do cristal que causam a criação das rachas e destruição posterior da rede cristalina ao longo do tratamento. O estudo detalhado das amostras tratadas mostrou que a mudança de tonalidade é estável e o procedimento elaborado não altera a maioria das características (Física-Gemológica) dos cristais, isto é, não ocorrem mudanças significativas nem na composição química e nem na estrutura cristalina do material, que possam desvalorizar o efeito de melhoramento de cor, de ponto de vista comercial.

- Os resultados obtidos sobre caracterização das granadas de Cuamba e águas-marinhas de Nipepe, são passíveis de comparação com outros tabelados, obtidos em estudos realizados por diversos autores, utilizando métodos de análise distintos. Daí que, a integração desses resultados com outros, que terão que ser realizados nas outras regiões da província do Niassa, será possível chegar a um consenso a respeito das fontes (regiões) originária desses minerais.

- O método proposto demonstrou apresentar eficiência em seu objectivo principal, o qual visou indicar que é possível caracterizar "populações" de minerais de gemas duma determinada região, para uma comparação com as de outras regiões, e apartir daí seja possível indicar a sua procedência (proveniência). Métodos com tal finalidade vem sendo requisitados, no mercado intenacional de gemas, como uma exigência de se conhecer os produtos para fins de comparação e melhor adequação aos seus propósitos.

8.2. Recomendações

- Futuramente explorar duma forma mais integral o microscópio gemológico, de modo a complementar a caraterização das amostras com o estudo das inclusões, uma das ferramentas importantes na identifição da região de proveniência das gemas.

- Continuar com o estudo nas restantes regiões de ocorrência de minerais de gemas na província de Niassa, para completar o ciclo de estudo nesta província, já que este foi um projecto piloto.

- Realizar o mesmo tipo de estudo nas restantes províncias de Moçambique, com ocorrências de minerais de gemas, para se ter informação suficiente e fiável, para a produção dum Atlas verdadeiramente de Minerais de Gemas de Moçambique e sua valorização comercial.

9 Referências Bibliográficas

1. Askarhodjaev, A., Uthui, R.J., Malate, E.L., Fazilov, A. **Diagnóstico dos diamantes por meio de radiação–X.** Revista de Academia de Ciências de República de Uzbequistão, 2002.

2. Askarhodjaev, A., Malate, E.L., Uthui, R.J. **Melhoramento da cor da turmalina escura de Moçambique por meio do seu tratamento térmico.** Revista de Academia de Ciências de República de Uzbequistão, 2003; Poster na Primeira Mostra de Ciências e Tecnologias, MESCT, 2003; Revista da Faculdade de Ciências da UEM, 2ª Edição.

3. Malate, E.L. **Montagem do Laboratório Gemológico do Departamento de Física-UEM.** Trabalho de Licenciatura, 2000.

4. Lãchelt, S. **The Geology and Mineral Resources of Mozambique.** Direcção Nacional de Geologia, Maputo-Moçambique, 2004.

5. Gübelin, E. I. & Koivula, J. I. **Photoatlas of Inclusions in Gemstones.** ABC Edition, Zurich, 1997.

6. Gübelin, E. I. & Koivula, J. I. **Photoatlas of Inclusions in Gemstones, Volume 2.** ABC Edition, Zurich, 2005.

7. Michelsen. **Gemstone Index.** Center for the study of gemstone evaluation. New Jeracy, USA, 1995; p. 12; p. 21.

8. Miller, A. & Sinkankas, J. **Standart Catalog of Gem Values.** GemStone Press, Woodstock, 1995. p. 23.

9. Webster, R. & Jobbins, E. A. **Gemmologists'Compendium.** St Edmunds Press Ltd, London 1998, p.224.

10. J. Daylog. **"the system of determination of coulor of gemstone.**

11. Ginalmazzoloto. **Guia de perito gemologo e joalheiro avaliador.** Moscovo, 1996, p.43.

12. Alonso, M. & Finn, E. J. **Física Vol.II – Campos e Ondas.** Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo – Brasil 1981, p.348 –351,367-371.

13. Martinsson, B.G.& Hansson H.C. **Nucl. Instr. & Methods B34.** 1988, p.203.

14. Anderson, B. **Gem Testing.** Butterworths, Sydney, 1983, p.226,194,195.

15. Direcção Nacional de Geologia. **Mapas Geológicos.** Maputo, 2007.

16. Iavorsky, B.M. & Detlaf, A.A. **Prontuário de Física**. Moscovo**,** "Nauka",1988, p.305.

17. Matveev, A. N. **Física Atómica.** Moscovo, "Vyschaia Chkola", 1989, p. 49.

18. Sivuhin, D. V. **Óptica.** "Nauka" Moscovo", 1985, p.165, 364.

19. Prygov, V. I. **A influência das inclusões internas dos brilhantes sobre a sua cor.** Juvelir, N 3, Março 1996, p.44.

20. Zaidel, A. N. **Avaliações dos Erros das Medições.** Editora "NAUKA", leninegrado 1968, p.15.

21. Victreen, I. A. **Mass absrption coeficient calculation.** Appl. Phy.; Vol.20; p.1141; 1949.

22. Elwell, D. **Man-Made Gemstone.** Ellis Horwood Limited, 1981, p.39,95.

23. Güntter, B. **Tables of Gemstone Identification.** Elisabeth Lenzen, 1988, 23-89p.

24. Arem, J. E. **Colour Encyclopedia of Gemstones**, New York, John Wiley & Sons, 1977, 47-70 p.

25. Hankin, R. **Gemas, Cristais & Minerais**. Lisboa, Edições 70, 1998, 43-144 p.

26. ICSL, **Price Guide Coloured Stones**, March 1997 – February 1998, P.O.Box 1354 Randburg, JHB. 12-77 p.

27. Johansson, S.A.E. & Campbell J.L. 1988. **P·I·X·E – A Novel Technique for Elemental analysis**. New York, John Wiley & Sons, 229-236 p.

28. Johansson, S.A.E.; Campbell, J.L.; Malmqvist, K.G. 1995. **Particle-Induced X-Ray Emission Spectrometry (PIXE), Vol.133**. New York, John Wiley & Sons, 367-378 p.

29. Marques, J.M. & Afonso, R.S. 1998. **Evolução Geológica de Moçambique**. 2ª Edição, Maputo, Direcção Nacional de Geologia,16, 57p.

30. Marques, J.M. & Afonso, R.S. 1998. **Recursos Minerais da República de Moçambique**. 2ª Edição, Maputo, Direcção Nacional de Geologia, 105-111p.

31. Matlins, A.L. & Bonanno, A.C. 1997. **Gem Identification Made Easy.** Woodstock Vormont, Gemstone press, 112-115 p.

32. Matveev, A.N. 1989. **Física Atómica**. Moscovo, Vyschaia Chkola, 49 p.

33. Michelsen, H.P. 1995. **Gemstone Index**. Center for the study of gemstone evaluation. New Jersey, ACS Publications, 12, 21p.

34. Miller, A. & Sinkankas, J. 1995. **Standard Catalog of Gem Values**. Woodstock, GemStone Press, 23 p.

35. Nassau, K. 1983. **The Physics' and Chemistry of color, "the Fifteen Causes of Color"**. New York, John Wiley & Sons, 184-201, 333-337p.

36. Nassau, K. 1999. **Gemstone Enhancement**. St Edmundsbury press Ltd.New York, 194 p.

37. PHYWE series publications. 1997. **University Laboratory Experiments "X-ray absorption"**. Physics. Gottigen, Germany, 4-6 p.

38. Prygov, V.I. 1996. **A influência das inclusões internas dos brilhantes sobre a sua cor**. Juvelir, N 3, Março, 44 p.

39. Schumann, W. 1996. **Gemstones of the World**. New York, Sterling, 27, 82 p.

40. Sevdermish, M. & Mashiah, A. 1996. **The Dealer's Book of Gems & Diamonds**, **vol. I**. Israel, Kal Priting House, Cap. 26, 27, 29; 358-360, 362-363, 375, 385 p.

41. Utui, R.J. 1996. **Assembling of a low energy ion beam analysis facility and use of Nuclear Microprobe techniques in geological studies**. Lund University, Department of Nuclear Physics, Lund, Sweden, Doctoral Thesis, 36-39, 54 p.

42. Webster, R. & Jobbins, E.A. 1988. **Gemmologist's Compendium**. London, St Edmunds, 224 p.

43. Woodwrad, C. & Harding, R. 1992. **Guia das Pedras Preciosas**. Lisboa, Editorial Presença, 21-24, 88-95 p.

44. Victreen, I.A. 1949. **Mass absorption coefficient calculation**. Appl. Phy.; Vol. 20, 1141, 1949 p.

45. Da Costa, J. B. **Estudo e Classificação das Rochas por Exame Macroscópico. 8ª** Edição, Serviço de Educação, Editora: Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1993, p 64.

46. Borges, F. S. **"Elementos de Cristalografia"**, 2ª Edição, Serviço de Educação, Editora: Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1996, p 12, 425-433.

47. De Carvalho, R. G. **Gemologia: Conhecer as Inclusões,** In "Revista Inpulso" nº 12, Abril/Maio 2000.

48. "**Depósitos Minerais 1: Origem e Distribuição**", The Open University, Os Recursos Físicos da Terra, Editora da UNICAMP, SP, Brasi, 1997.

49. "**Recursos, Economia e Geologia: Uma Introdução**", The Open University, Os Recursos Físicos da Terra, Editora da UNICAMP, SP, Brasi, 1994.

50. "**Gem Reference Guide**", Gemological Institute of America (GIA), USA, 1995.

51. Liccardo, A. "**Inclusões cristalinas e fluidas e seus aspectos gemológicos"**, Área de Mineralogia-Gemologia, UFOP, Brasil, 2005.

52. Anderson, B. W. **Gem Testing**, CIBJO: **Blue Book**, Edição 2006 & Webster, R.: Gems Their Sources, Descriptions and Identification.

53. Da Silveira, L. A. **"Pleocroísmo, 1ª e 2ª partes",** Portal Joia-br, Artigos Tesis, 2010.

54. Roedder, E. (1984) **"Fluid inclusions"** Vol. 12. Reviews in Mineralogy, (Ed. Ribbe, P. E.) Mineralogical Society of America, 644 p.

55. De Vivo B. and Frezzotti M. L., editors (1994): c Short Course of the IMA Working Group **"Inclusions in Minerals"** (Pontignano - Siena, 1-4 September, 1994), Published by Virginia Tech, USA.

56. Nardy, A.J.R; Machado, F.B. "**Mineralogia Óptica"**, Portal Joia-br, Artigos Tesis, 2010, cap.IV, pag.44.

57. Nunes, E.H.M. **"Caracterização de Ametistas Naturais"**, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2008.

58. www.joiasbr.com.br/gemlab - 22 de Julho de 2010.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

MINERAIS-GEMAS DE MOÇAMBIQUE: *OCORRÊNCIAS E CARACTERIZAÇÃO DOS ASPECTOS FÍSICOS, GEMOLÓGICOS, GEOLÓGICOS E DAS INCLUSÕES.*

Autor: Enoque Lopes Malate

Supervisor: **Prof. Doutor Akil Askarhodjaev**