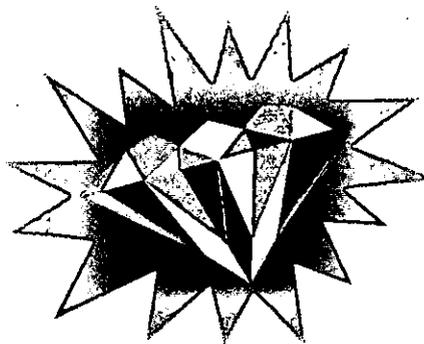


Fis 65

**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

Trabalho de Licenciatura

**DETERMINAÇÃO DAS PEDRAS PRECIOSAS
USANDO
MÉTODOS DA FÍSICA MODERNA**



Autor:

Carlos Alfredo Nuyunga

Maputo, Dezembro de 1997

539
Nuv
215



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

Trabalho de Licenciatura

**DETERMINAÇÃO DAS PEDRAS PRECIOSAS
USANDO
MÉTODOS DA FÍSICA MODERNA**

**Supervisor:
Prof. Dr. Akil Askarhodjaev**

Maputo, Dezembro de 1997

À memória de Alfredo Nuvunga, o pai,
ao Alfredo e Arnaldo, os filhos
e
à Salita Quive, a mãe.



AGRADECIMENTOS

Palavras e mais palavras nunca seriam suficientes para exprimir a minha gratidão às pessoas que, directa ou indirectamente, contribuíram para a existência deste trabalho e o sucesso dos meus estudos. Contudo, gostaria de deixar expressa a minha profunda gratidão a todas essas pessoas e em particular:

Ao Sr. Prof. Dr. Akil Askarhodjaev, meu supervisor, e à família. A ele pelo acompanhamento, sugestões, conselhos e tempo dispensados, que foram de grande utilidade e estimulantes na realização deste trabalho e à família pela bondade que teve em dispensar parte do tempo necessário para o convívio familiar a meu favor.

Ao Sr. Eng. José Salomone Cossa, Director-Geral da Empresa Nacional de Aeroportos de Moçambique e por seu intermédio, a toda a direcção da ADM e ao Sr. Felismino Charas, Director do Aeroporto Internacional de Maputo e toda a direcção do AIM pelas facilidades concedidas para os meus estudos.

Ao Sr. Prof. Dr. Rogério José Utui, ao Sr. dr. Genito Maure, à colega Ana Maria da Costa e ao Projecto de Investigação em Física Nuclear pelo equipamento disponibilizado, que foi de grande importância na realização deste trabalho.

Ao Sr. dr. Hermínio Tembe, Chefe do Departamento de Física; à Sr^a. dr^a. Mayra de Sousa, Directora do Curso de Física, a todos os professores do Departamento de Física, aos senhores Rego, Etelvina, Rosa, Macamo, Otilia, Rafael, Alice, e demais trabalhadores do Departamento de Física por tudo quanto fizeram pela minha formação.

Aos Srs. Eduardo Machiana e Samuel Matlombe, meus colegas e amigos e ao Sr. dr. Constantino Dombo pelo incessante incitamento e estímulo na realização deste trabalho.

Ao Sr. Chefe do Departamento de Geologia, ao Sr. Dr. Achimo, aos Sr. Artur e Elisa, bibliotecários do Departamento de Geologia, à Sr^a. Filomena e Sr. Maconzo, Engenharia Mecânica e ao Sr. Panguene, Técnico de laboratório do Departamento de Química pelos serviços prestados em prol deste trabalho.

Aos meus filhos Alfredo e Arnaldo, à minha mãe, à Pegina, à Susana Zacarias e a todos os meus familiares pelos sacrifícios consentidos e por tudo quanto têm feito por mim.

A todos, muito obrigado !

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 da inteira responsabilidade do autor.

Maputo, Dezembro de 1997.

O autor


(Carlos Alfredo Nuvunga)

RESUMO

Com o desenvolvimento da indústria gemológica em Moçambique surge a necessidade de uma instituição especializada, dotada de uma capacidade técnica-científica para o controle da qualidade das pedras preciosas produzidas. Com efeito, no mercado gemológico depara-se frequentemente com o problema da existência de gemas sintéticas, que podem ser confundidas com as pedras preciosas naturais. Uma das tarefas principais de um gemologista é, por isso, de determinar se uma gema é natural ou sintética. Estas determinações são de grande importância porque uma gema natural pode valer centenas de vezes mais que a sua congênera sintética. A autenticidade de uma gema é determinada a partir das suas propriedades físicas e neste caso, a aplicação dos métodos de Física na determinação das pedras preciosas reveste-se de grande importância económica e científica. O trabalho circunscreve-se nos programas de montagem de um Laboratório Gemológico no Departamento de Física da Universidade Eduardo Mondlane.

O trabalho consiste, como o título sugere, na determinação das pedras preciosas usando métodos da Física Moderna e é dividido em três capítulos:

No primeiro capítulo faz-se a descrição, baseada na literatura afim, das propriedades gerais de algumas pedras preciosas de Moçambique, dos métodos físicos e equipamentos de determinação das pedras preciosas e dos métodos de tratamento dos erros das observações experimentais.

O segundo capítulo é dedicado á descrição das experiências realizadas, a maneira como os resultados experimentais são usados para a determinação das pedras preciosas.

O capítulo três dedica-se ao estudo detalhado do método de reflectografia de laser aplicado no estudo das pedras preciosas lapidadas, que consiste na análise da distribuição espacial da luz reflectida e transmitida através duma pedra preciosa lapidada, no sentido de que o reflectograma (como é designada a imagem obtida) é característica para uma dada pedra preciosa lapidada, servindo também para efeitos de diagnóstico.

Na última parte do trabalho são feitas conclusões e recomendações.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	3
DECLARAÇÃO DE HONRA.....	4
RESUMO	5
ÍNDICE	6
INTRODUÇÃO.....	8
CAPITULO I.....	9
1. PEDRAS PRECIOSAS DE MOÇAMBIQUE E O PROBLEMA DA SUA DETERMINAÇÃO	9
1.1. DESCRIÇÃO DAS PROPRIEDADES DE ALGUMAS PEDRAS PRECIOSAS DE MOÇAMBIQUE.....	9
1.1.1. <i>Aguamarinha</i>	9
1.1.2. <i>Esmeralda</i>	10
1.1.3. <i>Granada</i>	10
1.1.4. <i>Rubi</i>	11
1.1.5. <i>Turmalina</i>	12
1.2. MÉTODOS TRADICIONAIS DE DETERMINAÇÃO DAS PEDRAS PRECIOSAS.....	12
1.2.1. <i>Determinação das pedras preciosas pela medição da dureza</i>	12
1.2.2. <i>Determinação das pedras preciosas pela medição da densidade</i>	13
1.2.3. <i>Luminescência das pedras preciosas</i>	13
1.2.4. <i>Determinação das pedras preciosas pela medição do índice de refração</i>	14
1.2.5. <i>O polariscópio e o método de polarização</i>	14
1.2.6. <i>Outros métodos e equipamentos tradicionais de determinação das pedras Preciosas</i>	14
1.3. PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DAS PEDRAS PRECIOSAS.....	15
1.3.1. <i>classificação das substâncias segundo as suas propriedades magnéticas</i>	15
1.3.2. <i>Magnetismo nos minerais</i>	16
1.4. POLARIZAÇÃO DA LUZ TRANSMITIDA ATRAVÉS DAS PEDRAS PRECIOSAS.....	17
1.6. TRATAMENTO DOS RESULTADOS OBTIDOS NAS MEDIÇÕES.....	18
1.6.1. <i>Erros sistemáticos</i>	18
1.6.2. <i>Erros acidentais</i>	18
CAPÍTULO II.....	20
2. APROVEITAMENTO DE ALGUNS MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DAS PEDRAS PRECIOSAS ..	20
2.1. MONTAGEM DE UM DISPOSITIVO EXPERIMENTAL MULTIDISCIPLINAR PARA O DIAGNÓSTICO DAS PEDRAS PRECIOSAS.....	20
2.2. DETERMINAÇÃO DA TURMALINA PELO MÉTODO DE POLARIZAÇÃO.....	21
DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	22
2.3. DETERMINAÇÃO DAS PEDRAS PRECIOSAS PELA LUMINESCÊNCIA.....	24
<i>Considerações gerais</i>	24
<i>Observação da luminescência sob acção dos raios-x</i>	24
<i>Observação da luminescência sob acção dos raios catódicos</i>	25
<i>Discussão dos resultados</i>	26
2.4. DIAGNÓSTICO DAS PEDRAS PRECIOSAS PELA SUA MAGNETIZAÇÃO.....	27
<i>Dispositivo experimental</i>	28
<i>RESULTADOS</i>	29
<i>Discussão dos resultados</i>	30
2.5. DETERMINAÇÃO DAS PEDRAS PRECIOSAS PELO PESO ESPECÍFICO.....	31
<i>Considerações gerais</i>	31
<i>Dispositivo experimental</i>	31
<i>Resultados</i>	32
<i>Discussão dos resultados</i>	32
2.5. APLICAÇÃO DA RADIAÇÃO NA INVESTIGAÇÃO DA ESMERALDA.....	33
<i>Considerações gerais</i>	33

<i>Discussão dos resultados</i>	34
CAPÍTULO III	35
3. DETERMINAÇÃO DAS PEDRAS PRECIOSAS E DESCOBRIMENTO DOS DEFEITOS DE LAPIDAÇÃO PELO MÉTODO DE REFLECTOGRAFIA DE LASER	35
3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	35
3.2. DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE REFLECTOGRAFIA DE LASER DAS PEDRAS PRECIOSAS.....	36
3.3. TRAJECTÓRIA DA LUZ NAS PEDRAS PRECIOSAS TRANSPARENTES LAPIDADAS.....	36
3.3. DESCRIÇÃO DOS MODELOS EXPERIMENTAIS DE OBSERVAÇÃO E REGISTO DOS REFLECTOGRAMS DAS PEDRAS.....	37
3.4. DETERMINAÇÃO DAS DISTÂNCIAS FOCAIS DAS LENTES.....	41
3.5. OBSERVAÇÃO E REGISTO DOS REFLECTOGRAMAS DAS PEDRAS PRECIOSAS LAPIDADAS.....	42
3.6. AVALIAÇÃO DAS DEFLEÇÕES ADMISSÍVEIS DOS ELEMENTOS DO ESQUEMA ÓPTICO ELABORADO.....	43
3.6.1. Valor admissível da deflexão angular do feixe do laser.....	44
3.6.2. Valor admissível do deslocamento paralelo do feixe de laser.....	45
3.6.3. Deflexão angular admissível do feixe do laser na entrada.....	46
3.6.4. Deslocamento admissível das lentes ao longo do eixo óptico.....	47
3.6.5. Deflexões angulares admissíveis das lentes.....	47
3.6.6. Variações admissíveis da posição do écran.....	48
3.7. ANÁLISE DO REFLECTOGRAMA DA PEDRA PRECIOSA LAPIDADA NA FORMA CLÁSSICA CR-57.....	49
3.8. Análise dos resultados.....	50
3.9. PERSPECTIVAS DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DE REFLECTOGRAMA DAS PEDRAS PRECIOSAS.....	50
4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	52
4.1. CONCLUSÕES.....	52
4.2. RECOMENDAÇÕES.....	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

INTRODUÇÃO.

Por determinação de uma pedra preciosa entende-se a identificação da sua verdadeira natureza. Sendo as pedras preciosas essencialmente minerais, a maioria dos métodos desenvolvidos na mineralogia para a determinação dos minerais é geralmente aplicada na determinação das pedras preciosas. Contudo, o gemologista deve restringir os seus testes a métodos não destrutivos, particularmente na análise das pedras preciosas lapidadas. Neste sentido, uma série de métodos baseados nas propriedades físicas da matéria é frequentemente aplicada; são os chamados métodos tradicionais de determinação. Outros, baseados nos métodos modernos da física vêm sendo introduzidos na gemologia. São os casos, por exemplo, dos testes de microdureza, condutibilidade térmica e espectros infravermelhos de reflexão.

Os objectivos deste trabalho são os seguintes:

- Análise bibliográfica de diversos métodos de determinação das pedras preciosas.
- Usando o equipamento disponível nos laboratórios do Departamento de Física, montar dispositivos destinados à determinação das pedras preciosas.
- Aplicar alguns métodos tradicionais, bem como os baseados na aplicação dos métodos da Física Experimental Moderna, para a determinação das pedras preciosas de Moçambique.
- Na base de um laser e de um banco óptico, montar um dispositivo de análise dos parâmetros de lapidação e do estudo de outras propriedades determinativas das pedras preciosas. Este dispositivo deve ser multidisciplinar, na medida em que com pequenas mudanças dos elementos do banco óptico é possível a realização de múltiplas tarefas.

O dispositivo montado possui três vantagens fundamentais: Económica, multidisciplinaridade e didáctica. Económica porque o equipamento usado não precisa de ser comprado, encontra-se à disposição no Departamento de física, multidisciplinar porque, como já foi dito no caso do método de reflectografia de laser, permite realizar muitas investigações pela mudança ou deslocamento dos elementos do sistema óptico e didáctica porque permite a aplicação dos conhecimentos adquiridos em tarefas concretas.

CAPITULO I

1. PEDRAS PRECIOSAS DE MOÇAMBIQUE E O PROBLEMA DA SUA DETERMINAÇÃO.

1.1. Descrição das propriedades de algumas pedras preciosas de Moçambique.

1.1.1. Aguamarinha.

A aguamarinha é um cristal que pertence ao grupo do berilo. Pode ser confundida com o euclásio, cianita, topázio, zircão e imitações de vidro. O azul escuro é o tipo mais valioso. As pedras de qualidade inferior podem ser aquecidas até à temperatura de 400 °C para a indução do azul intenso do tipo mais cobiçado. Por causa de inclusões de substâncias estranhas as suas propriedades físicas podem variar. A sua sintetização é um processo oneroso, por isso, não rentável. A tabela 1.1.1 mostra as propriedades da aguamarinha (Klein e Hurlbut 1971, Schumann 1977) : Em todas as tabelas das propriedades das pedras preciosas, as linhas intensas do espectro de absorção são sublinhadas e as linhas fracas são colocadas entre parênteses.

Tabela 1.1.1: propriedades da aguamarinha.

Cor: Azul claro, azul, azul esverdeado.	Dupla refração: -0.006
Cor de listra: Branca.	Índice de refração: 1.577-1.583
Dureza de Mohs: $7\frac{1}{2}$ - 8	Pleocroísmo: Azul claro, quase incolor, azul celeste.
Gravidade específica: 2.67-2.71.	Espectro de absorção (\square): <u>5370</u> , 4560, 4270.
Clivagem: Nenhuma.	Fluorescência: Nenhuma.
Fractura: Concooidal, desigual, quebradiça.	Transparência: Transparente à opaca.
Sistema cristalino: Hexagonal (trigonal).	Inclusões: Hastes ocas que por vezes reflectem luz branca.
Composição química: $Al_2Be_3(Si_6O_{18})$	

1.1.2. Esmeralda.

A esmeralda é uma pedra semi-preciosa translúcida e regra geral verde, devido ao teor de cromo. Pertence ao grupo do berilo, sendo a mais preciosa do grupo. A sua cor é estável sob efeitos de luz e calor, alterando-se somente sob temperaturas de 700-800°C. A esmeralda é confundível com o demantóide - que é uma variedade da andradita, o diopsídio, diopásio, grossulária, "hiddenita", peridoto, turmalina verde e com a uvarivota. Existem esmeraldas sintéticas de boa qualidade e imitações de vidro. A tabela 1.1.2 mostra as propriedades da esmeralda (Klein e Hurlbut 1971, Schumann 1977).

Tabela 1.1.2: propriedades da esmeralda.

Cor: Verde esmeralda, azul, azul esverdeado.	Índice de refração: 1.576-1.582
Cor de listra: Branca.	Dupla refração: 0.006
Dureza de Mohs: $7\frac{1}{2}$ - 8	Pleocroísmo: Definido, verde, azul esverdeado à amarelo esverdeado
Gravidade específica: 2.67-2.78	Espectro de absorção (\square): 6835, 6806, 6620, 6460, 6370, (6060), (5940), 5800, 4774, 4725
Clivagem: Nenhuma.	Fluorescência: Usualmente nenhuma.
Fractura: Concoidal pequena, desigual, quebradiça.	Transparência: Transparente à opaca.
Sistema cristalino: Hexagonal (trigonal), prismas hexagonais, colunar.	Composição química: $Al_2Be_3(Si_6O_{18})$

1.1.3. Granada.

Granada é um nome comum dado a um grupo de vários minerais coloridos, com uma composição química similar. No sentido popular do termo, por granada designa-se as duas variedades vermelhas: A almandina e o piropo. A fórmula química geral de todos os elementos que constituem o grupo das granadas é $A_3B_2(SiO_4)_3$, onde *A* pode ser Mg, Ca, Mn, e Fe e *B* pode ser Al, Fe, Cr e Ti. Os dados comuns de todas as variedades de granadas são dadas na tabela 1.1.3 (Klein e Hurlbut 1971, Schumann 1977).

Tabela 1.1.3: Propriedades gerais da granada.

Cor de listra: Branca.	Dupla refração: Apenas a rodolita.
Clivagem: Imperfeita.	Pleocroísmo: Nenhum.
Fractura: Concoidal, irregular, quebradiça.	Fluorescência: Nenhuma.
Sistema cristalino: Isométrico, rômboico, dodecaedro icositetraedro	Transparência: Transparente à translúcida

1.1.3.1. Almandina.

A almandina é a variedade de granada de cor vermelha com matiz violeta. As propriedades particulares da almandina são dadas na tabela 1.1.4 (Klein e Hurlbut 1971, Schumann 1977).

Tabela 1.1.4: Propriedades da almandina.

Cor: Vermelha com matiz violeta.	Índice de refração: 1.71-1.81.
Dureza de Mohs: $7\frac{1}{2}$	Dispersão: 0.024
Gravidade específica: 3.95 - 4.20.	Espectro de absorção (\square): 6170, 5760, 5260, 5050, 4760, 4620, 4380, 4280, 4040, 3930.
Composição química: $Fe_3Al_2(SiO_4)_3$	

1.1.3.2. Piropo.

O piropo é uma das variedades da granada. A sua cor é vermelha com matiz castanha. Pode ser confundido com a almandina, a espinela (incolor, vermelha, vermelho do rubi a preto) e com o rubi. A *rodolita* é uma variedade do piropo de cor rosa avermelhada ou violeta pálido. A tabela 1.1.5 mostra as propriedades do piropo (Klein e Hurlbut 1971, Schumann 1977).

Tabela 1.1.5: Propriedades do piropo.

Cor: Vermelha com matiz castanha.	Índice de refração: 1.730-1.760.
Dureza de Mohs: 7 - 7½	Dispersão: 0.022
Gravidade específica: 3.65-3.80.	Espectro de absorção (□): 6870, 6850, 6710,
Composição química: $Mg_3Al_2(SiO)_3$	6500, 6200-5200, 5050.

1.1.4. Rubi.

O rubi é uma pedra preciosa transparente, de um vermelho muito vivo. Pertence ao grupo do corundão. O seu vermelho varia de depósito em depósito, de modo que não é possível determinar a zona de ocorrência pela cor. A cor mais desejável é a do sangue do pombo, vermelho puro com aparências azuladas. As suas propriedades do rubi são dadas na tabela 1.1.6 (Klein e Hurlbut 1971, Schumann 1977).

Tabela 1.1.6: Propriedades do rubi.

Cor: Vermelha variável.	Índice de refração: 1.766 - 1.774
Cor de listra: Branca.	Dupla refração: -0.008
Dureza de Mohs: 9	Dispersão: 0.018
Clivagem: Nenhuma.	Pleocroísmo: Intenso, amarelo avermelhado, vermelho de rubi muito intenso.
Fractura: Concooidal pequena, irregular, estilhadiça, quebradiça.	Espectro de absorção (□): 6942, 6928, 6680, 6592, 6100-5000, 4765, 4750, 4685.
Sistema cristalino: hexagonal (trigonal), prismas ou tabuletas hexagonais.	Fluorescência: Vermelho de rubi forte.
Composição química: Al_2O_3	Transparência: Opaco, translúcido, transparente.

1.1.5. Turmalina.

A turmalina é um cristal duro ocorrendo sob múltiplas cores. As suas variedades são a acroite, incolor ou quase incolor, rubelite, de cor de rosa a vermelha com uma matiz violeta. A variedade da cor do rubi é a mais preciosa. As suas propriedades gerais da turmalina são dadas na tabela 1.1.7. (Klein e Hurlbut 1971, Schumann 1977).

Tabela 1.1.7: Propriedades da turmalina.

Cor: Incolor, cor de rosa, vermelha, amarela, castanha, verde, violeta, preta, multicolor.	Fractura: Irregular, concoidal pequena e quebradiça.
Cor de listra: Branca.	Dupla refração: -0.008
Dureza de Mohs: 7 - 7 $\frac{1}{2}$	Dispersão: 0,018
Gravidade específica: 3.02 - 3.26	Índice de refração: 1.766 - 1.774
Pleocroísmo: Vermelho, vermelho claro e escuro, castanho definido, castanho, castanho escuro. Verde intenso e verde escuro fracos.	Espectro de absorção (\square): Vermelho: 5550, 5370, 5250 - 4610, 4560, 4510, 4280.
Vermelho	Verde: 4970, 4610, 4150.
Clivagem: Nenhuma.	Fluorescência: Incolor, verde azulada, amarela pálida, e verde azulada todas fracas. Vermelho.
Sistema cristalino: Hexagonal (trigonal), usualmente apresenta-se sob forma de cristais longos com secção triangular e lados redondos.	Transparência: transparente e opaca.

1.2. Métodos tradicionais de determinação das pedras preciosas.

Actualmente, várias técnicas e instrumentos que permitem uma análise eficiente das pedras preciosas têm sido desenvolvidos, principalmente na base das propriedades físicas (Sechos 1980 e Lawrence 1982). Neste parágrafo é feita uma breve descrição dos métodos frequentemente usados na determinação das pedras preciosas.

1.2.1. Determinação das pedras preciosas pela medição da dureza.

Um dos métodos tradicionais de determinação das pedras preciosas é o da medição da sua dureza relativa, que é o grau de resistência que uma superfície de um cristal oferece a ser riscada. A dureza é avaliada, geralmente, pela escala de dureza de Mohs, que consiste de 10 cristais tomados como padrão, cujas designações e as respectivas durezas são: Talco (1), gipso (2), calcita (3), flourita (4), apatita (5), ortoclásio (6), quartzo (7), topázio (8), corindo (9) e diamante (10). Nesta escala, cada cristal pode riscar o anterior e cristais de igual dureza não se riscam mutuamente. A dureza de um cristal é obtida por comparação, riscando o cristal com os cristais da escala.

1.2.2. Determinação das pedras preciosas pela medição da densidade.

Na gemologia, onde se trabalha frequentemente com pedras de pequenas dimensões, os métodos de teste comumente usados são o da balança hidrostática e o dos líquidos pesados (Anderson 1970).

O funcionamento de uma balança hidrostática baseia-se no princípio de Arquimedes, segundo o qual, todo o sólido mergulhado num líquido sofre, da parte deste, uma força de impulsão vertical de baixo para cima, numericamente igual ao peso do volume do líquido deslocado. A

pesagem é feita usando balanças laboratoriais de precisão não inferior 0,1 mg. O cristal em estudo, cuidadosamente limpo e pesado no ar, é fixado numa cavidade helicoidal da extremidade inferior duma haste de cobre e o sistema é pesado na água. O cálculo da densidade é feita usando a fórmula seguinte:

$$\rho = \frac{m}{m - (m_l - m_m)} \cdot \rho_l(T) \quad (1.2.2.1)$$

Onde : m - massa do peso que equilibra o cristal no ar, m_l - massa do peso que equilibra o cristal com a mola na água, m_m - massa do peso que equilibra a mola na água e $\rho_l(T)$ - a densidade da água à temperatura da experiência.

O método dos líquidos pesados consiste em mergulhar a amostra em líquidos de diferentes densidades até que num deles fique suspenso, sem emergir nem submergir. Neste caso, $\rho_{cristal} \approx \rho_{liquido}$. O método dos líquidos pesados é mais rápido em comparação com o da balança hidrostática.

1.2.3. Luminescência das pedras preciosas.

A luminescência é o termo geral que designa a emissão não termal de radiação quando um corpo é sujeito à acção da radiação. O comprimento de onda da radiação luminescente é sempre maior que a da radiação excitadora. À luminescência que cessa com a interrupção da fonte excitadora dá-se o nome de fluorescência, e a outra é chamada fosforescência. Não existe, contudo, uma demarcação nítida entre os dois fenómenos. Actualmente (Leverenz 1968, Marshal 1988, Utui et al. 1997) a fluorescência é definida como a radiação que cessa dentro de 10^{-8} segundos após a remoção da fonte da radiação excitadora.

A energia excitadora apresenta-se sob diversas formas, tais como: Raios ultravioleta, iões, raios-X e raios catódicos; ou ainda sob forma de perturbações mecânicas.

O processo básico da luminescência (Remond et al. 1992) consiste na excitação de um electrão atómico do seu estado energético fundamental E_0 para um estado excitado E_1 , seguida do processo de desexcitação para o estado fundamental com a emissão de um fóton geralmente luminescente. Durante o processo de desexcitação, uma emissão fluorescente tem lugar se o electrão excitado retornar directamente para o seu estado fundamental. No processo de desexcitação que envolve um estado metaestável E_m , dá-se a fosforescência. De acordo com este mecanismo, o electrão excitado é "armadilhado" no estado metaestável, em que a transição espontânea E_m para E_0 é proibida. Neste caso, o sistema manter-se-à neste estado a não ser que absorva uma energia suficiente (esta energia pode ser obtida sob forma de calor da vizinhança) para atingir o estado excitado, com o possível retorno ao estado fundamental.

A luminescência nos cristais pode ser intrínseca, resultante da violação da periodicidade da rede cristalina, ou extrínseca, devida à presença de impurezas na rede (átomos ou iões estranhos)

No diagnóstico das gemas usa-se frequentemente a análise comparativa da sua luminescência. A luminescência dos cristais em geral, e das pedras preciosas em particular, encontra-se descrita em muitas publicações (Levshin 1972, Tarashan 1978, Bosch e Mones 1979).

1.2.4. Determinação das pedras preciosas pela medição do índice de refracção.

O índice de refracção é uma grandeza importante na determinação de um cristal. Os aparelhos mais usados na sua medição são diversos refractómetros, cujo funcionamento basea-se no

princípio de reflexão interna total dum feixe luminoso que incidir perpendicularmente sobre uma superfície de separação de dois meios de índices de refração diferentes (Smith 1980 e Hobbs 1981)

A parte operacional de um refractómetro é um prisma ou semiesfera de vidro com um elevado índice de refração, sobre o qual se coloca o cristal em estudo. Para a medição do índice de refração, faz-se incidir um feixe monocromático de luz sob um ângulo de 90° em relação à normal da superfície de separação do cristal e do vidro, a chamada incidência rasante. Neste caso, quando o índice de refração do vidro for menor que o do cristal, observa-se, por meio de um sistema de lentes focalizadoras, uma linha de separação entre uma zona iluminada e outra escura. O índice de refração é lido directamente numa escala graduada. Existem vários tipos de refractómetros, com um diapasão de medições de 1.3 à 1.85 (Read 1980, Murlbut 1981)

1.2.5. O polariscópio e o método de polarização.

Os testes mais informativos são baseados nas propriedades ópticas da pedras preciosas. O teste para saber se uma pedra é isotrópica ou anisotrópica pode ser feita rapidamente usando um microscópio polarizador. Um tipo simples usado pelos gemologistas é igualmente efectivo para o diagnóstico. É composto de duas placas polarizadoras, uma acima da outra sendo a fonte de luz localizada abaixo deles. As placas são ajustadas numa posição cruzada, ajustando o polarizador superior até que passe por ele um o mínimo de luz. Uma pedra preciosa transparente colocada na placa inferior e rodada lentamente permanecerá escura se for isotrópica (isométrica ou não cristalina), por outro lado tornar-se-à alternadamente clara e escura se for anisotrópica.

1.2.6. Outros métodos e equipamentos tradicionais de determinação das pedras Preciosas.

Além dos métodos e equipamentos acima descritos, existem outros meios de determinação das pedras lapidadas, tais como o método de medição da condutibilidade térmica (Hoover 1983 e Vila 1982); a análise sob raios-X (Dum 1977 e Fivhl 1982); uso duma caneta especial que deixa, na superfície da pedra, uma marca característica para cada tipo de cristal. Por exemplo, sobre o diamante deixa uma linha recta e no zircónio uma marca de formato de uma gota.

Existem também outros métodos não tradicionais de determinação da pedras preciosas, como é o caso da marcação usando um feixe fino de LASER, uso de programas especializados de computação, análise das superfícies das pedras (Gresser 1983), etc. Importa fazer referência aos métodos modernos de determinação baseados na análise dos espectros infravermelhos de reflexão (Fritsch 1987 Vohmiancev 1988).

1.3. Propriedades magnéticas das pedras preciosas.

Quando um corpo qualquer é sujeito à acção de um campo magnético externo adquire um certo grau de propriedades magnéticas (Brailsford 1966). Este fenómeno denomina-se magnetização.

Um campo magnético de intensidade \vec{H} , no vazio, produz uma indução magnética, \vec{B} (Brailsford 1966).

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (1.3.1)$$

Se \vec{H} actuar num material duma substância qualquer, seja ela um gás, líquido ou sólido, à indução magnética sobrepõe-se outra componente, \vec{M} , denominada intensidade de magnetização.

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} + \vec{M} \quad (1.3.2)$$

Ao material se associa, neste caso, uma permeabilidade absoluta, $\mu_m = B/H$. A permeabilidade μ_m contém, como é obvio, uma contribuição referente ao espaço vazio e outra relacionada com o próprio material. De (1.3.2) resulta que $B/H = \mu_0 + M/H$, onde M/H é chamada susceptibilidade magnética absoluta do materiais, denotada por χ . Então,

$$\mu_m = \mu_0 + \chi \quad (1.3.3)$$

Dividindo (1.3.3) por μ_0 obtém-se $\mu_m/\mu_0 = 1 + \chi/\mu_0$, e pode se escrever a expressão:

$$\mu_r = 1 + \chi_r \quad (1.3.4)$$

$\chi_r = \chi/\mu_0$ denomina-se susceptibilidade relativa, resultando que μ_r e χ_r são grandezas adimensionais.

1.3.1. classificação das substâncias segundo as suas propriedades magnéticas.

Os átomos de algumas substâncias caracterizam-se por possuírem momentos magnéticos totais nulos porque as componentes dos seus momentos magnéticos orbitais compensam-se, resultando num momento magnético orbital nulo, o mesmo acontecendo com os momentos magnéticos de spin. Por outro lado, os átomos de outros elementos possuem momentos magnéticos não nulos. De acordo com estas propriedades, as substâncias podem ser classificadas em *diamagnéticas*, *paramagnéticas*, *ferromagnéticas* (Brailsford 1966).

Substâncias Diamagnéticas: Apesar de algumas substâncias apresentarem momentos magnéticos nulos, nelas se induzirá um momento magnético se forem submetidas à acção de um campo magnético externo. A componente precessional da rotação de cada electrão produz outra componente do campo magnético induzido num sentido oposto à \vec{H} . Em virtude de cada electrão extra-nuclear ser afectado desta maneira, o efeito de magnetização existe em todas as substâncias e as substâncias que obedecem a este tipo de magnetização são chamadas diamagnéticas. A susceptibilidade magnética deste tipo de substâncias é sempre menor que zero e é dada pela expressão seguinte:

$$\chi = -\frac{\mu}{H} \quad (1.3.5)$$

A permeabilidade magnética absoluta destas substâncias, μ_m é menor que a permeabilidade magnética do vácuo, μ_0 . Por isso, a sua permeabilidade magnética *relativa*, μ_r é menor que a unidade.

Substâncias Paramagnéticas: O paramagnetismo ocorre nas substâncias em que os átomos ou moléculas constituintes possuem momentos magnéticos. Uma vez que o movimento caótico dos átomos ou moléculas numa substância destrói a regularidade da distribuição dos seus momentos magnéticos, a magnetização diminui com o aumento da temperatura. Retirando-se o corpo do campo magnético externo o movimento caótico destrói a magnetização que possa ter restado da magnetização induzida. As substâncias paramagnéticas são materiais fracamente magnetizáveis. Neste caso a susceptibilidade magnética relativa é maior que zero (não atingindo, porém, valores muito grandes) e a permeabilidade relativa é um pouco maior que a unidade.

Substâncias Ferromagnéticas: Dá-se o nome de ferromagnéticas às substâncias que possuem uma permeabilidade magnética, μ_m muito maior que a do vácuo, μ_0 . Um exemplo típico desta classe é o ferro, que tem a propriedade de possuir uma indução magnética muitas vezes superior que a do campo magnético externo. Outras substâncias como o aço, níquel, cobalto, gadolínio (metal raro), bem como algumas ligas metálicas possuem propriedades semelhantes.

O ferromagnetismo caracteriza, geralmente, as substâncias que contêm na sua composição química elementos de transição e das terras raras. Nestes elementos os momentos de spin e os momentos angulares dos electrões adjacentes não se cancelam mutuamente devido à presença de electrões desemparelhados.

As substâncias ferromagnéticas distinguem-se das substâncias diamagnéticas e paramagnéticas por uma série de propriedades:

- A curva de magnetização, $B = f(H)$, tem um carácter complexo. No caso das substâncias diamagnéticas o gráfico é uma linha recta de coeficiente angular negativo e nas paramagnéticas é uma recta de coeficiente angular positivo.
- Uma substância ferromagnética é constituída por uma série enorme de regiões magnetizadas, chamadas domínios magnéticos. Submetendo a substância à acção de um campo magnético externo, estes domínios reorganizam-se de modo que, para um dado valor de H_s , chamado magnetização de saturação, eles orientam-se todos no mesmo sentido.

1.3.2. Magnetismo nos minerais.

Os minerais são chamados paramagnéticos quando forem atraídos por um íman e diamagnéticos quando repelidos. Os minerais ferromagnéticos são aqueles que conservam uma magnetização remanescente depois da retirada do campo magnetizante. Para efeitos determinativos (Anderson 1983 e Zussman 1967) os cristais são classificadas em magnéticas fortes, magnéticas médias, magnéticas fracas e quase não magnéticas. Nomeadamente:

- **Pedras magnéticas fortes:** Almandina, espessartina, rodocroita, ropdonita e hematita.
- **Pedras magnéticas médias:** Demantóide, epidota, Plonasta, piropo e turmalina verde escura.
- **Pedras magnéticas fracas:** Singalita e turmalina verde.
- **Pedras quase não magnéticas:** Quartzo e zircónio cúbico.

1.4 polarização da luz transmitida através das pedras preciosas.

Na secção 1.2.5. foi visto que o método de polarização serve para a identificação das pedras preciosas. Nesta secção faz-se um breve resumo teórico deste método e na secção 2.2 descreve-se como se aplica este método, usando o equipamento disponível neste Departamento de Física, no diagnóstico da turmalina. Uma onda electromagnética, como é o caso da luz, pode ser caracterizada, em qualquer ponto do espaço da sua trajectória, por três vectores mutuamente perpendiculares (Walsh 1958): Dois vectores oscilantes que são o vector campo eléctrico \vec{E} , e o vector campo

magnético \vec{H} , bem como o vector sentido de propagação, \vec{N} . Em virtude da maioria dos fenómenos electromagnéticos na matéria serem induzidos pela componente eléctrica, dispensar-se-à a análise do vector \vec{H} .

A luz natural ou proveniente de uma fonte qualquer consiste de trens múltiplos de ondas, cujos vectores \vec{E} oscilam distribuidos aleatoriamente por todos os sentidos perpendiculares a \vec{N} .

No caso de ausência de predominância de nenhuma direcção de oscilações, a luz denomina-se não polarizada, fig. 1.4.1 a); parcialmente polarizada, fig. 1.4.1.b), se o vector \vec{E} oscilar com uma direcção predominante e linearmente polarizada, fig. 1.4.1. c), se oscilar sobre um único plano perpendicular à direcção de propagação.

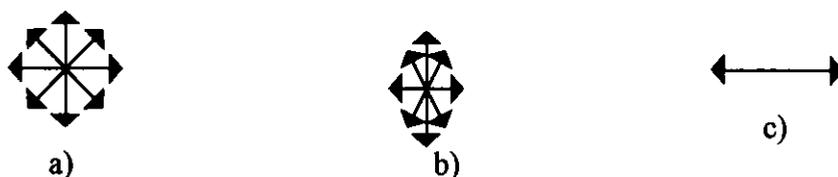


Fig. 1.4.1. a) luz não polarizada. b) luz parcialmente polarizada. c) luz linearmente polarizada

A polarização pode ser obtida transmitindo a luz através de um material especial, chamado polaróide ou placa polarizadora. Esta possui a propriedade de transmitir as componentes de luz cujos vectores \vec{E} oscilem num determinado plano de oscilações e atenuar ou absorver as outras componentes. Para o efeito, coloca-se um polaróide com as faces perpendiculares à direcção de propagação dum feixe colimado de luz. Um outro polaróide, chamado analisador, é colocado na trajetória do feixe a uma certa distância do primeiro. Rodando o segundo, mas mantendo as suas faces paralelas às do primeiro, verificar-se-à uma variação da intensidade do feixe emergente. Este fenómeno é descrito pela lei de Malus, que tem o seguinte aspecto.

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (1.4.1)$$

Onde: I - é a intensidade da luz transmitida pelo polaróide, I_0 - é a intensidade da luz transmitida pelo analisador, θ - o ângulo de rotação do analisador em relação ao polaróide. A turmalina comporta-se como um polarizador natural, por isso pode ser determinado pelo método de polarização.

1.6. Tratamento dos resultados obtidos nas medições.

Uma das etapas principais de uma experiência é a avaliação da exactidão e fiabilidade dos resultados obtidos nas medições. A elevação do grau da exactidão das medições permite, em certos casos, descobrir novas propriedades e novas conformidades às leis. Os resultados das medições das grandezas físicas deflexiam-se do verdadeiro valor em medição. Esta deflexão resulta de um grande número de pequenas deflexões que ocorrem durante as medições. Deste modo, a exactidão dos

resultados determina-se pelos erros (deflexões) das medições, que pela sua natureza, classificam-se em sistemáticos e em acidentais (também conhecidos por casuais ou aleatórios).

1.6.1. Erros sistemáticos.

Os erros sistemáticos resultam de factores constantes no decorrer das medições, tais como a baixa precisão dos instrumentos de medição, a sua má calibração ou condições laboratoriais adversas, sendo possível corrigi-los ou determiná-los com bastante precisão desde que sejam identificados.

1.6.2. Erros acidentais.

Os erros acidentais resultam de um grande número de causas isoladas, que afectam cada medição de diversas maneiras, não sendo possível corrigi-los. Pelo seu carácter aleatório, o seu tratamento é feito pelos métodos estatísticos, nos quais cada fenómeno aleatório descreve-se por uma função denominada densidade de probabilidades.

Na medição de grandezas macroscópicas, que assumem valores contínuos, os resultados são geralmente descritos pela lei de Gauss, segundo a qual, a probabilidade duma variável aleatória contínua assumir um dado valor num intervalo $x \rightarrow x+dx$, é dada pela expressão (Kassandrova D. N. et al. 1970).

$$w(x)dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\alpha)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (1.6.1)$$

onde α designa a esperança matemática da grandeza x , σ^2 é a variância da grandeza em medição e designa-se frequentemente por $D(x)$.

A dispersão é o quadrado médio da deflexão em relação ao verdadeiro valor da grandeza em medição e é dada pela expressão:

$$D(x) = \overline{(x-\alpha)^2} = \int_{-\infty}^{\infty} (x-\alpha)^2 w(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} (x-\alpha)^2 \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\alpha)^2}{2\sigma^2}} dx = \sigma^2.$$

À grandeza $\sigma = \sqrt{D(x)}$ dá-se o nome de deflexão quadrática média duma medição.

Na maioria dos casos a dispersão não é conhecida à priori e só pode ser determinada a partir das deflexões dos resultados das medições e neste caso é dada pela expressão seguinte (Hudson, 1967 e Whittle et al. (1973):

$$\sigma^2 = D(x) = \overline{(x-\bar{x})^2} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N} \quad (1.6.2)$$

Nesta expressão, N é o número total das medições e \bar{x} é o valor médio das medições que se calcula pela expressão seguinte:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$$

Pode se mostrar (Hudson, 1967) que a melhor aproximação ao verdadeiro valor é obtido substituindo N por $(N-1)$ na equação (1.6.2), obtendo-se:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1} \quad (1.6.2_a)$$

Na física nuclear, onde se processam grandezas de carácter discreto, e as flutuações, em geral, estão relacionadas com as próprias grandezas em medição, os erros são descritos pela lei de Poisson (em certos casos a lei binomial) da densidade de probabilidades. Neste caso, nas medições pelo contador de Geiger por exemplo, pode-se mostrar (Kassandrova, 1970) que, na contagem de n partículas num intervalo de tempo t , a dispersão, $D(n)$, será:

$$D(n) \approx n,$$

isto é,

$$\sigma = \sqrt{D(n)} \approx \sqrt{n} \quad (1.6.3)$$

Se o número de eventos registados for grande ($n \geq 20$), a distribuição de Poisson pouco difere da distribuição de Gauss, e tem a forma seguinte:

$$W(n)dn = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} e^{-\frac{(n-\bar{n})^2}{2n}} dn \quad (1.6.4)$$

Onde n é o número médio das partículas registadas pelo detector no intervalo de tempo T .

Com o aumento de n cresce o valor absoluto do erro quadrático médio, σ , não obstante o erro relativo, δ , decrescer.

$$\delta = \frac{\sigma}{n} = \frac{\sqrt{n}}{n} = \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (1.6.5)$$

Sejam χ_1 e χ_2 duas variáveis aleatórias independentes, $\bar{\chi}_1$ e $\bar{\chi}_2$ os seus valores médios σ_1^2 e σ_2^2 as suas respectivas dispersões e $\Phi(\chi_1, \chi_2)$ uma função daquelas duas variáveis. Se a função $\Phi(\chi_1, \chi_2)$ for descrita pela distribuição de Gauss em torno do seu valor médio, $\Phi(\bar{\chi}_1, \bar{\chi}_2)$, o erro quadrático médio, neste caso, será (Hudson, 1967):

$$\sigma_\Phi = \sqrt{\left(\frac{\partial\Phi}{\partial\chi_1}\right)^2 D(\chi_1) + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial\chi_2}\right)^2 D(\chi_2)} \quad (1.6.6)$$

Deste modo, os erros quadráticos médios, dos resultados das medições realizadas neste trabalho, serão calculados pelas fórmulas (1.6.2_a), (1.6.3) e (1.6.6), usando cada uma delas em conformidade com o tipo de deflexão e do carácter de distribuição sem a apresentação dos cálculos.

CAPÍTULO II

2. APROVEITAMENTO DE ALGUNS MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DAS PEDRAS PRECIOSAS.

No âmbito do projecto de Montagem de um laboratório Gemológico no Departamento de Física, tornou-se necessário seleccionar um conjunto de métodos de diagnóstico das pedras preciosas, visando os seguintes objectivos:

- Determinação das propriedades mecânicas dos cristais em jóias;
- Determinação das propriedades ópticas dos cristais transparentes (refracção dupla, polarização, espectros de absorção, pleocroísmo, e outras);
- Diagnóstico dos cristais pela gravidade específica;
- Determinação das propriedades magnéticas das pedras preciosas;
- Métodos de luminescência;
- Análises por microscópios;
- Métodos de reflectografia de laser.

Para conseguir estes objectivos, recorreu-se ao uso do equipamento e métodos experimentais disponíveis nos laboratórios de investigação do Departamento de Física. Uma vez que o equipamento e métodos experimentais disponíveis não se destinam para as investigações planeadas, houve necessidade de introduz adaptações mais ou menos laboriosas no equipamento. Neste sentido, tornou-se necessário projectar e montar um dispositivo destinado à realização de experiências com pedras preciosas transparentes lapidadas.

2. 1. Montagem de um dispositivo experimental multidisciplinar para o diagnóstico das pedras preciosas.

O dispositivo experimental montado (fig. 2.1.1) consiste basicamente de um banco óptico rígido e um laser laboratorial de He-Ne. As características do laser são dadas abaixo.

- Potência máxima da radiação na saída: 1 mW;
- Comprimento de onda da radiação: 632,8 nm (luz vermelha);
- Diâmetro máximo do feixe na saída: 0,49 mm;
- Divergência do feixe (ângulo sólido) : 1,7 mrad;
- Polarização do feixe: Aleatória.

O laser é fixado numa das extremidades do banco. A centralização de todo o sistema óptico é feita colocando um espelho plano na outra extremidade do banco. Neste caso, se o sistema estiver centralizado, o feixe reflectido do vidro volta a entrar na janela de saída do feixe do laser. Para um percurso de $2L = 3$ m, onde L é o comprimento do banco óptico, a exactidão possível do ajustamento foi de $\sigma_{xy} = 0.25$ mm.

O diâmetro do feixe pode ser regulado por meio dum colimador na saída do laser . Dado que o laser usado não é destinado à investigação dos cristais transparentes e pedras preciosas lapidadas, que exigem um feixe luminoso com parâmetros geométricos variáveis, particularmente o seu diâmetro, coloca-se um sistema de lentes de focalização e colimação na saída do laser. Por isso, na maioria dos casos, houve necessidade de aumentar o diâmetro do feixe luminoso para a formação

dos parâmetros geométricos do feixe. Para o efeito, foi usado um sistema composto de lentes de focalização e colimadores. Contudo, a introdução destes elementos suplementares bastante densos provoca a diminuição da intensidade do feixe. A experiência mostra que, para se conseguir o efeito desejado, torna-se necessário variar as distâncias entre os vários elementos ópticos do dispositivo.

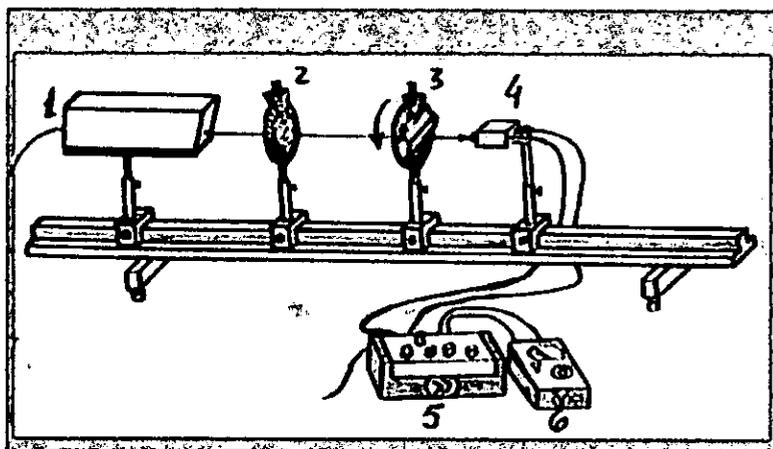


Fig. 2.1.1. Dispositivo experimental para a investigação das pedras preciosas transparentes.

Para a medição da intensidade luminosa do feixe em qualquer ponto do banco óptico foi usada uma aparelhagem, concebida especialmente para operar com o laser referido. Esta aparelhagem, mostrada na fig. 2.1.1., consiste de um fotodiodo (4), cuja sensibilidade espectral corresponde ao diapasão de radiação do laser, um amplificador linear (5) com uma amplificação, K , variável entre $(10^0 \div 10^6)$ e um voltímetro digital (6).

Uma avaliação da exactidão das medições da intensidade mostra que os erros sistemáticos introduzidos por este equipamento são desprezíveis em relação aos erros sistemáticos associados ao ajustamento do sistema óptico.

As amostras a investigar são fixadas num suporte especial que permite deslocar gradualmente o cristal ao longo do plano perpendicular ao eixo óptico do banco. Para otimizar este trabalho, é necessário um suporte especial que permita deslocar gradualmente a amostra, com 3 graus de liberdade (horizontalmente, verticalmente e ao longo do eixo óptico central) e com uma exactidão σ_{xy} não menor que $\pm 0,3$ mm.

2. 2. Determinação da turmalina pelo método de polarização.

Na secção 1.4 do Capítulo I foi visto que o fenómeno de polarização nos cristais transparentes pode ser usado no diagnóstico da turmalina e de outras pedras preciosas. Neste sentido, afigurou-se interessante realizar as seguintes tarefas:

- Verificação experimental da lei de Malus para o fenómeno de polarização do feixe luminoso de laser, transmitido através de um cristal prismático-hexagonal da turmalina.
- Testar a validade dos resultados obtidos para diagnóstico de alguns tipos da turmalina local.

A figura 2.1.1 representa o dispositivo usado nesta experiência. Os elementos 1, 2, 3 e 4 são dispostos e fixados num banco óptico. As faces do polaróide laboratorial (2) são dispostos perpendicularmente à direcção de propagação do feixe, e este deve incidir perpendicularmente ao eixo de polarização da amostra (3). A amostra e o polaróide são fixados de modo a girarem livremente em torno da direcção de eixo óptico do banco. A luz proveniente do polarizador

transmite-se através da amostra e é detectada pelo fotodíodo. Neste, é transformada em corrente que é amplificada e a correspondente tensão, que é proporcional à intensidade da luz detectada no fotodíodo, é lida no voltímetro. Para evitar erros sistemáticos, que podem afectar a exactidão dos resultados das medições, o laser usado deve produzir luz não polarizada.

Para várias amostras de turmalina e outras pedras preciosas de Moçambique, foram feitas as medições da intensidade da luz transmitida (tensão no voltímetro), variando o ângulo θ entre eixos ópticos do cristal e do polaróide de 0° até 90° , em intervalos de 10° . Os resultados obtidos para uma amostra de turmalina verde são dados no gráfico da figura 2.2.1.

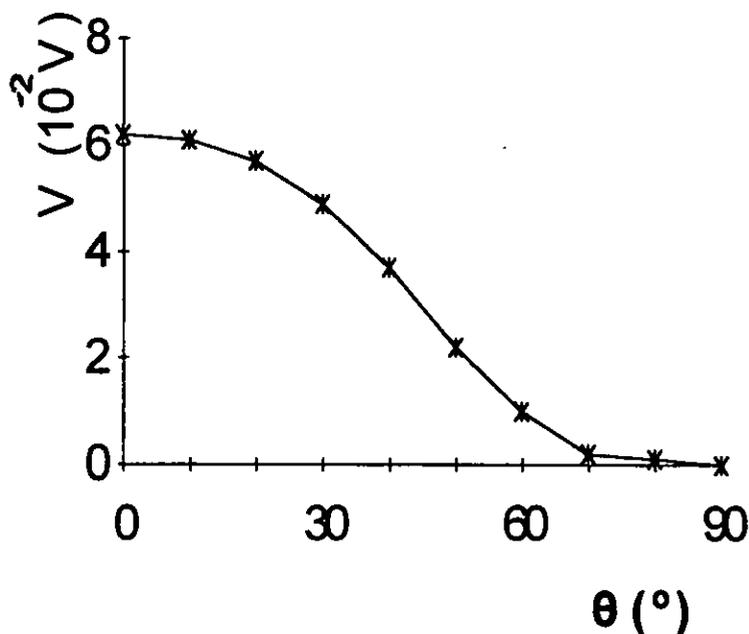


Fig. 2.2.1. Gráfico da variação da intensidade da luz do laser, transmitida através do cristal de turmalina em função do ângulo θ entre os eixos do cristal-polarizador e polaróide.

Discussão dos resultados.

- A variação de intensidade da luz transmitida através do sistema constituído pelo cristal em estudo e o polaróide, mostra que a luz fica polarizada ao passar pela amostra da turmalina.
- Um cristal uniaxial de turmalina, colocado no trajecto dum feixe de luz, transmite apenas as componentes de radiação cujos vectores eléctricos oscilam paralelamente ao eixo óptico do cristal. Se o eixo óptico do cristal em estudo fizer um ângulo θ com o do vector campo eléctrico do feixe linearmente polarizada no polaróide, apenas a componente $E_\theta = E \cos \theta$ é transmitida. Por isso, como a intensidade da luz é proporcional ao quadrado do campo eléctrico, tem-se a relação

$$I = I_0 \cos^2 \theta,$$

onde I_0 é a intensidade da luz incidente e I a da luz transmitida. Este resultado corresponde à lei de Malus, considerado no Capítulo I. Quando o ângulo θ for igual a 0° ou 180° , a

intensidade da luz transmitida é máxima; quando $\theta = 90^\circ$, ela é nula. Isto faz com que a intensidade da luz transmitida pelo cristal da turmalina varie entre 0 e $I_{máx}$.

- No caso da luz transmitida sem polarização na amostra, não se nota nenhuma variação da sua intensidade. Este é o caso das amostras da aguamarinha, berilo, esmeralda e varios tipos de vidros que se podem confundir com a turmalina.
- As flutuações da intensidade da luz polarizada na turmalina foram avaliadas pelas flutuações da tensão no circuito do fotodíodo, que é proporcional à fotocorrente.
- A avaliação dos erros mostrou que os erros máximos das medições, sistemáticos e acidentais, não superam 7 %. Este nível de erro não encobre o efeito em estudo, por isso o método de determinação.
- A turmalina comporta-se como um polarizador natural bastante forte. Por isso, os resultados obtidos confirmam que o método de polarização é eficiente para o diagnóstico da turmalina prismática-hexagonal.

Ao investigar a polarização da turmalina prismática hexagonal de cor verde escura, foi observada uma imagem que não se observa nos outros tipos de cristais. A análise feita para cristais do mesmo tipo mostrou o mesmo tipo de imagem. Para o registo deste tipo de imagens, foi montado o dispositivo experimental representado na figura 2.2.2. Ele é constituído por um laser de He-Ne (1), uma amostra (2), uma tela translúcida (3) e uma máquina fotográfica (4).

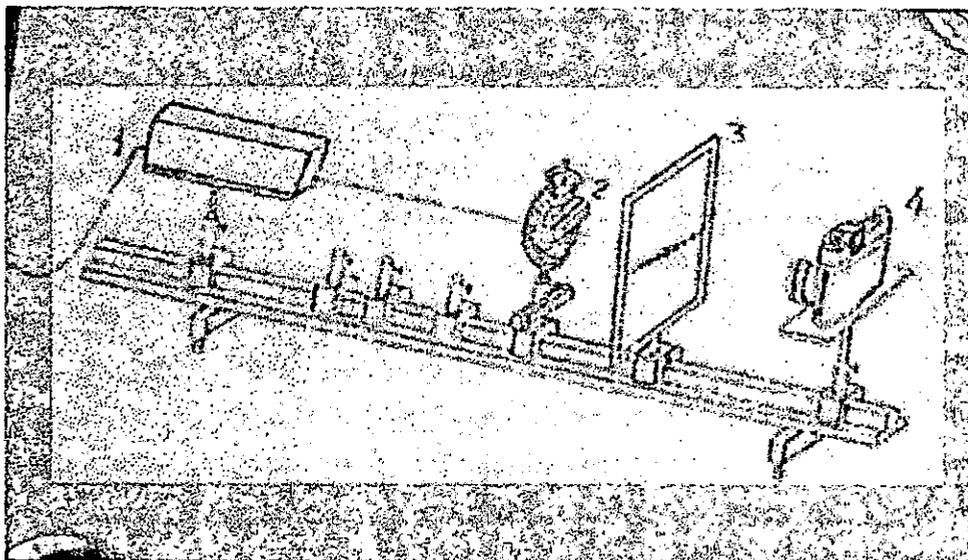


Fig. 2.2.2. Dispositivo experimental usado na observação e registo do efeito de polarização da luz transmitida pelas amostras das pedras preciosas 1-laser, 2-amostra, 3-tela translúcida e 4-máquina fotográfica.

As figuras 2.2.3 e 2.2.4 representam as imagens da luz de laser transmitida através da turmalina e da almandina respectivamente.



Fig. 2.2.3. Imagem da luz transmitida através duma amostra de turmalina prismática hexagonal de cor verde escura.

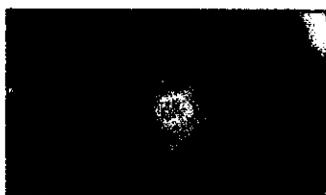


Fig. 2.2.4. Imagem da luz transmitida através de uma amostra da almandina isométrica.

2.3. Determinação das pedras preciosas pela luminescência.

Considerações gerais.

A luminescência nas pedras preciosas é devida, fundamentalmente, à presença de inclusões de elementos metálicos em proporções diminutas na rede cristalina; tais como Cr, Co, Ni, Mo, molibdénio e alguns compostos de urânio (Schumann 1977). Pedras preciosas do mesmo tipo podem conter inclusões de diferentes elementos. Por isso, nem todas as pedras preciosas de um dado tipo exibem a mesma cor de luminescência. A luminescência das pedras preciosas pode variar também dum depósito para o outro e, por isso, a luminescência é considerada como um método auxiliar de teste na gemologia.

A luminescência induzida pela radiação ultravioleta (LUV) de $\lambda_1=253.7$ nm e $\lambda_2=365$ nm, é usualmente usada na determinação das pedras preciosas. Não obstante, a luminescência pode também ser induzida por meio de outras formas de radiação da Física Experimental Moderna, isto é, usando energias de outras regiões da escala das ondas eletromagnéticas. Tal é o caso da luminescência induzida sob acção dos raios-X (LRX) e da cátodo-luminescência (CL), que é a luminescência induzida sob acção dos raios catódicos. Dados da LUV das pedras preciosas são frequentes na literatura, por exemplo (Schumann 1977). Crê-se que a justaposição de dados de luminescência, obtidos usando diferentes fontes excitadoras, pode aumentar a eficiência deste método de diagnóstico das pedras preciosas. Neste sentido, foram usadas neste trabalho a LRX e a CL.

Observação da luminescência sob acção dos raios-x.

O aparelho de raios-X usado neste trabalho é uma unidade portátil laboratorial que consiste de duas regiões: um compartimento blindado e inacessível ao utente, onde se situa o tubo de raios-X e outro compartimento experimental, visível através de vidros com protecção de chumbo e acessível através de uma portinhola. As características do aparelho de raios-X são dadas abaixo:

- Tensão de alimentação: 220 V
- Potência: 200 W.
- Corrente de operação: 1mA
- Dose máxima na superfície do aparelho : 0,3 mR/h
- Tensão de operação: 59 kV
- Ângulo sólido do feixe de raios X na saída sem colimação: 38°.

Para a observação da luminescência a amostra em estudo é fixada no colimador do feixe dos raios-X e, numa sala suficientemente escura, liga-se a fonte dos raios-X e observa-se a luminescência.

Como o tempo de emissão dos raios-X deve ser limitado para evitar o aquecimento do aparelho, o observador deve habituar a vista à escuridão durante alguns minutos antes de ligar o aparelho. A luminescência das amostras observa-se através de janelas de vidro do aparelho.

Observação da luminescência sob acção dos raios catódicos.

Uma das grandes vantagens da CL em comparação com a LUV, que foi considerada no ponto 1.2.3, reside na larga faixa de energias excitadoras possíveis, 0 - 50 KeV, contra 1,8 - 4,9 eV (Marshall, D. J. E Mariano, A. N. 1988) da fotoluminescência ultravioleta. Não obstante, esta vantagem é relativa porque uma escolha ponderada da fonte de raios ultravioleta permite obter bons resultados. Deve-se notar que para energias superiores a um certo limiar a luminescência deixa de depender da energia excitadora e a CL apresenta, neste caso, maiores vantagens.

O dispositivo experimental é um luminoscópio, que foi disponibilizado pelo Laboratório de Física Nuclear, coordenado pelo Prof. Dr. Rogério Utui. Consiste de um canhão electrónico, uma câmara experimental evacuada onde se colocam as amostras em estudo, um monitor pelo qual se regulam os parâmetros de operação do luminoscópio e uma bomba de vácuo. O instrumento possui um mecanismo que permite deslocar as amostras dentro da câmara evacuada e estudar a luminescência de vários cristais ao mesmo tempo.

As características técnicas do aparelho de raios catódicos são dadas abaixo:

- Tensão de alimentação: 220 V
- Tensão operacional: 0 - 30 kV
- Corrente operacional: 0,3 - 0,8 mA
- Pressão operacional: $5,5 \times 10^{-2}$ mBar

Os resultados experimentais da luminescência de algumas pedras preciosas são mostrados na tabela 2.2.1; nomeadamente, LRX na coluna 2, CL na coluna 3 e LUV, bem como os dados da literatura (Schumann 1977) da fluorescência sob acção da radiação UV na coluna 4

Tabela 2.3.1. Resultados experimentais de LRX e CL observadas e dados bibliográficos da luminescência UV de algumas pedras preciosas.

Nome da pedra	Fonte excitadora e cor da luminescência		
	LRX	CL	LUV (Dados da literatura)
Aguamarinha	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma
Almandina	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma
Ametista	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma
Calcita	Cor de laranja forte	Nenhuma	-----
Esmeralda natural	Nenhuma	Vermelha fraca	Nenhuma
Esmerald. (Brasil)	-----	Vermelha fraca	Nenhuma
Fluorita	Azul intensa	Azul intensa	Azul-violeta forte
Goshenita	Violeta fraca	Violeta fraca	Nenhuma
Morganita	Violeta fraca	Violeta fraca	Violeta fraca
Diamante	Azul esbranquiçada	-----	Incolor ou Azul
Pérola artificial	Amarela intensa	Amarela intensa	Amarela
Pérola natural	Muito fraca	Fraca	Violeta-escura
Quartzo	Cinzenta fraca	Cinzenta-violeta	Violeta-escura
Rubelita	Nenhuma	Nenhuma	Fraca
Safira	Fraca de cor indistinta	Fraca	Púrpura
Verdelita	Cor de rosa fraca	Nenhuma	Nenhuma
Zircónio cubico	Amarela fraca	Branca azulada	Amarela-escura

Discussão dos resultados.

- A cor da luminescência depende muito do tipo da gema do que da fonte excitadora, como se pode ver da tabela 2.3.1, onde a luminescência da maioria dos cristais é a mesma. Isto significa que a a desexcitação luminescente induzida por fontes que emitem na faixa dos comprimentos de onda compreendidos entre (10 ÷ 400) nm não tem diferenças significativas.
- Foi observada uma luminescência vermelha fraca na esmeralda de Moçambique, sob acção dos raios catódicos. As esmeraldas da África Austral não luminescem sob acção da radiação ultravioleta (Anderson 1983), facto que se explica pela presença de inclusões de Fe na estrutura dos cristais.
- Os resultados da RXL e Cl observados nas pedras preciosas de Moçambique constituem uma informação bastante útil. As cores da luminescência indicadas nas colunas 2 e 3 da tabela 2.2.1 podem servir como um prontuário suplementar no diagnóstico das pedras preciosas de Moçambique. Com base na informação daquela tabela, é possível distinguir algumas pedras preciosas (coluna 1 da tabela 2.2.2) das outras com a mesma aparência e alguns parâmetros de diagnóstico semelhantes (coluna 2 da tabela 2.2.2):

Pedra em estudo	Análoga aparente
Esmeralda de Moçambique	Esmeralda hidrotermal (sintética)
Diamante	Zircónio cúbico (imitação do diamante)
Turmalina verde	Berilo verde e vidro verde
Pérola natural	Pérola artificial

- A obtenção duma informação mais exacta e aumentar, deste modo, a eficiência do diagnóstico das pedras preciosas, pode ser possível usando métodos de espectroscopia de RXL, CL e LUV.

2.4. Diagnóstico das pedras preciosas pela sua magnetização

Como foi visto na secção 1.3 do capítulo I deste trabalho, o fenómeno da magnetização pode ser usado na determinação das pedras preciosas. O método consiste em sgeitar a amostra em estudo à acção de um campo magnético externo, e medir a variação do seu peso. No trabalho de Anderson (1983) a avaliação é feita introduzindo um factor magnético μ^* , dado pela fórmula (2.4.1).

$$\mu^* = \frac{P_m - P}{\sqrt{p}} \times 100 \quad (2.4.1)$$

Onde p_m e p são os pesos da pedra na presença e na ausência do campo magnetizante respectivamente.

O sentido físico do factor μ^* não é explícito devido ao termo \sqrt{p} no denominador da expressão 2.4.1. Não obstante, os resultados obtidos permitem determinar algumas pedras preciosas. Neste trabalho, foi usada a fórmula (2.4.2), em que μ caracteriza a variação relativa do peso do cristal pela acção do campo magnetizante.

$$\mu = \frac{P_m - P}{P} \times 100 \quad (2.4.2)$$

Onde p_m e p , como no caso da fórmula 2.4.1, são os pesos da pedra na presença e na ausência do campo magnetizante respectivamente.

O que foi exposto tornou interessante realizar as seguintes tarefas:

- Conceber e montar um dispositivo experimental para a medição do peso das pedras preciosas sujeitas à acção de um campo magnético externo.
- Usar o dispositivo montado para a medição do peso das pedras preciosas na presença e na ausência do campo magnetizante.
- Calcular e fazer uma análise comparativa do valor de μ para diferentes amostras de pedras preciosas e testar a sua aplicabilidade na determinação de algumas pedras preciosas de Moçambique.

Dispositivo experimental.

O disposição experimental para a medição da variação do peso das pedras preciosas sob acção do campo magnetizante é mostrado na figura 2.4.1 e consiste de uma balança (1), suporte (2), amostra (3), electroíman (4), fonte de corrente (5) e dum amperímetro (6).

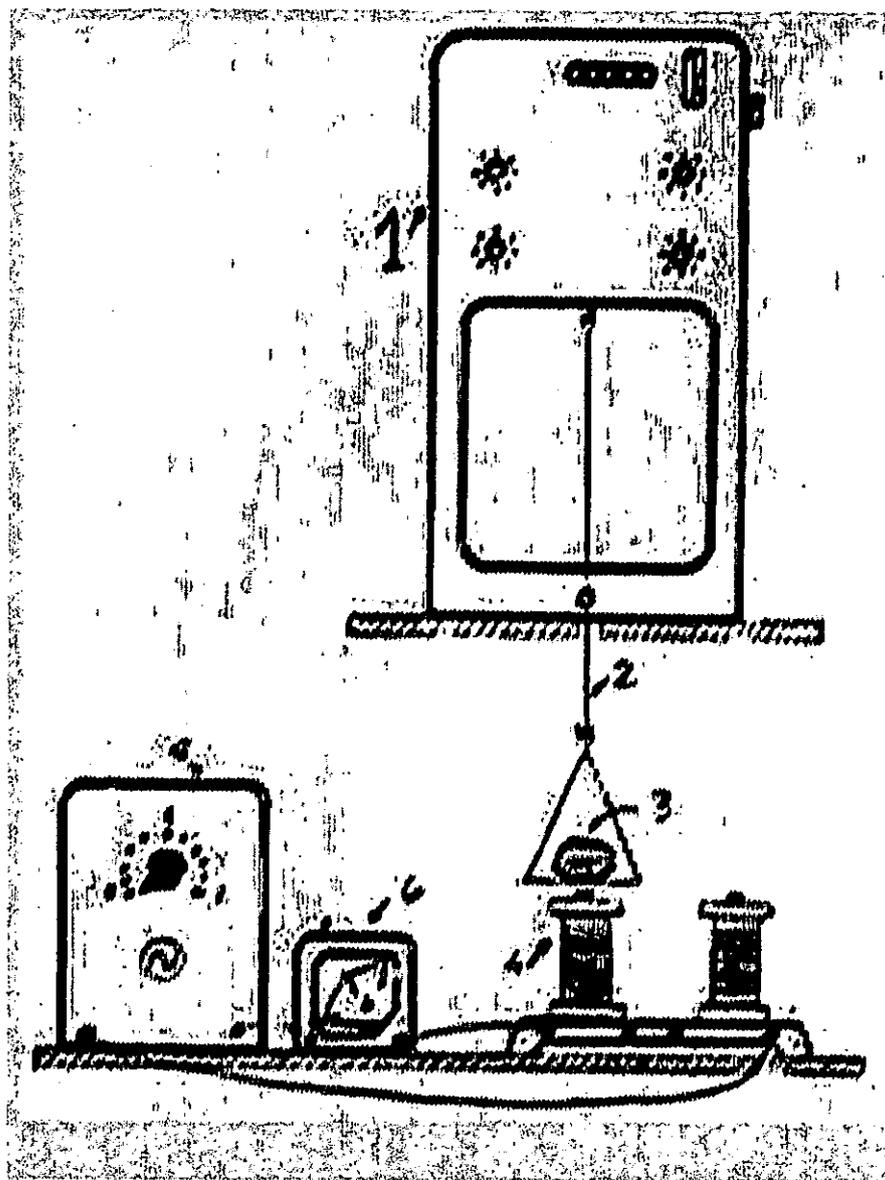


Fig 2.4.1. Dispositivo experimental de medição da variação do peso das pedras preciosas pela acção do campo magnetizante

A montagem do dispositivo foi feita usando um electroímã laboratorial, composto de duas bobinas que, quando forem percorridas por uma corrente contínua de 1 A, produzem nos seus pólos um campo magnético de 0.4 T. A medição do peso das amostras é feita por meio de uma balança analítica laboratorial, com uma precisão de 0.1 mg e a tensão de alimentação de 220 V a.c. A corrente que alimenta o electroímã é produzida por uma fonte de corrente contínua estabilizada. A corrente é controlada por meio de um voltímetro digital. Para a realização das medições, aproxima-se um dos pólos do electroímã por baixo da amostra, suspensa no suporte. A distância entre o pólo do electroímã e a amostra deve ser a mais curta possível para aumentar a sensibilidade das medições, mas por outro lado, deve-se ter o cuidado de preservar uma separação suficiente para que a amostra não toque no pólo do electroímã durante a experiência.

RESULTADOS.

O diagrama da figura 2.4.2 mostra os valores comparativos de μ , para diferentes amostras das pedras preciosas de Moçambique e a figura 2.4.3 mostra os gráficos da variação de μ em função do campo magnético (corrente aplicada ao electroíman).

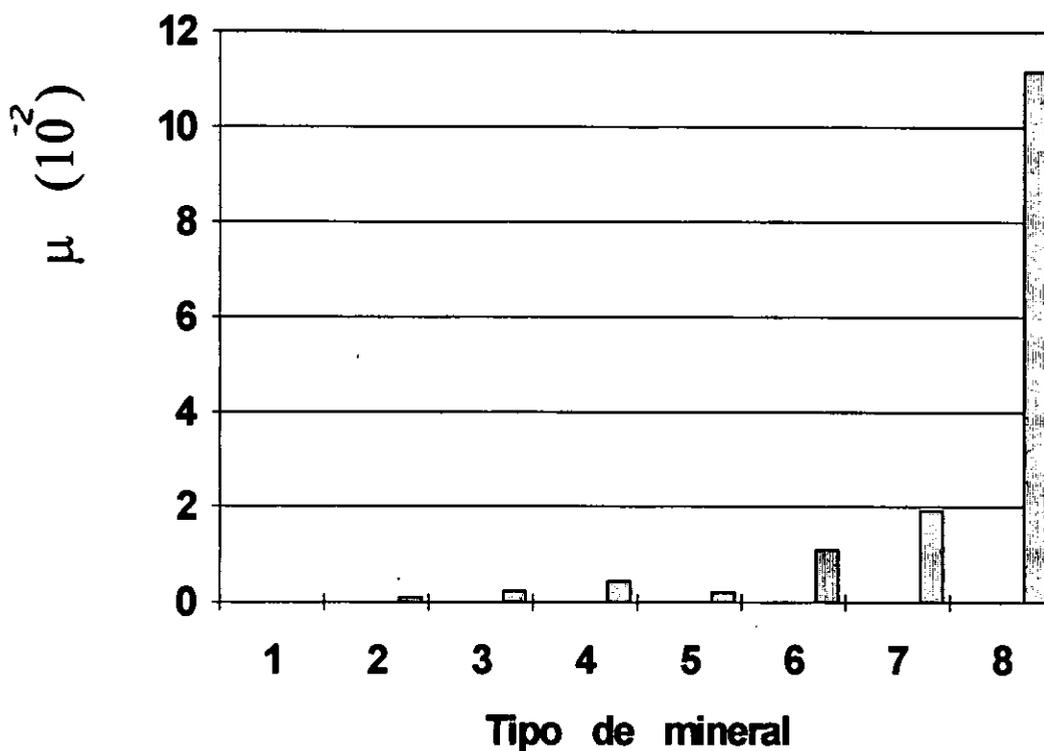


Fig. 2.4.2. Diagrama comparativa de magnetização de alguns cristais. No eixo das abcissas:
1 - Aguamarinha, 2 - Rubi, 3 - Esmeralda, 5 - Turmalina verde laminada, 6 - Rubelita,
7 - Turmalina prismática hexagonal e 8 - Almandina.

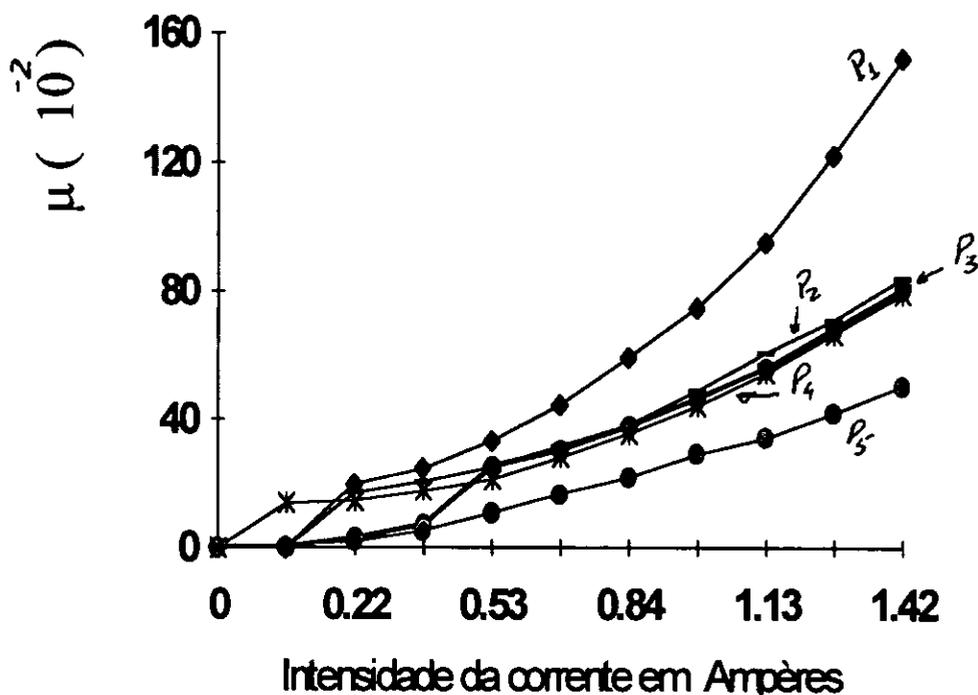


Fig. 2.4.2. Gráficos de de variação de μ em função da corrente, para amostras de almandina de pesos diferentes. Em cada uma das curvas estão indicadas as designações dos pesos das amostras correspondentes: $P_1 = 2.067$ g, $P_2 = 2.110$ g, $P_3 = 2.121$ g, $P_4 = 2.213$ g e $P_5 = 4.393$ g.

Discussão dos resultados.

- Foi feita a medição da variação do peso de algumas pedras preciosas de Moçambique, usando um dispositivo projectado e montado no âmbito deste trabalho. O dispositivo foi montado na base do equipamento laboratorial existente no Departamento de Física da U.E.M.
- O tratamento dos resultados obtidos mostrou que a soma dos erros acidentais resultantes do processo de medição e os sistemáticos, associados à precisão da balança e do amperímetro, não supera 7 %. Este nível de erro não encobre o efeito em estudo e os resultados podem assim ser aceites para efeitos de diagnóstico.
- O diagrama comparativo dado na figura 2.4.2 mostra que a variação do peso da almandina sob acção do campo magnetizante é 10 vezes maior que a do peso da turmalina prismática hexagonal de cor verde escura, que é a segunda, das amostras estudadas, onde o efeito é mais sensível.
- A figura 2.4.3. mostra os gráficos da variação de μ em função da intensidade da corrente que percorre o electroíman para cinco amostras de almandina de diferentes pesos. Estes gráficos mostram que a sensibilidade do método de medição usado diminui com o aumento do peso da amostra. Este facto mostra que o aumento do peso real da amostra em função do aumento da sua massa é mais rápido que o aumento do acréscimo do mesmo peso em função da variação da intensidade do campo magnetizante. Por isso o método usado é viável para o diagnóstico de amostras de pesos compreendidos entre (0.5 ÷ 2) g, para as quais, o acréscimo relativo do peso sob acção do campo magnetizante é ainda mensurável sem grandes problemas metodológicos.
- Na realização das medições é importante evitar a influência dos elementos magnéticos estranhos, tais como as peças da balança e de outras componentes do dispositivo experimental.

- A influência da variação do peso específico da água em função da temperatura introduz um erro sistemático de $\sigma_a \approx 0.002$ g nas medições.
- A influência do erro sistemático da balança $\sigma_b \approx 0.0001$ g.
- Então o erro sistemático resultante é de $\sigma_r = (\sigma_t^2 + \sigma_a^2 + \sigma_b^2)^{1/2} \approx 0.002$ g, valor que não encobre o efeito em medição, por isso os resultados podem ser aplicados para o diagnóstico.
- A experiência mostra que o método da balança hidrostática é menos preciso para as amostras de menor tamanho.
- Como se pode ver da tabela 3.4.1, os valores do peso específico, obtidos para pedras preciosas de Moçambique, encontram-se nos limites indicados na bibliografia (Schumann 1977) para as pedras do mesmo tipo.
- O método em estudo foi aplicado para o diagnóstico de duas amostras da mesma aparência que não foi possível distingui-los à vista desarmada e pelo método da luminescência. Os pesos específicos dessas amostras foram de 3.067 ± 0.004 e 2.587 ± 0.004 respectivamente. Da comparação com os dados tabelados (Schumann 1977), foi concluído que a primeira das mostras em estudo era turmalina e a outra um vidro ordinário.

2.5. Aplicação da radiação na investigação da esmeralda.

Considerações gerais.

A interacção da radiação com uma substância pode provocar vários efeitos. Nos cristais é possível a deformação da rede, a ionização e muitos outros efeitos que se podem traduzir na mudança de muitas propriedades. A análise destas mudanças pode ser útil para efeitos de diagnóstico. Neste sentido, tornou-se interessante estudar os efeitos da radiação sobre as pedras preciosas. Para o efeito, foram seleccionadas duas amostras de esmeralda de cor e tamanhos aproximadamente iguais. Aos cristais escolhidos foi feita a medição da densidade, luminescência e peso específico. Uma observação usando uma lupa com a amplificação de 10x mostrou que as duas amostras não possuíam inclusões visíveis. Uma das amostras foi conservada para efeitos de comparação e a outra submetida à radiação de uma fonte de Cs^{137} , durante 90 dias.

As características da fonte de radioactiva Cs^{137} são mostradas abaixo:

Ano de fabrico: 1990

Actividade inicial: $A_0 = 3.7 \times 10^6$ Bq

Período de semidesintegração: 27 anos

Actividade durante a experiência: $A \approx 2,9 \times 10^6$ Bq

A actividade da fonte na altura da experiência foi calculada na base da fórmula:

$$A = A_0 \exp(-t/T) \quad (3.5.1)$$

Sendo A_0 a actividade inicial da fonte, T o período de semidesintegração, t o tempo da experiência contado a partir do início da actividade da fonte e A é a actividade procurada.

Discussão dos resultados.

- A comparação das cores da amostra-padrão e a submetida à irradiação mostrou que a aparência externa da última não sofreu nenhuma mudança. A investigação foi feita por meio de lupas de amplificação x10 e x20.
- A medição das propriedades depois da experiência (densidade, luminescência e peso específico) não mostrou nenhuma alteração.
- O facto de não aparecimento dos microdefeitos esperados, tanto na superfície bem como dentro do volume do cristal irradiado, indica que a energia do feixe dos fótons da fonte usada ou sua intensidade não foram possivelmente suficientes para criar alguns centros irregulares na rede cristalina que poderia levar à mudança de cor do cristal.
- Crê-se que para provocar o aparecimento dos microdefeitos no cristal, bem como a alteração das propriedades medidas seria necessário usar fontes de maior actividade, por exemplo Co^{60} , ou o acelerador de Van-de-Graff existente no Projecto de Investigação em Física Nuclear.

CAPÍTULO III

3. DETERMINAÇÃO DAS PEDRAS PRECIOSAS E DESCOBRIMENTO DOS DEFEITOS DE LAPIDAÇÃO PELO MÉTODO DE REFLECTOGRAFIA DE LASER.

3.1. Considerações gerais.

O estágio actual de desenvolvimento da indústria joalheira em Moçambique exige, da ciência e da técnica, métodos e equipamentos laboratoriais especiais para a resolução eficiente e célere das necessidades de identificação e controle da qualidade das pedras preciosas lapidadas.

Tendo em conta que o valor das pedras preciosas naturais é relativamente superior ao do ouro, torna-se evidente a importância do controle da qualidade das pedras preciosas lapidadas na indústria joalheira. Por qualidade das pedras preciosas entende-se, em primeiro lugar, a correspondência dos parâmetros de lapidação às normas e padrões internacionais, E em segundo lugar, o tipo e qualidade das inclusões. Com efeito, pelas normas do mercado internacional de gemas, a ocorrência de 10% ou mais de pedras preciosas com defeitos de lapidação, arranhões na superfície, fissuras e inclusões (visíveis sob uma lupa de amplificação de 10x) num lote de venda, este pode ficar depreciado em cerca de 20 à 40 % do seu valor real.

Neste capítulo, faz-se a análise de questões relacionadas com a identificação expedita da autenticidade e exclusividade das pedras preciosas nas condições industriais. A identificação e consequente registo das pedras preciosas lapidadas pode fornecer um instrumento de garantia da legitimidade de propriedade, uma vez que é possível a emissão de um documento identificativo duma dada pedra preciosa, usando informações registadas experimentalmente. É tendo em vista estes objectivos que surgiu a necessidade de:

- Elaboração e montagem de dois modelos experimentais de dispositivos para a identificação, registo e controle expedito e eficiente da qualidade das pedras preciosas lapidadas.
- Elaboração de um modelo teórico de distribuição dos pontos luminosos que formam o reflectograma duma pedra preciosa lapidada na forma de 57 facetas (forma de brilhante).
- Estudo da viabilidade da aplicação prática do modelo proposto.

A figura 3.1 mostra o dispositivo experimental do reflectrógrafo de laser, montado no âmbito deste trabalho, para a observação e registo dos reflectogramas das pedras preciosas lapidadas.

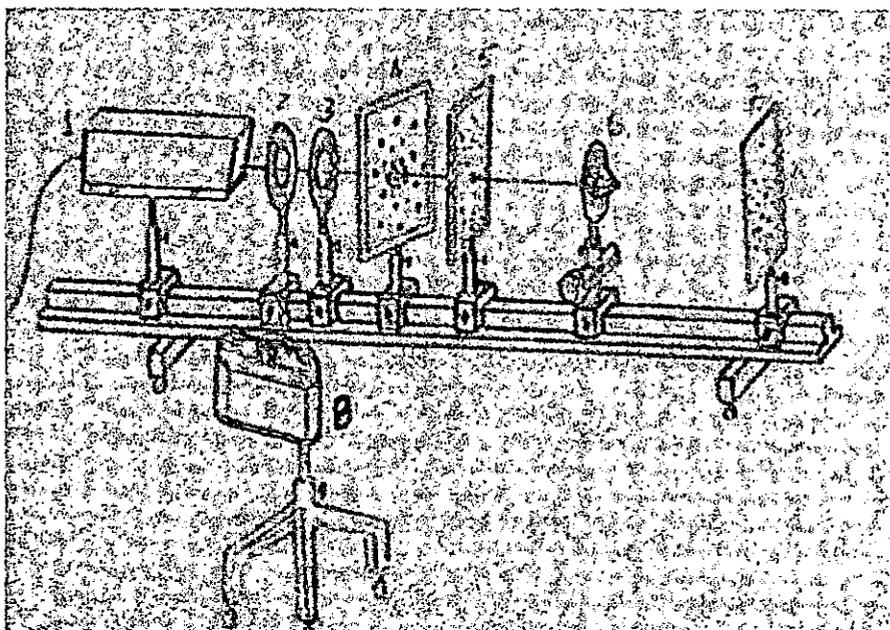


Fig. 3.1. Dispositivo experimental do reflectógrafo de laser. 1 - laser, 2 e 3 - lentes colimadoras 4 - espelho, 5 - tela, 6 - suporte com pedra, 7 - tela e 8 - máquina fotográfica.

3.2. Descrição do método de reflectografia de laser das pedras preciosas.

Na indústria joalheira praticam-se diversas formas de lapidação das pedras preciosas. A investigação destas pedras pelos métodos tradicionais requer uma série de medições usando aparelhos complexos e onerosos, apenas disponíveis nos laboratórios gemológicos especializados e desenvolvidos. Por isso, tornou-se importante a elaboração de métodos simples, mas eficientes, de medição dos parâmetros de corte das pedras lapidadas. Existe um aparelho com uma patente dos EUA, que permite a obtenção de reflectogramas das pedras preciosas lapidadas conhecidos por "impressões digitais". Miles (1978) fez a comparação e descrição dos reflectogramas de diversos tipos de jóias, mas não investigou o processo da sua formação. Uma análise das imagens obtidas no presente trabalho, iluminando diversas pedras preciosas transparentes lapidadas por meio de um feixe de laser laboratorial, permitiu notar que essas imagens não só são rigorosamente individuais para cada pedra, como também possuem informações sobre a natureza, qualidade de lapidação e defeitos dos cristais. Esta constatação criou a necessidade duma investigação sistematizada do método de reflectografia de laser das pedras preciosas.

3.3. Trajectória da luz nas pedras preciosas transparentes lapidadas.

Quando um feixe de raios luminosos incide sobre uma pedra preciosa transparente, uma parte reflecte-se na superfície e outra transmite-se. Esta última, depois de múltiplas reflexões nas facetas internas, emerge sob diversas componentes dirigidas segundo a orientação das facetas. A distribuição espacial e a intensidade destas componentes dependem da qualidade de lapidação, do índice de refração e dos defeitos, tanto internos como superficiais. Neste caso é interessante fazer a análise da trajectória dos raios luminosos através das pedras preciosas lapidadas. Neste sentido,

alguns trabalhos já foram realizados. Em 1919, o cientista inglês Tolkowsky (1919) calculou as proporções de lapidação redonda de 57 facetas (que doravante será designada por Cr-57) para os diamantes.

A figura 3.1 representa um cristal lapidado na forma Cr-57.

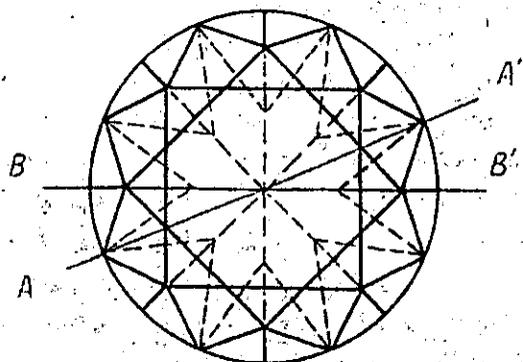


Fig. 3.2 Cristal lapidado na forma clássica Cr-57.
AA' e BB' são duas seções de corte da pedra.

3.3. Descrição dos modelos experimentais de observação e registo dos reflectograms das pedras.

Quando um feixe monocromático de raios luminosos incide normalmente sobre a mesa duma pedra preciosa de corte facetado, sofre múltiplas reflexões nas facetas da pedra e uma parte é reflectida através da mesa e outra transmitida. Cada uma destas partes emerge da pedra sob diversos ângulos, determinados pela orientação espacial das facetas, formando uma imagem característica da pedra em estudo, chamada, "reflectograma da pedra". Para compreender este processo, considere-se uma pedra preciosa lapidada na forma Cr-57, vista do lado da sua mesa (fig. 3.1). Dois planos AA' e BB' determinam duas seções de corte através dos quais propagam-se os raios do feixe luminoso incidente. Considere-se a propagação dos raios dum feixe luminoso através daqueles planos.

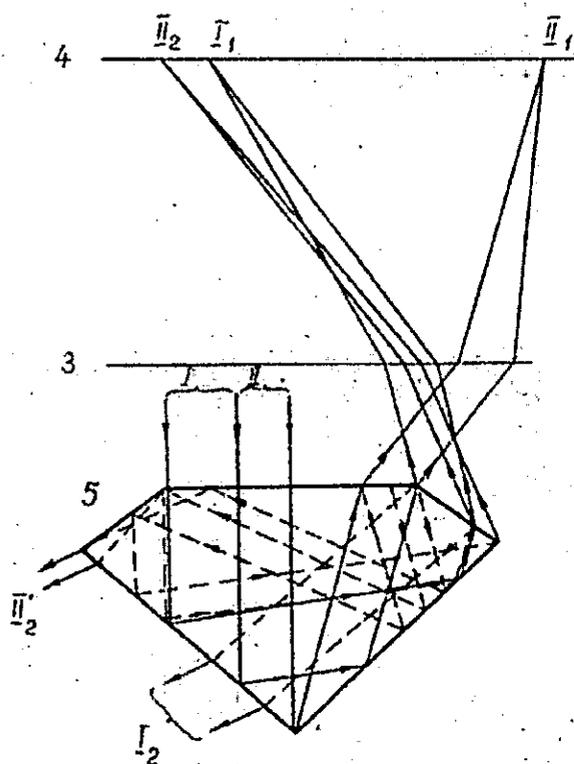


Fig. 3.3 Trajectória dos raios luminosos na secção de corte AA'.

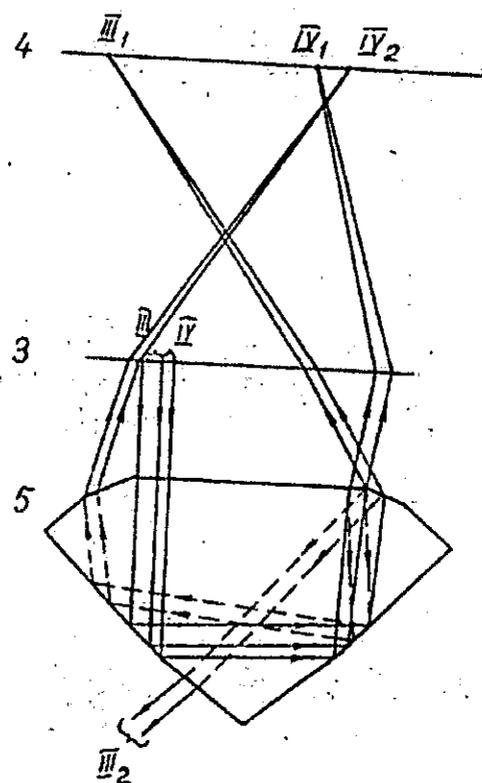


Fig. 3.4. Trajectória dos raios luminosos na secção de corte BB'.

As figuras 3.3 e 3.4 mostram as trajetórias dos raios luminosos através das secções referidas e o processo de formação dos reflexos no plano focal da lente 3. Naquelas figuras, os raios do feixe incidente desdobram-se, na saída, em duas componentes, I_1 e II_1 na secção AA' e III_1 e IV_1 na secção BB' . I_1 e III_1 são as componentes que emergem através da faceta adjacente à mesa e II_1 e IV_1 emergem através da mesa. Os feixes que incidem na faceta adjacente ao ângulo superior da coroa não são analisados, pois as suas trajetórias coincidem com as dos da secção AA' . Além das componentes I_1 , II_1 , III_1 e IV_1 existem outros feixes formados a partir dum outro ciclo de reflexões, designados por I_2 , II_2 , III_2 e IV_2 , que participam também na formação dos reflexos reflectogramas.

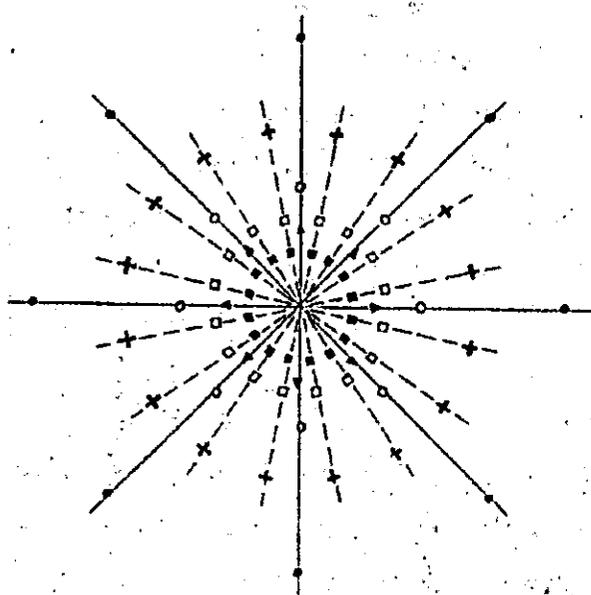


Fig 3.5 Reflectograma teórico dum cristal lapidado na forma clássica Cr-57.

Os feixes emergentes do plano da secção AA' formam, no ecrã situado no plano focal da lente 3, seis reflexos na linha de intersecção do plano da secção AA' com o do ecrã. Uma vez que existem 4 secções daquele tipo, situadas sob ângulos múltiplos de 45° da primeira secção, os seus reflexos formam no ecrã uma estrela de oito pontos, com o centro na intersecção do eixo óptico com o plano focal. Estes pontos são formados por duas reflexões da primeira e outra da segunda ordem de cada uma das oito facetas adjacentes ao pavilhão. Os feixes emergentes de cada um dos planos das secções BB' formam também 3 reflexos cada e, como são reflectidos a partir dos 16 cunhos do pavilhão, contribuem na formação do reflectograma com 16 reflexos (fig. 3.5).

Depois da análise das trajectórias dos raios do feixe luminoso incidente normalmente ao plano da mesa da pedra é possível relacionar cada um dos reflexos da primeira ordem com as facetas que os tenham originado. A característica fundamental que permite relacionar um reflexo com a faceta que o tenha originado é a sua intensidade luminosa. Desprezando a influência da camada superficial e os defeitos do cristal, as intensidades relativas dos reflexos podem ser avaliadas pelas fórmulas de Fresnel (Iavorski 1981, Dodson 1978). A partir destas fórmulas e das diferenças do poder de reflexão das superfícies das facetas, foram calculadas, teoricamente, as intensidades relativas dos feixes emergentes do lado do pavilhão dum brilhante lapidado. Os resultados desses cálculos são mostrados na última coluna da tabela 3.1. Nesta tabela as designações dos feixes correspondem àquelas das figuras 3.3 e 3.4; rfl significa reflexão e rfr significa refração.

Tabela 1: Dados e designações dos reflexos principais nos reflectogramas.

Tipo do plano	Tipo do feixe (rfl)	Designação do plano reflexo	Facetas que participam na formação dos reflexos	Intensidad es relativas dos reflexos ≈ %
AA'	I ₁	▲	mesa (rfr), faceta inferior (rfl), faceta inferior (rfl) e faceta superior (rfr)	100
	II ₁	●	mesa (rfr), faceta inferior (rfl), faceta inferior (rfl) e mesa (rfr)	80
	II ₂	○	mesa (rfl), faceta inferior (rfl), faceta inferior (rfl), mesa(rfl), faceta inferior (rfl), faceta superior (rfl), faceta inferior (rfl), faceta inferior (rfl) e faceta superior (rfr)	10
	III ₁	+	mesa (rfr), cunha inferior (rfl) e cunha superior (rfr)	10
	IV ₁	□	mesa (rfr), cunha inferior (rfl), cunha inferior (rfl) e mesa(rfr)	12
	IV ₂	□	mesa (rfr), cunha inferior (rfl), cunha inferior (rfl), mesa (rfl), cunha inferior (rfl), cunha inferior (rfl) e cunha superior (rfr).	3

No reflectograma da fig. 3.5 pode se ver 8 reflexos situados na primeira circunferência concêntrica, contando a partir do centro, que correspondem aos feixes do tipo I₁ no plano da secção AA' com a intensidade relativa de 100%. Pode se ver ainda os reflexos do tipo II₁, de maior circunferência concêntrica, com a intensidade relativa de 80% e 16 reflexos do tipo IV₁ com a intensidade relativa de 12%. Contudo, além dos reflexos correspondentes aos previstos, existem no reflectograma um conjunto de pontos não previstos, que caracterizam as particularidades individuais da pedra considerada, cujas origens têm origem nos defeitos de lapidação, inclusões, propriedades ópticas e outros defeitos físicos da pedra lapidada.

O esquema óptico básico do dispositivo usado para a observação e registo dos reflectogramas é dado na fig. 3.6. Consiste de um laser, 1; 2 e 3 são duas lentes convergentes que constituem um sistema de colimação e ajuste do diâmetro de feixe incidente na pedra em estudo, 4 é um écran, com furo no centro, situado no plano focal das duas lentes de colimação e 5 é a pedra em estudo.

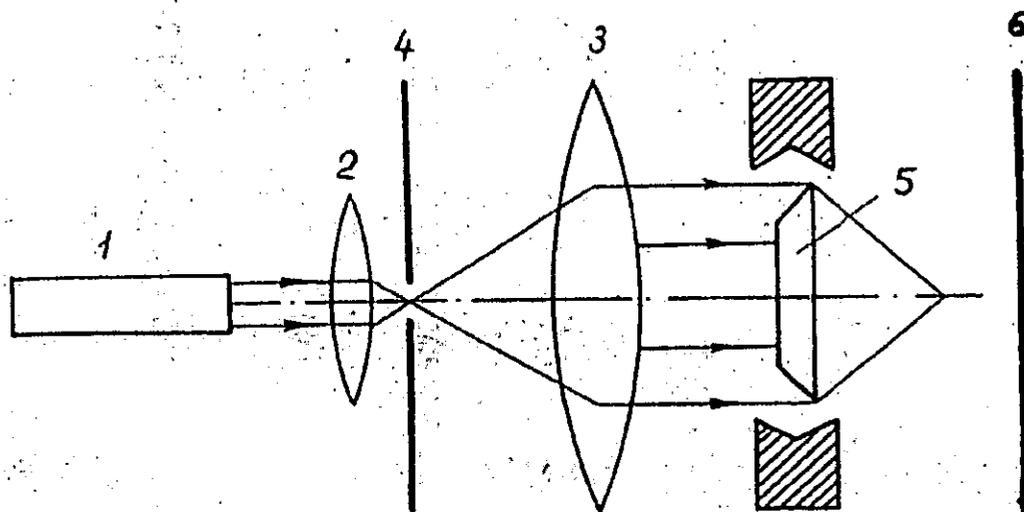


Figura 3.6. Esquema do dispositivo para a observação dos reflectogramas. 1-Laser, 2-lente de entrada no colimador, 3-lente de saída do colimador, 4-écran e 5-pedra preciosa lapidada.

A pedra é fixada num suporte especial que possibilita a sua orientação em relação ao feixe incidente. No esquema, as distâncias entre os elementos 2, 3 e 5 podem ser fixadas arbitrariamente porque não influem na qualidade do reflectograma. Porém, a escolha da distância entre os elementos 3 e 4, igual à distância focal da lente 3 do sistema de colimação, deve ser criteriosa porque a lente 3, além de participar no processo de colimação, determina também as dimensões do reflectograma. A experiência mostra que a distância entre os elementos 3 e 5 não deve superar 15mm, para minimizar os erros de aberração resultante da passagem dos raios através das zonas periféricas da lente 3.

Os raios reflectidos pela pedra, passando pela lente 3, projectam-se no écran 4, onde formam o reflectograma da pedra e os raios transmitidos formam outro reflectograma no écran 6. Resultados experimentais mostram que o ângulo adequado para uma identificação correcta deve situar-se entre $25^\circ - 30^\circ$.

3.4. Determinação das distâncias focais das lentes.

Sendo AB (fig.3.7) o diâmetro do reflectograma, a distância focal F_2 (fig. 3.8) é dada pela expressão seguinte:

$$F_2 = OQ = \frac{AB}{2\text{tg}\alpha} \quad (3.1)$$

Onde α é o ângulo de saída dos raios reflectidos.

A distância focal F_1 , (fig. 3.8) determina-se a partir do diâmetro do feixe de entrada no colimador, Φ_{ent} , proveniente directamente do laser e do diâmetro do feixe de saída do colimador, Φ_s .

$$F_1 = \frac{\Phi_{ent} F_2}{\Phi_s} \quad (3.2)$$

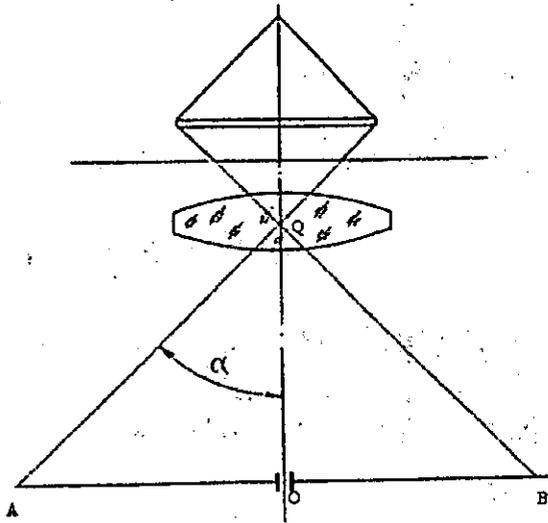


Fig. 3.7. Esquema de determinação da distância focal da lente de saída do colimador.

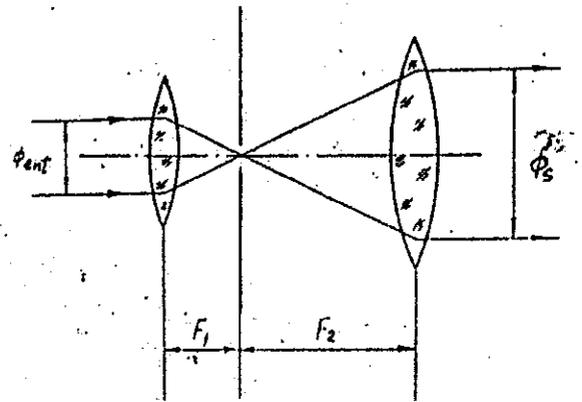


Fig. 3.8. Esquema da determinação da distância focal da lente de entrada do colimador.

Para que os reflectogramas obtidos correspondam aos processos de reflexão conducentes a um maior brilho da pedra lapidada, o diâmetro do feixe deve ser igual ao diâmetro da mesa da pedra. Isto porque nas pedras preciosas bem lapidadas, cerca de 90 % do total dos raios reflectidos e 80 % do fluxo luminoso emergente da mesa propaga-se segundo um cone, denominado cone de brilho (Kaplan 1980), que depende do índice de refração do material da pedra.

3.5. Observação e registo dos reflectogramas das pedras preciosas lapidadas.

A observação dos reflectogramas pode ser feita usando écrans feitos de materiais translúcidos, colocados nas posições 4 e 6 do dispositivo experimental representado na fig. 3.6. No écran 4 observam-se os reflectogramas reflectidos através da mesa e das facetas adjacentes à mesa, enquanto que no écran 6 são observados os reflectogramas transmitidos do lado da coroa da pedra.

O registo dos reflectogramas pode ser feito substituindo os écrans 4 e 6 por chapas fotográficas, fixadas em cassetes apropriados. Em particular, a chapa da posição 4, tal como o écran da mesma posição, deve ter um orifício central para permitir a passagem do feixe que vai incidir sobre a pedra. Não obstante, a técnica de chapas é complicada, primeiro porque todas as operações devem ser executadas na escuridão e em segundo lugar porque a sua aquisição e posterior processamento não são comumente feitos no mercado fotográfico nacional. Para evitar estas dificuldades, o registo é feito usando máquinas fotográficas, que são de fácil operação e existem no mercado nacional, e o processamento dos filmes pode ser feito em qualquer casa da especialidade.

O registo dos reflectogramas usando a máquina fotográfica é feito colocando-a a uma distância adequada, por detrás do écran 6 e orientada na direcção do eixo óptico do esquema. No caso dos reflectogramas reflectidos, o dispositivo experimental dispõe-se segundo o esquema da fig. 3.9. Nesta, 1 é o laser, 2 é o sistema de colimação e ajuste do diâmetro do feixe, 3 é o espelho

rotativo com orifício central (é recomendável que o orifício tenha uma inclinação lateral para permitir a transmissão eficiente do feixe), 4 é um écran translúcido, também com orifício central, 5 é a pedra fixa num suporte e 6 é uma máquina fotográfica. O reflectograma formado no écran 4 incide sobre o espelho e é reflectido para a máquina onde pode ser captada e registado.

Neste trabalho, foi usada uma máquina fotográfica de marca ZENIT de fabrico Soviético.

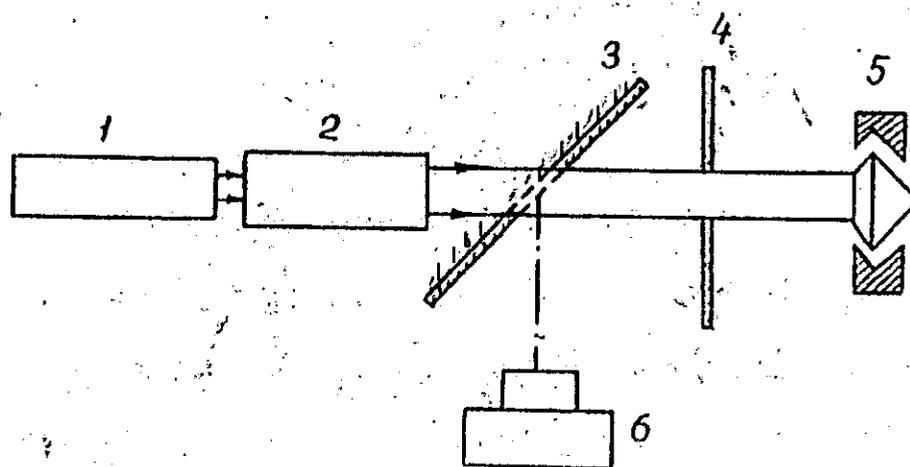


Fig 3.9. Dispositivo experimental para o registo dos reflectogramas. 1-laser, 2-bloco de formação do feixe incidente, 3-espelho com furo no centro, 4-écran semi-transparente com furo no centro, 5-suporte com a amostra em estudo e 6-máquina fotográfica.

3.6. Avaliação das deflexões admissíveis dos elementos do esquema óptico elaborado.

A aplicação prática dos esquemas elaborados para a observação e registo dos reflectogramas mostrou que a distribuição, tanto espacial como das intensidades luminosas dos reflexos, factores que determinam a qualidade dos reflectogramas obtidos, depende consideravelmente do ajustamento de todo o sistema óptico em geral, bem como de cada elemento constituinte em particular. Desta constatação surgiu a necessidade imperiosa de evitar, tanto quanto possível, as deflexões e deste modo diminuir os erros sistemáticos a eles associados.

Na prática, faz-se a avaliação dos desvios máximos admissíveis dos reflexos em torno dos valores médios das coordenadas dos reflexos. O método consiste em destacar, em cada fase, um elemento do esquema óptico para o estudo, fixar e assumir que os restantes elementos do banco óptico encontram-se idealmente ajustados.

Os cálculos são feitos, por um lado na base da óptica geométrica, da geometria espacial e do uso dos parâmetros principais do sistema óptico, tais como as distâncias entre os elementos, as distâncias focais das lentes, o diâmetro da secção transversal do feixe do laser e outros; e por outro lado, usando os parâmetros geométricos de lapidação da pedra preciosa em estudo e o seu índice de refração, dado que são também determinantes na formação dos reflectogramas.

Os valores numéricos dos parâmetros iniciais do esquema óptico do reflectograma e da amostra usados nos cálculos são:

- Distância focal e diâmetro da lente de saída do colimador, 3.
- Distância focal da lente de entrada do colimador, 2.
- Diâmetro da secção transversal do feixe de saída do laser, 0.5 mm.

3.6.1. Valor admissível da deflexão angular do feixe do laser.

Por deflexão angular admissível do feixe do laser considera-se o ângulo ω , formado por um raio luminoso 1, que incide normalmente sobre a mesa de uma pedra preciosa e outro 2, que incide com uma inclinação sistemática. O cálculo é feito a partir das leis da óptica geométrica e da modificação da fórmula usada na elaboração do aparelho para a investigação do campo luminoso do diamante (Fazilov 1985), e a partir da fig. 3.10, obtendo a seguinte fórmula :

$$\omega = \arcsen \left\{ n \cdot \sen \left[4\beta + \alpha - 180^\circ - \arcsen \frac{\sen \left(\arctg \frac{l_2}{r} \right)}{n} \right] \right\} \quad (3.3)$$

Nesta fórmula,

- n é o índice de refração da pedra preciosa,
- e β são os ângulos formados entre o pavilhão e a coroa respectivamente,
- $l_1 = r \operatorname{tg} \{ \arcsen [n \operatorname{sen}(4\beta + \alpha - 180^\circ)] \} = 76,5$ mm é a distância entre o centro do reflectograma e a posição do reflexo para $\omega = 0$,
- $l_2 = l_1 + \Delta_{\max} = 77,5$ mm. Onde Δ_{\max} é o desvio máximo admissível do reflexo em todo reflectograma, e
- $r = 113,4$ mm é o raio da curvatura da lente.

A partir de avaliações experimentais aceita-se, para um reflectograma do tamanho de $130 \times 130 \text{ mm}^2$, como desvio máximo admissível dum dado reflexo, $\Delta_{\max} \leq 1$ mm.

No caso da almandina, por exemplo, cujo índice de refração é $n = 1,81$ e de ângulos de lapidação $\beta = 41^\circ$ e $\alpha = 34^\circ$, obtem-se da fórmula (3.3) a deflexão angular admissível do do laser um valor de $\omega = 0^\circ 18'$.

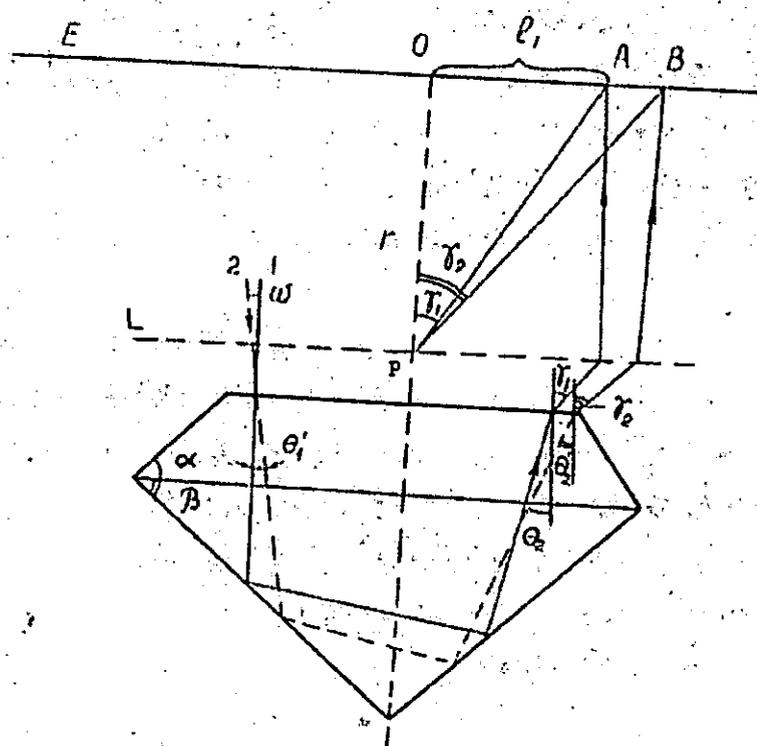


Fig. 3.10. Deflexão admissível do ângulo ω , formado pelos raios 1 que incide normalmente e 2 com uma inclinação em relação ao raio 1.

3.6.2 valor admissível do deslocamento paralelo do feixe de laser.

A figura 3.11 representa as trajetórias dos raios periféricos de um feixe de laser, um tomado como o ideal (1) e outro (2) deslocado paralelamente em relação ao primeiro. O valor do deslocamento máximo admissível, AA' , calcula-se pela fórmula seguinte:

$$AA' = OF \frac{BB'}{QF} \tag{3.4}$$

- OF é a distância focal da lente L_1 ,
- QF é a distância focal da lente L_2 ,
- BB' é deslocamento limiar do feixe do laser que incide sobre a pedra. A partir do valor máximo do diâmetro da secção transversal do feixe do laser que incide sobre a pedra, $\Phi_{\text{máx}} \leq 10 \text{ mm}$, aceita-se que BB' não deve superar 2 mm. neste caso obtem-se, para o valor limiar do deslocamento paralelo do feixe do laser em relação ao eixo óptico do sistema, $AA' = 1,97 \text{ mm}$.

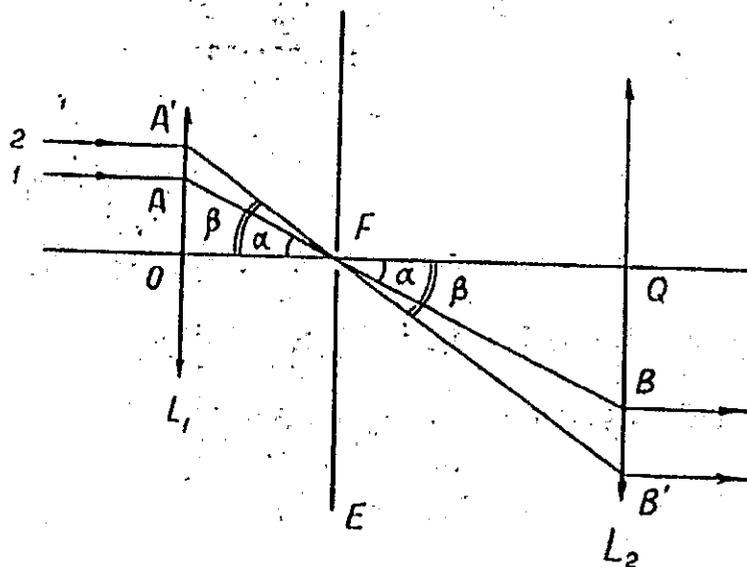


Fig. 3.11 Deslocamento paralelo do feixe. 1 - raio normal, 2 - raio deslocado.

3.6.3. Deflexão angular admissível do feixe do laser na entrada.

A deflexão angular admissível do feixe do laser na entrada do sistema de colimação em relação ao eixo óptico é calculada, tendo em conta a figura 3.12, usando a fórmula seguinte:

$$\gamma = \arctg \left[\frac{QF}{OF} \operatorname{tg} \omega \right] = -0^{\circ} 18' \quad (3.5)$$

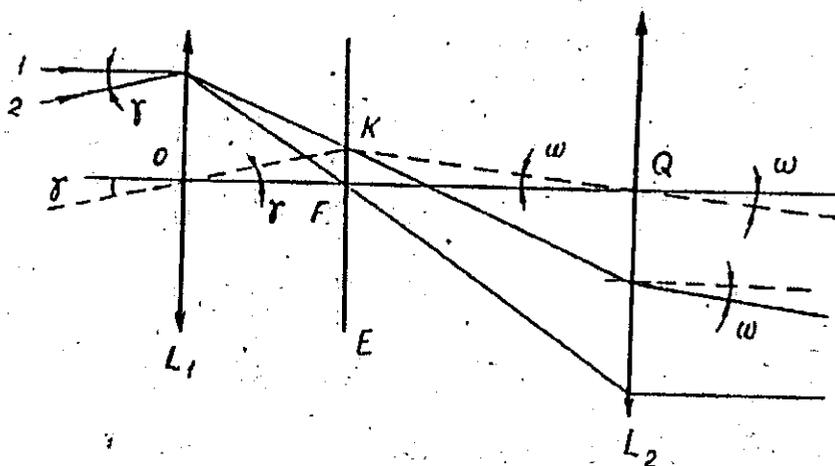


Fig. 3.12. Deflexão angular do feixe na entrada do sistema de colimação.

3.6.4. Deslocamento admissível das lentes ao longo do eixo óptico.

O deslocamento limiar admissível das lentes, ao longo do eixo óptico, é calculada, tendo em conta a figura 3.13, usando a fórmula seguinte:

$$L_2 L'_2 = \frac{OF \cdot Q'F' \cdot \text{tg} \omega}{OA} \quad (3.6)$$

onde $OA = \Phi_0/2 = 0,5 \text{ mm}$ é o raio da secção transversal do feixe de laser na entrada no colimador. Do cálculo deste parâmetro resulta que $L_2 L'_2 = 3,8 \text{ mm}$.

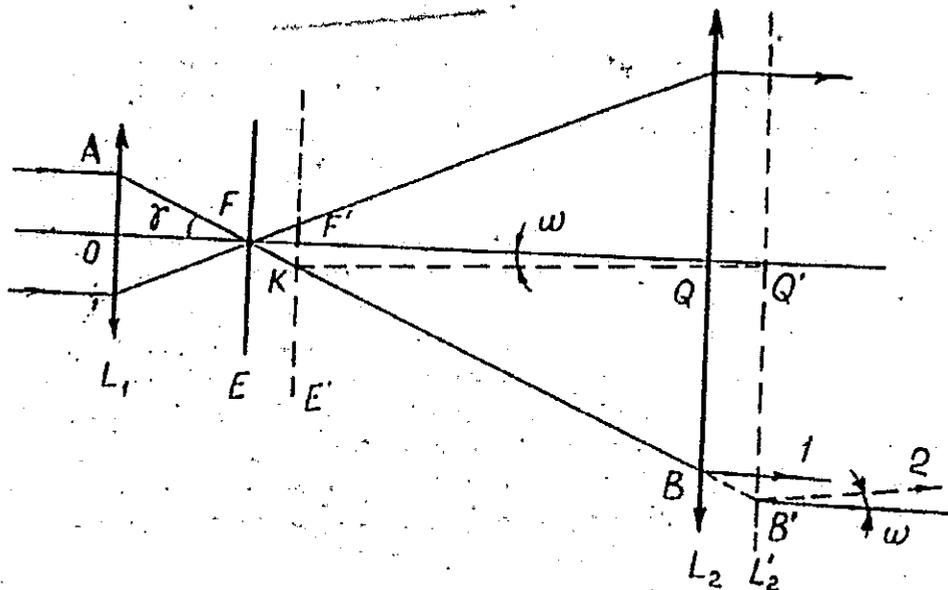


Fig 3.13. Deslocamento da lente de saída ao longo do eixo óptico

3.6.5. Deflexões angulares admissíveis das lentes.

Os valores limiares das deflexões angulares das lentes de entrada do colimador L_1 (fig. 3.14) e de saída do colimador L_2 (fig. 3.15) são calculados pelas fórmulas (3.5) e (3.6) respectivamente:

$$\gamma_1 = \arctg\left(\frac{QF}{OF} \cdot \text{tg} \omega\right) \quad (3.7)$$

e

$$\gamma_2 = \arccos \frac{QF' \cdot \text{sen}\left(\arctg \frac{OA}{OF} - \omega\right)}{QF \cdot \text{sen}\left(180^\circ - \arctg \frac{OA}{OF}\right)} - \omega \quad (3.8)$$

Os valores, obtidos nos cálculos são $\gamma_1 = 1^\circ 52'$ e $\gamma_2 = 14^\circ 26'$.

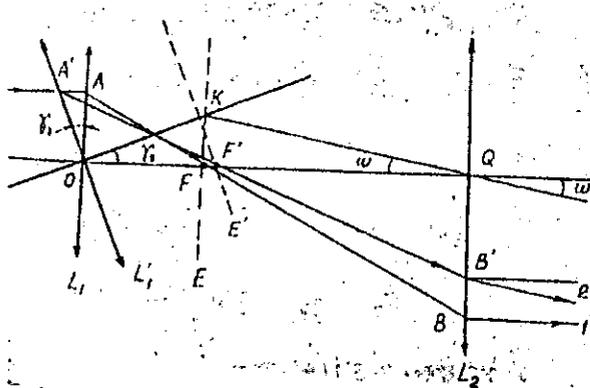


Fig. 3.14 Deflexão angular da lente de entrada.

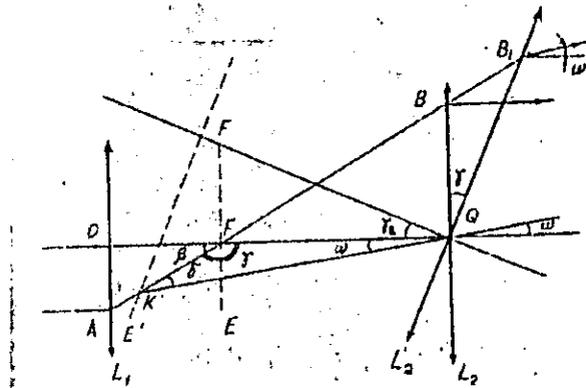


Fig. 3.15 Deflexão angular da lente de saída.

3.6.6. Variações admissíveis da posição do écran.

Os valores limiares do deslocamento do écran ao longo do eixo óptico (fig. 3.16) e da sua deflexão angular δ (fig. 3.17) calculam-se respectivamente pelas seguintes fórmulas:

$$EE' = CD = C'D \frac{QF}{CF - FF'} \tag{3.9}$$

onde - $FF' = 5,0 \text{ mm}$;
 $C'D = 0,5 \text{ mm}$;
 $CF = L_1 = QF \text{ tg}\{\text{arcsen}[n \text{ sen}(4\beta - 180^\circ)]\}$

$$\delta = 180^\circ - \left[\text{arcsen} \frac{CF \cdot \text{sen}(90^\circ + \gamma')}{C'F} + 90^\circ + \gamma' \right] \tag{3.10}$$

onde CF é o mesmo da fórmula (3.9) e $\gamma' = \text{arctg} \frac{CF - FF'}{Q'F'}$,

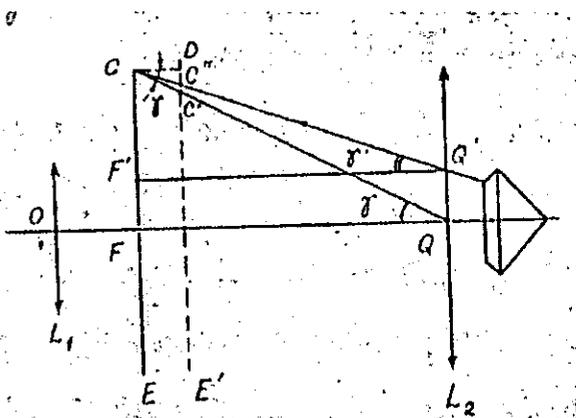


Fig. 3.16 Deslocamento paralelo do écran ao longo do eixo óptico.

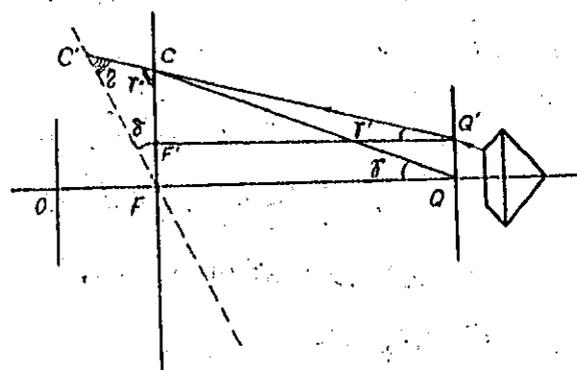


Fig. 3.17 Deflexão angular do écran em relação à sua posição normal.

Dos cálculos obteve-se os seguintes valores: $EE'=0,47$ mm e $\delta = 48' 57''$.

As figuras 3.19 e 3.20 representam reflectogramas experimentais duma aguamarinha lapidada na forma clássica Cr-57 e dum zircónio cúbico respectivamente. As dimensões do reflectograma são de 130×130 mm² e de diâmetro da mesa, $\Phi_m = 5$ mm. Para o registo deste reflectograma foram usados os seguintes elementos ópticos:

- $F_1 = 6,6$ mm a distância focal da lente de entrada do colimador e $\Phi_1 = 12$ mm é o seu diâmetro.
- $F_2 = 113,4$ mm é a distância focal da lente de saída do colimador e $\Phi_2 = 32$ mm é o seu diâmetro.
- O diâmetro da secção transversal do feixe do laser, $\Phi_{\text{máx}} = 1,0$ mm.
- $\Phi_2 = 12,8$ mm é o diâmetro da secção transversal do feixe de saída do colimador, para os valores de F_1 e F_2 acima dados.

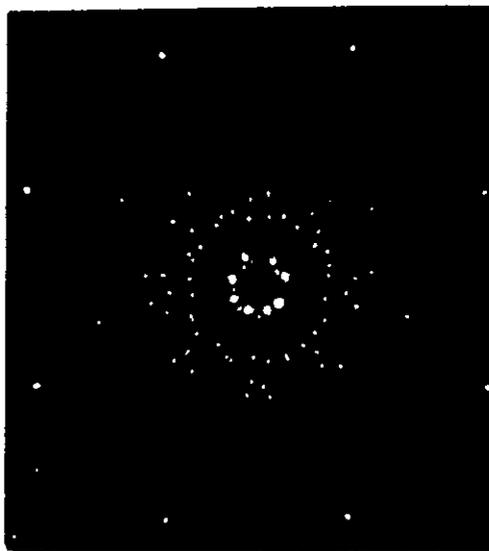


Fig. 3.18 Reflectograma experimental duma aguamarinha lapidada na forma Cr-57.

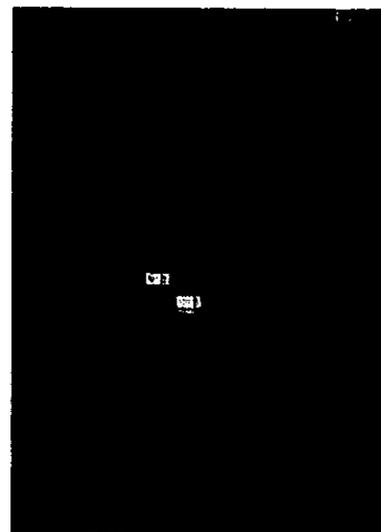


Fig 3.19 Refracção dupla no zircónio cúbico.

3. 7. Análise do reflectograma da pedra preciosa lapidada na forma clássica cr-57.

No estudo dos reflectogramas das pedras preciosas obtidos experimentalmente, que vem sendo feito neste capítulo, mostrou-se a importância deste método na verificação dos reflexos característicos e particulares dum reflectograma, as condições de observação e registo, bem como a análise dos reflectogramas em função dos parâmetros de lapidação. O estudo foi feito na base das leis da interacção da radiação luminosa com a matéria, na aproximação da óptica geométrica (Klimov 1981, Landsberg 1981, Gercberger 1962). Nos cálculos efectuados admitiu-se que o feixe luminoso entrava no interior da pedras preciosas através da mesa.

3.8. Análise dos resultados.

- O método dos reflectogramas tornou claro que as coordenadas espaciais dos reflexos podem ser medidos num referencial ligado ao centro geométrico da imagem, com a exactidão, $\sigma = 0.5$ mm.
- Uma análise comparativa dos reflectogramas experimentais e o teórico, simulado na base da óptica geométrica e os parâmetros de lapidação ideal, mostra que os primeiros tem, em geral, uma estrutura complexa, devida às irregularidades do cristal (inclusões, fissuras, etc). Essa comparação permitiu tirar as seguintes conclusões:
 - A distribuição espacial dos reflexos dos reflectogramas reais condizem com a dos reflexos do reflectograma ideal simulado.
 - Sobrepondo um reflectograma real e o ideal é possível detectar desvios de alguns reflexos do reflectograma experimental em relação aos do ideal. Este desvio constitui uma clara manifestação da existência de defeitos de lapidação. Um outro indício destes defeitos manifesta-se na diferença da distribuição das intensidades luminosas no reflectograma.
 - A simetria que se verifica na distribuição espacial dos reflexos no reflectograma deve-se à simetria de corte das pedras preciosas lapidadas na forma Cr-57. Desvios insignificantes, mesmo da ordem de 50 - 100 nm, na orientação da faceta duma pedra preciosa lapidada afectam a simetria do reflectograma obtido.
 - O estudo dos reflectogramas permite, em certos casos, obter informações sobre a natureza e algumas características ópticas dum dado cristal. No reflectograma dum zircónio cúbico lapidado, manifesta-se nitidamente o fenómeno de dupla refração sob forma de reflexos duplos, fenómeno que não se observa num reflectograma do berilo, cuja magnitude de dupla refração é 3 vezes menor que na turmalina. Este facto mostra que o método de reflectogramas das pedras preciosas, além da avaliação dos parâmetros de lapidação, pode ser usado para efeitos de identificação das pedras preciosas.
 - A análise das trajectórias das componentes do feixe emergentes da pedra permitiu seleccionar os reflexos mais importantes na formação dos reflectogramas. Do total dos reflexos constituintes dum reflectograma, apenas os do tipo I_1 e II_1 (de maior intensidade luminosa) é que contém a informação relativa às facetas adjacentes à mesa duma pedra preciosas lapidada. Reflexos do tipo I_1 caracterizam as posições das facetas principais do pavilhão e duma faceta adjacente à mesa. Os reflexos do tipo II_1 caracterizam as posições de duas facetas adjacentes à mesa e a própria mesa. Os parâmetros de ambos os reflexos caracterizam as propriedades ópticas do cristal. A orientação espacial das restantes facetas dependem directamente das posições das facetas adjacentes à mesa.

3.9. Perspectivas da aplicação do método de reflectograma das pedras preciosas.

A análise experimental mostra que o método do reflectograma das pedras preciosas tem muitas possibilidades de aplicação prática. Destas possibilidades, duas revestem-se de grande importância prática e aplicabilidade imediata, que são:

- Determinação da qualidade de lapidação das pedras preciosas, e
- Diagnóstico da natureza das pedras preciosas.

Quanto ao primeiro aspecto, a análise dos reflectogramas tornou claro que a distribuição espacial dos reflexos, para um dispositivo ajustado correctamente, depende da forma de lapidação e do índice de refração do cristal em estudo. A sistematização das regularidades da distribuição das intensidades por um lado e espacial dos reflexos por outro lado permitirá aplicar o método não apenas para o controle qualitativo, mas também quantitativo da lapidação das pedras preciosas

lapidadas e deste modo aumentar a qualidade da produção. Contudo, a aplicação efectiva deste método só será possível com a conclusão das seguintes fases experimentais:

- Automatizar e computarizar o processo de simulação da formação dos reflectogramas de poliedros de diferentes formas, elaborando programas que permitam a determinação da dependência dos reflectogramas experimentais dos defeitos de lapidação.
- Com a ajuda de um programa de computação, investigar a influência das propriedades ópticas (em particular do índice de refração) das pedras preciosas no carácter dos reflectogramas. Os resultados desta análise poderão ajudar na criação de um método expedito de identificação das pedras preciosas.
- Automatizar e computarizar os processos de descobrimento de defeitos de lapidação e outras particularidades individuais das pedras preciosas.
- Aplicar a lei de dispersão da luz sobre a pedra para a medição do índice de refração. Este método exige o uso de um laser de comprimentos de onda variáveis ou dois lasers de comprimentos de onda diferentes. Iluminando simultaneamente a pedra em estudo com radiações luminosas diferentes, formar-se-ão dois reflectogramas idênticos, mas deslocados um do outro em virtude da dispersão do índice de refração da pedra. A determinação da dependência do deslocamento dos reflexos em função do índice de refração conduz a um método de determinação das pedras preciosas.
- Documentação das jóias valiosas que contêm diamantes, fotografar a a luminescência das submetidas à acção radiações luminosa e ultravioleta. cada jóia terá uma imagem colorida própria e, por isso, a fotografia serve como um documento importante que confirma a identidade da jóia no caso da sua perda e auxilia a sua identificação em caso de roubo.

Todos os métodos aqui propostos afiguram-se possíveis de aplicar e uma vez postos em prática serviriam para a optimização da indústria joalheira em Moçambique.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.

4.1. Conclusões.

- Foram usados alguns métodos tradicionais de determinação das pedras preciosas, nomeadamente, os baseados na medição de polarização, peso específico, propriedades magnéticas e de observação da cor da luminescência.
 - Foi aplicado o fenómeno de polarização para o diagnóstico das pedras preciosas de Moçambique, o que permitiu mostrar que este método é eficiente para a determinação da turmalina prismática hexagonal de cor verde escura.
 - Foi aplicado o fenómeno de luminescência para a determinação de algumas pedras preciosas tais como esmeralda natural, dióxido de zircónio, diamante, rubi, pérola natural, pérola sintética e várias imitações de vidro, com o auxílio do aparelho de raios-X do Laboratório da Física Moderna e o luminoscópio do Projecto de Investigação em Física Nuclear. Com base na informação daqui obtida, foi elaborada uma tabela das cores de RX-luminescência e Cátodo-luminescência de algumas pedras preciosas de Moçambique.
 - Foi aplicado o fenómeno de magnetização para o diagnóstico das pedras preciosas. Os resultados obtidos permitiram concluir que a almandina de Moçambique e a turmalina prismática de cor verde escura podem ser conclusivamente determinadas com o auxílio deste método.
 - Foi usado o método de pesagem hidrostática para a medição do peso específico e os resultados obtidos foram aplicados na determinação de algumas pedras preciosas de Moçambique. Foi avaliada a influência dos erros sistemáticos nos resultados obtidos deste método.
- Foi feito o estudo do efeito da radiação sobre a esmeralda usando uma fonte radioactiva de Cs^{137} .
- Na base de um laser de He-Ne foi elaborado e montado um dispositivo para a observação e registo dos reflectogramas das pedras preciosas lapidadas bem com doutros cristais transparentes e translúcidos.
- Foi feita a montagem de um modelo teórico do reflectograma duma pedra preciosa lapidada na forma de 57 facetas, usando métodos da óptica geométrica. A partir dos desvios máximos admissíveis dos reflexos no reflectograma em relação ao valor médio das suas coordenadas, foram avaliadas as deflexões admissíveis dos elementos do reflectógrafo de laser montado no âmbito deste trabalho.
- Uma análise comparativa do reflectograma teórico elaborado e dos reflectogramas reais das pedras preciosas permitiu ver que os últimos possuíam uma estrutura complexa, em virtude da natureza do cristal e de outros factores extrínsecos, tais como defeitos de lapidação, fissuras, inclusões e demais defeitos da pedra preciosa.

4.2. Recomendações.

- Aperfeiçar o dispositivo de reflectografia de laser, substituindo os suportes da amostra, das telas e de outros elementos ópticos do banco óptico por outros que possam permitir realizar as investigações com comodidade e eficácia.
- Montar um dispositivo constituído por um laser, uma câmara vídeo, um microscópio e um computador e a partir deste dispositivo fazer o controle de qualidade de lapidação e diagnóstico das pedras preciosas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. Anderson, B. W. (1983). Determinação das Pedras Preciosas. 349 pp. Moscovo, Editora Mir.
2. Anderson, B. W. (1970). Gem Testing, 8th edition. 384 pp. London, Edit. Butterworths.
3. Bar-Issak, C., Ramat, G. e Frey, E. (1974). Gem Identification. p 14. London, Bar Issak & Ramat.
4. Schumann, W. (1977). Gemstones of the World. 256 pp. New York, Sterling Publishing Co. Inc.
5. Sechos, B. (1980). Diamond Fingerprinting. Anstral Lapid. Mag. pp 16 - 20.
6. Levshin, V. L. e Levshin L. V. (1972). A Luminesacência e a sua Aplicação. pp 37 - 42. Mosvovo, Nauka.
7. Tarashan, A. N. (1978). Luminescência dos Cristais. 296 pp. Kiev, Naukova Dunka.
8. Bosch, F. J. e Mones, R. L. (1979). Nuevas Técnicas de Observacion de la Luminescencia em diamantes y em algunos de sus Substitutos. Gemologia, 17 (1): 7 - 12.
9. Smit, G. (1980). Pedras Preciosas. 586 pp. Moscovo, Mir.
10. Hobbs, J. (1981). A simple approach to Detecting Diamond Simulant. Gems and Gemology, 17 (1): 20 - 30.
11. Read, P. G. (1980). Beginners Guide to Gemology. 243 pp. London, New Tecnical Books.
12. Murlbut, C. S. (1981). A Cubic Zirconia Refractometre, 17 (2): 93 - 95.
13. Marshall, D. J. (1988). Cathodoluminescence of geological Materials. 146 pp. Boston, Unwin Hyman.
14. Utui, R. (1996). Assembling of Low energy Ion Beam Analysis facility and use of Nuclear Microprobe Techniques in geological studies. 143 pp. Lund, Lund University and Lund Institute of Technology.
15. Leverenz, H. W. (1950). An Introduction to Luminescence of Solids. pp 1 -569. New York, John Wily and sons.
16. Remond, G., Cesbron, F., Chapoulie, R., Ohnenstelter, D., Roques-Carmes, C. e Schvoerer M. (1992). Cathodoluminescence Aplied to the Microcharacterization of Cristal Materials. A Present Status in Experimental and Interpretation. Scanning Microscopy, 1 (6) pp 23 - 68.
17. Manneman, W. W. (1987). Identification of Gemstones by Relative Refractive Reflection Measurements coupled with a Scale calibrated in Gem Names . pp 17 - 39. Tucson, Glossary Cristalogical Record, 85740 USA.
18. Manneman, W. W. (1977). A New Gemological Property. Gems and Gemology., 15 (10): 302 - 305.

19. Gemmol, J. (1978). The role of refractivity in Gemology. 16 (2): 109 - 121.
20. Hoover, D. M. (1983). The diamond Master and the Thermal Properties of Gems. Gems and Gemology, 19 (2): 77 - 86.
21. Vila, P. V. (1982). Nuevo Aparato para la Identificacion del Diamante. Gemologia, 17 (55 - 56): 57 - 69.
22. Gemmol, J. e Dum, O. J. (1977). The Use of the Electron Microscope in Gemology, 15 (5): 248 - 258.
23. Dichl, R. e Dtsch, Z. (1982). Möglichkeiten der Edelstein diagnose Mit hilfe der röntgentopographie, 31 (1-2): 3 - 22.
24. Kaplan, G. R. (1980) A new view of diamonds beauty - „The cone of brilliance”. Gems and Gemology, 17, p.324-325.
25. Fritsch, E. e Stocton, C. M. (1987). Infrared Spectroscopy in Gem identification. Gem and Gemology, 23 (1): 18.
26. Vohmancev, A. J. (1987). Diagnóstico dos Cristais pelos Espectros Infravermelhos de Reflexão. Cristalografia e Geoquímica, 7C: 163 - 176.
27. Miles, E. R. (1978). Laser Reflexão Pattern in Diamond Substitutes. Gems and Gemology, 16 (3) : 77
28. Eulitz, W. R. (1968). The Optics of Brilliant cut Diamond. Gems and Gemology, 2 (4) : 246.271.
29. Hard, A., Shtrikman, S., e Stern, N. A ray Tracing Study of Gem Quality. Optica Acta, 28 (6) : 801 - 809.
30. Klimov, I. M. (1981). Fundamentos dos Cálculos dos Aparelhos Óptico-Mecânicos. 176 pp. Moscovo, Mir.
31. Landsberg, G. S. (1981). Óptica. 944 pp. Tashkent, Ukituvchi.
32. Gerberger, M. (1962). Óptica Geométrica Moderna. 488 pp. Moscovo, Editora Inost Lit.
33. Dodson, F. S. (1978). A statistical Assesment of Brilliant and Five Round Cut Diamonds. Óptica Acta, 25 (8) : 681 -692.
34. Iavoriski, B. M., Detlaf A. A. (1982). Prontuário de Física. 764 pp. Moscovo, Nauca.
35. Fazilov, A. (1985). Aparelho para a Investigação do Campo Luminoso do Brilhante. Certificado do Autor N1321216 MKV Go1 N21/00.
36. Klein, C. and Hurlbut, C. S. J, (1985). Manual of Cristalogy. 596 pp. New York, John Wiley & Sons.
37. Kochkin, N. I. e Chirkévitch, M. G. (1986). Prontuário de Física. 296 pp. Moscovo, Editora Mir.

38. Hands, R. A. (1972). Light for Advanced Courses. pp 89-97. London, G. Bell & Sons Ltd.
39. Zussman, J. (1967). Physical Methods in Determinative Crystology. 514 pp. London, Academic Press.
40. Walsh, J. W. T. (1958). Photometry. 544 pp. New York, Dover Publications, Inc.
41. Hudson, D. (1967). Estatística para os Físicos. pp17. Moscovo. Mir.
42. Kassandrova, D. N. Tratamento dos Resultados das Observações. pp 27-29. Moscovo, Mir.
43. Whittle, R. M. e Yarwood, J. (1973). Discussion of the Results of an Experiment. Experimental Physics for Students. pp 1 -5. London, Chapman and Hall.