Ministério da Educação
Universidade Federal do Paraná
Setor de Ciências Exatas
Departamento de Física

LABORATÓRIOS DE ENSINO DE FÍSICA

Setor B (Eletricidade, Magnetismo e Óptica)

Disciplinas

CF2408 – FÍSICA GERAL EXPERIMENTAL 4

e

CF1822 – LABORATÓRIO DE FÍSICA BÁSICA 4

Manual de Experimentos

Professor da Disciplina: Prof. Edilson Silveira

Professores que contribuíram para o desenvolvimento deste manual:
Prof. Carlos Maurício Lepienski
Prof. Edílson Sérgio Silveira
Prof. José P. M. Serbena
Prof. Sérgio L. M. Berleze

2º SEMESTRE - 2026

CURITIBA

Sumário

Cronograma de Atividades por Equipe 1
Equipamentos do Conjunto de Óptica 2
EXPERIMENTO 1 7
1.1: Feixe de Luz e Reflexão da Luz 7
1.2: Formação de Imagens por um Espelho Plano 12
EXPERIMENTO 2 14
2.1: Formação de Imagens por Espelhos Cilíndricos 14
2.2: Formação de Imagens por Espelhos Esféricos 17
EXPERIMENTO 3 19
3.1: Lei da Refração 19
3.2: Reversibilidade 21
3.3: Dispersão e Reflexão Interna Total 23
EXPERIMENTO 4 26
4.1: Formação de Imagens com Lentes Cilíndricas 26
4.2: Formação de Imagens com Lentes Esféricas – Relação entre Imagem e Objeto 29
4.3: Lentes Esféricas – Aberrações Cromática e Esférica – Tamanho de Abertura e Profundidade de Campo 30
EXPERIMENTO 5 33
5.1: Projetor 33
5.2: Lupa 35
5.3: Microscópio 37
5.4: Telescópio ou luneta 39
EXPERIMENTO 8 41
8.1: Polarização da Luz por Absorção – Lei de Malus 41
EXPERIÊNCIA 9 48
9.1: Polarização Por Reflexão - Ângulo de Brewster 48
9.2: Reflexão por Dielétricos e Polarização 51
EXPERIMENTO 10 56
10.1: Difração e Interferência da Luz - estudo qualitativo 56
EXPERIMENTO 11 58
11.1: Difração da Luz em Fenda Única 58
EXPERIMENTO 12 64
12.1: Interferência da Luz em Fenda Dupla 64
EXPERIMENTO 13 68
13.1: Luz, Cor e Rede de Difração 68
EXPERIÊNCIA 14 74
14.1: Utilização do Espectrofotômetro 74

CRONOGRAMA DE ATIVIDADES POR EQUIPE

Bloco I: Experimentos 1 a 5 (todas as equipes realizam o mesmo experimento).

Bloco II: Experimentos 8 e 9 (todas as equipes realizam o mesmo experimento).

Bloco III: Experimentos 10, 11 e 12 (todas as equipes realizam o mesmo experimento)

Bloco IV: Experimentos 13 e 14 (há quatro bancadas iguais para cada experimento)

EXPERIMENTOS	**SEMANA**	
	1ª	2ª
LUZ E COR E REDES DE DIFRAÇÃO (Experimento 13)	G1, G2, G3 e G4	G5, G6, G7 e G8
LINHAS ESPECTRAIS E UTILIZAÇÃO DO ESPECTRÔMETRO (Experimento 14)	G5, G6, G7 e G8	G1, G2, G3 e G4

EQUIPAMENTOS DO CONJUNTO DE ÓPTICA

A Figura 1 mostra todos os componentes do ***SISTEMA DE INTRODUÇÃO À ÓPTICA MODELO OS-8500*** da PASCO. O sistema também inclui uma caixa que suporta todos os componentes. Para cada componente existe uma abertura própria para o seu encaixe.

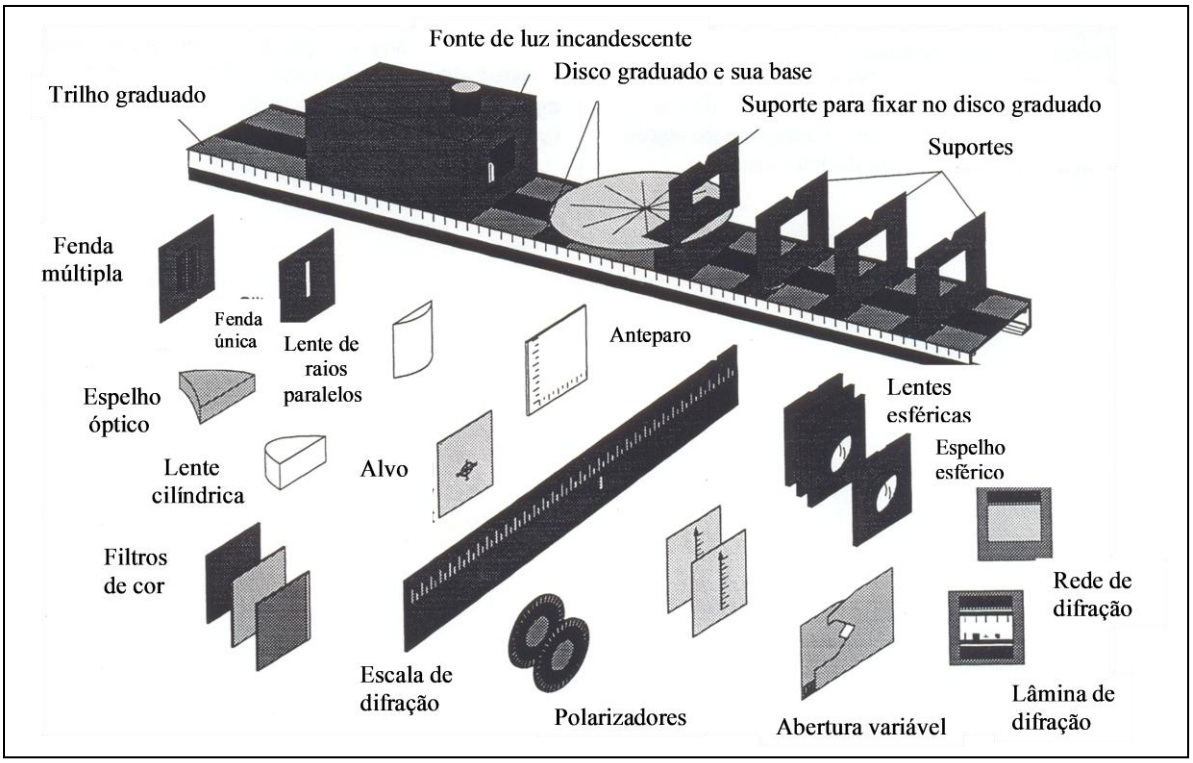


Figura 1 – Componentes inclusos no SISTEMA DE INTRODUÇÃO À ÓPTICA MODELO OS-8500

.

Montagem do equipamento:

SISTEMA ÓPTICO:

O sistema óptico é mostrado na Figura 2. A *fonte de luz*, o *trilho graduado*, o *disco graduado* e a sua base são presos magneticamente ao trilho, como mostrado na Figura 2. Para um bom alinhamento óptico, a extremidade de cada um destes componentes deve seguir o alinhamento do *trilho graduado* (guia elevada que corre ao longo do trilho).

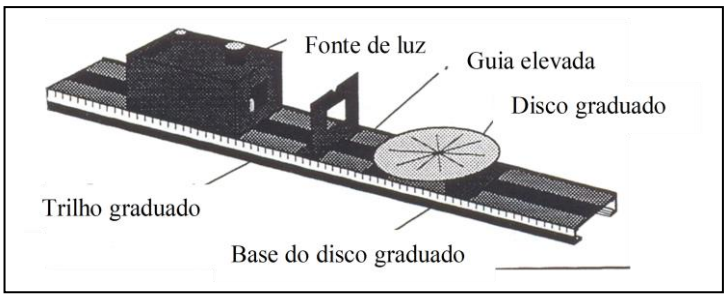


FIGURA 2

NOTA: Evite danificar as superfícies magnéticas dos componentes. Se elas adquirirem sujeira, use água ou álcool isopropílico esfregando até limpar. Outros solventes podem danificar a superfície magnética.

FONTE DE LUZ INCANDESCENTE

A *fonte de luz* está mostrada na Figura 3. Conecte o cabo de força em uma tomada de 105/125 VAC e ligue o interruptor que se encontra na parte de cima da fonte. Se a fonte não funcionar consulte o professor.

O botão de posição do filamento move lateralmente a lâmpada incandescente. Os cortes na região inferior das laterais da fonte indicam a posição do filamento da lâmpada incandescente, de forma que durante os experimentos poderão ser feitas medidas precisas.

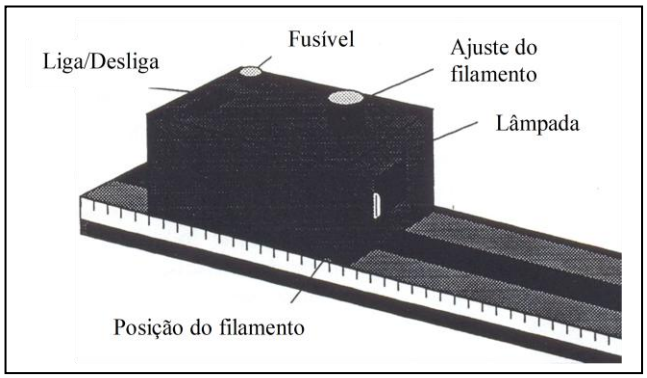


FIGURA 3

SUPORTES:

O kit óptico vem com três *suportes* regulares e um suporte projetado para fixação no plano do *disco graduado*. Os *suportes* regulares são presos magneticamente ao trilho, conforme a Figura 4. O entalhe no *topo* de cada suporte é para centrar o *componente* no suporte. O entalhe na *base* do suporte serve para medidas precisas de distâncias entre os componentes no *trilho*.

Este entalhe na base é posicionado de tal forma que se tenha a localização precisa do plano vertical da *lente* ou *espelho* montados sobre o trilho. Conforme ilustrado na Figura 5, o *componente* óptico pode ser colocado na face esquerda do suporte ou na face direita; nesta figura está mostrada a localização para ambas situações.

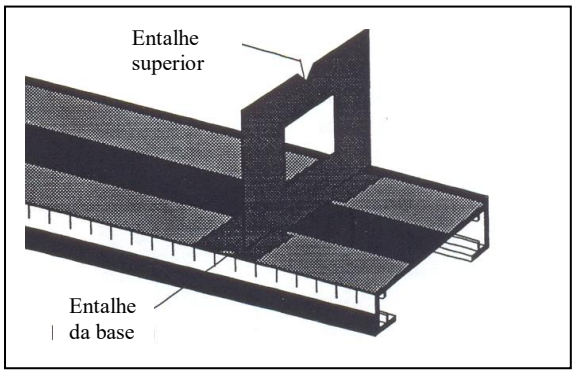


FIGURA 4

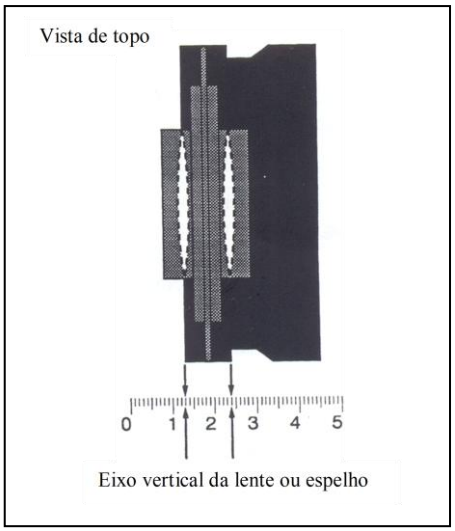


FIGURA 5

A *abertura variável*, os *polarizadores* e as *lentes* são presos nos *suportes* como mostra a Figura 6. Use o entalhe centrado para alinhar os componentes ao longo do *trilho graduado* e, no caso dos *polarizadores*, para medir o ângulo de polarização.

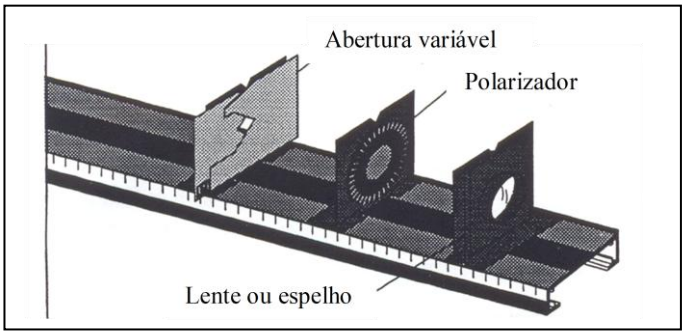


FIGURA 6



FIGURA 7

Proceda da mesma maneira para alinhar o *espelho esférico*. Note que o *espelho* é prateado em ambas as faces, de forma que dependendo de qual lado é usado, ele pode ser côncavo ou convexo. Veja a ilustração da Figura 7.

EXPERIMENTOS COM A REDE DE DIFRAÇÃO:

Monte o equipamento de difração como mostrado na Figura 8. Você pode usar a *lâmina de difração* que tem dez aberturas diferentes identificadas com as letras A a J, ou uma *rede de difração* que tem linhas com espaçamento de 600 linhas/mm. Se você está usando a *lâmina de difração (Diffraction Plate)*, coloque a *fenda única (Slit Mask)*do outro lado do suporte e posicione de forma que só uma única fenda de difração seja iluminada pela *fonte de luz*.

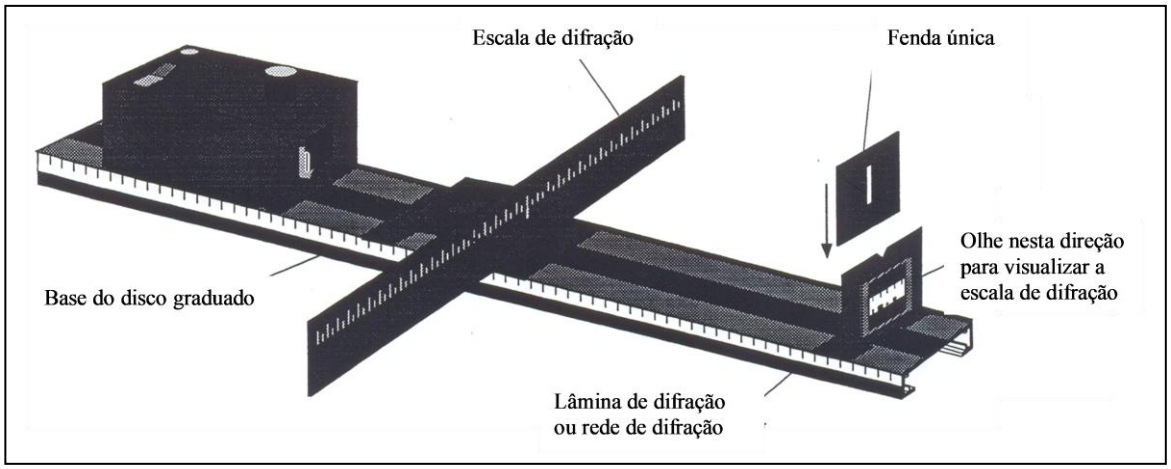
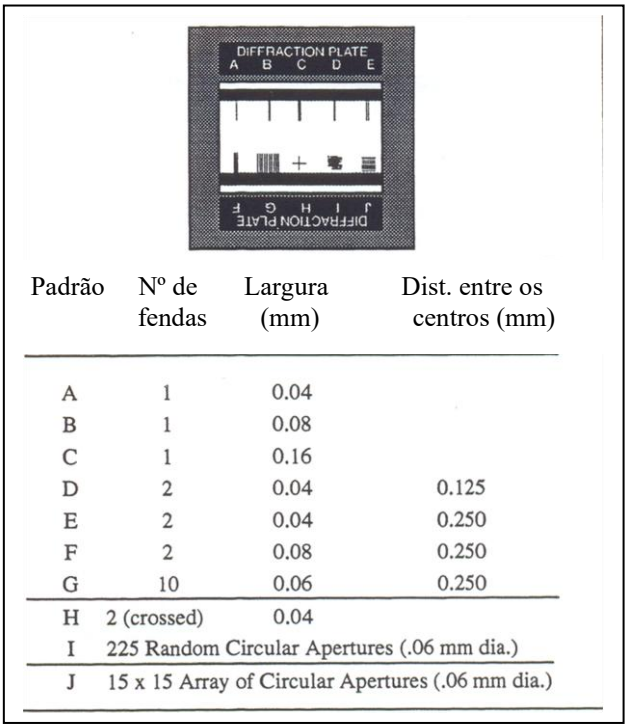


FIGURA 8

Mais informações sobre como analisar estas medidas estão contidas nos experimentos sobre difração e interferência da luz. As dimensões das aberturas da lâmina de difração estão listadas na Figura 9.



Padrão	Nº de fendas	Largura (mm)	Dist. entre os centros (mm)
A	1	0.04	
B	1	0.08	
C	1	0.16	
D	2	0.04	0.125
E	2	0.04	0.250
F	2	0.08	0.250
G	10	0.06	0.250
H	2 (crossed)	0.04	
I	225 Random Circular Apertures (.06 mm dia.)		
J	15 x 15 Array of Circular Apertures (.06 mm dia.)		

FIGURA 9

MONTAGEM BÁSICA PARA O FEIXE DE LUZ:

A montagem básica para utilização do feixe de luz está mostrada na Figura 10. A base do *disco graduado* deve se deslocar seguindo a guia elevada do *trilho*. O *disco graduado* é encaixado sobre a sua base.

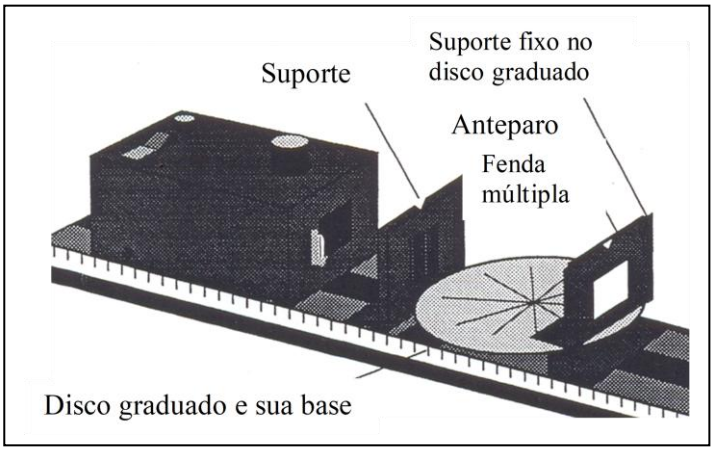


FIGURA 10

Observe que a base do *disco graduado* é ligeiramente inclinada. Quando você está montando a base no *banco óptico*, esteja certo que o *disco graduado* fique inclinado para a *fonte de luz*. Isso assegura raios de luz alinhados e claros. Em todas as experiências descritas neste manual, o erro introduzido por esta inclinação é desprezível.

Qualquer lado do *disco graduado* pode ser usado. Um lado tem uma escala angular, e o outro tem uma escala angular e uma grade, que pode ser usada para medidas lineares.

A *fenda múltipla (Slit Plate)* é presa no suporte entre a *fonte de luz* e o *disco graduado*. O posicionamento mostrado na ilustração dará feixes de luz claros, estando em uma sala ligeiramente escurecida. Porém, a qualidade (largura ou divergência) dos feixes de luz é facilmente variada ajustando a distância entre a *fonte de luz* e a *fenda múltipla*. Feixes menos divergentes podem ser obtidos aumentando-se a distância entre a *fonte de luz* e as *fendas*, porém, há uma diminuição no brilho. O suporte próprio para ser fixado no *disco graduado* é fixado magneticamente, como ilustrado na Figura 10. Neste suporte, pode ser montado o *anteparo*, o *polarizador* ou outro componente.

FEIXE DE LUZ ÚNICO:

Vários experimentos de óptica, com análise quantitativa, são executados utilizando-se um único feixe de luz. Isto pode ser obtido usando-se a *fenda única*, como mostrado na Figura 11, a qual bloqueia todos os feixes exceto o desejado. Para medidas precisas que utilizem a escala angular, o feixe de luz incidente tem que atravessar diretamente o centro do *disco graduado*.

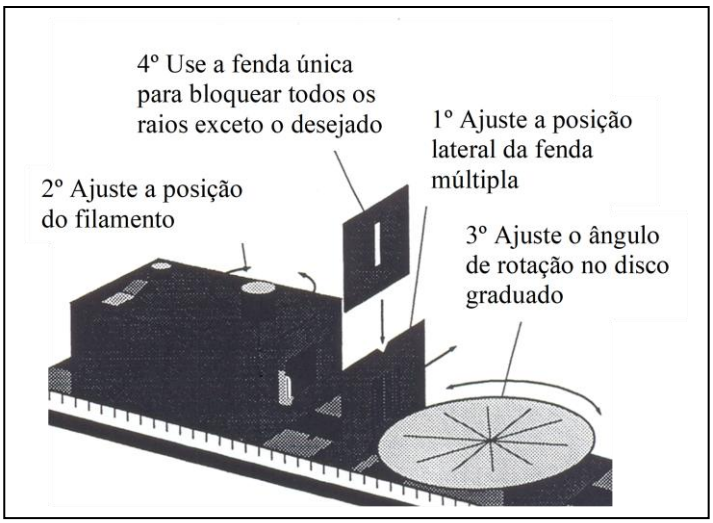


FIGURA 11 – Alinhamento de um único raio.

Para fazer isto, faça o ajuste na sequência:
1º - a posição lateral da *fenda múltipla* em seu suporte;
2º - a posição do filamento da *fonte de luz* em relação ao eixo óptico;
3º - a rotação do disco graduado.

Quando um dos feixes de luz é alinhado desta maneira, coloque a *fenda única* no outro lado do suporte para bloquear todos os feixes exceto o feixe de luz desejado.

FEIXES DE LUZ PARALELOS:

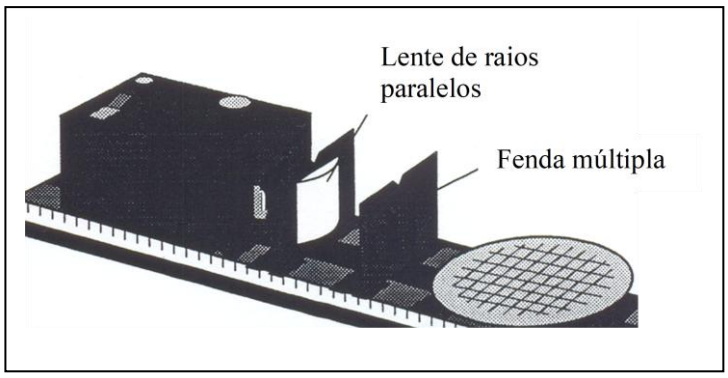


FIGURA 12

Feixes de luz paralelos são obtidos posicionando a *lente de raios paralelos* e seu *suporte* entre a *fonte de luz* e as *fendas*, conforme mostra a Figura 12. Use as linhas paralelas da grade do *disco graduado* como uma referência. Ajuste a posição longitudinal da *lente* até que os feixes de luz sejam paralelos.

EXPERIMENTO 1

1.1: Feixe de Luz e Reflexão da Luz

1 EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS:

Trilho graduado, disco graduado e sua base (*Ray Table Degree Scale*), fenda múltipla (*Slit Plate*), fenda única (*Slit Mask*), anteparo (*Viewing Screen*), fonte de luz, suporte, suporte para fixar no disco graduado, espelho óptico.

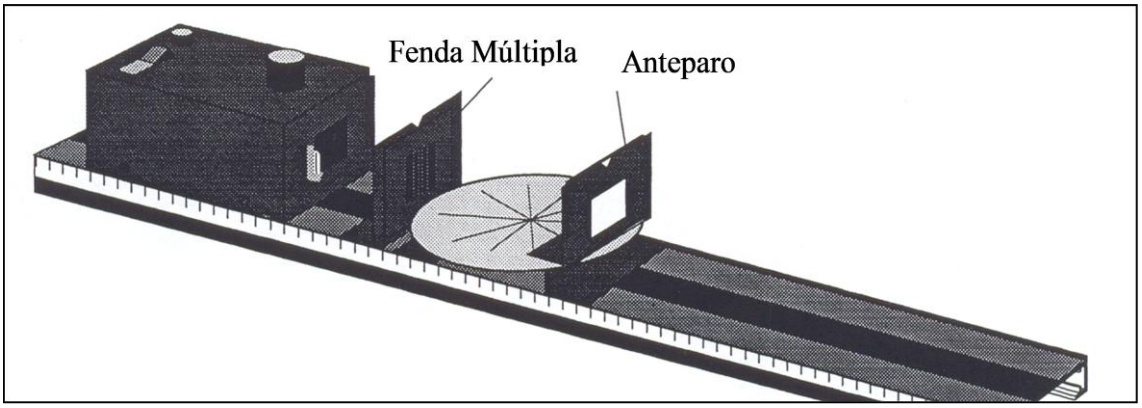


FIGURA 1.1.1 – Montagem básica para obter feixes de luz.

2 OBJETIVOS:

- Observar a propagação retilínea da luz;
- Utilizar o feixe para determinar a posição de um objeto;
- Comprovar as leis da reflexão da luz.

3 INTRODUÇÃO:

A forma e a localização da imagem criada por reflexão em um espelho de forma qualquer são determinadas através de alguns princípios simples. Um destes princípios você já sabe: a luz se propaga em linha reta. Você terá uma oportunidade para aprender os princípios restantes neste experimento.

Para determinar os princípios básicos de qualquer fenômeno, é melhor observar aquele fenômeno em sua forma mais simples. Neste experimento você observará a reflexão de um único feixe de luz por um espelho plano. Os princípios descobertos aqui serão aplicados nas próximas experimentos e em exemplos mais complexos de reflexão.

4 PROCEDIMENTO:

4.1 PROPAGAÇÃO RETILÍNEA:

Monte o equipamento como mostrado na Figura 1.1.1 e ligue a *fonte de luz*. Escureça o ambiente para que os feixes de luz sejam vistos com mais facilidade sobre o *disco graduado*.

Sugestão: para facilitar a análise e o traçado dos raios, nas etapas 4.1.1 e 4.1.2 utilize uma distância de 25 a 30 cm entre a face da fonte de luz e o centro do disco graduado.

4.1.1 Propagação retilínea da luz:

Observe os feixes de luz sobre o *disco graduado* e responda as questões.

1) Os feixes de luz são retos?

2) Como a largura (e a definição) de cada feixe de luz varia se a *fenda múltipla* for colocada mais afastada da *fonte de luz*?

Retire o *anteparo* e seu suporte e siga para o próximo passo.

3) Abaixe a sua cabeça até que você possa olhar ao longo de um dos "feixes de luz" no *disco graduado*. Onde a luz se origina? Que caminho a luz segue até chegar ao seu olho? Tente isto para vários feixes de luz.

4) Faça um desenho com a vista de cima da montagem, representando as fendas e o filamento da lâmpada. Sobre este desenho faça um diagrama de raios mostrando como a luz do ponto do filamento passa pelas fendas.

4.1.2 Localizando o filamento:

Você pode usar o fato que a luz se propaga em linha reta para medir a distância entre o filamento da *fonte de luz* e o centro do *disco graduado*. Observe a Figura 1.1.2. Todos os feixes de luz no *disco graduado* se originam no filamento da *fonte de luz*. Pelo fato da luz se propagar em linha reta, você só precisa prolongar os feixes de luz para trás para localizar o filamento. (Veja a questão 3 na primeira parte deste experimento).

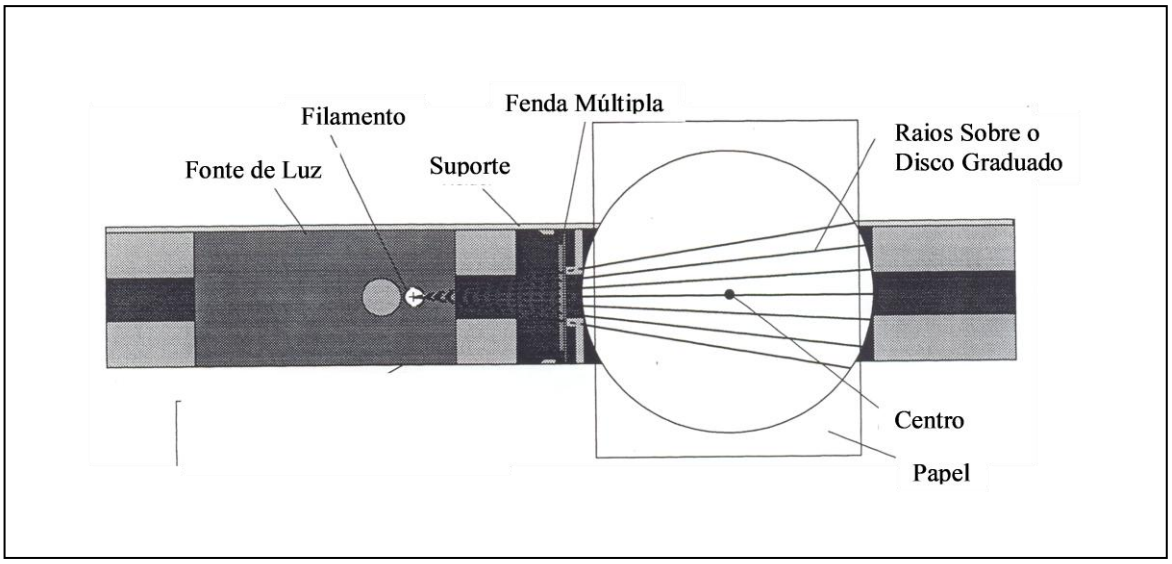


FIGURA 1.1.2 – Procedimento para determinar a posição do objeto.

Coloque um pedaço de papel branco sobre o *disco graduado*. Prenda com um pedaço de fita adesiva. Faça uma marca no papel referente à posição do centro do *disco graduado*. Usando um lápis, marque dois pontos sobre cada feixe de luz sobre o papel.

Remova o papel. Trace uma reta ligando cada par de pontos correspondentes aos feixes de luz. Prolongue cada feixe para achar o ponto de intersecção comum a eles. Você pode precisar de uma folha adicional de papel; neste caso, cole-as. Meça e expresse a incerteza na localização do ponto de intersecção.

1) No diagrama de raios, meça a distância entre a marca de referência do centro do disco e o ponto de intersecção dos feixes de luz.

2) Use a escala métrica do *trilho graduado* para medir diretamente a distância entre o filamento e o centro do *disco graduado* (conforme a Figura 1.1.2, o entalhe lateral localizado na base da fonte de luz indica a posição do filamento).

3) Compare as medidas feitas utilizando os passos 1 e 2. Considere a incerteza na localização do ponto de intersecção dos feixes. Comente o resultado.

4) Discuta os conceitos de fonte de luz pontual e fonte de luz extensa.

5) Caso a fonte de luz fosse uma lâmpada comum, quais os cuidados que deveriam ser observados?

Uma das ideias principais deste experimento é a habilidade para localizar a origem dos feixes de luz. Este conceito será muito útil nas próximas experimentos.

4.2 REFLEXÃO DA LUZ:

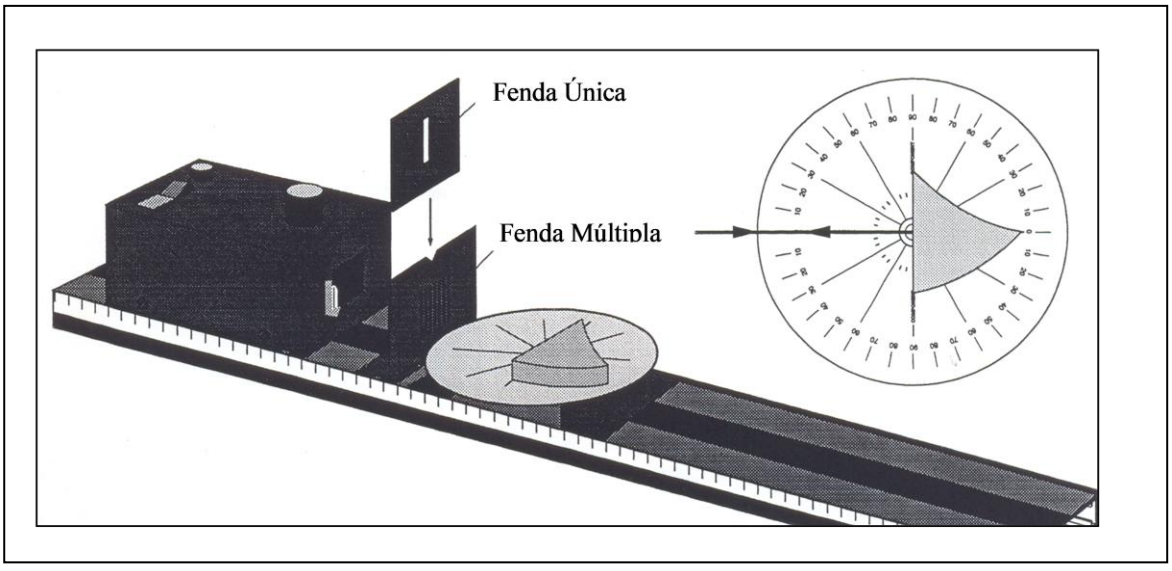


FIGURA 1.1.3 – Montagem do sistema para estudar a lei da reflexão.

Monte o equipamento como mostrado na Figura 1.1.3. Para esta etapa, deixe a *placa de fendas* e o *disco graduado* relativamente afastados da fonte de luz de modo a ter um feixe estreito; isto melhora a qualidade dos resultados. Ajuste os componentes de forma que um único feixe de luz esteja alinhado com a seta em negrito denominada "Normal" na escala do *disco graduado*.

Observe que a base do espelho possui uma superfície imantada de modo a fixá-lo melhor sobre o disco.

Alinhe cuidadosamente a superfície refletora plana do *espelho* com a linha em negrito denominada "Component" no *disco graduado*. Com o *espelho* corretamente alinhado, a seta em negrito no *disco graduado* é normal ao plano da superfície refletora e o ponto de incidência ajustado adequadamente.

Gire o *disco graduado* e observe o feixe de luz. Os ângulos de incidência e de reflexão são medidos em relação à normal da superfície refletora, conforme está mostrado na Figura 1.1.4.

Nas medidas a seguir, expresse os ângulos na forma explícita. A incerteza nas leituras do ângulo de reflexão pode variar conforme o ângulo de incidência.

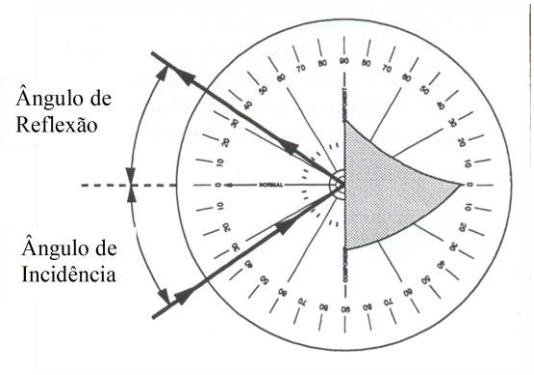


FIGURA 1.1.4 – Definição dos ângulos e detalhes das suas medidas.

Girando o d*isco graduado*, fixe o ângulo de incidência para cada uma das posições mostradas na Tabela 1.1.1. Para cada ângulo de incidência (no sentido horário), registre o ângulo de reflexão (Refletido$_1$). Repita suas medidas com o feixe de luz incidindo pelo lado oposto (no sentido anti-horário) em relação à normal. Anote o ângulo de reflexão na coluna (Refletido$_2$).

TABELA 1.1.1 – Ângulos de reflexão medidos.

Ângulo Incidente	Ângulo Refletido$_1$ (horário)	Ângulo Refletido$_2$ (anti-horário)
0°		
10°		
20°		
30°		
40°		
50°		
60°		
70°		
80°		
90°		

1) Os resultados para as duas situações são os mesmos? Caso não sejam, você atribui as diferenças a que?

2) Foram feitas medidas dos ângulos ao girar o disco nos sentidos horário e anti-horário. Que vantagem isto permite?

3) Observando os resultados da Tabela 1.1.1, qual é a relação entre o ângulo de incidência e o ângulo de reflexão?

4) Parte da lei da reflexão diz que o feixe de luz incidente, a normal e o feixe refletido estão no mesmo plano. Discuta como isto é mostrado no seu experimento.

5) Uma forma alternativa de realizar a dedução teórica das leis da reflexão (como também da leis da refração) pode ser feita utilizando o Princípio de Fermat. Enuncie esse princípio. Explique como essa dedução da lei de reflexão pode ser realizada.

6) Os físicos buscam sempre aumentar a precisão com que uma lei exata pode ser provada como válida. Como você poderia testar a lei da reflexão em um nível de precisão mais elevado do que você executou neste experimento?

1.2: Formação de Imagens por um Espelho Plano

1 EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS:

Trilho graduado, disco graduado e sua base (*Ray Table Degree Scale*), fenda múltipla (*Slit Plate*), fonte de luz, suporte, espelho óptico.

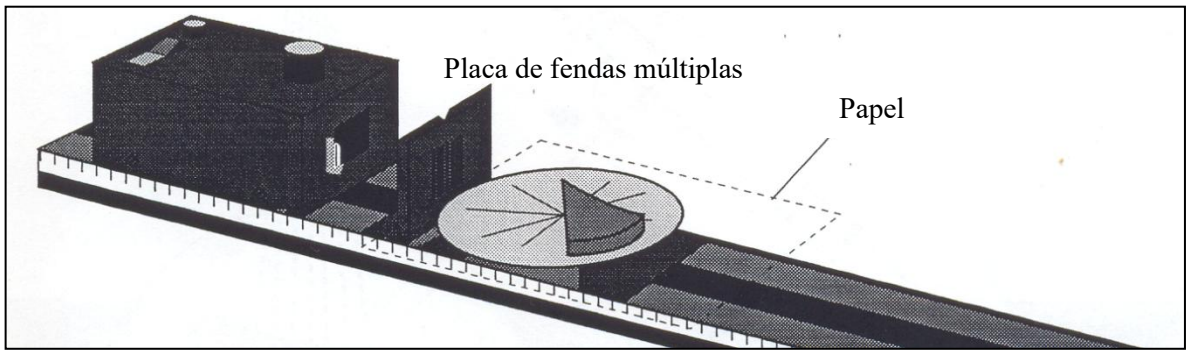


FIGURA 1.2.1 – Montagem do sistema, mostrando a folha de papel em branco sobre o disco e o posicionamento do espelho.

2 INTRODUÇÃO:

A natureza da imagem que você vê num espelho plano pode ser analisada em termos dos princípios já estudados: a lei de reflexão e a propagação retilínea da luz. Neste experimento você investigará como a localização aparente de uma imagem refletida de um espelho plano se relaciona com a localização do objeto, e como esta relação é um resultado direto dos princípios básicos que você já estudou.

3 PROCEDIMENTO:

Monte o equipamento como mostrado na Figura 1.2.1. Utilize uma distância de 25 a 30 cm entre a face da fonte de luz e o centro do disco graduado. Ajuste a *fenda múltipla* e a *fonte de luz* para que os feixes sejam bem visíveis.

Como mostrado, deixe um espaço em branco na folha de papel sobre o *disco graduado* e coloque o *espelho* sobre o papel. Posicione o *espelho* de forma que todos os feixes de luz de sua superfície plana sejam refletidos.

Marque no papel a posição da superfície plana do *espelho*. Olhe no *espelho* ao longo da linha dos feixes de luz refletidos de forma que você possa ver a imagem da *fenda múltipla*, e através das fendas, o filamento da *fonte de luz*. (Gire o *espelho* se for preciso).

Marque dois pontos nas extremidades de cada feixe de luz incidente e refletido. Nomeie os pontos (I_1 , I_2 , ... , R_1 , R_2 , ...) para você saber quais pontos pertencem aos feixes de luz incidentes e quais pertencem aos feixes refletidos. Remova o papel e reconstrua os feixes de luz como mostrado na Figura 1.2.2. Se for necessário, utilize folhas adicionais de papel.

Risque as linhas pontilhadas para estender os feixes de luz incidente e refletido. Se você tiver dúvida em como localizar estes feixes consulte a experimento 1.1. Em seu desenho, marque onde se encontra o filamento e a posição aparente de sua imagem refletida.

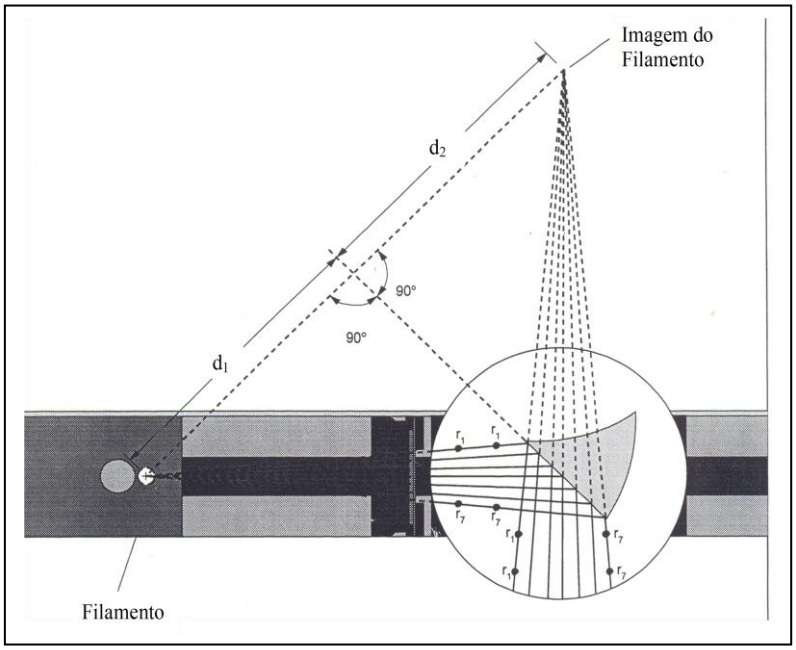


FIGURA 1.2.2 – Prolongamento dos raios incidentes e refletidos e determinação da posição do objeto e da imagem.

1) O que significa a distância perpendicular do filamento até o plano do *espelho* (distância d_1 mostrada na Figura 1.2.2) ?

2) O que significa a distância perpendicular da imagem do filamento até o plano do *espelho* (distância d_2 mostrada na Figura 1.2.2) ?

Mude a posição do *espelho* e da *fonte de luz* e visualize o que acontece. Discuta. Caso haja tempo, repita a experimento.

3) Qual é a relação entre a posição do objeto e a localização da imagem refletida em um *espelho* plano? (Considere a incerteza na posição dos pontos de intersecção dos feixes).

4 PERGUNTAS ADICIONAIS:

1) Se uma parede de um quarto consiste em um espelho plano grande, quanto maior (em área) o quarto parece ser, do que realmente é?

2) Faça um diagrama que ilustra por que uma imagem da letra **F**, refletida por um espelho plano, é invertida. Trace cada ponta da letra **F** como uma fonte de luz. Localize a imagem para cada fonte e construa a imagem de **F**.

3) Qual a relação entre o tamanho da imagem refletida por um espelho plano e o tamanho do objeto?

4) Se a superfície não fosse polida as leis de reflexão seriam válidas?

5) Se o espelho não fosse plano as leis da reflexão seriam diferentes? Como aplicar as leis nesses casos para encontrar a imagem de um espelho não plano?

EXPERIMENTO 2

2.1: Formação de Imagens por Espelhos Cilíndricos

1 EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS:

Trilho graduado, disco graduado e sua base (*Ray Table Degree Scale*), fenda múltipla (*Slit Plate*), lente de raios paralelos, fonte de luz, suportes, espelho óptico.

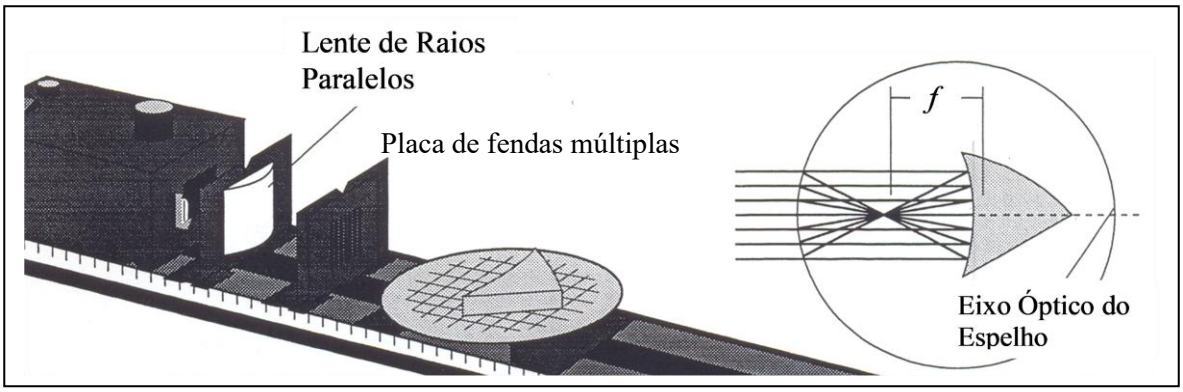


FIGURA 2.1.1 – Montagem do conjunto para o estudo de espelhos cilíndricos.

2 INTRODUÇÃO:

A técnica do traçado de raios pode ser utilizada para localizar a imagem formada por qualquer espelho de forma conhecida. Simplesmente pense no objeto como uma coleção de fontes pontuais de luz. Para um determinado ponto de luz, os raios divergentes são refletidos no espelho de acordo com a lei da reflexão. Se os raios refletidos se cruzam num ponto, uma imagem real é formada naquele ponto. Se os raios refletidos não se cruzam, uma imagem virtual é formada no ponto de cruzamento do prolongamento destes raios para trás do espelho.
Neste experimento você usará o disco graduado para estudar as propriedades da imagem formada pela superfície refletora cilíndrica. As propriedades que você observará têm uma analogia com a imagem formada por lentes cilíndricas.

3 PROCEDIMENTO:

Monte o equipamento conforme mostrado na Figura 2.1.1. Posicione *a lente de raios paralelos* sobre um dos suportes. Sobre outro suporte posicione a placa de fendas múltiplas. Coloque o *espelho óptico* sobre o *disco graduado*, de forma que os raios sejam refletidos pela superfície côncava.

3.1 PONTO FOCAL:

Ajuste a posição do suporte com a *lente de raios paralelos* para obter raios paralelos sobre o *disco graduado*. Ajuste o *espelho* sobre o *disco graduado* de forma que os raios incidentes sejam paralelos ao eixo óptico do *espelho*. Certifique-se que o vértice do *espelho* esteja exatamente sobre o centro do *disco graduado*.

1) Meça a distância focal do espelho cilíndrico *côncavo*, expressando-a com incerteza:

f (côncavo) = _____

2) Utilize a técnica do traçado de raios para medir a distância focal do espelho cilíndrico *convexo*. Coloque uma folha de papel auxiliar entre o espelho e o disco. Marque o vértice do

espelho e também dois pontos sobre cada feixe refletido. Ligue os pontos dois a dois prolongando-os até a intersecção. Localize o ponto de foco do espelho. Meça a distância focal, expressando-a com incerteza. Consulte o seu livro texto se você tiver dúvidas sobre a convenção de sinais.

f (convexo) = _____

3) Verifique se os raios de curvatura dos espelhos são iguais. Relacione as distâncias focais com os raios de curvatura. Compare as medidas de f(côncavo) e f(convexo). Considerando as incertezas nas medidas, os resultados são compatíveis?

4) Nos itens anteriores, os feixes incidentes eram paralelos ao eixo de simetria do espelho. Gire o disco óptico de modo que os feixes passem a incidir com um ângulo de aproximadamente 20° em relação ao eixo de simetria. Observe o ponto de intersecção dos feixes refletidos. Aumente gradativamente o ângulo de incidência e observe o que ocorre com a intersecção dos feixes refletidos. Todos os feixes se interceptam num mesmo ponto?
Este comportamento dá origem à chamada aberração de *coma*, que ocorre em espelhos e lentes cilíndricas e esféricas.

3.2 POSIÇÃO DA IMAGEM, CONFORME A POSIÇÃO DO OBJETO:

Aqui será analisada a distância da imagem em relação ao espelho, quando é modificada a distância do objeto em relação ao espelho. Remova a *lente de raios paralelos*. Deslize a *fenda múltipla*, o *disco graduado* e o *espelh*o ao longo do trilho, o mais afastado possível da *fonte de luz*. Posicione o *espelho* como mostrado na Figura 2.1.1.

1) Próximo a que ponto é formada a imagem do filamento da lâmpada?

2) O que acontece com a distância entre a imagem e o espelho se você mover a fonte de luz para mais perto do *espelho*?

3) Verifique se uma imagem ainda é formada quando a distância entre o filamento e o *espelho* é menor que a distância focal do *espelho*. Neste caso, qual é o tipo de imagem formada?

4) Usando o lado convexo do *espelho*, você pode obter uma imagem real do filamento da *fonte de luz*? Explique como.

3.3 AMPLIAÇÃO E INVERSÃO DA IMAGEM:

No plano do *disco graduado*, o filamento da fonte de luz age como uma fonte pontual de luz. Para observar a ampliação e a inversão é necessária uma fonte extensa. Como se observa na Figura 2.1.2, duas posições diferentes do filamento da *fonte de luz* podem ser usadas para simular uma seta que define um objeto de comprimento h_o. Utilize uma folha de papel colocada sobre o disco (entre o disco e o espelho). A fonte inteira será deslocada lateralmente conforme mostra a Figura 2.1.2; a posição final da fonte está desenhada em tracejado. O deslocamento lateral, medido com uma régua, dá o comprimento h_o desta seta fictícia. Posicione o filamento da fonte de luz inicialmente na parte de trás da seta fictícia e, depois, perto do topo. Para cada uma destas posições do objeto, localize a posição da imagem e faça uma marca na folha de papel. Meça o comprimento h_i da seta da imagem. A ampliação é determinada dividindo-se h_i por h_o.

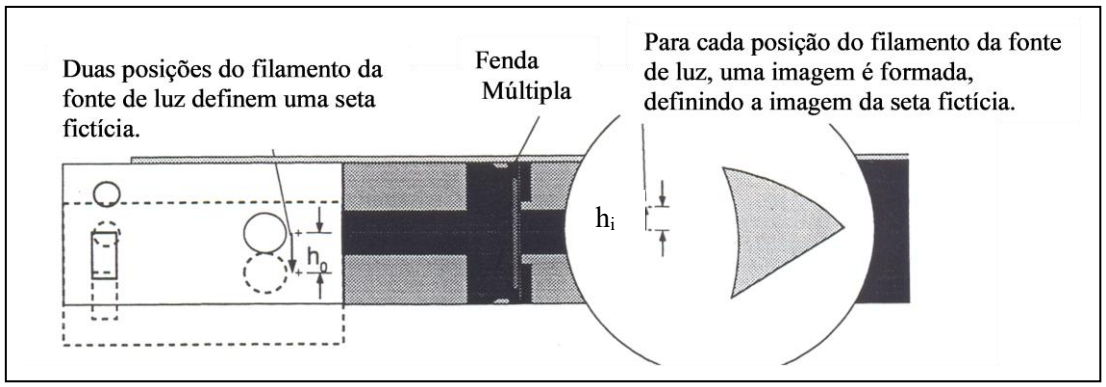


FIGURA 2.1.2 – Vista de cima do conjunto, mostrando a simulação de um objeto extenso com a movimentação do filamento.

Determine a ampliação para algumas distâncias diferentes entre a *fonte de luz* e o *espelho*.

1) Qualitativamente, como a ampliação depende da distância entre o objeto e o *espelho*?

2) A imagem é invertida? A inversão da imagem depende da localização do objeto em relação ao espelho?

3) Se estivesse sendo usada a parte convexa do espelho, haveria imagem formada? Que tipo de imagem seria essa? Como poderia ser determinada a sua posição e tamanho?

3.4 ABERRAÇÃO CILÍNDRICA:

Aberração cilíndrica é a distorção na imagem refletida causada por uma imperfeição da localização dos raios refletidos. Coloque uma folha de papel em branco entre o disco graduado e o espelho. Organize o equipamento de forma que todos os raios de luz sejam refletidos através da superfície côncava do *espelho*, conforme a Figura 2.1.1. Utilizando a placa de fenda única, bloqueie todos os raios, exceto dois, e marque o ponto de intersecção. Faça isto para os demais pares de raios adjacentes.

1) Para todos os casos o ponto imagem coincidiu exatamente?

2) Como você alteraria a forma do *espelho cilíndrico* para reduzir a aberração cilíndrica?

OBTENÇÃO DE UM OBJETO VIRTUAL:

Posicione a *fonte de luz* e a *lente de raios paralelos* de forma que os raios se cruzem num ponto sobre o *disco graduado*, como mostrado na Figura 2.1.3(a). Uma folha de papel em branco colocada em cima do *disco graduado* ajudará a ver os raios. Considerando que os raios divergem deste ponto de intersecção, ele pode ser usado como objeto.

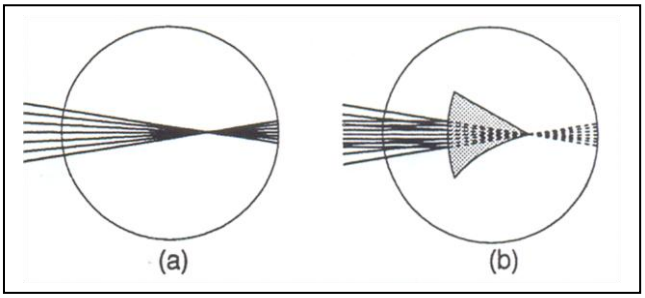


FIGURA 2.1.3 – (a) Convergência dos raios sobre o disco óptico; (b) Ponto focal do espelho convexo coincidindo com o ponto de convergência dos raios.

Coloque o lado convexo do *espelho* de forma que seu ponto focal coincida com o ponto onde os raios se cruzam, como visto na Figura 2.1.3(b). Deve ser destacado que, com o *espelho* nesta posição, os raios incidentes são refletidos pelo *espelho* e não se cruzam de fato. O ponto onde os prolongamentos dos raios incidentes se cruzariam é considerado um objeto virtual.

Desenhe um diagrama de raios, mostrando os raios refletidos quando um objeto virtual é posicionado no ponto focal do *espelho* convexo. Qual a orientação dos raios refletidos?

2.2: Formação de Imagens por Espelhos Esféricos

1 EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS:

Trilho graduado, fonte de luz, espelho esférico de distância focal 50 mm, acessório alvo (*Crossed Arrow Target*), suportes, acessório anteparo (*Viewing Screen*).

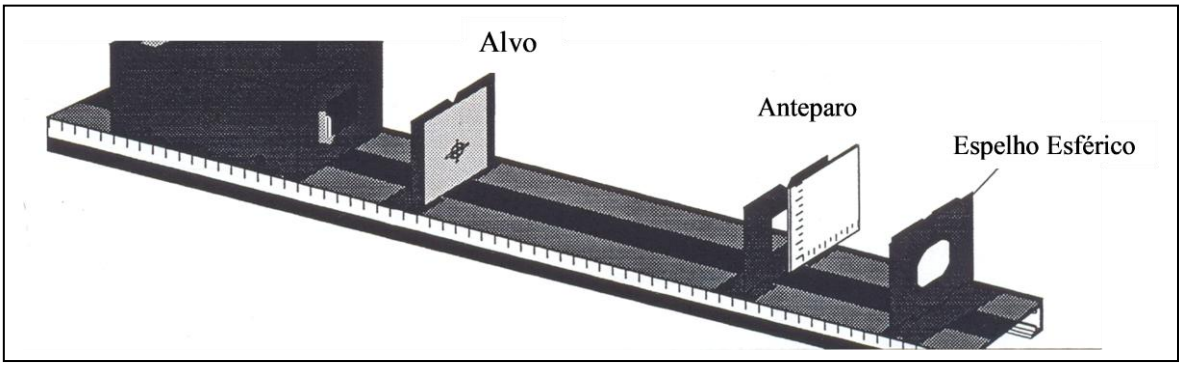


FIGURA 2.2.1 – Montagem do conjunto para estudar os espelhos esféricos.

2 INTRODUÇÃO:

Se você cortasse uma tira fina ao longo de qualquer diâmetro de um espelho esférico, esta tira seria uma aproximação a um espelho cilíndrico. Pensando nisso, não devemos nos surpreender que imagens formadas por espelhos esféricos apresentem várias propriedades iguais às formadas por espelhos cilíndricos. Neste experimento você investigará algumas destas propriedades.

3 PROCEDIMENTO:

3.1 PONTO FOCAL:

Monte o equipamento como mostrado na Figura 2.2.1, com o lado côncavo do *espelho* voltado para a *fonte de luz*. O *acessório anteparo* deve cobrir só a metade da parte vazada do suporte de forma que a luz do filamento alcance o *espelho*.
Para verificar a distância focal do *espelho*, posicione o *espelho* sobre o *trilho graduado* o mais distante possível do *acessório alvo*. Varie a posição do *anteparo* para encontrar onde a imagem do *alvo* é focalizada.

1) Qual é a medida da distância focal para o espelho esférico côncavo?

$f =$ _____ (lembre-se que este valor medido é uma aproximação)

2) Como você poderia determinar a distância focal com mais precisão?

3.2 LOCALIZAÇÃO DA IMAGEM, AMPLIAÇÃO E INVERSÃO:

A Equação Fundamental para os espelhos esféricos é:

$$\frac{1}{d_o}+\frac{1}{d_i}=\frac{1}{f}$$

com a ampliação da imagem dada por

$$m = \frac{h_i}{h_o} = -\frac{d_i}{d_o} \ .$$

Neste experimento você testará a validade desta equação para imagens formadas por espelhos esféricos.

Meça o tamanho do objeto no acessório alvo h_o.

Fixe a distância entre o *espelho côncavo* e o *acessório alvo* (objeto) para os valores mostrados na Tabela 2.2.1.

A cada posição do objeto ajuste a posição do *acessório anteparo* tal que a imagem do alvo esteja com a melhor focalização, meça a distância-imagem d_i e o seu tamanho h_i e anote-os na Tabela 2.2.1.

Faça os cálculos solicitados na tabela para verificar se a equação fundamental dos espelhos é válida.

TABELA 2.2.1 – Medidas feitas para o espelho côncavo.

Dados			Cálculos			
d_o (mm)	d_i (mm)	h_i (mm)	$1/d_i + 1/d_o$ (mm^{-1})	$1/f$ * (mm^{-1})	h_i / h_o	$-d_i / d_o$
120						
150						
180						
200				.		
220				.		
100				.		
75						
50						

** Utilizando o valor nominal.*

1) Que dificuldade você encontrou para fazer as medidas com precisão quando o objeto estava próximo do foco do espelho? E quando o objeto estava muito distante do espelho? Justifique.

2) Seus resultados estão de acordo com a equação fundamental? Em caso negativo, a que você atribui as discrepâncias? Explique em que situações o erro experimental é maior.

3) Faça um gráfico de d_i em função de d_o . Que forma tem este gráfico?

4) Com base na equação fundamental dos espelhos, proponha mudanças de variáveis de forma a linearizar o gráfico do item anterior. Trace o gráfico linearizado. Ajuste uma reta a este gráfico, determinando a sua equação. A partir desta equação calcule a distância focal do espelho utilizado. Compare este valor determinado experimentalmente com o valor nominal impresso no espelho. Discuta as possíveis causas para discrepâncias.

Até aqui você sempre obteve uma imagem real. Porém, quando um objeto é colocado entre o espelho côncavo e o ponto focal, uma imagem virtual é formada. Imagens virtuais também podem ser formadas usando um espelho esférico convexo.

EXPERIMENTO 3

3.1: Lei da Refração

1 EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS:

Trilho graduado, disco graduado e sua base (*Ray Table Degree Scale*), fenda múltipla (*Slit Plate*), fenda única (*Slit Mask*), lente cilíndrica (*Cylindrical Lens*), fonte de luz, suporte.

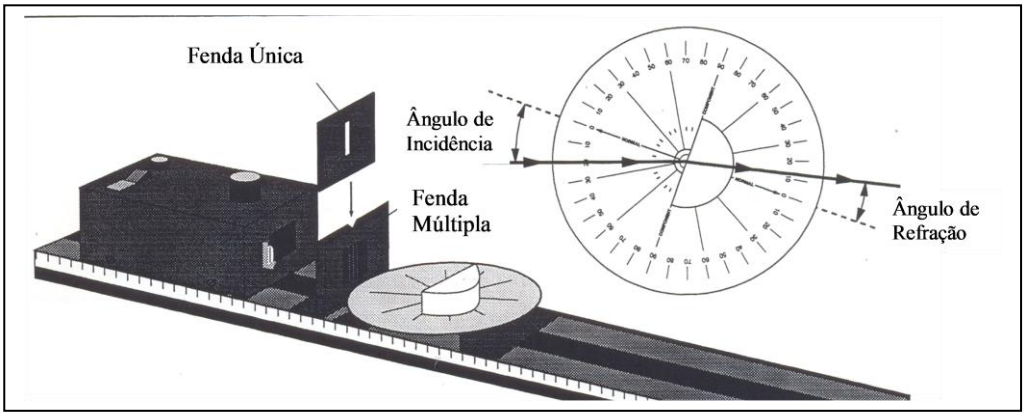


FIGURA 3.1.1 – Montagem do conjunto e posicionamento da peça semicircular para estudo da refração.

2 INTRODUÇÃO:

Como você já comprovou, a direção de propagação da luz muda abruptamente quando atinge obliquamente uma superfície refletora. A direção também pode mudar abruptamente quando a luz passa de um meio material para outro como, por exemplo, do ar para o acrílico ou do vidro para a água, desde que a incidência seja oblíqua em relação à normal. Neste caso a mudança de velocidade de propagação (e, em consequência, a mudança de direção) é chamada Refração. Da mesma forma que na reflexão, uma lei simples descreve o comportamento de um feixe de luz refratado. De acordo com a Lei da Refração, também conhecida como Lei de Snell,

$$n_1 \, sen\, \theta_1 = n_2 \, sen\, \theta_2 ,$$

os valores de n_1 e n_2 são constantes, chamados índices de refração, que dependem do meio material pelo qual a luz está passando. Os ângulos θ_1 e θ_2 são os ângulos que o feixe de luz faz com a normal no limite entre os dois meios materiais (veja a ilustração na Figura 3.1.1). Neste experimento você testará a validade desta lei, e também determinará o índice de refração da peça de acrílico.

3 PROCEDIMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS:

Monte o equipamento como mostrado na Figura 3.1.1. Ajuste os componentes de tal maneira que um único feixe de luz passe diretamente pela escala central do *disco graduado*. Alinhe a superfície plana da *lente cilíndrica* com a linha denominada "Component" no *disco graduado*. O feixe de luz deve incidir no centro da superfície plana, de modo que as linhas radiais que se estendem do centro da *escala graduada* serão perpendiculares à superfície circular da *lente*.

Sem desalinhar a *lente cilíndrica*, gire o *disco graduado* e observe o feixe de luz refratado para vários ângulos de incidência.

1) O raio se desvia quando incide na superfície plana da lente e passa para dentro dela?

2) O raio se desvia quando passa para fora da lente, atravessando perpendicularmente a sua superfície curva?

Girando o *disco graduado*, ajuste o ângulo de incidência para cada um dos valores mostrados na Tabela 3.1.1. Para cada ângulo de incidência, meça o ângulo de refração (Refratado$_1$). Repita as medidas fazendo o feixe de luz incidir sobre a superfície semicircular da *lente* (Refratado$_2$).

TABELA 3.1.1 – Ângulos de refração medidos.

Incidente	Refratado$_1$		Refratado$_2$	
	Sentido horário	Sentido anti-horário	Sentido horário	Sentido anti-horário
0°	_____	_____	_____	_____
10°	_____	_____	_____	_____
20°	_____	_____	_____	_____
30°	_____	_____	_____	_____
40°	_____	_____	_____	_____
50°	_____	_____		
60°	_____	_____		
70°	_____	_____		
80°	_____	_____		
90°	_____	_____		

3) Seus resultados são os mesmos para os dois conjuntos de medidas (horário e anti-horário)? Em caso negativo, a que você atribui as diferenças?

Utilizando os ângulos medidos na primeira configuração de incidência (Refratado$_1$), escolha um dos conjuntos de dados (horário ou anti-horário) e faça um gráfico com os valores do seno do ângulo de refração num dos eixos, e os valores do seno do ângulo de incidência no outro eixo. Ajuste uma reta, e determine a sua equação. Interprete o significado físico dos coeficientes da reta. Considerando o índice de refração do ar igual a 1,0 (o índice de refração do ar é 1,000293 a 0°C e 1 atm) calcule o índice de refração do acrílico.

4) Repita a análise gráfica para a outra configuração de incidência, (Refratado$_2$). Compare os resultados obtidos em ambos os gráficos. Eles são compatíveis?

5) O seu gráfico é consistente com a lei da refração? Explique.

4 PERGUNTAS ADICIONAIS:

1) Executando a experimento, que dificuldades você encontrou para medir os ângulos de refração quando os ângulos de incidência eram grandes?

2) Alguns raios foram refletidos? Como você poderia ter usado a Lei da Reflexão para testar o alinhamento da lente cilíndrica?

3) Até qual valor de θ_1 a Lei de Snell pode ser aproximada por $n_1\theta_1 \approx n_2\theta_2$? (Sugestão: para um dos conjuntos de dados (horário ou anti-horário) de Refratado$_1$ faça um gráfico com os valores do ângulo de refração no eixo *y*, e os valores do ângulo de incidência no eixo *x* - utilize um símbolo para estes pontos; sobre o mesmo gráfico represente a reta $y = \frac{n_1}{n_2}x$ com linha contínua, considerando o valor de n_2 calculado anteriormente. Observe qual o valor máximo de θ_1 para o qual as funções ainda podem ser consideradas concordantes).

3.2: Reversibilidade

1 EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS:

Os mesmos do experimento 3.1.

2 INTRODUÇÃO:

No experimento 3.1 você determinou a relação que existe entre o ângulo de incidência e o ângulo de refração para um raio de luz vindo do ar para um meio mais refringente, no caso a lente cilíndrica. Uma pergunta importante permanece. A mesma relação é válida entre os ângulos de incidência e refração para um raio de luz que provém de um meio mais refringente que o ar? Quer dizer, se a luz está viajando no sentido oposto, a lei da refração é a mesma ou diferente? Neste experimento você vai encontrar a resposta para esta pergunta.

3 PROCEDIMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS:

Sem modificar o alinhamento da *lente*, gire o *disco graduado* e fixe o ângulo de incidência para os valores listados na Tabela 3.2.1. Anote os correspondentes ângulos de refração na coluna Refratado$_1$. Copie estes valores na coluna Incidente$_2$. É importante que todos os ângulos sejam medidos com suas incertezas.

TABELA 3.2.1 – Ângulos de refração medidos para as duas situações de incidência.

Raio incidente sobre a Superfície Plana		Raio incidente sobre a Superfície Semicilíndrica	
Incidente$_1$	Refratado$_1$ =	= Incidente$_2$	Refratado$_2$
0°	_____	_____	_____
10°	_____	_____	_____
20°	_____	_____	_____
30°	_____	_____	_____
40°	_____	_____	_____
50°	_____	_____	_____
60°	_____	_____	_____
70°	_____	_____	_____
80°	_____	_____	_____
90°	_____	_____	_____

Girando o *disco graduado* de 180°, faça o raio incidir na superfície curva da *lente* (para um ângulo igual ao Refratado$_1$) O ângulo interno de incidência na superfície plana da *lente cilíndrica* é mostrado na Figura 3.2.1. Ajuste o disco de modo que o ângulo Incidente$_2$ seja igual aos listados na coluna Refratado$_1$. Meça e anote os ângulos de refração correspondentes (Refratado$_2$).

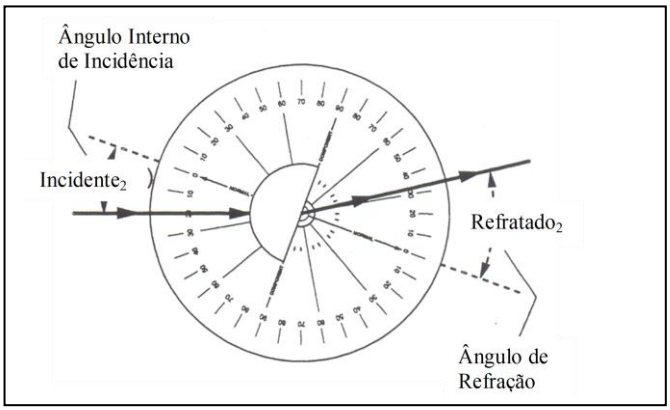


FIGURA 3.2.1 – Medidas dos ângulos de incidência e de refração.

1) Compare os ângulos de incidência (Incidente$_1$) e de refração (Refratado$_2$) considerando suas incertezas. Eles podem ser considerados iguais?

2) A lei da refração é a mesma para um feixe de luz proveniente de qualquer um dos meios?

3) Em uma folha de papel separada, colocada entre a peça e o disco, desenhe os contornos da *lente cilíndrica*. Utilizando os ângulos de uma das linhas da Tabela 3.2.1, faça um diagrama de raios que mostre um feixe de luz passando pela *lente cilíndrica*. Mostre os ângulos corretos de incidência e refração em ambas as superfícies atravessadas pelo feixe de luz. Use uma seta para indicar a direção de propagação do feixe de luz. Agora inverta o sentido do feixe de luz. Mostre que os novos ângulos de incidência e refração ainda são consistentes com a lei da refração. Este é o princípio da reversibilidade óptica.

4) Modifique a posição do semicilindro, de forma que o centro da face plana fique deslocado transversalmente em relação ao eixo óptico e observe os feixes refletidos e refratados em cada interface.

4 PERGUNTAS ADICIONAIS:

1) Quando a luz atravessa o semicilindro, ela encontra duas interfaces. Descreva num diagrama de raios como ocorrem as reflexões e refrações nessas duas superfícies, tanto com a incidência na parte plana como na parte convexa da peça.

2) Repita a mesma análise quando o feixe inicial atinge a peça quando ela está levemente deslocada transversalmente, não estando corretamente centrada. As leis de refração ainda são válidas?

3) Como o princípio de Fermat pode ser usado para se obter o enunciado das leis de refração?

4) As leis de reflexão e de refração podem ser aplicadas a outras oscilações eletromagnéticas como ondas de rádio, raios X e micro-ondas? Discuta as implicações.

5 TÓPICOS AVANÇADOS - OPCIONAL:

1) Faça uma análise das leis de reflexão e de refração utilizando o formalismo eletromagnético.

2) Obtenha a lei de Snell a partir do formalismo eletromagnético.

3) Discuta os balanços de energia transmitida e refletida que ocorrem numa interface com base no formalismo eletromagnético das ondas eletromagnéticas.

Bibliografia recomendada:
Optics – Eugene Hecht
Cap. 4 - pag. 79 - 120
2ª edição – 1987 – Addison Wesley Publishing Company Inc.

3.3: Dispersão e Reflexão Interna Total

1 EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS:

Trilho graduado, disco graduado e sua base (*Ray Table Degree Scale*), fenda múltipla (*Slit Plate*), fenda única (*Slit Mask*), lente cilíndrica (*Cylindrical Lens*), acessório anteparo (*Viewing Screen*), fonte de luz, suporte, suporte para fixar no disco graduado, prisma.

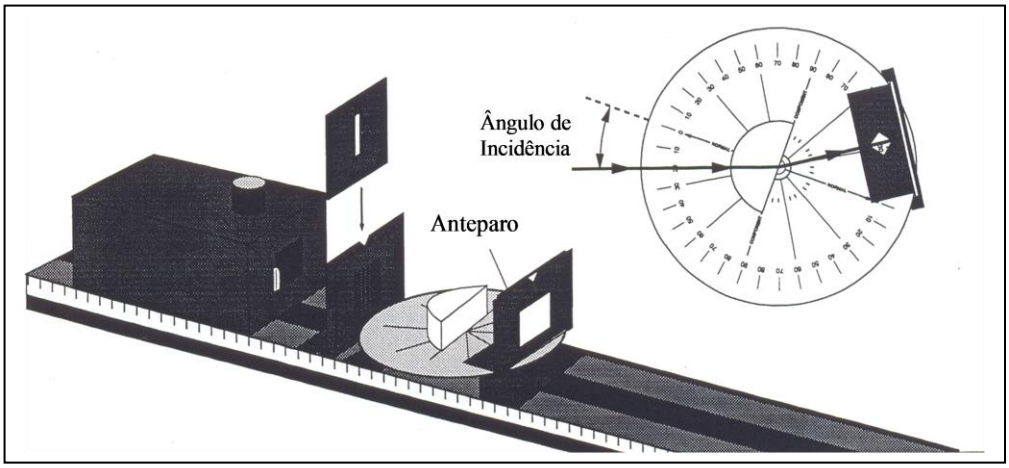


FIGURA 3.3.1 – Detalhes do posicionamento da lente cilíndrica para estudar os fenômenos da dispersão e da reflexão interna total.

2 INTRODUÇÃO:

Neste experimento você observará dois fenômenos relacionados com a refração: dispersão e reflexão interna total. A dispersão se deve ao fato que, na maioria dos materiais, os índices de refração são diferentes para cada cor da luz. A Figura 3.3.2 mostra esta variação para alguns materiais utilizados na prática.

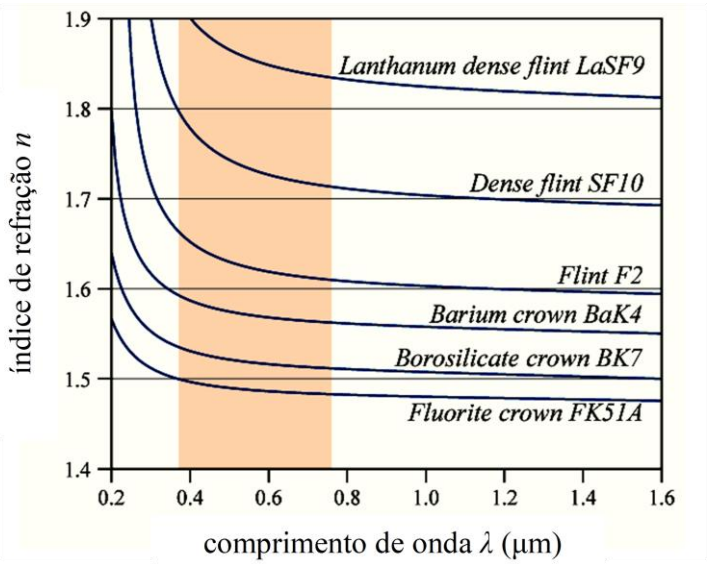


FIGURA 3.3.2 – Variação do índice de refração em função do comprimento de onda para alguns materiais. A região sombreada corresponde à parte visível do espectro.

Na reflexão total, encontrada em certas circunstâncias, um raio de luz que incide na interface entre dois meios transparentes não atravessa essa interface, refletindo-se totalmente.

3 PROCEDIMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS:

Monte o equipamento como mostrado na Figura 3.3.1, de forma que um único feixe de luz incida na superfície curvada da *lente cilíndrica*.

3.1 REFLEXÃO INTERNA TOTAL:

Para um dado ângulo de incidência, note que nem toda luz incidente é refratada. Uma parte da luz incidente também é refletida. Isto pode ser observado pela intensidade dos feixes incidente, refratado e refletido.

1) Em qual superfície da lente ocorre mudança de direção?

2) São observados raios refletidos para qualquer ângulo de incidência? Use o acessório *anteparo* para descobrir os raios menos nítidos.

3) Os ângulos para o raio refletido condizem com a lei da reflexão?

4) São observados raios refratados para qualquer ângulo de incidência?

5) Explique qualitativamente como a intensidade dos raios refletidos e refratados varia em função do ângulo de incidência.

6) Meça para qual ângulo de incidência a luz é totalmente refletida (nenhum raio refratado). Indique-o na *forma explícita* (com incerteza).

7) Com base nas medidas do item anterior, calcule o índice de refração da peça na *forma explícita*. Compare com o valor obtido pelo gráfico da Experimento 3.1.

3.2 DISPERSÃO:

Fixe o *disco graduado* de forma que o ângulo de incidência em relação à normal da superfície plana da *lente* seja zero graus. Ajuste o suporte fixado no *disco graduado* de forma que o raio refratado seja projetado e visível sobre o *anteparo*.

Lentamente aumente o ângulo de incidência. Observe o raio refratado no *anteparo*.

1) Para que ângulo de refração você começa a notar uma separação de cores no raio refratado?

2) Em que ângulo de refração a separação de cores é máxima?

3) Observando as cores no feixe refratado, qual cor apresenta o maior ângulo de refração? Qual cor apresenta o menor ângulo de refração?

4) Meça o ângulo de incidência do feixe. Faça também medidas dos ângulos de refração das extremidades vermelha e violeta do feixe e calcule o índice de refração do acrílico para estas cores.

5) Utilizando a lei de Snell

$$n_{\text{acrílico}}\, sen\theta_{\text{acrílico}} = n_{\text{ar}}\, sen\theta_{\text{ar}}$$

calcule o índice de refração do acrílico para o vermelho e para o violeta.

n (vermelho) = _____ *n* (violeta) = _____

NOTA: Nas Experimentos 3.1 e 3.2 consideramos que o índice de refração de um material é constante. Isto é uma aproximação. Como você pode ver, cores diferentes de luz refratam em ângulos ligeiramente diferentes e, então, têm índices de refração ligeiramente diferentes.

6) Utilizando os prismas fornecidos pelo professor, analise a dispersão da luz. A forma geométrica do prisma é importante para obter o fenômeno da dispersão? Experimente com prismas de diferentes ângulos. Avalie para qual posição do feixe incidente ocorre a maior dispersão. Explique qualitativamente.

Tópicos avançados – Opcional

1) Discuta a questão da reflexão interna total em termos de luz evanescente e mudança da forma oscilante da transferência de energia para uma forma dissipativa exponencial da energia da luz que atravessa a interface.

2) Os temas de reflexão e refração aqui apresentados foram discutidos para materiais dielétricos. Verifique qual o formalismo eletromagnético para a interação das ondas eletromagnéticas quando atingem um metal polido.

Bibliografia recomendada:
Optics – Eugene Hecht
Cap. 4 - pag. 104.
2ª edição – 1987 – Addison Wesley Publishing Company Inc.

3) *(Estudo quantitativo do prisma)* Utilize um prisma de ângulo 60° ou menor. Coloque uma folha de papel sobre o disco óptico, e então coloque o prisma com uma das faces alinhadas sobre a reta *Component*. Trace no papel a delimitação das suas faces. Faça incidir um raio sobre uma das faces do prisma e observe o raio emergente. Marque no papel dois pontos da trajetória do raio incidente e emergente. Indique ao lado dos pontos a qual situação eles pertencem (por exemplo, i_1, i_1, e_1, e_1). Repita este procedimento para outros ângulos de incidência, identificando os pontos (pelo menos mais 4 situações).

Após retirar a folha de papel, meça com o transferidor os ângulos de incidência e o ângulo de desvio total δ no feixe. Faça um gráfico deste desvio total em função do ângulo de incidência. Compare a forma deste gráfico com a curva teórica esperada. Identifique o *ângulo de desvio mínimo*. Veja na bibliografia como se obtém analiticamente esta condição.

Bibliografia recomendada:
Optics – Eugene Hecht
Cap. 5 – Seção 5.5.
2ª edição – 1987 – Addison Wesley Publishing Company Inc.

EXPERIMENTO 4

4.1: Formação de Imagens com Lentes Cilíndricas

1 EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS:

Trilho graduado, disco graduado e sua base (*Ray Table Degree Scale*), fenda múltipla (*Slit Plate*), fenda única (*Slit Mask*), lente de raios paralelos, fonte de luz, suportes, lente cilíndrica.

2 INTRODUÇÃO:

Você tem investigado a formação de imagens através da reflexão. O princípio e o trabalho para determinar a formação de imagens através da refração são análogos. As técnicas de localização de raios são semelhantes e podem ser usadas para determinar a forma e a localização da imagem. As diferenças importantes são: a lei da refração substitui a lei da reflexão determinando a mudança de direção dos raios incidentes; o desvio dos raios pode ocorrer nas duas superfícies, pois a luz entra e sai da peça. Neste experimento você usará o disco graduado para estudar as propriedades das imagens formadas com lentes cilíndricas. As propriedades que você observará têm importante analogia com a formação de imagens com lentes esféricas.

3 PROCEDIMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS:

Monte o equipamento como mostrado na Figura 4.1.1, com a placa de fendas múltiplas. Posicione a *lente cilíndrica* sobre o *disco graduado* de forma que todos os raios incidam na superfície plana da *lente*.

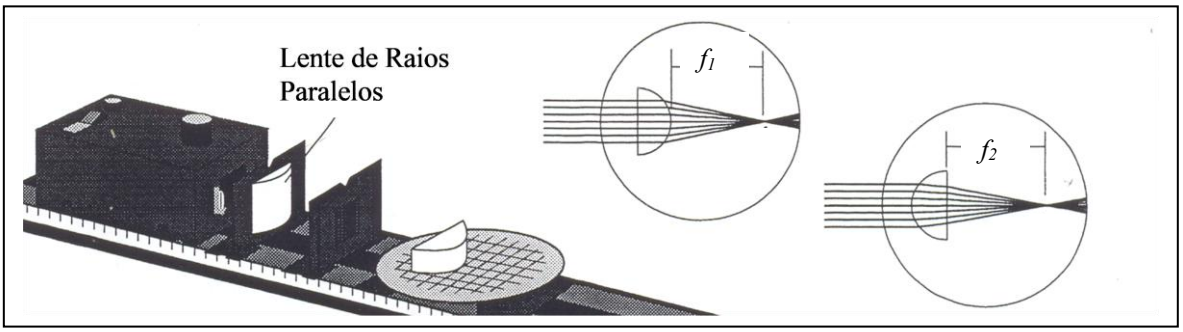


FIGURA 4.1.1 – Montagem do conjunto para estudar a formação de imagens por lentes cilíndricas.

3.1 PONTO FOCAL:

Ajuste a posição do suporte com a *lente de raios paralelos* para obter raios paralelos no *disco graduado*. Ajuste inicialmente a *lente cilíndrica* para que sua superfície plana seja perpendicular aos raios incidentes, assim o raio central passará através da *lente* sem desvio. Depois mude a posição da *lente cilíndrica* para que os raios paralelos incidam sobre a superfície curva.

1) Medidas das distâncias focais f_1 e f_2 conforme a Figura 1.

$f_1 =$ _____ $f_2 =$ _____

2) Por que uma distância focal é menor que a outra? Considere a refração dos raios de luz em ambas as superfícies da *lente*.

Remova *a lente de raios paralelos* e o seu suporte, e também o suporte que contém as fendas única e múltipla. Mova o *disco graduado* e sua base para junto da *fonte de luz* tal que o filamento da lâmpada esteja a uma distância f_2 da superfície plana da *lente cilíndrica*.

3) Descreva os raios refratados, fazendo um esboço da figura observada.

4) Observe que os raios mais próximos ao eixo óptico convergem para um determinado ponto e os raios mais afastados do eixo óptico convergem para outros pontos. Explique por que isso ocorre.

5) Gire a *lente cilíndrica* e coloque-a sobre o *disco graduado* de forma que o seu lado curvado esteja a uma distância f_1 do filamento. Você pode precisar deslocar o *disco graduado* e sua base para mais perto da *fonte de luz*.

3.2 POSIÇÃO DA IMAGEM, CONFORME A POSIÇÃO DO OBJETO:

Nesta parte será analisada a distância da imagem em relação à lente, quando é modificada a distância do objeto em relação à lente. Posicione um suporte contendo a placa de fenda múltipla próximo da *fonte de luz*. Mova o *disco graduado* e sua base para que a distância da fonte seja a maior possível. Fixe a *lente cilíndrica* no *disco graduado* com a superfície plana voltada para a *fonte de luz*.

1) Onde a imagem é formada?

2) O que acontece com a localização da imagem se você mover a fonte de luz para mais perto da lente?

3) Uma imagem ainda é formada quando a fonte de luz está mais perto do que a distância focal da lente? Que tipo de imagem se forma neste caso?

3.3 AMPLIAÇÃO E INVERSÃO DA IMAGEM:

O filamento da *fonte de luz* comporta-se como uma fonte pontual de luz no plano do *disco graduado*. Para observar a ampliação e a inversão é necessária uma fonte extensa. Conforme mostra a Figura 4.1.2, as duas posições extremas do filamento da *fonte de luz* podem ser usadas para definir uma seta de comprimento h_o. Utilize uma folha de papel colocada sobre o disco (entre o disco e a lente). A fonte inteira será deslocada lateralmente conforme mostra a Figura 4.1.2; a posição final da fonte está desenhada em tracejado. O deslocamento lateral, medido com uma régua, dá o comprimento h_o desta seta fictícia. Posicione o filamento da fonte de luz inicialmente na base da seta fictícia e, depois, perto do topo. Para cada uma destas posições do objeto, localize a posição da imagem e faça uma marca na folha de papel. Meça o comprimento h_i da seta da imagem. A ampliação é determinada dividindo-se h_i por h_o.

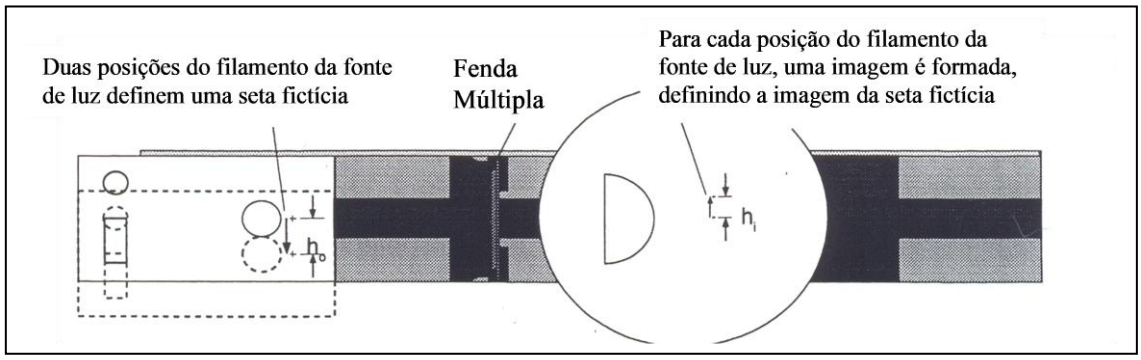


FIGURA 4.1.2 – Vista de cima mostrando como a mudança na posição do filamento pode produzir um objeto extenso fictício.

Determine a ampliação para algumas posições diferentes entre a *fonte de luz* e a *lente*.

1) Qualitativamente, como a ampliação depende da distância entre o objeto e a lente?

2) A imagem é invertida? Isto ocorre para todas as posições do objeto?

3.4 ABERRAÇÃO CILÍNDRICA:

Aberração cilíndrica é a distorção da imagem causada pela focalização imperfeita dos raios refratados. Coloque uma folha de papel branco em cima do *disco graduado*. Arrume o equipamento como na Figura 4.1.1, assim todos os raios são refratados através da *lente cilíndrica*. Use a *fenda única* para bloquear todos os raios, exceto dois. Faça isto para diferentes pares de raios.

1) Em todos os casos os raios se interceptam exatamente no mesmo ponto?

2) Como você alteraria a forma da lente para reduzir a aberração cilíndrica?

3.5 ABERRAÇÃO CROMÁTICA:

Estudamos na Experimento 3 que o índice de refração de um material é diferente para cada comprimento de onda, implicando em ângulos de refração diferentes e na dispersão da luz branca. Isto ocorre também na refração nas lentes, fazendo com que o ponto de convergência dos feixes seja diferente para cada comprimento de onda. Este comportamento dá origem à aberração cromática. Utilize a lente cilíndrica na configuração da Figura 4.1.1. Faça a luz incidir na face curva, deixando apenas os dois raios mais periféricos, um de cada lado do eixo óptico, atingirem a lente. o uso dos raios periféricos torna mais evidente esta aberração. Utilize uma folha de papel auxiliar entre a lente e o disco, conforme o procedimento feito no estudo da aberração cilíndrica. Utilize inicialmente o filtro de cor azul e marque no papel o ponto onde se forma a imagem. Substitua o filtro azul por um filtro vermelho e marque o seu ponto imagem.

1) O que você observa com os pontos imagem para cada cor? Eles estão exatamente sobrepostos?

2) Para qual cor a imagem se formou mais próxima da lente? E para qual cor ela se formou mais afastada?

4.2: Formação de Imagens com Lentes Esféricas – Relação entre Imagem e Objeto

1 EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS:

Trilho graduado, lente convergente com distância focal +75 mm, suportes, fonte de luz, acessório alvo (*Crossed Arrow Target*), acessório anteparo (*Viewing Screen*).

2 INTRODUÇÃO:

Dada uma lente de qualquer tipo e índice de refração, você pode determinar a forma e a localização das imagens baseando-se somente na Lei da Refração. Você necessita apenas aplicar a lei junto com algumas técnicas de localização de raios que você já conhece. Porém, para lentes esféricas (bem como para espelhos esféricos), há uma equação mais geral que você pode usar para determinar a localização e o tamanho de uma imagem. Esta equação é chamada de Equação Fundamental das Lentes ou Equação dos Pontos Conjugados:

$$\frac{1}{d_o}+\frac{1}{d_i}=\frac{1}{f}$$

onde f é a distância focal da lente, e d_o e d_i são as distâncias do objeto até a lente e da imagem até a lente, respectivamente. Observe a Figura 4.2.1. A ampliação linear ou transversal é determinada por:

$$m=\frac{h_i}{h_o}=-\frac{d_i}{d_o}.$$

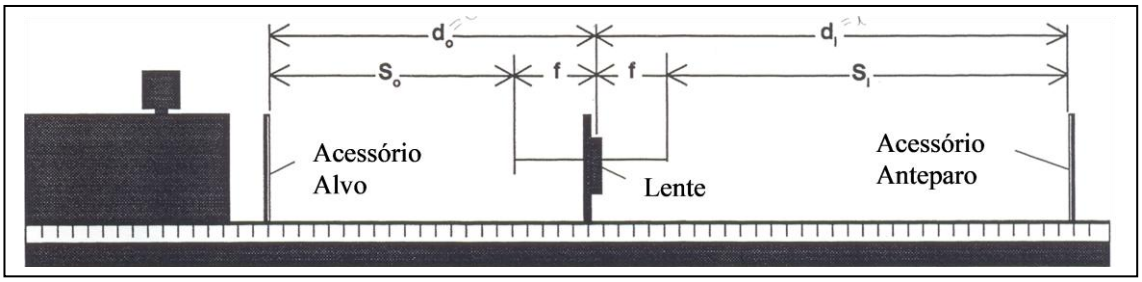


FIGURA 4.2.1 – Montagem do sistema e definição de variáveis.

Neste experimento você terá oportunidade de testar e aplicar estas equações.

NOTA: Em vez da equação acima, você pode ter aprendido a equação fundamental das lentes como $s_o s_i = f^2$, onde s_o e s_i são as distâncias entre o foco principal da lente e o objeto e entre o foco principal da lente e a imagem, respectivamente. Neste caso, note que $s_o = d_o - f$ e $s_i = d_i - f$ (observe a Figura 4.2.1). Usando estas igualdades, verifique que $\frac{1}{d_o}+\frac{1}{d_i}=\frac{1}{f}$ (forma Gaussiana) e $s_o s_i = f^2$ (forma Newtoniana) são expressões equivalentes.

3 PROCEDIMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS:

Monte o equipamento como mostrado na Figura 4.2.1. Ligue a *fonte de luz* e coloque o *acessório alvo* a uma certa distância d_o da *lente* de distância focal 75 mm. Deslize o *anteparo* para perto ou para longe da lente, até focalizar a imagem do *alvo* no *anteparo*. Meça a distância d_i do *anteparo* até a *lente*.

1) A imagem aumentou ou diminuiu em relação ao objeto?

2) A imagem é invertida em relação ao objeto?

3) Com base na equação fundamental da lente, o que aconteceria com d_i se você aumentasse d_o um pouco mais?

4) O que aconteceria com d_i se d_o fosse extremamente grande?

5) Usando a sua resposta para a questão 4, obtenha uma aproximação para a distância focal da lente. Explique.

6) Agora utilize os valores para d_o indicados na Tabela 4.2.1. Para cada situação localize a imagem e meça d_i. Meça também o tamanho da imagem h_i. O tamanho da seta ou o diâmetro do círculo no *acessório alvo* é h_o.

7) Quais as características da imagem quando a distância do objeto à lente estava na região entre f e $2f$? E quando o objeto estava mais afastado que $2f$ da lente?

8) Que dificuldade você encontrou para fazer as medidas com precisão quando o objeto estava próximo do foco da lente? E quando o objeto estava muito distante da lente? Justifique.

9) Utilizando a lente de distância focal 150 mm, repita o procedimento do item anterior para apenas duas posições do objeto em relação à lente. O que você observa com as distâncias e o tamanho da imagem nestes casos?

10) Utilizando os dados que você coletou na Tabela 4.2.1, execute os cálculos solicitados na tabela.

TABELA 4.2.1 – Medidas de posição e tamanho da imagem para diferentes posições do objeto.

Dados			Cálculos			
d_o (mm)	d_i (mm)	h_i (mm)	$1/d_i + 1/d_o$ (mm^{-1})	$1/f$* (mm^{-1})	h_i / h_o	$-d_i / d_o$
200						
220						
250						
280						
150						
120						
100						
75						
50						

* *Com base no valor nominal.*

11) Seus resultados estão de acordo com a equação fundamental das lentes? Em caso negativo, a que você atribui as discrepâncias?

12) Para quais valores de d_o você estava impossibilitado de focalizar uma imagem sobre o anteparo? Use a equação fundamental das lentes para explicar por quê.

13) Faça um gráfico de d_i em função de d_o . Que forma tem este gráfico?

14) Faça um gráfico da ampliação *m* (em módulo) em função de d_o, para a região $d_o > f$.

15) Analise o comportamento dos gráficos dos itens 13 e 14 para as seguintes faixas da distância do objeto à lente: $f < d_o < 2f$, $d_o = 2f$ e $d_o > 2f$.

16) Com base na equação fundamental das lentes, proponha mudanças de variáveis de modo a linearizar o gráfico do item 13 ou 14. Trace o gráfico linearizado. Ajuste uma reta a este gráfico, determinando a sua equação. A partir desta equação calcule a distância focal da lente utilizada. Compare este valor determinado experimentalmente com o valor nominal impresso na lente.

4 PERGUNTAS ADICIONAIS:

1) Considerando uma lente de distância focal *f*, para qual valor de d_o teríamos uma imagem com aumento igual a 1 (em módulo)?

2) É possível obter uma imagem não invertida com uma lente convergente? Explique.

3) Para uma lente convergente de distância focal *f*, onde você colocaria o objeto para obter uma imagem mais afastada possível da lente? Qual seria o tamanho da imagem?

4.3: Lentes Esféricas – Aberrações Cromática e Esférica – Tamanho de Abertura e Profundidade de Campo

1 EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS:

Trilho graduado, lente convexa de distância focal 75 mm, fonte de luz, acessório alvo (*Crossed Arrow Target*), suportes, acessório anteparo (*Viewing Screen*), abertura variável.

2 INTRODUÇÃO:

Não importa quão perfeita seja uma lente esférica. Sempre haverá um grau de distorção na imagem. Uma fonte de distorção, a aberração *esférica* poderá ser eliminada mudando a forma da lente (de esférica para parabólica). Porém, como você verá neste experimento, existem modos mais simples de reduzir, e não eliminar, a aberração esférica.

Um outro tipo de aberração, chamada *cromática* surge porque os materiais têm índices de refração ligeiramente diferentes para cores diferentes (comprimentos de onda). Por causa disto a luz branca incidente é separada por uma lente em suas cores constituintes, e são formadas imagens de cores diferentes em localizações ligeiramente diferentes. A aberração cromática só pode ser corrigida com o uso combinado de duas ou mais lentes de materiais e formas diferentes.

3 PROCEDIMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS:

Monte o equipamento como mostrado na Figura 4.3.1. Comece com a *abertura variável* completamente aberta. Varie a distância entre a *lente* e o *acessório anteparo* até que uma imagem do *alvo* seja focalizada.

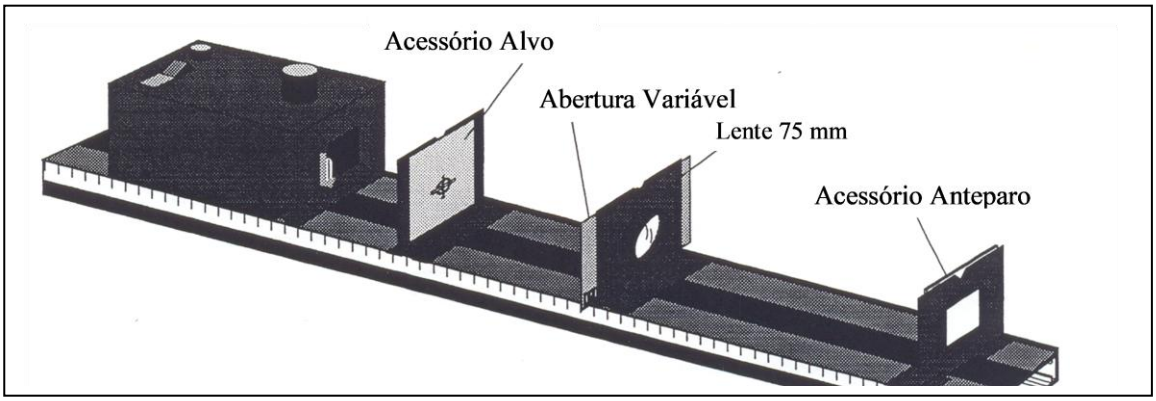


FIGURA 4.3.1 – Montagem necessária para estudar as aberrações cromática e esférica, e medir a profundidade de campo.

3.1 ABERRAÇÃO ESFÉRICA:

Feche a *abertura variável* lentamente. Esteja seguro que o "V" formado pela abertura das duas partes estão centralizadas com o entalhe no topo do suporte. Observe a imagem do *alvo* na tela.

1) Como a focalização da imagem é afetada pelo tamanho da abertura?

2) Que tamanho da abertura daria uma melhor focalização da imagem (melhor definição dos seus contornos)? Por que este tamanho de abertura não é prático?

3.2 Profundidade de campo:

Além da aberração esférica, o tamanho da abertura tem um efeito importante em outra característica da imagem focalizada: a *profundidade de campo*. Profundidade de campo é uma medida de quanto a distância entre a lente e o anteparo pode ser variada enquanto ainda percebe-se uma imagem bem focalizada (observe a Figura 4.3.2).

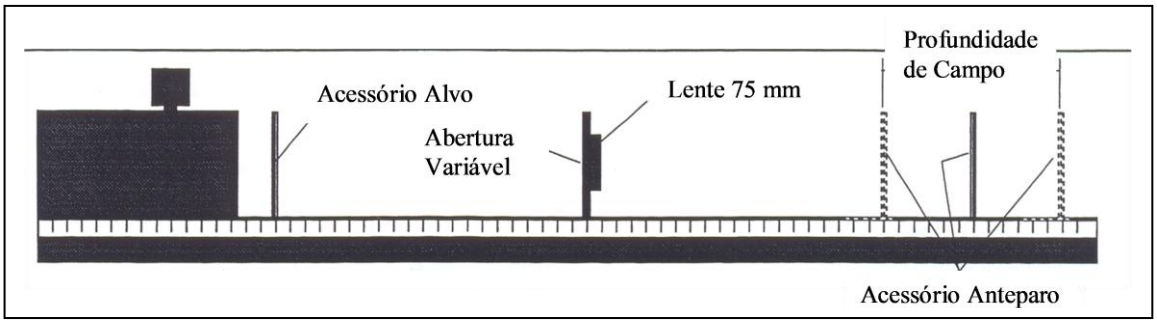


FIGURA 4.3.2 – Definição de profundidade de campo.

Para investigar este fenômeno, comece com a *abertura variável* completamente aberta. Meça a profundidade de campo. Agora diminua o tamanho da *abertura* e meça a profundidade de campo para o novo tamanho.

1) Como a profundidade de campo depende do tamanho da abertura?

2) Por que na prática não é possível ter uma profundidade de campo que seja infinitamente longa?

3) Fale sobre correções de miopia por fechamento do olho. Faça um experimento com o aparato da Figura 4.3.2.

3.3 ABERRAÇÃO CROMÁTICA:

Remova o *acessório alvo* da fonte de luz. Nesta etapa o objeto será o filamento da lâmpada. Insira novamente a lente e a abertura variável conforme a Figura 4.3.2. Usando uma pequena abertura (2 a 3 mm), focalize o filamento da fonte de luz sobre o *anteparo*. Deslize lateralmente a *abertura variável*, afastando-a do eixo óptico da *lente*, como mostrado na Figura 4.3.3. Com isso, a imagem será formada pelos raios periféricos à lente. Não mude o tamanho da abertura. Note a separação de cor na imagem do filamento com a abertura suficientemente afastado do eixo óptico da lente.

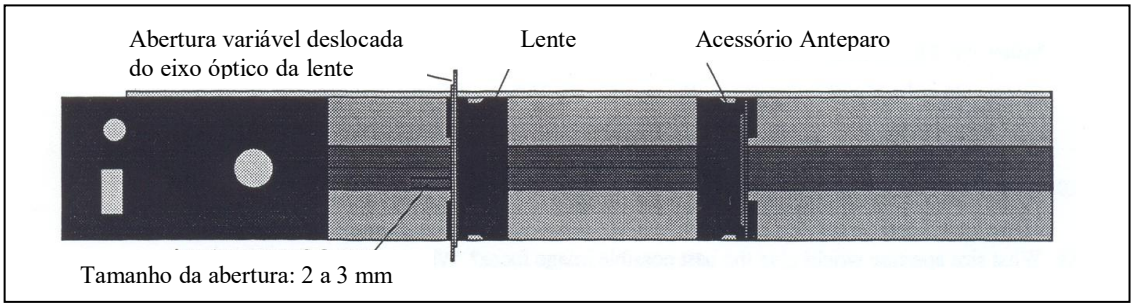


FIGURA 4.3.3 – Montagem vista de cima, mostrando detalhes do posicionamento da abertura variável.

1) Por que a aberração cromática é mais aparente quando a abertura está fora do eixo óptico da *lente*?

O projeto de instrumentos ópticos de alta qualidade pode ser bastante complexo e envolver uma combinação de lentes. A complexidade surge principalmente da necessidade de se reduzir os efeitos da aberração esférica e cromática.

EXPERIMENTO 5

5.1: Projetor

1 EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS:
Trilho graduado, lente convexa com distância focal 75 mm, acessório anteparo (*Viewing Screen*), fonte de luz, acessório alvo (*Crossed Arrow Target*), suportes.
//

2 INTRODUÇÃO:
Quando um objeto está localizado entre o ponto focal (f) e o ponto (2f) de uma lente convexa, uma imagem real, invertida e ampliada é formada como mostra a Figura 5.1.1. Se um *anteparo* é colocado na posição da imagem, ela será focalizada sobre o *anteparo*. Neste caso a lente funciona como um projetor.

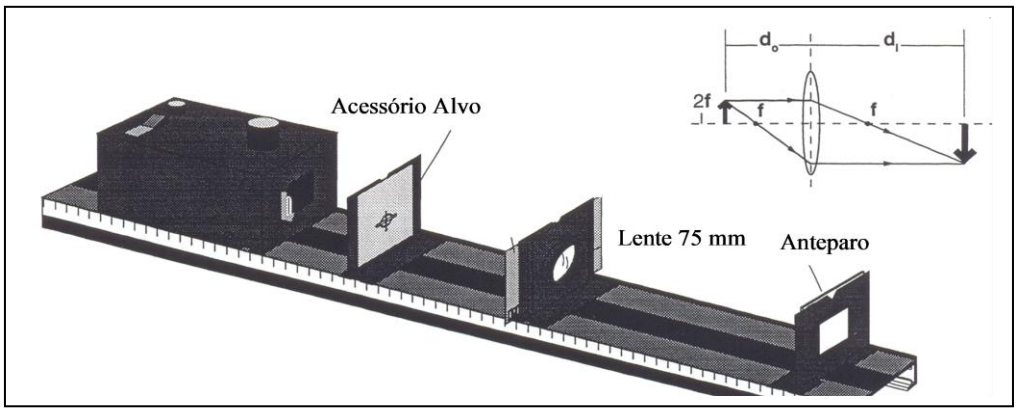


FIGURA 5.1.1 – Montagem do projetor.

3 PROCEDIMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS:

- Monte o equipamento sobre o banco óptico conforme a figura 5.1.1. Utilize a lente convergente de +75 mm de distância focal.

- Posicione o objeto ("*Crossed Arrow Target*") na região ($f < d_o \leq 2f$) em relação à lente.

- Verifique com o anteparo ("*Viewing Screen*") onde se localiza e como se caracteriza a imagem formada. Meça a distância-imagem (lente-anteparo) d_i e a distância-objeto (lente-objeto) d_o . Expresse estas medidas com incertezas. Para achar a incerteza na posição da imagem, considere o conceito de profundidade de campo estudado em aulas anteriores. Meça também o tamanho do objeto h_o e da imagem h_i.

- Escolha a posição do objeto e repita este procedimento, medindo d_o, d_i, e o tamanho da imagem h_i, anotando os valores na tabela 5.1.1. Considere posições d_o com separação aproximadamente constante.

TABELA 5.1.1 – Posições e tamanhos medidos do objeto e da imagem.

Ponto	d_o ( )	d_i ( )	h_o ( )	h_i ( )	$m = h_i / h_o$	$m = -d_i / d_o$
1	_____	_____	_____	_____	_____	_____
2	_____	_____		_____	_____	_____
3	_____	_____		_____	_____	_____
4	_____	_____	.	_____	_____	_____
5	_____	_____	.	_____	_____	_____
6	_____	_____	.	_____	_____	_____
7	_____	_____		_____	_____	_____
8	_____	_____		_____	_____	_____

- *Visualização de uma imagem real sem utilizar um anteparo*. Ajuste o objeto, a lente de distância focal 75 mm e o anteparo do projetor de modo que seja formada sobre o anteparo uma imagem real. Posicione seu rosto na direção do eixo óptico e olhe na direção da fonte, de modo que seus olhos mirem de frente a imagem no anteparo. Retire o anteparo e continue olhando nesta direção. Se necessário desloque a cabeça por pequena distância na vertical ou na horizontal. Então responda:
  - A imagem produzida por um projetor pode ser visualizada diretamente por um observador sem usar um anteparo?
  - Neste caso, onde o observador deve estar?

1) O que acontece com a imagem se d_o for menor que f? A imagem pode ser focalizada sobre o anteparo? Justifique.

2) O que acontece com a imagem se d_o for maior que 2f? A imagem ainda pode ser focalizada sobre o anteparo? Justifique.

3) Há limites práticos para a ampliação da imagem? Neste caso, quais são?

4) É possível, usando uma única lente, projetar uma imagem direita?

5) Com os dados da Tabela 5.1.1, determine a ampliação da imagem obtida com a lente de +75 mm utilizando os valores de d_o e d_i . Calcule também a ampliação utilizando as medidas de h_o e h_i. Compare os resultados fornecidos por estes dois procedimentos.

6) Para a lente de 75 mm, faça um gráfico de d_i em função de d_o , com os dados da Tabela 5.1.1. Faça mudanças de variáveis para linearizar este gráfico e ajuste a melhor reta. Interprete o significado físico dos coeficientes da reta ajustada. Determine a distância focal da lente a partir da equação ajustada. Faça uma comparação entre este resultado e os valores previstos teoricamente.

5.2: Lupa

1 EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS:

Trilho graduado, fonte de luz, lente convexa com distância focal 75 mm, lente convexa com distância focal 150 mm, suportes, filtros de cor, acessório anteparo (*Viewing Screen*).

2 INTRODUÇÃO:

Quando um objeto está localizado entre uma lente convergente e o seu ponto focal, uma imagem virtual, ampliada e direita é formada. Considerando que a imagem não é real, ela não pode ser localizada sobre um anteparo. Porém, ela pode ser vista diretamente por um observador, considerando que o olho realiza a focalização da imagem na retina.

3 PROCEDIMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS:

Monte uma lupa como mostrado na Figura 5.2.1, acrescentando a fonte de luz. Coloque um filtro de cor em sequência no mesmo suporte do objeto. Primeiramente tente com uma *lente de distância focal 75 mm* e, após, com uma *lente de distância focal 150 mm*. Para cada lente, ajuste a distância entre o objeto (*acessório anteparo*) e a *lente* para que na ampliação máxima a imagem esteja claramente focalizada na retina.

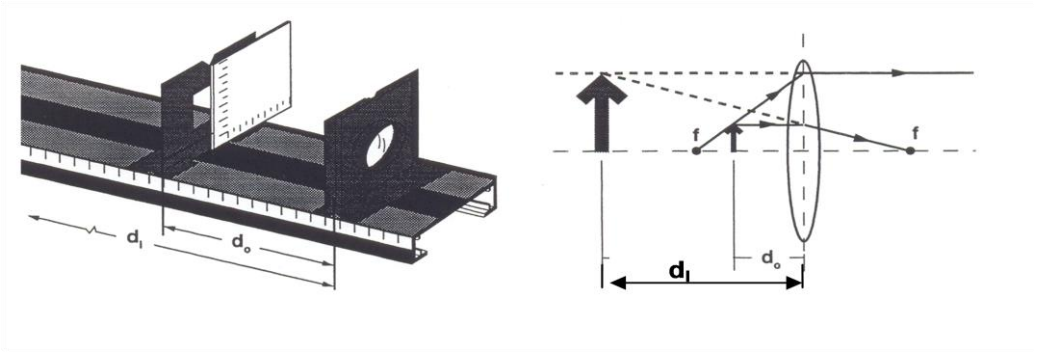


FIGURA 5.2.1 – Montagem para o estudo da lupa.

1) Olhando através das lentes, para qual das duas parece haver uma maior ampliação?

2) A equação fundamental das lentes impõe limites na ampliação (*m*) que uma lente pode produzir? Na prática, usando cada uma das lentes como lupa, parece estar claro que a ampliação de uma lente convergente é limitada; acompanhe a análise a seguir.

Isto não significa que a equação $m = -\frac{d_i}{d_o}$ está errada. Esta equação dá a relação correta entre o tamanho da imagem e o tamanho do objeto. Porém, o tamanho da imagem não é a única variável importante na determinação da ampliação de um sistema óptico, como a lupa. Igualmente importante é a distância entre o observador e a imagem que ele está olhando. Da mesma maneira que um objeto distante parece menor que o mesmo objeto visto de perto, uma imagem de um objeto vista através de um sistema óptico parece maior do que o objeto visto

sem o instrumento. A noção de tamanho que temos ao visualizar um objeto ou imagem está associada ao tamanho da região iluminada na retina.

AMPLIAÇÃO ANGULAR:

Para as imagens reais em espelhos e lentes, você usou o conceito de ampliação linear. No caso de imagens virtuais, um conceito importante é a ampliação angular. A Figura 5.2.2 mostra um objeto de tamanho h_o , a uma distância d_o do observador. O tamanho da imagem na retina do observador é proporcional ao ângulo θ_{olho}. Considerando a aproximação da função tangente para ângulos pequenos, $\theta_{olho} \approx h_o/d_o$. Devemos lembrar também que a equação fundamental das lentes só é válida para ângulos pequenos.

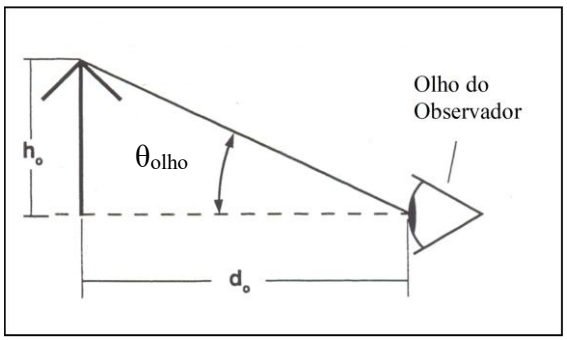


FIGURA 5.2.2 – Geometria utilizada para calcular a ampliação angular.

Há uma limitação importante para o valor de θ_{olho} . Para ver isso, segure um objeto e mova-o lentamente em direção ao seu olho (com um dos olhos fechado). Há uma distância (chamada de ponto próximo) na qual a imagem começa a ficar desfocada, porque o seu olho não consegue focalizar sobre a retina os raios vindos do objeto. O ponto próximo difere de pessoa para pessoa, mas a média é de aproximadamente 25 cm. Então, $\theta_{o\ máx} = h_o$ / 25 cm, onde $\theta_{o\ máx}$ é o valor máximo para o qual o olho pode focalizar uma imagem.

Quando estiver utilizando uma lupa ou qualquer sistema óptico dessa maneira, o tamanho aparente da imagem depende do tamanho e da localização da imagem produzida pela lupa, em vez do tamanho e localização do objeto, de forma que a ampliação angular para a lupa será $\theta_\ell = h_i/ d_i$. Da equação fundamental das lentes tem-se $h_i = m\ h_o = -(d_i/ d_o).h_o$. Ignorando o sinal negativo, $\theta_\ell = h_o/ d_o$, o mesmo que haveria se não houvesse a lupa.

Este resultado parece dizer que uma lupa não produz nenhuma ampliação. Porém, usando a lupa o objeto parece ser trazido mais perto do olho que a distância do ponto próximo, e ainda ser focalizado pelo olho. Se o objeto é colocado sobre o ponto focal da lupa, esta apresenta a máxima ampliação e a equação $\theta_\ell = h_o/ d_o$ pode ser escrita como $\theta_{\ell\ máx} = h_o/ f$. Então, o poder de ampliação da lupa é uma função da distância focal da lente, variando inversamente com o valor de *f*.

A ampliação angular máxima de uma lupa é calculada como:

$$m_\theta = \theta_\ell / \theta_{o\ máx} = 25\ (\text{cm}) / f.$$

3) Calcule a ampliação angular para as lentes de distância focal 75 mm e 150 mm. Seus cálculos são consistentes com a sua resposta da questão 1?

4) Uma lente convergente com distância focal de 50 mm seria útil como uma lupa? Explique.

5.3: Microscópio

1 EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS:

Trilho graduado, suportes, lentes convexas com distância focal 75 mm e 150 mm, acessório alvo (*Crossed Arrow Target*), acessório anteparo (*Viewing Screen*), filtros de cor e abertura variável.

2 INTRODUÇÃO:

O microscópio utiliza duas lentes para obter maior ampliação de objetos próximos. Esta ampliação é maior que aquela obtida com uma única lente, como a lupa. A montagem está mostrada na Figura 5.3.1.

A lente objetiva L_1 funciona como um projetor. O objeto é colocado a uma distância entre f_1 e $2f_1$ da lente L_1, assim uma imagem real, invertida e aumentada é formada. A ocular L_2 funciona como uma lupa. Ela forma uma imagem virtual e aumentada da imagem real formada por L_1.

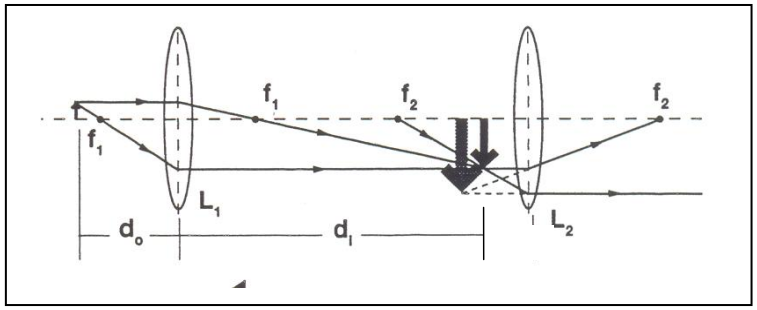


FIGURA 5.3.1 – Detalhes da formação da imagem final num microscópio.

A imagem real (intermediária) formada por L_1 está ampliada de

$$m = -\frac{d_i}{d_o} = -\left(\frac{f_{objetiva}}{d_o - f_{objetiva}}\right),$$

conforme indicado pela equação fundamental das lentes. A seguir, esta imagem intermediária é aumentada pela lente ocular L_2, com uma ampliação angular m_θ. A ampliação total M é dada pelo produto das duas ampliações sucessivas.

$$M = m \cdot m_\theta$$

Se a imagem intermediária estiver próxima do foco da lente ocular, a segunda ampliação será dada por um fator de $\left(\frac{25\text{ cm}}{f_{ocular}}\right)$ (veja a Experimento 4.2). A ampliação total será:

$$M = \left(-\frac{d_i}{d_o}\right)\cdot\left(\frac{25\text{ cm}}{f_{ocular}}\right) = -\left(\frac{f_{objetiva}}{d_o - f_{objetiva}}\right)\cdot\left(\frac{25\text{ cm}}{f_{ocular}}\right)$$

3 PROCEDIMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS:

Monte o microscópio como mostrado na Figura 5.3.2. Use a *lente de distância focal 75 mm* como lente objetiva e a de *distância focal 150 mm* como lente ocular. Posicione o objeto a uma distância qualquer na região $f_1 < d_o < 2f_1$ em relação à lente objetiva. Coloque o anteparo entre as lentes, procurando uma posição onde há a formação da imagem intermediária. Meça as distâncias d_{o1} e d_{i1} para a lente objetiva.

d_{o1} = _____ d_{i1} = _____

Coloque um filtro de cor em sequência no mesmo suporte da lente ocular. Retire o anteparo e ajuste a posição da ocular até que você veja através dela uma imagem clara do objeto. Meça a distância *D* entre as lentes. *D* = _____

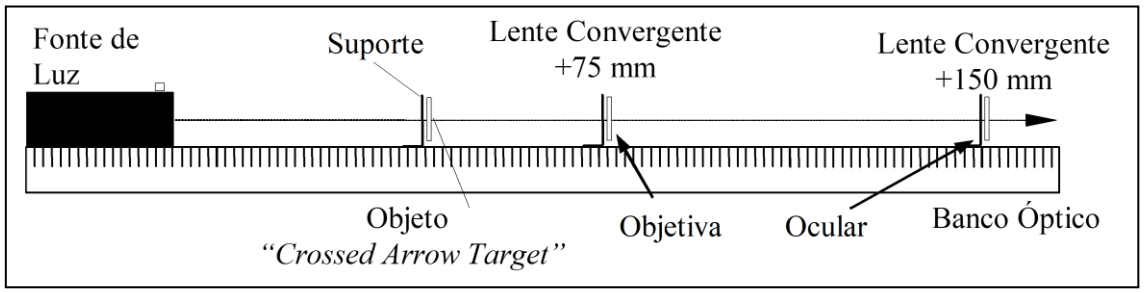


FIGURA 5.3.2 – Disposição dos componentes na montagem do microscópio.

1) A imagem é ampliada? Como esta ampliação se compara com a da lente de distância focal 75 mm sozinha, como lupa?

Enquanto estiver olhando através da ocular, mova lentamente a *lente* objetiva para mais perto do *objeto*. Ajuste a posição da ocular o necessário para obter a melhor focalização.

2) Por que a ampliação aumenta se a lente objetiva estiver mais próxima do objeto?

3) Quais problemas de focalização ocorrem com o aumento da ampliação?

Use a *abertura variável* para que o olho humano visualize apenas a região central da *lente objetiva*. Varie o tamanho da *abertura* e observe os efeitos na focalização.

4) Qual é o efeito da abertura na focalização?

5) Qual é o efeito da abertura sobre o brilho (intensidade) da imagem?

6) Que vantagem haveria em se utilizar uma lente de distância focal 75 mm como ocular mantendo a de 75 mm como objetiva?

7) Com os valores de f_2 , d_{i1} e *D* medidos anteriormente, calcule a distância imagem d_{i2}. Este valor resultou negativo? Interprete o resultado deste cálculo.

8) Com os valores de f_1 , f_2 e d_{o1} calcule a ampliação angular do microscópio nesta situação.

5.4: Telescópio ou luneta

1 EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS:

Trilho graduado, lentes convexas de distâncias focais 75 mm e 150 mm, suportes.

2 INTRODUÇÃO:

Os telescópios são utilizados para se obter imagens de objetos distantes aparentemente mais próximas de nós. Como você pode notar olhando a Tabela 5.1.1 da Experimento 5.1, a imagem de um objeto distante quando visualizada através de uma única lente convexa será focalizada quase no ponto focal da lente. Esta imagem será real, invertida e de tamanho reduzido. De fato, quanto maior for a distância do objeto à lente (em relação ao valor de f), menor será o tamanho da imagem.

Porém, esta imagem reduzida é útil. Visualizando a imagem através de uma segunda lente convexa, usada como lupa, será vista uma imagem aparentemente mais próxima.

A Figura 5.4.1 mostra a montagem simplificada de uma luneta. A lente objetiva L_1 cria uma imagem real e invertida. Esta imagem é muito pequena e está perto do ponto focal da lente L_2. Se o objeto está suficientemente longe, esta imagem será localizada aproximadamente em F_1, o ponto focal de L_1. A ocular L_2 então se comporta como uma lupa, criando uma imagem ampliada e virtual, a qual pode ser visualizada pelo observador. Para uma ampliação máxima, L_2 é posicionada de forma que a imagem criada por L_1 esteja muito próxima do ponto focal F_2. Então a distância entre as lentes objetiva e ocular de uma luneta, quando visualizando objetos distantes, é aproximadamente $(f_1 + f_2)$.

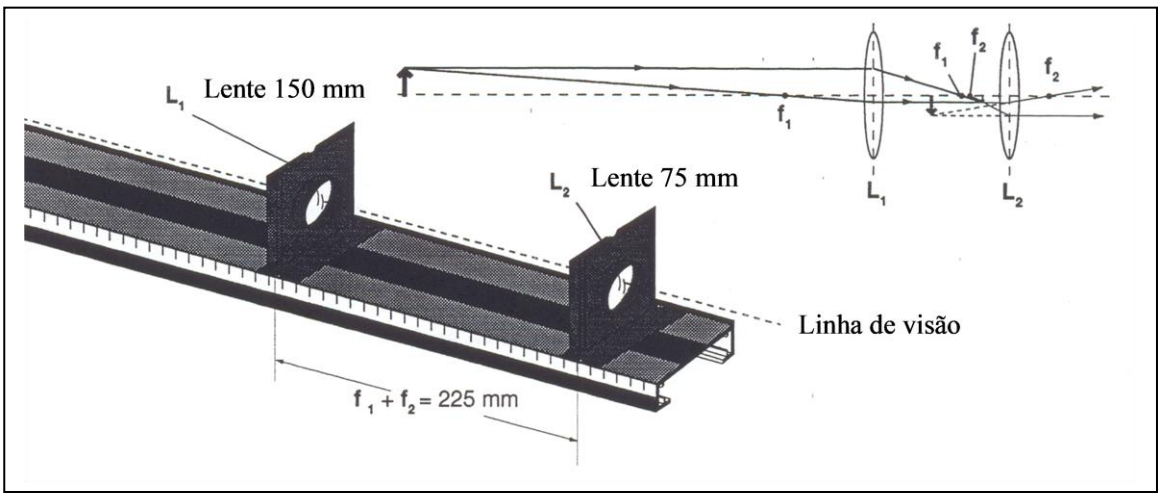


FIGURA 5.4.1 - Disposição dos componentes para montagem de uma luneta.

A ampliação angular para um telescópio pode ser aproximada assumindo que as lentes estejam separadas exatamente por $f_1 + f_2$, como mostrado na Figura 5.4.2. O tamanho do objeto visto a olho nu é proporcional ao ângulo θ_1 no diagrama. Se a distância do objeto à luneta é grande (muito maior do que o mostrado no diagrama), $\theta_1 = \theta_1'$ é uma aproximação aceitável. O raio superior mostrado no diagrama passa através do ponto focal da lente objetiva, sai paralelo ao eixo óptico da luneta, e então é refratado pela ocular passando pelo ponto focal. O ângulo θ_2 é então proporcional a h_1 , o tamanho da imagem vista pelo observador.

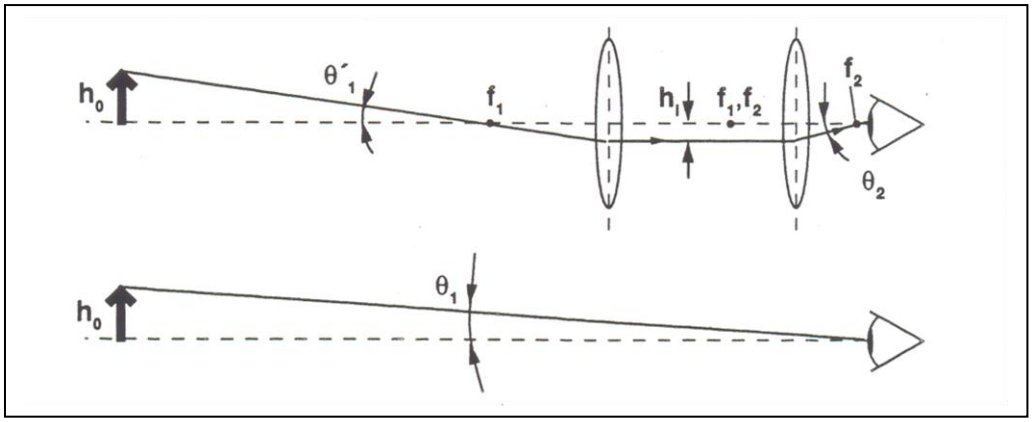


FIGURA 5.4.2 –Obtenção da expressão da ampliação angular para a luneta.

3 DEDUÇÃO:

1) Utilizando a Figura 5.4.2, calcule *tan* θ_1' como uma função do tamanho da imagem (h_1) e da distância focal f_1 (utilize a semelhança de triângulos em F_1). De forma análoga, calcule *tan* θ_2 como uma função do tamanho da imagem (h_1) e da distância focal f_2.

2) Considere que θ_1' e θ_2 são muito pequenos, tal que *tan* $\theta_1' \approx \theta_1'$, *tan* $\theta_2 \approx \theta_2$ e que $\theta_1' \approx \theta_1$. Sabendo que a ampliação angular da luneta é definida como θ_2 / θ_1 mostre que, em função das distâncias focais das lentes, ela pode ser escrita como:

$$m_\theta = -\frac{f_1}{f_2} = -\frac{f_{objetiva}}{f_{ocular}}$$

4 PROCEDIMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS:

1) Monte uma luneta usando *as lentes de distâncias focais 75 mm e 150 mm*; a distância entre as *lentes* será de aproximadamente 225 mm. Usando a lente de 75 mm como ocular, observe alguns objetos razoavelmente distantes. Ajuste a distância entre as lentes, se necessário, para obter uma focalização melhor. Para observar a ampliação, olhe com um olho através do telescópio e com o outro olhe diretamente para o objeto. Compare o tamanho das imagens.

2) Observe na luneta a ampliação quando é usada uma *lente* de 150 mm como objetiva e de 75 mm como ocular. Calcule a ampliação neste caso.

3) Observe na luneta qual é a ampliação se as *lentes* forem trocadas de posição. Calcule a ampliação após esta mudança.

4) Explique por que a distância entre as lentes deve ser aproximadamente igual à soma das suas distâncias focais.

5) Explique como você poderia fazer, modificando as distâncias focais das lentes, de modo a ter uma maior ampliação.

EXPERIMENTO 8

8.1: Polarização da Luz por Absorção – Lei de Malus

1 OBJETIVO:

- Estudar a polarização da luz através da absorção.
- Analisar a intensidade da luz polarizada (lei de Malus).

2 MATERIAL UTILIZADO:

Banco óptico, fonte de luz LED e incandescente, disco graduado ("*Ray Table Degree Scale*") e respectiva base, polarizadores, acessórios fenda única ("*Slit Mask*") e múltipla ("*Slit Plate*") e respectivos suportes para o banco óptico, acessório alvo ("*Crossed Arrow Target*"), suporte específico para ser usado sobre o disco graduado, lente cilíndrica ("*Cylindrical Lens*"), fotômetro e acessórios.

3 INTRODUÇÃO:

A luz é uma onda transversal, isto é, os campos eletromagnéticos que compõem a luz são orientados em direções perpendiculares à direção de propagação. Para a luz, define-se a polarização com respeito à orientação do vetor campo elétrico. O campo magnético é sempre perpendicular ao campo elétrico. O conjunto óptico inclui dois polarizadores, os quais transmitem luz segundo um plano definido entre 0° e 180°, marcado na escala do polarizador. Luz polarizada ao longo de qualquer outro plano é absorvida parcialmente ou totalmente pelo polarizador. Caso incida luz não polarizada sobre o polarizador, somente luz polarizada sairá deste.
Neste experimento você utilizará os polarizadores para investigar o fenômeno da polarização da luz. Quando dois polarizadores são colocados em sequência, a intensidade da luz que sai do segundo polarizador está relacionada com a intensidade da luz que incide sobre ele de acordo com a lei de Malus:

$$I(\theta) = I_{\max} \cos^2 \theta \,,$$

onde θ é o ângulo entre as direções de polarização dos polarizadores e I_{max} é a intensidade da luz polarizada que atinge o segundo polarizador.
Outra forma de polarizar a luz é por reflexão. Em certas situações, conforme o ângulo de incidência da luz sobre a superfície refletora, é possível polarizar completamente o feixe refletido.

4 ROTEIRO DE ESTUDOS:

1) Se a luz é uma onda eletromagnética transversal, qual o ângulo entre a vibração dos campos elétrico e magnético e a direção de propagação?

2) Quando se fala de luz polarizada (também chamada de plano-polarizada) na direção y, qual o ângulo formado entre a direção de vibração do campo elétrico **E** e o eixo y?

3) Represente, nos diagramas da Figura 8.1, a direção de vibração do campo elétrico para luz polarizada nas direções y e z respectivamente, onde o vetor **n** representa a direção de propagação da onda.



FIGURA 8.1 - Diagramas de polarização.

4) Cite alguns fenômenos que levam à obtenção de luz polarizada a partir de luz não-polarizada.

5) A maioria da lâmpadas incandescentes emite luz cuja direção de vibração do campo elétrico varia rápida e aleatoriamente com o tempo, como nas figuras 8.2 a 8.4. Represente, nos diagramas x,y,z a seguir, o campo elétrico da onda após atravessar o(s) polarizador(es) cuja direção de polarização é: ***a***) vertical - eixo z (Figura 8.2), ***b***) horizontal - eixo y (Figura 8.3) e ***c***) vertical e horizontal - eixos z e y (Figura 8.4).

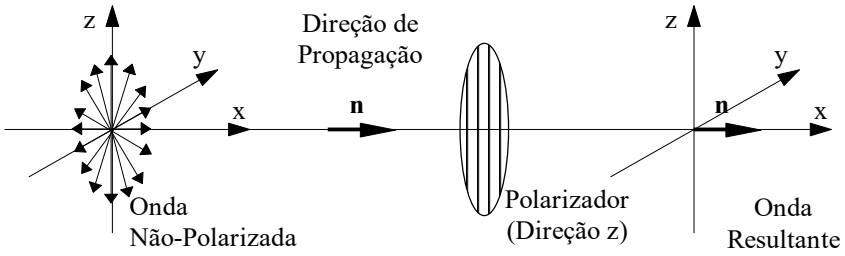


FIGURA 8.2

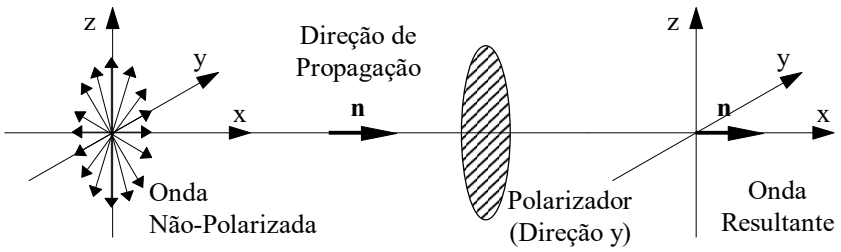


FIGURA 8.3

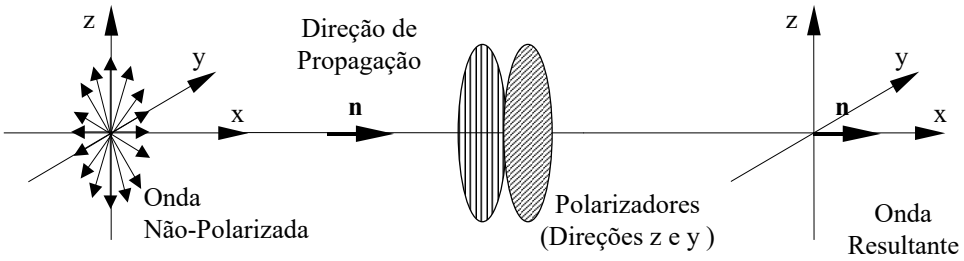


FIGURA 8.4

6) Após analisar os diagramas acima explique o que faz um polarizador.

5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL:

- Monte o equipamento conforme a Figura 8.5 (não posicione ainda os polarizadores).

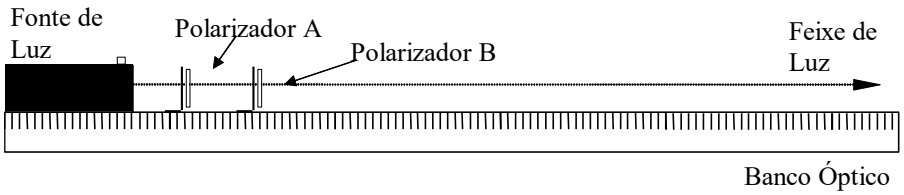


FIGURA 8.5 - Montagem experimental para o estudo da lei de Malus.

- Nesta etapa utilize a *fonte de luz com LED*.

PARTE QUALITATIVA - observações visuais:

- Ligue a fonte de luz e olhe em sua direção.
- Coloque o polarizador A sobre o suporte.
- Observe a fonte através de um polarizador girando-o. Verifique se houve alteração na intensidade da luz. Ao se fazer uma rotação gradual e completa no polarizador, verifica-se se a luz da fonte é plano polarizada, ou seja, se o campo elétrico está alinhado com alguma direção preferencial do polarizador.
- Posicione o polarizador A sobre o Banco Óptico, próximo à fonte, tal que a luz transmitida através dele seja polarizada verticalmente (indicação 0º na posição vertical superior).
- Coloque o outro polarizador (B) sobre o Banco Óptico (também com a indicação 0º na posição vertical superior). Deixe-o próximo ao polarizador A, conforme ilustrado na Figura 8.5.
- Observe a fonte através de ambos os polarizadores.
- Gire gradualmente o polarizador B e observe como varia a intensidade da luz transmitida para vários ângulos deste polarizador (em relação ao 0º do polarizador A).

PARTE QUANTITATIVA - medidas com o fotômetro:

- Coloque um suporte para a fibra óptica ou sensor após o polarizador B. Conecte-o a um fotômetro. Deixe uma distância aproximada de 10 cm entre o polarizador B e o sensor para obter leituras com valores maiores.
- Ligue o fotômetro e, se necessário, faça o ajuste do zero para uma situação de mínima luminosidade possível do ambiente. Se for utilizado o fotômetro digital, meça e anote a intensidade da luz residual no ambiente.
- Complete a Tabela 8.1, medindo a intensidade da luz para as situações sem polarizadores, com um polarizador, e com os dois polarizadores variando-se o ângulo de polarização do polarizador B.
- Repita o procedimento do item anterior, girando agora o polarizador A e deixando o polarizador B fixo em 0°.

TABELA 8.1 - Intensidade da luz transmitida por um sistema de dois polarizadores utilizando uma fonte LED.

INTENSIDADE DA LUZ SEM POLARIZADORES _____

INTENSIDADE DA LUZ COM O POLARIZADOR _____

Polariz A	**Polariz B**	**I transmitida**	**Polariz A**	**Polariz B**	**I transmitida**
	0º	_____			
	10º	_____	0º		_____
	20º	_____			
	30°	_____			
	40°	_____	30°		_____
	50°	_____			
	60°	_____			
	70°	_____	60°		_____
	80°	_____			
0º	90°	_____		0º	
	100º	_____	90°		_____
	110º	_____			
	120º	_____			
	130º	_____	120º		_____
	140º	_____			
	150º	_____			
	160°	_____	150°		_____
	170°	_____			
	180°	_____	180°		_____

Repita esse mesmo procedimento, mas agora utilizando a fonte de luz incandescente. Complete a Tabela 8.2

TABELA 8.2 - Intensidade da luz transmitida por um sistema de dois polarizadores utilizando uma fonte incandescente.

INTENSIDADE DA LUZ SEM POLARIZADORES _____

INTENSIDADE DA LUZ COM O POLARIZADOR _____

Polariz A	**Polariz B**	**I transmitida**	**Polariz A**	**Polariz B**	**I transmitida**
	0º	_____			
	10º	_____	0º		_____
	20º	_____			
	30°	_____			
	40°	_____	30°		_____
	50°	_____			
	60°	_____			
	70°	_____	60°		_____
	80°	_____			
0º	90°	_____		0º	
	100º	_____	90°		_____
	110º	_____			
	120º	_____			
	130º	_____	120º		_____
	140º	_____			
	150º	_____			
	160°	_____	150°		_____
	170°	_____			
	180°	_____	180°		_____

UTILIZAÇÃO DE 3 FILTROS POLARIZADORES

Nesta etapa utilize a *fonte de luz com LED*. Monte um sistema com dois polarizadores **A** e **B** cruzados (o primeiro a 0° e o segundo a 90°). Coloque um terceiro polarizador **C** entre os dois anteriores. Posicione o suporte da fibra óptica ou sensor sobre o trilho. Utilizando o fotômetro, determine a intensidade *I* da luz que atravessa o sistema, em função do ângulo (θ) do polarizador **C** em relação ao polarizador **A**. Complete a Tabela 8.3.

TABELA 8.3 - Intensidade da luz transmitida por um sistema de três polarizadores.

Polariz. A	**Polariz. B**	**Polariz. C**	***I*** ( )	**Polariz. C**	***I*** ( )	**Polariz. C**	***I*** ( )
		0º	_____	60°	_____	130°	_____
		10º	_____	70º	_____	135°	_____
		20º	_____	80º	_____	140°	_____
0	90	30°	_____	90º	_____	150°	_____
		40°	_____	100º	_____	160°	_____
		45°	_____	110º	_____	170°	_____
		50°	_____	120°	_____	180°	_____

- Com o auxílio dos polarizadores, analise a luz emitida por telas de computadores e pelos mostradores de cristal líquido de relógios e calculadoras. Ela também é plano-polarizada?

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS:

1) Por que há diferença entre a intensidade da imagem do alvo quando se olha diretamente para ele, e aquela imagem vista através do polarizado? Em qual das duas situações a imagem é mais intensa?

2) A luz de ambas as fonte, LED e incandescente, é plano-polarizada? Justifique a resposta.

3) Para que ângulos do polarizador **B** um máximo de luz é transmitida?

4) Na etapa com os dois polarizadores, faça um gráfico da intensidade da luz transmitida pelos dois polarizadores em função do ângulo entre suas direções de polarização, para as duas fontes de luz.

5) Os resultados estão de acordo com a lei de Malus? Comprove isto ajustando a função $I(\theta) = a + b\cos^2(\theta + c)$ por mínimos quadrados, onde a, b e c são os parâmetros a serem ajustados. Interprete os parâmetros *a*, *b* e *c*.

6) Para que ângulos do polarizador **B** um mínimo de luz é transmitida? O mínimo é realmente zero? Os resultados estão de acordo com a lei de Malus?

7) O que você verificou com luz visível neste experimento é válido também para qualquer onda eletromagnética? E para ondas que não são eletromagnéticas?

8) Para os dados obtidos com a montagem dos polarizadores **A**, **C** e **B** em sequência, faça um gráfico da intensidade da luz transmitida *I* em função do ângulo θ.

9) Explique o comportamento do gráfico do item 8. Em que ângulos do polarizador **C** a intensidade transmitida é mínima? Em que ângulos ela é máxima?

10) Escreva uma expressão literal para a intensidade de luz transmitida, aplicando a lei de Malus duas vezes em sequência. Com um procedimento análogo ao do item 5, ajuste por mínimos quadrados esta expressão deduzida e interprete seus parâmetros.

11) Com base neste gráfico, compare e discuta a intensidade máxima transmitida em cada situação. Compare o número de pontos de intensidade máxima e mínima em cada uma das duas situações.

PASSOS ALTERNATIVOS SE NÃO ESTIVER DISPONÍVEL UM PROGRAMA QUE FAÇA AJUSTAMENTO DE FUNÇÕES DEFINIDAS PELO USUÁRIO:

4*) Verifique o valor residual que foi transmitido quando os filtros estavam a 90° e subtraia este valor de todas as leituras. Normalize cada intensidade em relação ao valor máximo medido. Faça um gráfico da intensidade normalizada da luz transmitida pelos dois polarizadores em função do ângulo entre as suas direções de polarização.

5*) Os resultados estão de acordo com a lei de Malus? Comprove isto sobrepondo a curva teórica no mesmo gráfico. Considere aqui $I_{max} = 1$. Se o programa para traçado de

gráficos tiver o recurso de desenhar funções escritas pelo usuário, escreva a equação teórica para I normalizada em função de θ e sobreponha esta curva ao gráfico. Compare com o resultado experimental.

8*) Para os dados obtidos com a montagem dos polarizadores **A**, **C** e **B** em sequência, subtraia o valor residual que foi transmitido quando os filtros estavam a 90° de todas as leituras e depois divida cada intensidade pelo valor máximo da tabela. Faça um gráfico da intensidade normalizada I em função do ângulo θ.

9*) Explique o comportamento do gráfico do item 8. Em que ângulos do polarizador **C** a intensidade transmitida é mínima? Em que ângulos ela é máxima?

10*) Escreva a expressão literal para a intensidade de luz transmitida, aplicando a lei de Malus duas vezes em sequência. Represente a curva teórica sobre o mesmo gráfico do item anterior. Considere $I_{max} = 1$. Siga o mesmo procedimento do item 5*.

EXPERIÊNCIA 9

9.1: Polarização Por Reflexão - Ângulo de Brewster

1 OBJETIVO:

- Estudar a polarização da luz através da reflexão.
- Medir o ângulo de Brewster e analisar o estado de polarização da luz refletida.

2 MATERIAL UTILIZADO:

Banco óptico, fonte de luz incandescente, disco graduado ("*Ray Table Degree Scale*") e respectiva base, polarizadores, acessórios fenda única ("*Slit Mask*") e múltipla ("*Slit Plate*") e respectivos suportes para o banco óptico, acessório alvo ("*Crossed Arrow Target*"), suporte específico para ser usado sobre o disco graduado, lente cilíndrica ("*Cylindrical Lens*"), fotômetro e acessórios.

3 INTRODUÇÃO:

1) O que é o fenômeno da polarização por reflexão?

2) Explique o que é ângulo de Brewster.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL:

- Monte o equipamento conforme a Figura 9.1. Nesta etapa utilize a *fonte de luz com lâmpada incandescente*.

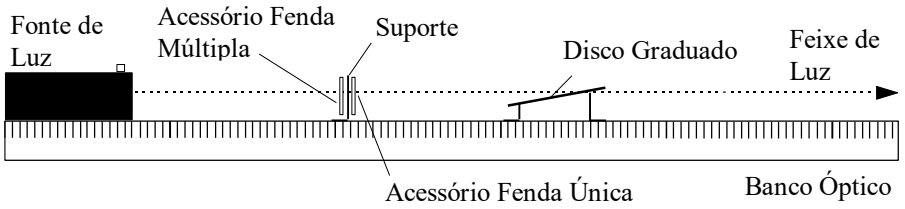


FIGURA 9.1 - Montagem experimental para a polarização por reflexão.

- Ajuste os componentes sobre o Banco Óptico, tal que apenas um feixe de luz passe através do centro do disco graduado, alinhando-o com a reta *"NORMAL"* do disco.
- Posicione a lente cilíndrica sobre o centro do disco graduado, com a face plana voltada para o feixe de luz.
- Observe os raios que são produzidos quando o feixe incidente é refletido e refratado na superfície plana da lente.
- Gire o disco graduado com a lente até que o ângulo entre os raios refletido e refratado seja de 90^o (observe a Figura 9.2). Utilize a escala do disco para ter certeza disto.

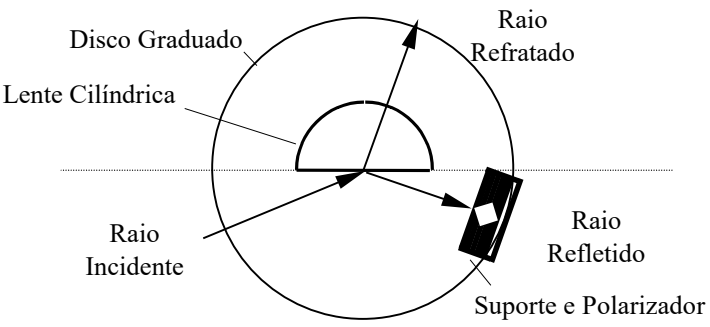


FIGURA 9.2 - Raios refletido e refratado.

- Segure o polarizador com a mão, posicionando-o de tal maneira que o raio refletido incida sobre ele.
- Olhe, através do polarizador, a imagem do filamento da fonte de luz (refletida pela lente cilíndrica).
- Gire o polarizador atentamente para todos os ângulos e verifique se a luz refletida pela lente é plano-polarizada, e em que ângulo (em relação ao eixo vertical) é esta polarização.
- Meça o ângulo de incidência (ângulo entre o feixe incidente e a normal à superfície) para esta situação. Expresse também a sua incerteza.

  θ_B = _____
- Varie o ângulo de incidência para (θ_B+10°) e observe a imagem do filamento. Repita esta observação quando o ângulo de incidência é (θ_B-10°).
- Verifique com o polarizador se há luz plano-polarizada quando o raio refletido não forma um ângulo de 90º com o raio refratado.
- Na realização desta parte do experimento você colocou o polarizador entre a face refletora da peça de acrílico e o seu olho, para verificar se a luz refletida era polarizada e medir o seu ângulo de polarização. Agora, explore a seguinte situação: coloque o polarizador entre a fonte e a face refletora. Gire o polarizador e observe a intensidade do feixe refletido. Em que situação ela é máxima? Em que situação ela é mínima?
- Gire o disco graduado fazendo com que a luz incida na face curva da peça de acrílico, analisando a reflexão e a refração quando a luz passa do acrílico para o ar. Meça o ângulo de Brewster nesta configuração de incidência, com incerteza. Com o filtro polarizador verifique o estado de polarização da luz refletida.

  θ_B = _____
- Substitua a peça semicilíndrica de acrílico pelo espelho metálico (plano) utilizado nas Aulas 1 e 2. Verifique para diferentes ângulos de incidência se a luz refletida é polarizada.

1) A luz refletida pela lente é plano-polarizada? Em caso afirmativo, qual o ângulo de polarização em relação ao eixo vertical?

2) Com o ângulo de Brewster medido experimentalmente, calcule o índice de refração do acrílico, expressando o resultado na forma explícita.

3) Para ângulos de incidência diferentes do ângulo de Brewster, o raio refletido é plano-polarizado? Este resultado era esperado?

4) Explique o comportamento observado no feixe refletido, ao colocar o polarizador antes da face refletora.

5) Ainda foi verificado o fenômeno da polarização por reflexão quando a luz refletiu ao passar do acrílico para o ar? Analise o ângulo de Brewster para cada uma das configurações de incidência e observe que relação existe entre seus valores.

6) O raio refletido pelo espelho é polarizado?

7) Observe e analise com os polarizadores a luz refletida na bancada e no quadro. Discuta o estado de polarização destes feixes de luz.

9.2: Reflexão por Dielétricos e Polarização

1 MATERIAL UTILIZADO:

Trilho graduado, fonte de luz incandescente, lente de raios paralelos, suportes, lente cilíndrica (*Cylindrical Lens*), disco graduado e sua base (*Ray Table Degree Scale*), fenda única (*Slit Mask*), fotômetro com fibra óptica e suporte para a fibra óptica.

2 OBJETIVOS:

Observar a intensidade da luz refletida por um dielétrico, em cada direção de polarização, em função do ângulo de incidência.

3 INTRODUÇÃO:

A Figura 9.3 apresenta de forma esquemática, feixes de luz com duas diferentes polarizações, uma delas chamada de *s* (perpendicular ao plano de incidência) e a outra *p* (paralela ao plano de incidência), sendo refletidos e transmitidos na interface entre dois meios.

Ao lado de cada figura há uma equação representando o coeficiente de reflexão, ou reflectância (*R*), correspondente à polarização em questão.

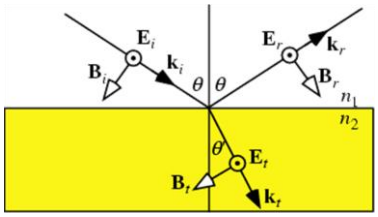
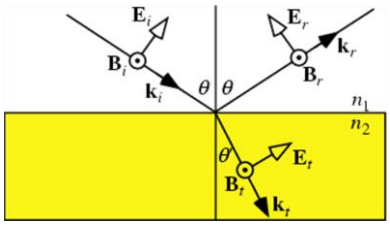
	$R_S = R_\perp = \left(\frac{n_1 \cos\theta_1 - n_2 \cos\theta_2}{n_1 \cos\theta_1 + n_2 \cos\theta_2} \right)^2$
	$R_P = R_\parallel = \left(\frac{n_2 \cos\theta_1 - n_1 \cos\theta_2}{n_2 \cos\theta_1 + n_1 \cos\theta_2} \right)^2$

Figura 9.3 – Reflexão e transmissão de feixes de luz incidente sobre um dielétrico.

O coeficiente de reflexão indica a intensidade da luz refletida como uma porcentagem ou fração da intensidade da luz incidente.

O estado de polarização da luz pode ser quantificado por uma grandeza chamada grau de polarização (*V*). Para definir *V* supõe-se que o feixe de luz observado seja formado pela superposição de dois feixes: um deles de luz polarizada, com intensidade I_P, e o outro de luz não polarizada, com intensidade I_N. A forma prática para se determinar *V* envolve a intensidade máxima medida I_{max} e a intensidade mínima medida I_{min}, ao se girar o polarizador. Considerando um polarizador ideal, $I_{\min} = \frac{1}{2} I_N$ e $I_{\max} = I_P + \frac{1}{2} I_N$, de forma que a expressão do grau de polarização é:

$$V = \frac{I_P}{I_P + I_N} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

Neste experimento I_{max} corresponde à intensidade $I_{\perp}$ medida e I_{min} corresponde a $I_{\parallel}$.

A parte complementar da reflectância se chama transmitância e está relacionada com a intensidade da luz transmitida ou refratada pelo material.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL:

- Posicione a fonte de luz sobre o trilho. Fixe a lente de raios paralelos e a fenda única num suporte, a fim de obter um feixe intenso e centralizado com o trilho. Posicione também o disco graduado e sua base. Observe as figuras 9.4 (*a*) e (*b*).

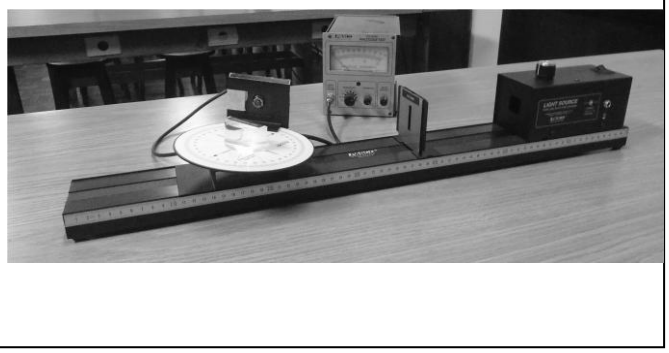


Fig. 9.4 (*a*)

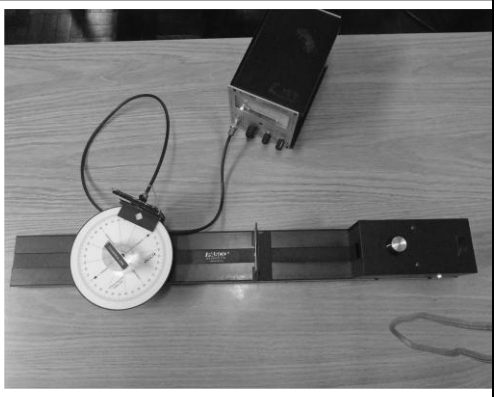


Fig. 9.4 (*b*)

- Ao posicionar a lente de raios paralelos, lembre que o filamento da lâmpada é o objeto e a imagem será formada no ponto onde os raios transmitidos pela lente convergirem. Neste ponto ocorre a maior intensidade de luz. O sistema deve ser ajustado para que este ponto de maior intensidade ocorra sobre o centro do disco.

- Sobre o disco graduado posicione a lente cilíndrica com a face plana voltada para a fonte de luz e alinhada com a linha *COMPONENT* do disco. O centro da face plana deve coincidir com o centro do disco.

- Utilize o suporte com garras, apropriado para fixação no disco graduado, conforme mostrado na figura 9.5. Fixe a este suporte, com fita adesiva, o suporte da fibra óptica.

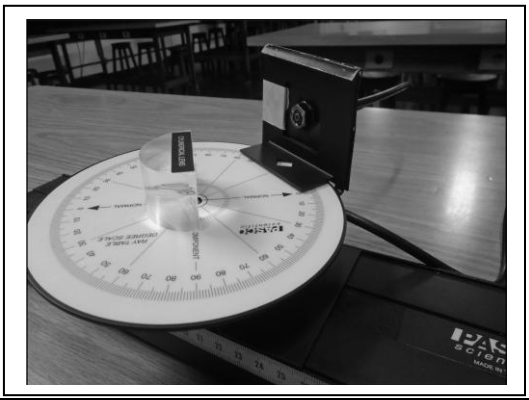


Fig. 9.5 - Detalhe da montagem do suporte e da fibra óptica.

- Posicione a fibra óptica na frente e no mesmo alinhamento do feixe refletido, de modo a receber a luz refletida.

* No experimento sobre polarização da luz, na etapa em que foi estudada a polarização por reflexão, colocou-se o polarizador (analisador) na trajetória do feixe refletido, já polarizado pela reflexão no ângulo de Brewster. Verificou-se também que um resultado equivalente é obtido quando o polarizador é colocado logo após a fonte de luz, antes do feixe incidir sobre a peça.

A colocação dos polarizadores após a fonte de luz tem como objetivo evitar desalinhamentos na posição da fibra óptica, o que poderia ocorrer facilmente ao girar a polarizador se ele estivesse fixado na frente da fibra.

- Prepare dois suportes: um deles com um polarizador com direção de polarização vertical (0° na vertical) e o outro com um polarizador com direção de polarização horizontal (0° na horizontal). Este procedimento visa agilizar as medidas. Também poderia ser utilizado um único polarizador, mas ele deveria ser posicionado (girado) nas direções de polarização vertical e horizontal a cada novo ângulo de incidência.

- No próximo passo, para uma boa qualidade no resultado, é importante fazer as medidas sem alterar o ângulo de incidência da luz, bem como a posição da fibra óptica que recebe a luz refletida. Meça e anote na Tabela 9.1 o ângulo de incidência (θ_1), o ângulo de refração (θ_2) (ambos com relação à normal), e as três intensidades:
  a. sem polarizador após a fonte (I).
  b. com o polarizador após a fonte com direção de polarização na vertical (perpendicular ao plano de incidência) ($I_\perp$).
  c. com o polarizador após a fonte com direção de polarização na horizontal (paralela ao plano de incidência) ($I_\parallel$).

- Utilize inicialmente um ângulo de incidência igual a 20°. Posicione o suporte com a fibra óptica para recolher o feixe refletido. Faça as medidas conforme indicado no item anterior. Repita este procedimento variando o ângulo de incidência de 5 em 5 graus. Para cada novo ângulo de incidência, posicione o suporte com a fibra óptica no novo ângulo de reflexão.
- Para a medida com $\theta_1 = 90°$ retire a peça de acrílico do disco, deixando a luz incidir diretamente sobre o sensor.

TABELA 9.1 – Intensidades medidas do feixe refletido.

θ_1 (°)	θ_2 (°)	I ( )	$I_\perp$ ( )	$I_\parallel$ ( )	V
20	_____	_____	_____	_____	_____
25	_____	_____	_____	_____	_____
30	_____	_____	_____	_____	_____
35	_____	_____	_____	_____	_____
40	_____	_____	_____	_____	_____
45	_____	_____	_____	_____	_____
50	_____	_____	_____	_____	_____
55	_____	_____	_____	_____	_____
60	_____	_____	_____	_____	_____
65	_____	_____	_____	_____	_____
70	_____	_____	_____	_____	_____
75	_____	_____	_____	_____	_____
80	_____	_____	_____	_____	_____
85	_____	_____	_____	_____	_____
90	_____	_____	_____	_____	_____

- Considere o ângulo de Brewster θ_B = _____ medido na Experiência sobre Polarização da Luz. Para este ângulo de incidência, meça as componentes $I_\perp$ e $I_\parallel$ para o *feixe transmitido ou refratado*.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS:

1) Normalize as intensidades I, $I_\perp$ e $I_\parallel$, dividindo cada valor medido pelo respectivo valor máximo medido com incidência $\theta_1 = 90°$.

2) Construa um gráfico das intensidades medidas normalizadas $I_\perp$ e $I_\parallel$ (do feixe refletido) em função do ângulo de incidência. Represente no mesmo gráfico os pontos referentes às componentes $(\perp)$ e $(\parallel)$. Analise o comportamento de cada componente. Observe o resultado para o ângulo particular θ_B obtido no experimento sobre Polarização da Luz, na etapa da polarização por reflexão.

3) Com os dados da Tabela 9.1, calcule o grau de polarização para cada ângulo de incidência e faça o gráfico de V em função de θ. Observe em que ângulo de incidência ocorre a máxima polarização.

4) Supondo que a fonte emita luz não polarizada, existe algum ângulo de incidência onde o feixe *refletido* foi completamente polarizado? Explique com base nas medidas feitas. O que se pode afirmar do feixe transmitido ou refratado?

5) Considere o experimento sobre a refração da luz (Experiência 3 – Parte 3.2). O que ocorria com a intensidade do feixe refratado quando o ângulo de incidência aumentava? E com a intensidade do feixe refletido? Naquela prática você observou qualitativamente o comportamento da intensidade da luz refletida e refratada em função do ângulo de incidência e fez uma análise qualitativa. Com base no estudo quantitativo do coeficiente de reflexão e no seu gráfico, feitos nesta aula, justifique o comportamento observado naquela experiência.

6) Com os valores medidos dos ângulos de incidência e refração e considerando a lei de Snell, faça um gráfico que permita determinar o índice de refração do material da peça.

7) Com base no resultado do item anterior faça uma estimativa do ângulo de Brewster.

8) Com estes resultados trace sobre o mesmo gráfico do item 2 as curvas baseadas no modelo teórico (equações) de Fresnel para $I_{\perp}$ e $I_{\parallel}$ em função de θ. Veja as equações na Introdução. Se o programa para traçado de gráficos permitir desenhar funções escritas pelo usuário, utilize-o e sobreponha estas curvas ao gráfico.

9) Compare os resultados experimentais com as curvas teóricas.

10) No ângulo de Brewster, o *feixe transmitido* é polarizado? Explique.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

[1] *Optics*, Eugune Hecht, 3rd edition, Addison-Wesley.

[2] *Teoria Eletromagnética Básica,* Reitz, J.R., Milford, F.J., Christy, R.W., 1982, Ed. Camp

EXPERIMENTO 10

10.1: Difração e Interferência da Luz - estudo qualitativo

1 EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS:

Trilho graduado, suportes, lâmina de difração (*Diffraction Plate*), laser.

2 INTRODUÇÃO:

Os padrões de difração mais simples são produzidos por fendas estreitas. Porém, qualquer abertura ou coleção de aberturas produzirá um padrão de difração se as dimensões das aberturas forem da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda da luz.
O padrão de difração criado por uma determinada abertura pode ser obtido quantitativamente utilizando o princípio de Huygens. Simplesmente considera-se cada abertura como um conjunto de fontes de luz. Em qualquer posição no seu anteparo deve-se determinar a fase da luz proveniente de cada ponto na abertura. Finalmente, utiliza-se o princípio da superposição para somar as contribuições de todos os pontos da abertura. Você tem que executar este mesmo cálculo para cada ponto do anteparo para determinar o padrão de difração completo. Este experimento será mais qualitativa. Você usará seu conhecimento de padrões de difração formados por fendas para entender os padrões formados por aberturas mais complicadas.

3 PROCEDIMENTO:

Monte o equipamento como mostrado na Figura 10.1, mas utilizando a fonte de laser ao invés da lâmpada incandescente. Aponte o laser de forma a atingir cada uma das fendas, de forma que a luz que atravessa cada fenda atinja um anteparo situado a aproximadamente 1 m de distância. Você fará esboços das figuras de interferência e difração observados em cada uma das fendas de **A** a **J**.

Cuidado: Não olhe diretamente para o feixe de laser. Projete a figura no anteparo.

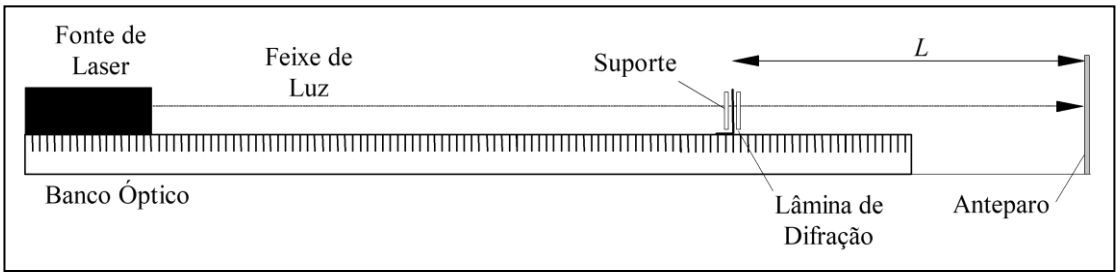


FIGURA 10.1 – Montagem para um estudo introdutório da difração.

Comece examinando os padrões de difração formados pelas fendas únicas **A**, **B** e **C**. Depois analise os padrões de interferência das fendas duplas **D**, **E** e **F**. Na Introdução deste manual estão as descrições de cada uma das fendas. Descreva qualitativamente os padrões de difração e interferência observados e analise com base nos dados das fendas. Faça esboços das figuras observadas.

3.1 FENDAS CRUZADAS:

Examine a figura de difração formada através da abertura **H** de fendas cruzadas. Enquanto você observa a figura, lentamente gire a *lâmina de difração*, assim, inicialmente uma das fendas estará na vertical e, depois, a outra.

1) Descreva a figura de difração em termos das figuras formadas por cada uma das fendas individualmente.

3.2 ORDEM ALEATÓRIA DE ABERTURAS CIRCULARES:

Examine a figura de difração formada através da abertura **I**, com um conjunto aleatório de aberturas circulares. A figura é semelhante à formada por uma única abertura circular. Para a fenda **I**, as figuras são todas provenientes de aberturas circulares superpostas, assim, a figura de difração combinada é mais intensa.

Nesta etapa e na próxima são usados círculos menores do que você conseguiria fazer com um alfinete.

Observando a difração em fenda única, note que quanto mais estreita for a fenda, maior será a separação entre as franjas na figura de difração.

1) O que se espera na figura de difração formada quando são utilizados orifícios de menor diâmetro?

3.3 MATRIZ QUADRADA DE ABERTURAS CIRCULARES:

Examine a figura de difração formada pela abertura **J**, uma matriz quadrada de aberturas circulares.
1) Compare esta figura com aquela formada pelo conjunto de distribuição aleatória. Qual é a diferença?

Cada abertura circular na matriz forma uma figura de difração circular com máximos e mínimos que aparecem em raios diferentes. Porém, a regularidade da matriz gera interferências entre as figuras formadas pelos círculos individuais. Isto é análogo ao modo no qual a figura de interferência de fenda dupla cria máximos e mínimos que são sobrepostos nas figuras de fenda única criadas pelas fendas individuais.

EXPERIMENTO 11

11.1: Difração da Luz em Fenda Única

1 MATERIAL UTILIZADO:
Banco óptico, fonte de laser, suportes para o banco óptico, anteparo, papel branco, régua, lâmina com diferentes aberturas para difração ("*Diffraction Plate*"), fotômetro e acessório posicionador milimétrico.

2 INTRODUÇÃO:
Neste experimento será feito o estudo quantitativo do fenômeno da difração utilizando um laser de He-Ne e fendas de diferentes larguras. A figura de difração devido a uma fenda única pode ser explicada pela teoria de Huygens. Quando uma onda plana atinge a fenda, cada ponto na fenda se comporta como uma fonte pontual de luz. A Figura 11.1 mostra um ponto P, longe da fenda, onde a distância $\overline{AP} = \overline{BP} + \frac{\lambda}{2}$. Impõe-se a condição que a diferença no comprimento dos caminhos percorridos seja λ/2, onde λ é o comprimento de onda da luz. Como a luz vem do ponto A percorrendo meio comprimento de onda a mais que a luz do ponto B, a luz vinda destes dois pontos estão em oposição de fase ao incidir no ponto P. Por causa disto há um completo cancelamento de luz no ponto P e um mínimo (franja escura) será visto naquele ponto. A luz que atinge o ponto P proveniente dos pontos entre A e B terá fase entre 0° e 180°.

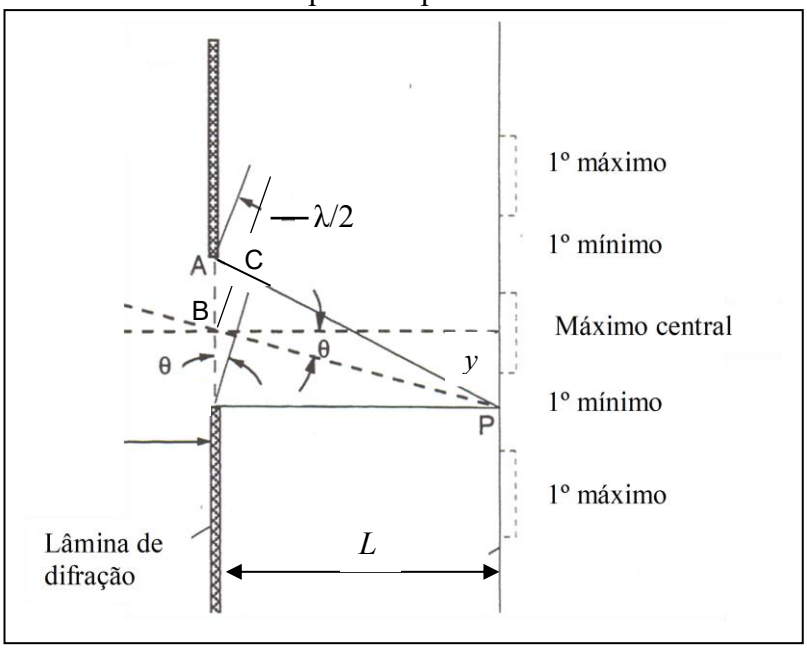


FIGURA 11.1 – Geometria necessária para deduzir as expressões relativas à difração em fenda única.

Na Figura 10.2.1, o ponto P está num ângulo θ em relação ao centro da fenda. Nós fazemos a hipótese que o ponto P está suficientemente longe, de forma que $\overline{AP}$ e $\overline{BP}$ são quase paralelos. Como mostrado no desenho, o ângulo $ABC = \theta$. Para o raio que passa pelo centro da fenda e atinge o ponto P, tem-se que $\frac{a}{2} sen\theta = \frac{\lambda}{2}$, que dá a condição $a\, sen\theta = \lambda$, onde a é a largura da fenda. Um argumento similar pode ser usado para mostrar que um mínimo será localizado em ângulos que satisfaçam a relação:

$$a\, sen\theta = n\lambda \qquad n = 1, 2, 3, \ldots \quad (mínimos)$$

Ao observar a figura de difração no anteparo e fazer a medida da posição dos mínimos, lembre-se que $\theta = \arctan\frac{y}{L}$, onde L é a distância da fenda até o anteparo, como pode ser visto na Figura 10.2.1.

A intensidade da luz difratada se distribui angularmente em relação ao eixo óptico. A intensidade da luz em função do ângulo θ obedece a relação:

$$I(\theta) = I_{\max}\left(\frac{sen\,\alpha}{\alpha}\right)^2 \text{ onde } \alpha = \frac{\pi a}{\lambda} sen\theta .$$

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL:

3.1 DIFRAÇÃO EM FENDA ÚNICA – POSIÇÃO DOS MÍNIMOS:

- Monte o equipamento conforme a Figura 11.2.
- Anote o número da lâmina de difração utilizada: _____ .
- Verifique o posicionamento do banco óptico em relação ao anteparo; eles devem estar perpendiculares entre si. O suporte com a lâmina de difração deve estar a aproximadamente 1 m do anteparo, onde deve ser colada uma folha de papel branco.
- Meça e anote o valor da distância entre a lâmina de difração e o anteparo. L =____.
- Ligue o laser, **CUIDANDO PARA QUE O FEIXE NÃO ATINJA O OLHO DAS PESSOAS.**
- Posicione a lâmina de difração, alinhando a fenda padrão **A** (uma fenda de largura nominal 0,04 mm) de forma que o feixe de luz atravesse essa fenda e produza uma figura de difração no anteparo.

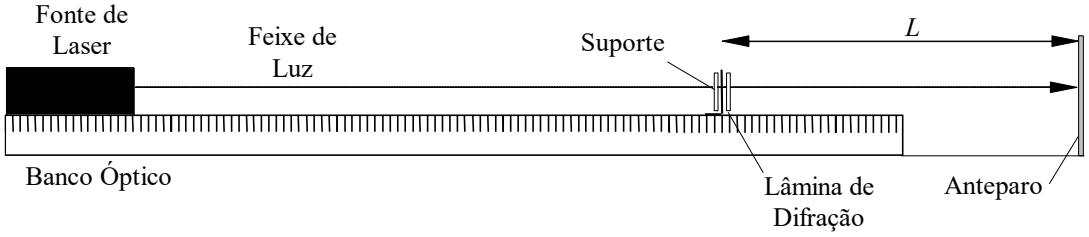


FIGURA 11.2 - Montagem experimental para a marcação dos mínimos.

- Cole sobre o anteparo uma folha de papel, alinhando-a em relação ao padrão de difração.
- Inicialmente, identifique a posição central do máximo mais intenso.
- Marque sobre a folha de papel as posições dos mínimos, tanto à direita quanto à esquerda do máximo mais intenso.
- Determine a distância ($2y$) entre os dois primeiros mínimos, entre os dois segundos mínimos e assim por diante, anotando na Tabela 11.1.
- Repita a operação para as fendas **B** e **C,** sem mudar a distância da lâmina de difração ao anteparo.

TABELA 11.1 - Distância entre os mínimos da difração.

Largura da Abertura	**Mínimo**	**Ordem *n***	**Distância 2*y* (mm)**
A Largura* = 0,04 mm	1º	1	_____
	2º	2	_____
	3º	3	_____
	4º	4	_____
	5º	5	_____
B Largura* = 0,08 mm	1º	1	_____
	2º	2	_____
	3º	3	_____
	4º	4	_____
	5º	5	_____
	6º	6	_____
C Largura* = 0,16 mm	1º	1	_____
	2º	2	_____
	3º	3	_____
	4º	4	_____
	5º	5	_____
	6º	6	_____

(*) Valores nominais fornecidos pelo fabricante.

- Responda as questões da Análise de Resultados.

3.2 DIFRAÇÃO EM FENDA ÚNICA - INTENSIDADE DA LUZ DIFRATADA:

- Monte o equipamento conforme a Figura 11.3 (não posicione a Lâmina de Difração ainda).

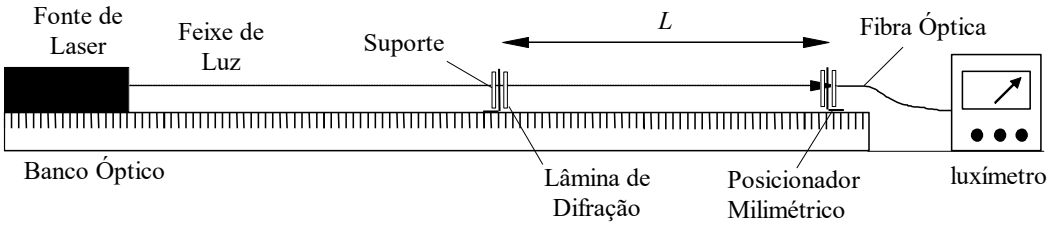


FIGURA 11.3 - Montagem experimental para determinar a intensidade da luz difratada.

- Verifique se o sensor com a fibra óptica está centralizado (posição 25 mm na escala) sobre o banco óptico, possibilitando deslocá-lo com o posicionador milimétrico igualmente tanto para a direita quanto para a esquerda (observe a escala na parte posterior do posicionador).
- Ligue o fotômetro e ajuste o zero para uma situação de mínima luminosidade possível do ambiente.
- Ligue o laser e alinhe o feixe em relação à fibra óptica do sensor (nesta situação temos o ponto de máximo central).

- O suporte da lâmina de difração deve ficar aproximadamente a 50 cm da extremidade da fibra óptica. Meça e anote a distância da lâmina de difração até a fibra óptica. L = _____.
- Posicione a lâmina de difração junto ao suporte, alinhando a abertura **A** com o feixe de luz. Ajuste-a tal que o máximo central esteja localizado sobre a fibra óptica.
- Observe a formação dos padrões de difração sobre a fibra óptica e verifique se ele está na direção horizontal.
- Desloque o posicionador milimétrico até a sua extremidade em 0 mm. Avance o posicionador a cada 2 mm, medindo em cada ponto a intensidade da luz difratada e preenchendo as duas primeiras colunas da Tabela 11.2. Ajuste a escala do fotômetro conforme a necessidade.

TABELA 11.2 - Intensidade em função da posição do sensor.

POSIÇÃO DO SENSOR* (mm)	INTENSIDADE MEDIDA ( )	INTENSIDADE NORMALIZADA	DISTÂNCIA** y (mm)	ÂNGULO θ (^{o})	α ( )	INT. TEÓRICA NORM.
0						
2						
4						
6						
8						
10						
12						
14						
16						
18						
20						
22						
24						
26						
28						
30						
32						
34						
36						
38						
40						
42						
44						
46						
48						
50						

**Valor lido na própria escala do posicionador milimétrico (os valores podem variar entre 0 e 50 mm).*

*** Distância do ponto observado até o máximo central. (Será calculada na Análise de Dados)*

- Responda as questões da Análise de Resultados.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS:

O comprimento de onda da luz do laser é $\lambda = 632{,}8$ nm.

4.1 DIFRAÇÃO EM FENDA ÚNICA – POSIÇÃO DOS MÍNIMOS:

1) Pela observação das figuras de difração e dos resultados da Tabela 11.1, como o espaçamento entre as franjas varia com a largura da fenda?

2) Considerando o triângulo retângulo formado pelas distâncias *L* e *y* (ver Figura 10.2.1), escreva uma expressão para a *tangente* do ângulo formado entre a direção do eixo central e a direção de cada mínimo.

3) Com base na óptica física, escreva uma expressão para o *seno* do ângulo formado entre a direção do eixo central e a direção de cada mínimo devido à difração.

4) Combine as expressões dos itens 2 e 3 de forma a resultar uma equação para a distância (*y*) entre os mínimos e o eixo central em função da ordem (*n*) destes mínimos. Lembre-se que para θ pequeno vale a aproximação $sen\ \theta \approx \theta \approx tan\ \theta$.

5) Usando os resultados para a fenda **A** na Tabela 11.1, faça um gráfico representando a ordem dos mínimos (*n*) no eixo horizontal e a distância entre os mínimos e o eixo central (*y*) no eixo vertical. Qual o significado físico dos coeficientes deste gráfico?

6) Ajuste uma reta aos pontos medidos e determine a sua equação.

7) A partir deste resultado calcule a largura da fenda **A**.

8) Compare este valor obtido experimentalmente com o nominal (*) citado na Tabela 11.1.

9) Pergunte ao professor qual deveria ser o valor da largura desta fenda.

10) Repita os passos anteriores para as fendas **B** e **C**.

11) Pegue um fio fino (por exemplo um fio de cobre ou de cabelo) e fixe verticalmente com uma fita adesiva num suporte. Faça o laser atingir o fio. Determine a espessura do fio de cabelo utilizando o mesmo procedimento de análise seguido para a fenda única.

4.2 DIFRAÇÃO EM FENDA ÚNICA - INTENSIDADE DA LUZ DIFRATADA:

1) Com os dados que você registrou na Tabela 11.2, identifique a *Posição do Sensor* em que ocorreu a máxima *Intensidade* (centro do máximo central). Este ponto terá coordenada 0 na coluna *Distância*.
2) Calcule agora a distância entre cada posição do sensor e o centro do máximo central, completando a coluna *Distância*. Com isso foi feita a translação da origem, de modo que a escala horizontal do gráfico terá o valor 0 coincidindo com a situação de máxima intensidade.

3) Considerando o triângulo retângulo formado pelas distâncias L e y (ver Figura 11.1), calcule o ângulo θ entre as direções correspondentes a cada ponto observado e o máximo central, completando a coluna *Ângulo*.

4) Calcule a coluna *Intensidade Normalizada* dividindo cada intensidade medida pelo máximo valor medido.

5) Faça um gráfico da *Intensidade Normalizada* (medida) em função do ângulo θ. Utilize um símbolo para representar estes dados no gráfico.

6) Calcule a variável α na Tabela 11.2. Utilize a largura da fenda calculada na seção 4.1.

7) Calcule a *Intensidade Teórica* normalizada $I(\theta) = I_{\max}\left(\frac{sen\,\alpha}{\alpha}\right)^2$ em função do ângulo θ. Lembre-se que α está em radianos e considere $I_{\max} = 1$.

8) Sobre o gráfico do item 5, desenhe a curva que representa a Intensidade Teórica calculada.

9) Analisando o gráfico, compare os pontos experimentais com a curva da expressão teórica. Verifique se há concordância da largura do máximo central, da posição dos mínimos e da intensidade dos máximos secundários. Os dois resultados são compatíveis?

10) Se o programa para traçado de gráficos tiver o recurso de desenhar funções escritas pelo usuário, escreva a equação teórica para I normalizada em função de θ e sobreponha esta curva ao gráfico. Compare com o resultado experimental.

EXPERIMENTO 12

12.1: Interferência da Luz em Fenda Dupla

1 EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS:

Banco óptico, fonte de laser, suportes para o banco óptico, anteparo, papel branco, régua e lâmina com diferentes aberturas para difração ("*Diffraction Plate*").

2 INTRODUÇÃO:

Neste experimento serão verificados os padrões de interferência produzidos por diferentes pares de fendas.
Na interferência com duas fendas, a luz incide sobre um anteparo que apresenta duas fendas estreitas e próximas. De acordo com o princípio de Huygens cada fenda age como se fosse uma nova fonte de luz.
Para analisar o fenômeno, é interessante observar a Figura 12.1. No máximo central, os raios provenientes das fendas A e B percorrem a mesma distância das fendas até o ponto P no anteparo. Assim, eles estão em fase e interferem construtivamente. No primeiro máximo lateral, o raio proveniente da fenda B percorreu um comprimento de onda a mais do que o raio da fenda A, assim, os dois raios estão novamente em fase, e acontece uma interferência construtiva nesta posição.

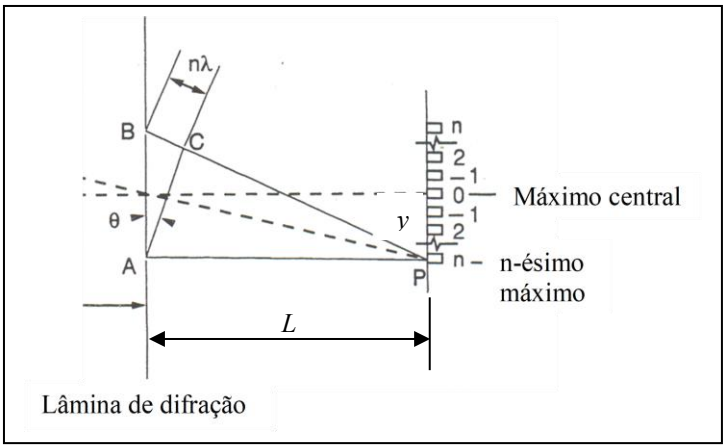


FIGURA 12.1 – Definição da geometria e das variáveis envolvidas na dedução das expressões.

Para o máximo de ordem *n* a luz que provém da fenda B percorreu *n* comprimentos de onda a mais que a luz que vem da fenda A, e desta forma ocorre interferência construtiva novamente. No desenho, a reta $\overline{AC}$ é perpendicular à reta $\overline{PB}$. Como as fendas são muito próximas uma da outra, as linhas $\overline{AP}$ e $\overline{PB}$ são praticamente paralelas. Assim, dentro de uma aproximação temos $\overline{AP} = \overline{CP}$. Isto significa que para termos uma interferência construtiva em P, devemos ter $\overline{BC} = n\lambda$.
A partir do triângulo ABC pode ser visto que $\overline{BC} = d\,sen\theta$, onde $d = \overline{AB}$ é a separação entre duas fendas na lâmina de difração. Desta forma temos a relação:

$$d\,sen\theta = n\lambda \qquad n = 1, 2, 3, \ldots \quad (máximos)$$

e, para a posição dos mínimos

$$d\,sen\theta = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda \qquad n = 0,1,2,... \quad (mínimos)$$

Para calcular o ângulo θ a partir das medidas feitas no anteparo, devemos considerar que $\theta = \arctan\frac{y}{L}$, como pode ser deduzido a partir da Figura 12.1.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL:

- Utilize a configuração da Figura 12.2 (não posicione a Lâmina de Difração ainda).

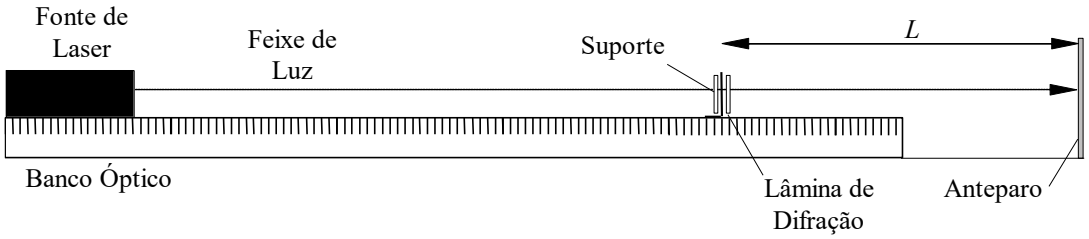


FIGURA 12.2 - Montagem experimental.

- Anote o número da lâmina de difração utilizada: _____ .
- Posicione o suporte a aproximadamente 1 m do anteparo. Meça esta distância exata e anote seu valor: L = _____.
- Verifique o posicionamento do banco óptico em relação ao anteparo: eles devem estar perpendiculares entre si.
- Ligue o laser.
- Posicione junto ao suporte a lâmina de difração, alinhando o padrão **D** (duas fendas de largura nominal 0,04 mm e separação nominal 0,125 mm) com o feixe de luz.
- Olhando para o anteparo, verifique os padrões de interferência.
- Cole sobre o anteparo uma folha de papel, alinhando-a em relação ao padrão de interferência.
- Inicialmente, identifique os máximos (central e adjacentes) e mínimos produzidos sobre a folha de papel.

Marque sobre esta folha as posições dos mínimos devido à interferência, tanto à direita quanto à esquerda do máximo mais intenso.

Determine a distância entre os dois primeiros mínimos, entre os dois segundos mínimos e assim por diante, anotando na Tabela 12.1.

- Repita o mesmo procedimento para os padrões **E** e **F**.

- Substitua o laser vermelho por outro de cor verde. Utilize o par de fendas **D** e repita o procedimento anterior, marcando a posição dos mínimos. Meça as distâncias entre mínimos, anotando na Tabela 12.1.

TABELA 12.1 - Distância entre os mínimos da interferência.

Características das aberturas	**Mínimo**	**Ordem** *n*	**Distância 2*y* (mm) (verm.)**	**Distância 2*y* (mm) (verde)**
D Largura* = 0,04 mm Separação* = 0,125 mm	1º	0	_____	_____
	2º	1	_____	_____
	3º	2	_____	_____
	4º	3	_____	_____
	5º	4	_____	_____
	6º	5	_____	_____
E Largura* = 0,04 mm Separação*= 0,250 mm	1º	0	_____	
	2º	1	_____	
	3º	2	_____	
	4º	3	_____	
	5º	4	_____	
	6º	5	_____	
F Largura* = 0,08 mm Separação* = 0,250 mm	1º	0	_____	
	2º	1	_____	
	3º	2	_____	
	4º	3	_____	
	5º	4	_____	
	6º	5	_____	

(*) Valores nominais fornecidos pelo fabricante.

- Responda as questões da Análise de Dados.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS:

O comprimento de onda da luz do laser vermelho é $\lambda = 632{,}8$ nm.

1) Como o padrão de interferência em fenda dupla se diferencia do padrão obtido para a fenda simples? (Compare os padrões produzidos por larguras iguais: **A** e **D** ou **B** e **F**).

2) Considerando o triângulo retângulo formado pelas distâncias *L* e *y* (ver Figura 12.1), escreva uma expressão para a *tangente* do ângulo formado entre a direção do eixo central e a direção de cada mínimo.

3) Com base na óptica física, escreva uma expressão para o *seno* do ângulo formado entre a direção do eixo central e a direção de cada mínimo devido à interferência.

4) Combine as expressões dos itens anteriores de forma a resultar uma equação para a distância (*y*) entre os mínimos e o eixo central em função da ordem (*n*) destes mínimos. Lembre-se que para θ pequeno vale a aproximação $sen\ \theta \approx \theta \approx tan\ \theta$.

5) Usando os resultados para as fendas **D** na Tabela 12.1, faça um gráfico representando ordem dos mínimos (*n)* no eixo horizontal e a distância entre os mínimos e o eixo central

(y) no eixo vertical. Qual o significado físico dos coeficientes deste gráfico ?

6) Ajuste uma reta aos pontos medidos e determine a sua equação.

7) A partir deste resultado calcule a separação das fendas **D**.

8) Compare este valor obtido experimentalmente com o nominal (*) citado na Tabela 12.1.

9) Pergunte ao professor qual deveria ser o valor da largura desta fenda.

10) Repita os passos anteriores para as fenda **E** e **F**.

Até aqui foi possível determinar a separação das fendas, sendo conhecido o comprimento de onda da luz monocromática da fonte. Um procedimento semelhante pode ser utilizado para determinar o comprimento de onda de uma nova fonte monocromática, sendo conhecida com precisão a separação entre as fendas.

11) Utilizando as medidas para o par de fendas **D** com o laser de cor verde, faça um gráfico e ajuste uma reta, determinando seus coeficientes.

12) Com estes coeficientes e com a separação entre as fendas calculada no item 7, determine o comprimento de onda da luz desta fonte.

13) Compare este resultado com o valor nominal. Discuta as possíveis discrepâncias.

EXPERIMENTO 13

13.1: Luz, Cor e Rede de Difração

Este experimento está dividido em duas partes. Na primeira parte estuda-se o experimento de Luz e Cor e na segunda o experimento de Rede de Difração.

1ª PARTE – LUZ E COR:

1 EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS:

Trilho graduado, suporte, fenda múltipla (*Slit Plate*), lente cilíndrica (*Cylindrical Lens*), filtros de cores, disco graduado e sua base (*Ray Table Degree Scale*), suporte para fixar no disco graduado, fenda única (*Slit Mask*), acessório anteparo (*Viewing Screen*).

2 INTRODUÇÃO:

Muito cedo os pesquisadores assumiram que a luz, na sua forma mais pura, simplesmente fosse branca, e que os materiais refrativos alterassem as características da luz branca para criar várias cores. Isaac Newton foi o primeiro a mostrar que a luz, na sua forma mais simples, é colorida, e que materiais refrativos meramente separam as várias cores que são componentes naturais da luz branca. Ele utilizou esta ideia para explicar as cores dos objetos.

3 AS CORES DA LUZ:

Monte o equipamento como mostrado na Figura 13.1. Utilizando a placa de fendas múltiplas e a placa de fenda única, obtenha um único feixe de luz passando pelo centro do *disco graduado*. Gire lentamente o *disco* para aumentar o ângulo de incidência do raio de luz. Examine o raio refratado no *anteparo*. Note que a separação de cores fica mais evidente para grandes ângulos de refração.

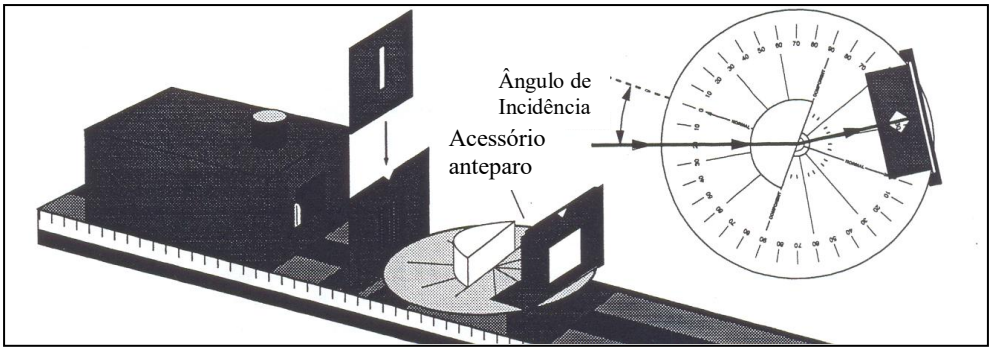


FIGURA 13.1 – Montagem para a experimento de dispersão da luz.

- Suas observações apoiam a teoria de Newton? Explique.

4 PROCESSO ADITIVO: a seguir monte o equipamento como mostrado na Figura 13.2.

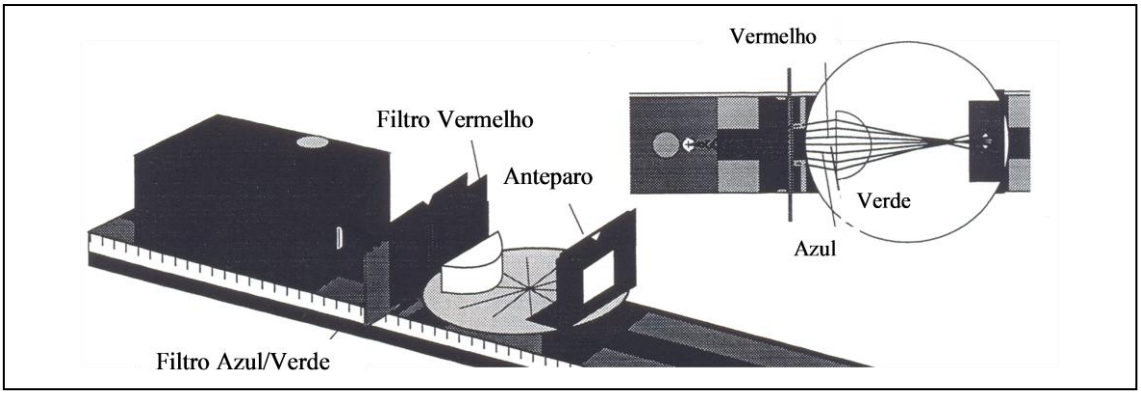


FIGURA 13.2 – Montagem para a experimento de composição da luz no processo aditivo.

- Utilize a placa de fendas múltiplas e os filtros de cor. Ajuste a *lente cilíndrica* de forma que os três feixes de luz centrais (um vermelho, um verde e um azul) se interceptem com precisão no mesmo ponto sobre o *disco graduado*. Utilize as peças da abertura variável ou outras placas para garantir que apenas os três feixes centrais atinjam a lente.
- Mova o anteparo lentamente na direção deste ponto de intersecção (você terá que movê-lo sobre o *disco graduado*). Posicione o anteparo precisamente no ponto de intersecção.
- Qual a cor da luz que resulta quando os raios vermelho, verde e azul estão misturados? Como isto apoia a teoria de Newton?

→Utilize a placa de fenda única de modo que apenas dois feixes atinjam a lente. Utilizando filtros, produza um feixe azul e outro vermelho. Qual cor se forma no ponto de intersecção? Agora combine um feixe azul e um verde. Verifique a cor resultante. Combine também um feixe verde e um vermelho. Que cor é observada na intersecção? Anote suas observações na Tabela 13.1.

Tabela 13.1 - Cores resultantes no processo aditivo

CORES DOS FEIXES INCIDENTES	COR RESULTANTE OBSERVADA
Vermelho + Verde + Azul	_____
Azul + Vermelho	_____
Azul + Verde	_____
Verde + Vermelho	_____

→Experimente a adição de feixes de cores complementares, utilizando os filtros indicados na Tabela 13.2. Qual cor se forma no ponto de intersecção? Anote suas observações na tabela.

Tabela 13.2 - Cores resultantes no processo aditivo

CORES DOS FEIXES INCIDENTES	COR RESULTANTE OBSERVADA
Azul + Amarelo	_____
Vermelho + Ciano	_____
Verde + Magenta	_____

→ Retire a placa de fendas múltiplas, obtendo feixes largos das cores dos filtros. Utilize só os raios paraxiais para minimizar a aberração cilíndrica ou esférica. Faça a mesma análise dos itens anteriores, adicionando inicialmente as três cores, e depois adicionando duas a duas nas combinações possíveis.

5 PROCESSO SUBTRATIVO:

- Monte o equipamento como mostrado na Figura 13.3. Observe os raios de luz que são transmitidos e refletidos pelo *filtro verde*. Se necessário, utilize um anteparo para facilitar a visualização dos feixes refletido e transmitido.

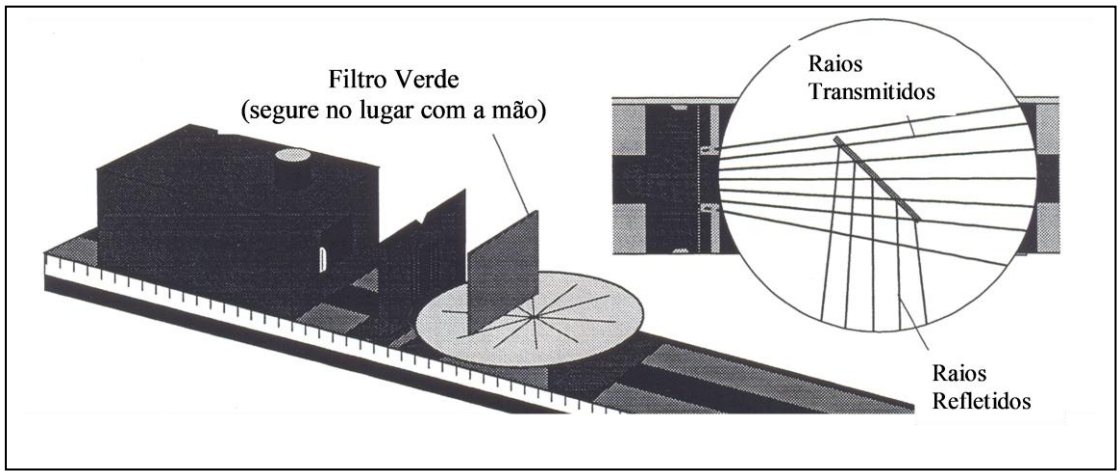


FIGURA 13.3 – Montagem para estudar as cores dos objetos e o processo subtrativo.

1) Qual a cor dos raios transmitidos? Qual a cor dos raios refletidos?

FILTRO VERDE: Transmitido: _____ Refletido: _____

- Coloque *o filtro vermelho* atrás do *filtro verde* (assim a luz passa primeiro pelo *filtro verde* e em seguida pelo *filtro vermelho*).

2) Qual a cor dos raios transmitidos pelo filtro verde? E dos raios refletidos? Quais raios são transmitidos pelo *filtro vermelho*, e quais são refletidos por sua superfície frontal?

FILTRO VERDE: Transmitido: _____ Refletido: _____

FILTRO VERMELHO: Transmitido: _____ Refletido: _____

- Troque a sequência dos filtros verde e vermelho e repita a análise.

FILTRO VERMELHO: Transmitido: _____ Refletido: _____

FILTRO VERDE: Transmitido: _____ Refletido: _____

- Coloque o *filtro azul* num suporte sobre o trilho logo após a abertura da *fonte de luz*, de forma que os raios incidentes sejam azuis.

3) Quais as cores dos raios transmitidos e refletidos pelo *filtro verde*?

FILTRO VERDE: Transmitido: _____ Refletido: _____

4) Baseado nas suas observações, o que faz o *filtro verde* parecer verde?

2ª PARTE – REDE DE DIFRAÇÃO:

1 EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS:

Trilho graduado, disco graduado e sua base (*Ray Table Degree Scale*), escala de difração (*Diffraction Scale*), rede de difração (*Diffraction Grating*), filtros de cor, fonte de luz, suporte, fenda única (*Slit Mask*).

2 INTRODUÇÃO:

As redes de difração são usadas para realizar medidas muito precisas do comprimento de onda da luz. Teoricamente, elas funcionam como aberturas de duas fendas (veja a experimento sobre interferência em fenda dupla). Porém, uma rede de difração tem muitas fendas, ao invés de duas, e as fendas têm um espaçamento muito pequeno. Usando estas fendas muito próximas, a luz é difratada em ângulos grandes e podem ser feitas medidas precisas. Difratando a luz em ângulos grandes ocorre uma perda de brilho. Usando muitas fendas próximas entre si ocorre uma soma de efeitos e o brilho é aumentado.
Neste experimento você utilizará uma rede de difração para determinar o intervalo de comprimentos de onda para cada cor do espectro visível.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL:

Monte os equipamentos como mostrado na Figura 13.4 com a rede de difração.

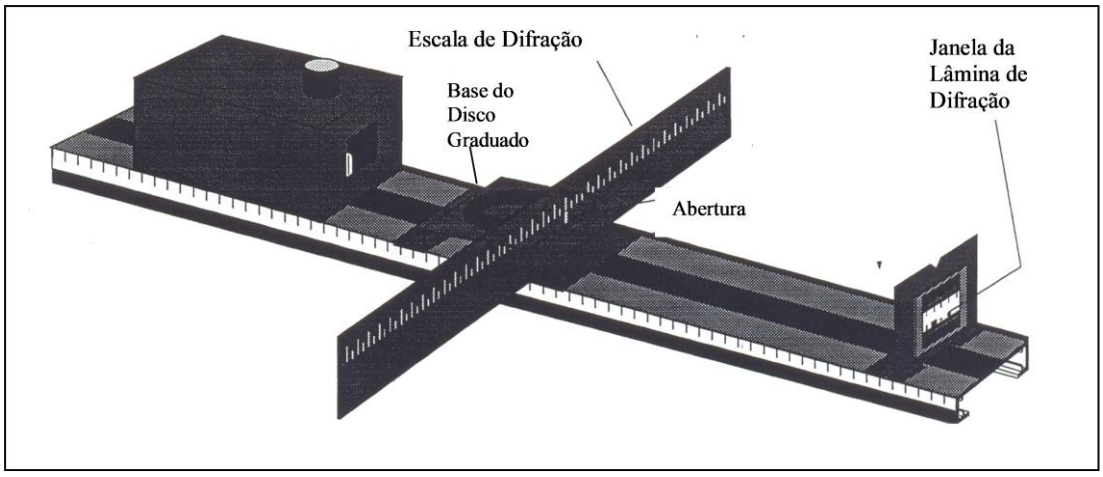


FIGURA 13.4 – Montagem do sistema com a rede de difração.

NOTA: Quando olhar através da *rede de difração* evite olhar diretamente para o filamento. Em vez disso, olhe para a posição na *escala de difração*, aproximadamente 4 a 5 cm a direita ou a esquerda da fenda na *escala*.

- Observe inicialmente o espectro contínuo da luz emitida pela lâmpada incandescente.
- Coloque filtros de cor antes da rede de difração e observe quais faixas do espectro foram absorvidas e quais foram transmitidas. Há regiões escuras? Como isso é explicado?
- Retire os filtros de cor para fazer a análise quantitativa da luz da fonte a seguir.

- Use a Figura 13.5 para identificar as variáveis e preencha os dados da Tabela 13.3. Reveja a experimento sobre interferência em fenda dupla, se necessário, para verificar os cálculos necessários para determinar λ_1 e λ_2, que definem o intervalo de comprimentos de onda para cada cor.

TABELA 13.3 – Valores medidos para as cores principais.

	Dados				Cálculos			
COR	A ( )	L ( )	X_1 ( )	X_2 ( )	θ_1 ( )	θ_2 ( )	λ_1 ( )	λ_2 ( )
Violeta			_____	_____	_____	_____	_____	_____
Azul			_____	_____	_____	_____	_____	_____
Verde			_____	_____	_____	_____	_____	_____
Amarelo	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____
Laranja			_____	_____	_____	_____	_____	_____
Vermelho			_____	_____	_____	_____	_____	_____

4 ANÁLISE DE RESULTADOS:

- A distância A entre fendas adjacentes é calculada a partir do número de linhas/cm ou linhas/mm da rede de difração. A grandeza A é chamada *constante da rede* ou *parâmetro da rede*.
- Para uma rede de difração, a posição dos *máximos* deve satisfazer a equação
$$A\,sin\theta = n\,\lambda\,,$$
onde $n = 1,2,\ldots$ Nesta aula será utilizado apenas o máximo de primeira ordem, por isso foi aplicado $n = 1$ na equação da Figura 13.5.
- Considerando-se os valores de X e L nesta montagem, observa-se que o ângulo θ pode assumir valores grandes. Assim, é necessário calcular $\tan\theta = \dfrac{X}{L}$ e, isolando-se θ, aplicar na equação $A\,\sin\theta = n\lambda$, resultando em $\lambda = A\sin\left(\arctan\dfrac{X}{L}\right)$.

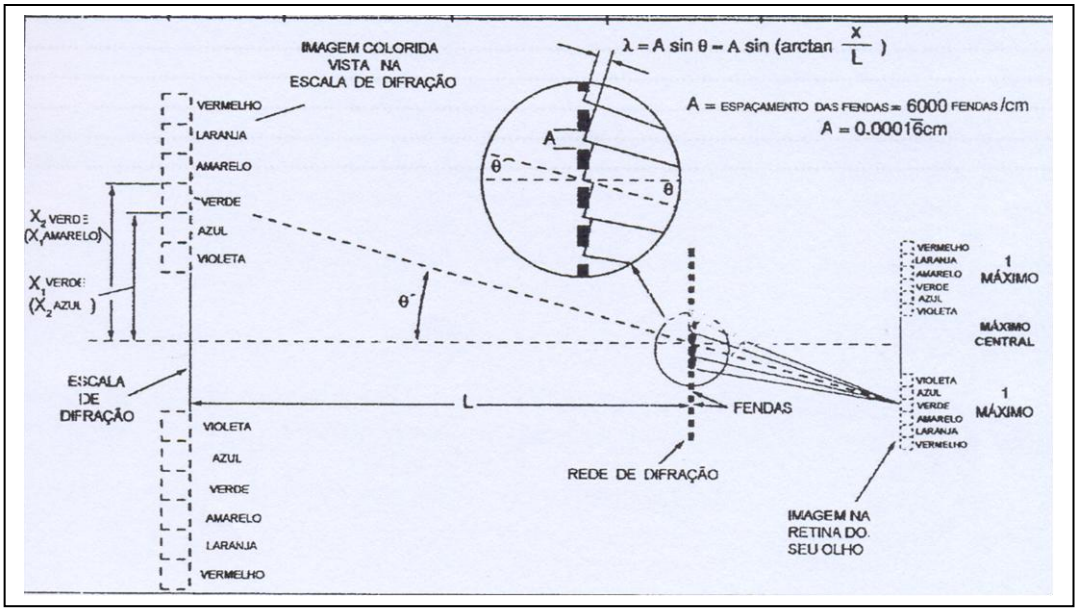


FIGURA 13.5 – Detalhes geométricos para a análise da rede de difração.

Compare seus resultados com os de outras equipes e com valores tabelados em livros de óptica.

1) Os seus resultados estão de acordo? Você pode explicar as diferenças?

2) Qual a vantagem em usar comprimentos de onda invés de cor para caracterizar a luz visível?

EXPERIÊNCIA 14

14.1: Utilização do Espectrofotômetro

1 MATERIAL UTILIZADO:

Espectrofotômetro, suporte, filtros, polarizadores.

2 OBJETIVOS:

- Utilizar adequadamente o espectrofotômetro.
- Medir o espectro de absorção do polarizador e dos filtros de cores.
- Medir o espectro de absorção dos polarizadores com eixos de polarização perpendiculares entre si.

3 INTRODUÇÃO:

O espectrofotômetro é um instrumento analítico utilizado para realizar análises quantitativas e qualitativas de amostras. Comumente empregado em laboratórios físico-químicos para exames clínicos e bioquímicos, no controle de qualidade, na indústria petroquímica e proteção ambiental, este equipamento é composto por 5 partes:

a. Lâmpadas de halogêneo ou de deutério para fornecer a luz;
b. Um Monocromador para isolar o comprimento de onda de interesse e eliminar a radiação indesejada de segunda ordem;
c. Um compartimento para acomodar a amostra;
d. Um detector para receber a luz transmitida e convertê-la em sinal elétrico;
e. Um visor digital para indicar absorbância ou transmitância.

O diagrama abaixo (Figura 01) ilustra a relação entre essas partes.



Figura 14.1 – Diagrama relacional dos componentes do espectrofotômetro.

No espectrofotômetro, a luz da lâmpada é focada na fenda de entrada do monocromador, onde o espelho de colima ao direciona o feixe para a grade. A grade dispersa o feixe de luz para produzir o espectro, uma parte da qual é focada na fenda de saída do monocromador por um espelho de colimação. O feixe passa para o compartimento de amostra através de um dos filtros, o que ajuda a eliminar a radiação indesejada de segunda ordem da grade de difração. Ao sair do compartimento de amostra, o feixe é direcionado para o detector de fotodiodo de silício e faz com que o detector produza um sinal elétrico que é exibido no visor digital.

4 DESCRIÇÕES DAS TECLAS E MÉTODOS DE OPERAÇÃO:

As teclas disponíveis no equipamento estão exibidas na Figura 14.2 e suas funções descritas a seguir:



Figura 14.2 – Teclas e display do equipamento.

MODE - Selecionar o modo de leitura: Transmitância (T), Absorbância (A), Concentração e Fator (F).
* Utilizaremos somente o modo Absorbância (A).

ENTER - Para ser utilizada em porta paralela para transmissão de dados (uma maneira de transmissão do equipamento para a impressora).

▲ 0%T - Para definir o "Zero" (*Get Dark Current*). É eficaz apenas no modo Transmitância.

▼ 0ABS/100%T - Quando no modo Absorbância ou Transmitância, feche o compartimento da amostra vazio, pressione a tecla e mostrará 0.000 (A) ou 100.0 (T).

5 PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS:

1. VERIFIQUE A TENSÃO DO EQUIPAMENTO;
2. Ligue o instrumento em uma tomada com aterramento;
3. Deixe o equipamento aquecer durante 20 minutos;
4. O comprimento de onda desejado pode ser selecionado com o botão, girando-o até o valor desejado;



Figura 14.3 – Seletor de comprimentos de onda.

5. Pressione a tecla **MODE** para alternar entre os modos A / T / C / F. Selecione o modo A.
6. Abra o compartimento de amostras;

a) b)

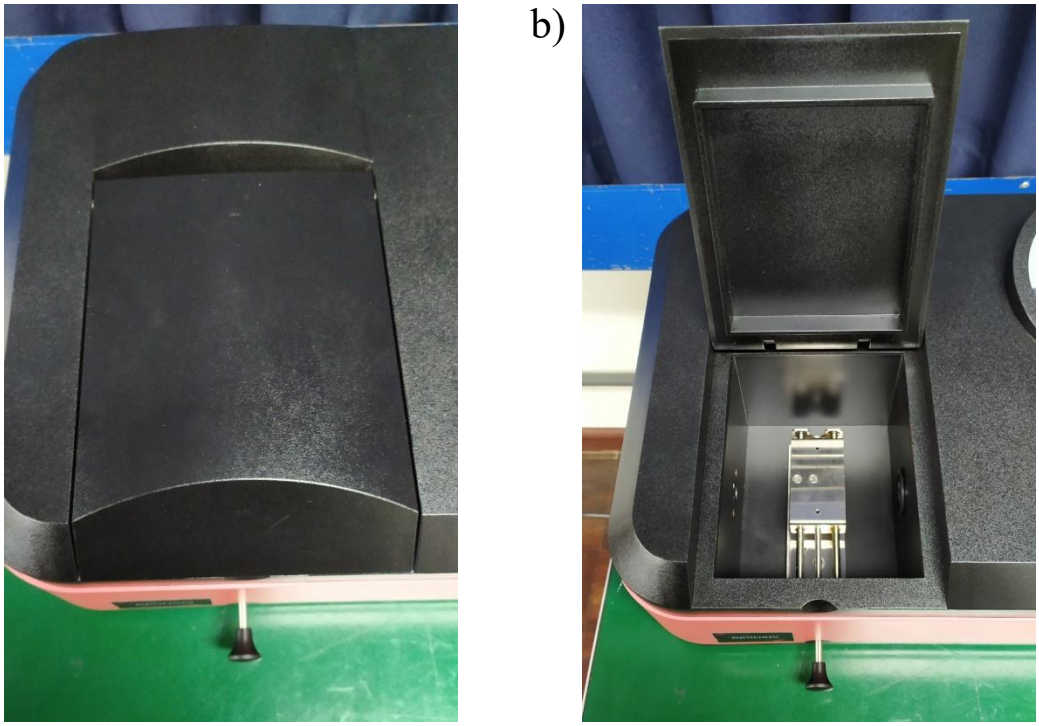


Figura 14.4 – Compartimento de amostras a) fechado e b) aberto.

7. Insira o polarizador com o suporte para o disco graduado. Posicione-o de modo a ficar no caminho do feixe de luz entre fonte e detector;

a) b)

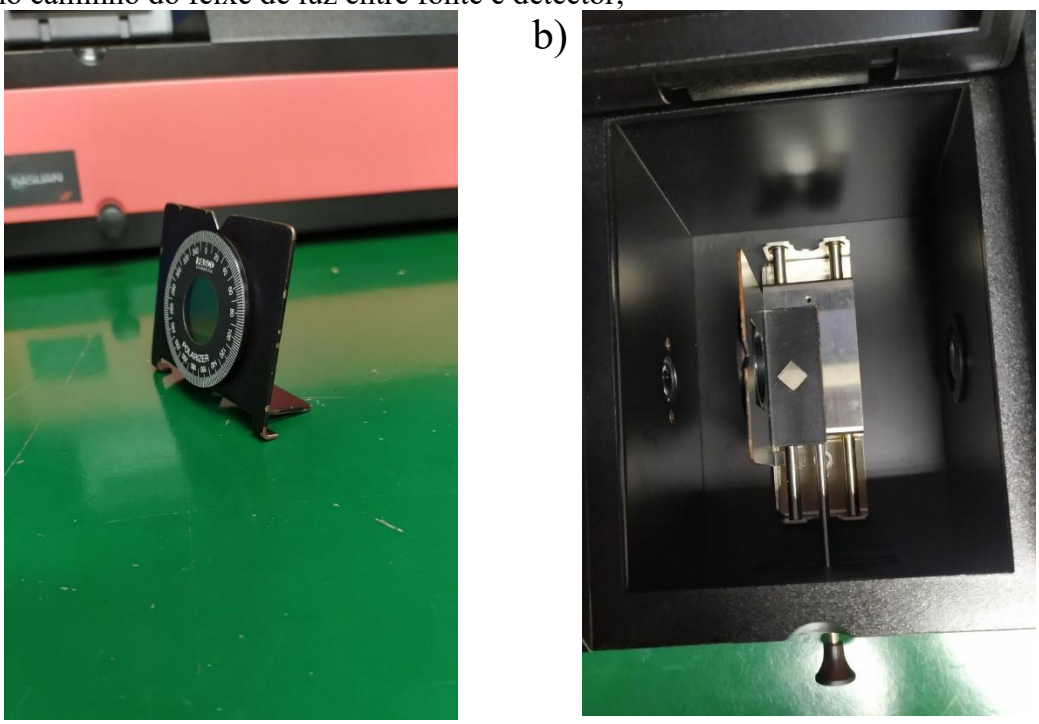


Figura 14.5 – a) Polarizador no suporte para disco graduado e b) posicionamento correto no espectrofotômetro.

8. Feche o compartimento de amostras.
9. Selecione os comprimentos de onda da Tabela 14.1 e, para cada um, anote o valor medido da Absorbância;

* DICA: anote as medidas diretamente no computador (LibreOffice, Excel, SciDavis, etc.)

10. Ao finalizar as medidas, abra o compartimento de amostras e troque o polarizador pelo filtro de cor azul;

a) b)

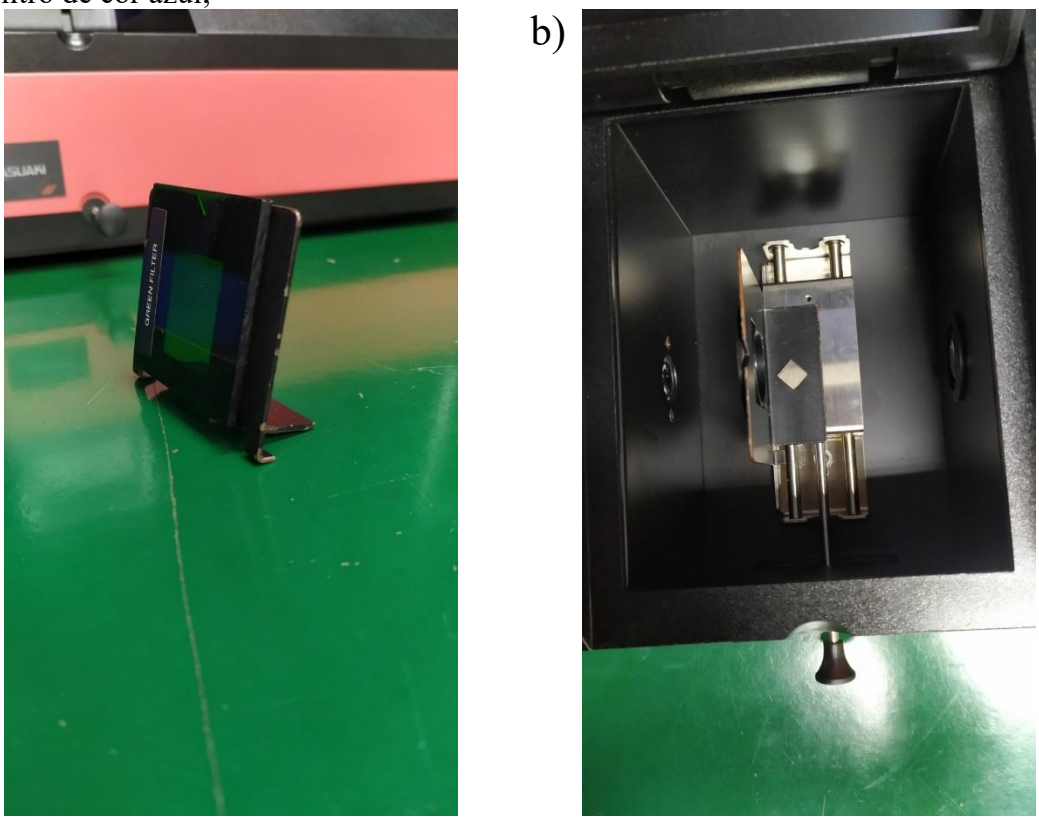


Figura 14.6 – a) Filtro de cor no suporte para disco graduado e b) posicionamento correto no espectrofotômetro.

11. Ao finalizar as medidas, abra o compartimento de amostras e troque o filtro de cor azul pelo filtro de cor verde;
12. Ao finalizar as medidas, abra o compartimento de amostras e troque o filtro de cor verde pelo filtro de cor vermelho.

Tabela 14.1 – Valores medidos para os espectros do polarizador e dos filtros de cores.

N	λ (nm)	Polarizador	Filtro Azul	Filtro Verde	Filtro Vermelho
1	330				
2	340				
3	350				
4	360				
5	370				
6	380				
7	390				
8	400				
9	410				
10	420				
11	430				
12	440				
13	450				

14	460				
15	470				
16	480				
17	490				
18	500				
19	510				
20	520				
21	530				
22	540				
23	550				
24	560				
25	570				
26	580				
27	590				
28	600				
29	610				
30	620				
31	630				
32	640				
33	650				
34	660				
35	670				
36	680				
37	690				
38	700				
39	710				
40	720				
41	730				
42	740				
43	750				
44	760				
45	770				
46	780				
47	790				
48	800				
49	810				
50	820				
51	830				
52	840				
53	850				
54	860				
55	870				
56	880				

57	890				
58	900				
59	910				
60	920				
61	930				
62	940				
63	950				
64	960				
65	970				
66	980				
67	990				
68	1000				

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS:

1) Faça o gráfico da Absorbância em função do comprimento de onda para o polarizador. O polarizador pode ser considerado ideal? Sob que condições?

2) Relacione o espectro obtido do polarizador com o resultado da Lei de Malus para ambas as fontes de luz: incandescente e LED.

3) Faça o gráfico da Absorbância em função do comprimento de onda para os filtros de cores. Os filtros de cores podem ser considerados ideais? Sob que condições?

4) Quais intervalos do espectro visível cada filtro de cor absorve? Considerando os espectros obtidos, ao juntar os três filtros de cores, o que se obtém?

* Procedimento de calibração para um único comprimento de onda. (OPCIONAL)

1. Para obter o valor mínimo de Transmitância (máxima Absorbância), pressione a tecla **MODE** até alterar para o modo T.
2. Abra o compartimento de amostras;
3. Insira a cubeta preta no espaço do suporte. Posicione-a de modo a ficar no caminho do feixe de luz entre fonte e detector;
4. Feche o compartimento de amostras;
5. Pressione a tecla **▲ 0%T** para "zerar" a Transmitância;

O VALOR EXIBIDO NO VISOR DEVERÁ SER 0.0

6. Pressione a tecla **MODE** para acessar o modo Absorbância (A);

O VALOR EXIBIDO NO VISOR DEVERÁ SER 100.0

7. Abra o compartimento de amostras;
8. Retire a cubeta preta do espaço do suporte e deixe-o vazio, de modo a ler a mínima Absorbância;
9. Pressione a tecla **▼ 0ABS/100%T** para "zerar" a Absorbância;
10. Abra o compartimento de amostras;
11. Insira o polarizador com o suporte para o disco graduado. Posicione-o de modo a ficar no caminho do feixe de luz entre fonte e detector;
12. Anote o valor de Absorbância.