

Adriano António da Luz Sampaio e Sousa

Experiências Demonstrativas de Óptica

Volume II



Departamento de Física
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
Junho de 1999

Adriano António da Luz Sampaio e Sousa

Experiências Demonstrativas de Óptica

Volume II



*Dissertação submetida à Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
para obtenção do grau de Mestre em Física para o Ensino*

Departamento de Física
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
Junho de 1999

2ª PARTE

ÍNDICE DE EXPERIÊNCIAS

2ª parte

EXP. 2A - A luz preenche o espaço ?	178
EXP. 2B - Interação de dois feixes luminosos	179
EXP. 2C - Interação da luz com a matéria	180
EXP. 3A - Variação da intensidade luminosa de uma fonte de luz com a tensão aplicada	182
EXP. 3B - Comparação de uma fonte de luz pontual com uma fonte extensa	184
EXP. 4A - Propagação da luz num meio óptico	186
EXP. 4B - Propagação da luz de um meio óptico para outro	188
EXP. 4C - Sombra e penumbra	190
EXP. 4D - Determinação da velocidade de propagação da luz	191
EXP. 5A - A luz transporta energia ?	193
EXP. 5B - Lei do inverso do quadrado das distâncias	194
EXP. 5C - Comparação de intensidades luminosas	196
EXP. 5D - Fração da luz incidente transmitida por uma placa de um material transparente	199
EXP. 6A - Arco-íris	201
EXP. 6B - Dispersão da luz por um prisma	202
EXP. 6C - Variação com a temperatura de um espectro de emissão por incandescência	204
EXP. 6D - Espectros de emissão obtidos por descargas eléctricas em gases rarefeitos	206
EXP. 6E - Espalhamento de Rayleigh	208
EXP. 7A - Adição de cores	210
EXP. 7B - Subtracção de cores	212
EXP. 8A - Leis da reflexão	214
EXP. 8B - Reflexão especular e difusa	216
EXP. 9A - Tipos de espelhos	217
EXP. 9B - Localização da imagem dada por um espelho	218
EXP. 9C - Construção de imagens num espelho plano	219
EXP. 9D - Multiplicidade de imagens dadas por dois espelhos planos	221
EXP. 9E - Características das imagens dadas pelos espelhos curvos	223
EXP. 9F - Determinação da distância focal de um espelho côncavo, localizando o foco	225
EXP. 9G - Determinação da distância focal de um espelho côncavo com o esferómetro	226
EXP. 9H - Determinação da distância focal de um espelho côncavo, pelo método de coincidência da imagem e objecto	228
EXP. 9I - Determinação da distância focal de um espelho côncavo, pelo método dos focos conjugados	231

<i>EXP. 9J</i> - Verificação da equação de Newton para um espelho côncavo	235
<i>EXP. 9K</i> - Determinação da distância focal de um espelho convexo com o esferómetro	237
<i>EXP. 9L</i> - Determinação da distância focal de um espelho convexo usando uma lente convexa	239
<i>EXP. 9M</i> - Determinação da distância focal de um espelho convexo usando um espelho plano	241
<i>EXP. 10A</i> - Leis da refração	243
<i>EXP. 10B</i> - Visibilidade e invisibilidade	245
<i>EXP. 10C</i> - Determinação do índice de refração de um líquido transparente, usando um espelho côncavo	246
<i>EXP. 10D</i> - Determinação do índice de refração de um meio transparente, pelo método da profundidade aparente	248
<i>EXP. 10E</i> - Determinação do índice de refração de um líquido transparente, pelo método da lente líquida	251
<i>EXP. 10F</i> - Determinação do índice de refração do vidro de uma lâmina de faces paralelas	253
<i>EXP. 10G</i> - Determinação do índice de refração do vidro de um prisma pelo método do desvio mínimo	255
<i>EXP. 10H</i> - Determinação do índice de refração de um líquido transparente, pelo método de Searle	257
<i>EXP. 10I</i> - Determinação do índice de refração de um material transparente, com o refractómetro de Abbe	259
<i>EXP. 11A</i> - Estudo da reflexão interna total com o tanque de refração de Nakamura	262
<i>EXP. 11B</i> - Reflexão interna total num prisma	264
<i>EXP. 11C</i> - Reflexão interna total com objectos do quotidiano	266
<i>EXP. 12A</i> - Tipos de lentes	268
<i>EXP. 12B</i> - Características das imagens produzidas pelas lentes	269
<i>EXP. 12C</i> - Determinação da distância focal de uma lente convexa, por localização directa do foco principal	271
<i>EXP. 12D</i> - Determinação da distância focal de uma lente convexa, usando um espelho plano	272
<i>EXP. 12E</i> - Determinação da distância focal de uma lente convexa, pelo método dos focos conjugados	275
<i>EXP. 12F</i> - Determinação da distância focal de uma lente convexa, pelo método do deslocamento (ou de Bessel)	279
<i>EXP. 12G</i> - Determinação da distância focal de uma lente convexa, através do gráfico da distância objecto-imagem em função da distância do objecto à lente	282
<i>EXP. 12H</i> - Determinação da distância focal de uma lente convexa, pelo método da ampliação	285
<i>EXP. 12I</i> - Verificação da equação de Newton para uma lente convexa	287
<i>EXP. 12J</i> - Estudo da relação entre a distância focal de uma associação de duas lentes delgadas em contacto, e as respectivas distâncias focais	289

<i>EXP. 12K</i> - Determinação da distância focal de uma lente côncava, usando uma lente convexa (método das lentes coladas)	290
<i>EXP. 12L</i> - Determinação da distância focal de uma lente côncava, usando um espelho côncavo	292
<i>EXP. 12M</i> - Determinação do raio de curvatura das faces de uma lente (método de Boys)	294
<i>EXP. 12N</i> - Estudo do efeito da abertura na luminosidade da imagem e na profundidade de campo	297
<i>EXP. 12O</i> - Estudo das aberrações de uma lente esférica	299
<i>EXP. 13A</i> - Demonstração do funcionamento do microscópio	301
<i>EXP. 13B</i> - Demonstração do funcionamento do telescópio	305
<i>EXP. 13C</i> - Estudo do poder resolvente de um telescópio	309
<i>EXP. 14A</i> - Modelo do olho humano	311
<i>EXP. 14B</i> - Ponto cego	313
<i>EXP. 14C</i> - Características da imagem formada na retina	314
<i>EXP. 14D</i> - Demonstração do poder resolvente do olho	316
<i>EXP. 14E</i> - Demonstração do efeito de persistência de visão com o disco de Newton	317
<i>EXP. 14F</i> - Demonstração do efeito de ilusão de cor com o disco de Benham	318
<i>EXP. 14G</i> - Demonstração do efeito de Purkinge	320
<i>EXP. 14H</i> - Demonstração do efeito de Pulfrich	321
<i>EXP. 15A</i> - Demonstração da polarização por absorção	323
<i>EXP. 15B</i> - Verificação da Lei de Malus	325
<i>EXP. 15C</i> - Demonstração da polarização por reflexão	327
<i>EXP. 15D</i> - Demonstração da polarização por dupla refração	328
<i>EXP. 15E</i> - Determinação do poder rotatório específico de uma substância opticamente activa	329
<i>EXP. 16A</i> - Observação de padrões de difração	332
<i>EXP. 16B</i> - Determinação do comprimento de onda de um laser usando uma fenda de abertura conhecida	334
<i>EXP. 16C</i> - Determinação da espessura de um cabelo e do diâmetro de uma célula de sangue, conhecido o comprimento de onda do laser	336
<i>EXP. 16D</i> - Estudo da interferência e difração usando uma fenda dupla	339
<i>EXP. 16E</i> - Comparação dos padrões de difração e interferência para fendas múltiplas	342
<i>EXP. 16F</i> - Influência da frequência da luz na interferência	344
<i>EXP. 16G</i> - Interferômetro de Michelson	345

EXPERIÊNCIA 2A - A luz preenche o espaço ?

Equipamento utilizado

- caixa de cartão
- fonte de luz (feixe delgado de raios paralelos)
- alvo
- tesoura

Objectivo

Observar o comportamento de um feixe de luz que atravessa um espaço obscuro.

Procedimento

- 1) Com a tesoura efectue um pequeno orifício ($d < 0,5$ cm) no centro de cada uma das duas faces laterais menores da caixa.
- 2) Efectue também um orifício maior na tampa da caixa, de modo a poder observar o seu interior.
- 3) Posicione o alvo em frente a um dos orifícios pequenos (A).
- 4) Com a sala obscurecida, faça incidir um feixe delgado de luz através do outro orifício pequeno (B), de modo a penetrar na caixa e sair pelo orifício (A) incidindo no alvo. Ver figura 2A.1.

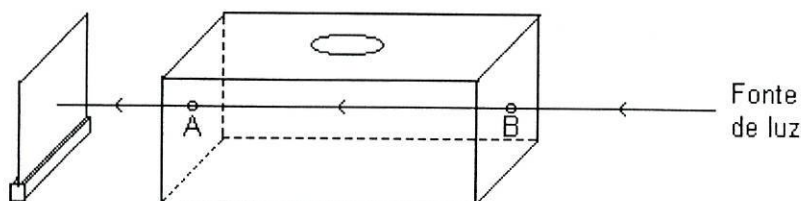


Figura 2A.1. Esquema de montagem

- 5) Observe o interior da caixa através do orifício maior. Compare a sua iluminação com aquela que pode ver no alvo. Responda agora à questão: a luz preenche totalmente o espaço onde penetra ?

EXPERIÊNCIA 2B - Interação de dois feixes luminosos

Equipamento utilizado

- duas fontes de luz (feixe delgado de raios paralelos)
- folha de papel branco
- laser
- fenda dupla
- alvo

Objectivo

Observar o comportamento de dois feixes de luz que se intersectam.

Procedimento

- 1) Na obscuridade, faça incidir os feixes luminosos das duas fontes obliquamente um em relação ao outro, no plano do papel, de modo a intersectarem-se. Os dois feixes mudam de direcção após a sua interacção ?
- 2) Faça incidir o laser sobre o alvo, de modo a atravessar a fenda dupla. Observe as zonas alternadamente escuras e iluminadas que se formaram no alvo.⁴⁸

Os comportamentos observados poderiam ser explicados por um modelo mecânico da luz, supondo-a formada por pequenas partículas materiais ?

⁴⁸ Esta demonstração representa uma antecipação qualitativa à EXP. 16D.

EXPERIÊNCIA 2C - Interação da luz com a matéria

Equipamento utilizado

- electoscópio de folhas (ou electrómetro) e placa de zinco
- lâmpada de U.V.
- varetas de ebonite e vidro
- pano de lã
- lâmina de acrílico transparente
- lâmpadas monocromáticas de várias frequências (se possível)
- aquecedores eléctricos (se necessário)

Objectivo

Estudar a interacção da luz com a matéria (efeito fotoeléctrico).

Procedimento

- 1) Assegure-se que o ar da sala se encontra suficientemente seco. Se necessário, utilize aquecedores eléctricos. Caso a iluminação da sala seja feita por lâmpadas de fluorescência, desligue-as.
- 2) Friccione a vareta de ebonite com o pano de lã, de modo a carregá-la negativamente. Em seguida, carregue o electoscópio, por contacto. Observe as folhas.
- 3) Ilumine imediatamente a placa de zinco com a lâmpada de U.V. Ver figura 2C.1. O que sucede às folhas ?

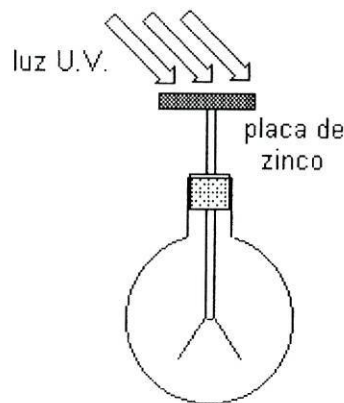


Figura 2C.1. Montagem utilizada

- 4) Descarregue completamente o electroscópio, tocando na placa de zinco.
- 5) Friccione agora a vareta de vidro com o pano de lã, de modo a carregá-la positivamente. Carregue o electroscópio, por contacto. Observe as folhas.
- 6) Ilumine imediatamente a placa de zinco com a lâmpada de U.V. Observa-se alguma alteração nas folhas ?
- 7) Descarregue o electroscópio.
- 8) Repita o procedimento descrito em 2) e 3), mas interponha a lâmina de acrílico entre a lâmpada de U.V. e a placa de zinco. Observa-se alguma alteração nas folhas ?
- 9) Procure interpretar o efeito da luz U.V. sobre a placa de zinco.
- 10) Experimente com luz de frequências inferiores. Verifica-se algum efeito, mesmo aumentando o tempo de exposição luminosa ?

Os comportamentos observados poderiam ser explicados por um modelo exclusivamente ondulatório da luz ?

EXPERIÊNCIA 3A - Variação da intensidade luminosa de uma fonte de luz com a tensão aplicada

Equipamento utilizado

- lâmpada de incandescência de 12 V
- LED
- fonte de tensão variável (até 12 V)
- fios de ligação
- resistência eléctrica ($\approx 200 \Omega$) para protecção do LED
- fotómetro eléctrico (em alternativa, ver anexo, na pág. 183)

Objectivo

Estudar a variação da intensidade luminosa, de uma lâmpada de incandescência e de um LED, com a tensão aplicada.

Procedimento

- 1) Ligue a lâmpada de incandescência à fonte de tensão variável. Coloque o fotómetro a uma distância de cerca de 10 cm desta. A comparação de intensidades luminosas será efectuada por comparação da iluminação obtida no fotómetro.
- 2) Apague todas as luzes da sala. Variando a tensão da fonte, desde o mínimo valor para o qual a lâmpada acende, até 12 V, efectue leituras de pares de valores (tensão, iluminação). Realize pelo menos dez ensaios. Se o painel do fotómetro não for iluminado, necessitará de uma pequena lanterna que lhe permita efectuar as leituras, tomando as necessárias precauções para que esta não interfira nos valores obtidos.
- 3) Represente graficamente $E = f(V)$.
- 4) Repita o procedimento descrito anteriormente, usando o LED.⁴⁹
- 5) Compare a forma dos dois gráficos obtidos.

⁴⁹ Tenha o cuidado de proteger o LED, mantendo a intensidade da corrente inferior a 30 mA, através do uso de uma resistência eléctrica adequada.

ANEXO**Construa o seu próprio detector !**

1. Efectue a montagem do circuito esquematizado na figura 3A.1.

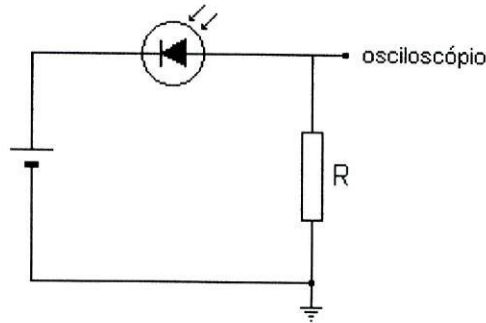


Figura 3A.1. Esquema do circuito

Utilize um fotodíodo BPW34 e uma resistência R de valor elevado ($\approx 1 \text{ M}\Omega$) de modo a que o osciloscópio assinale variações mensuráveis para valores reduzidos de intensidade luminosa. O gerador poderá ser ou não uma pilha, mas não deverá ultrapassar os 15 V.

2. Tome em atenção que as diferenças de potencial lidas na escala do osciloscópio são directamente proporcionais às intensidades de iluminação (E) do fotodíodo. Assim, embora o detector não lhe permita obter valores absolutos de E , é perfeitamente adequado para efectuar comparações.

EXPERIÊNCIA 3B - Comparação de uma fonte de luz pontual com uma fonte extensa

Equipamento utilizado

- caixa de cartão
- estilete metálico
- vidro fosco
- papel de estanho
- tesoura
- lâmpada eléctrica de filamento, com suporte (220 V)

Objectivo

Comparar uma fonte de luz pontual com uma fonte objecto.

Procedimento

- 1) Construa uma câmara escura com a caixa de cartão (ver figura 3B.1)
 - (a) Recorte um quadrado numa das faces laterais menores, e adapte o vidro fosco, que servirá de alvo, onde se formarão as imagens.
 - (b) Na face oposta recorte um círculo com cerca de 3 cm de diâmetro. Sobre ele cole um quadrado de papel de estanho com cerca de 5 cm de lado.
- 2) No centro do quadrado de papel de estanho faça um orifício com o estilete metálico.

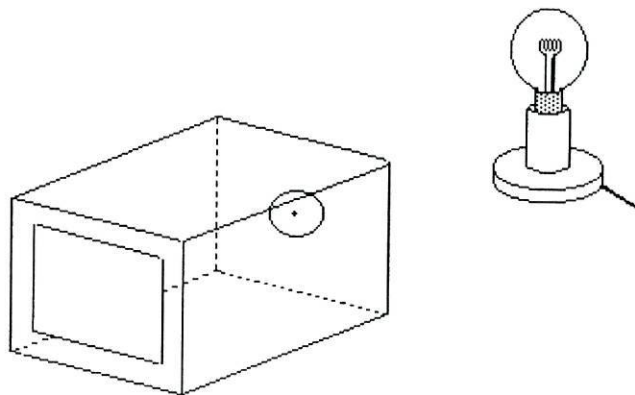


Figura 3B.1. Câmara escura

- 3) Com a sala obscurecida, acenda a lâmpada e coloque-a em frente à câmara escura, a uma distância conveniente, de modo a obter uma imagem focada do filamento da lâmpada.
- 4) Amplie o orifício do papel de estanho e repita a observação. Que diferença nota ?
- 5) Faça vários orifícios no papel. O que observa agora ?
- 6) Efectue o máximo número possível de orifícios no papel e observe. O que pode concluir ?

EXPERIÊNCIA 4A - Propagação da luz num meio óptico**Equipamento utilizado**

- tina de vidro de secção rectangular ($\ell > 50$ cm)
- funil de plástico largo
- tubo de borracha
- fonte de luz (laser ou feixe paralelo e delgado de luz branca)
- alvo
- reagentes: fluoresceína, cloreto de sódio, álcool etílico e água

Objectivo

Estudar a propagação da luz num meio óptico homogéneo e num meio óptico heterogéneo.

Procedimento

- 1) Dissolva um pouco de fluoresceína em álcool etílico; dilua então com bastante água (5×10^{-4} g dm⁻³ a 5×10^{-3} g dm⁻³). Encha a tina de vidro com esta solução, que constitui um meio homogéneo.
- 2) Posicione a fonte de luz e o alvo de modo que o feixe se propague ao longo da dimensão maior da tina. Ver figura 4A.1. Que tipo de trajectória têm os raios luminosos ?

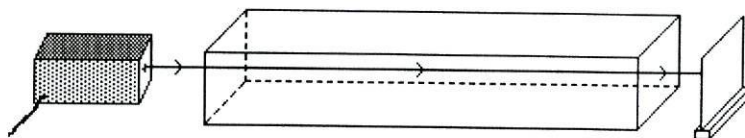


Figura 4A.1. Montagem utilizada

- 3) Prepare uma solução aquosa saturada de cloreto de sódio ⁵⁰. Introduza-a no fundo da tina, lentamente, utilizando o tubo de borracha ligado ao funil. Aguarde

⁵⁰ Em alternativa, pode utilizar uma solução de sacarose (açúcar). Atendendo à menor solubilidade desta, o tempo de espera será maior, mas o efeito pretendido será observado durante um período mais longo.

cerca de 1 h, para que a solução salina se difunda, dando origem a um meio óptico heterogéneo, cuja densidade aumenta gradualmente da superfície até ao fundo.

- 4) Faça de novo incidir o feixe luminoso ao longo da tina. Que tipo de trajectória têm agora os raios luminosos ?
- 5) Procure estabelecer uma relação entre aquilo que observou e certos fenómenos atmosféricos, como as miragens.

EXPERIÊNCIA 4B - Propagação da luz de um meio óptico para outro

Equipamento utilizado

- copo de vidro com água
- vareta de vidro
- tina de plástico opaco
- moeda
- fonte de luz (feixe delgado de raios paralelos)
- folha de papel branco
- lâmina de vidro de faces paralelas
- prisma óptico

Objectivo

Estudar a propagação da luz de um meio óptico para outro.

Procedimento

- 1) Mergulhe a vareta de vidro no copo com água. O que parece suceder à vareta ?
- 2) Coloque a moeda dentro da tina de plástico. Afaste-se até uma posição em que deixe de ver a moeda, oculta pela parede da tina. Peça a alguém que lance um pouco de água dentro da tina. O que observa ?
- 3) Os fenómenos observados são ocasionados pela mudança de meio óptico da luz proveniente dos objectos. Para investigar o que se passa, realize dois ensaios:
 - (a) Faça incidir um feixe delgado de raios paralelos tangencialmente a uma folha de papel branco; no seu percurso interponha a lâmina de faces paralelas (figura 4B.1). Observe a trajectória da luz quando passa do ar para o vidro e novamente para o ar. Experimente variar o ângulo de incidência. Descreva as suas observações.

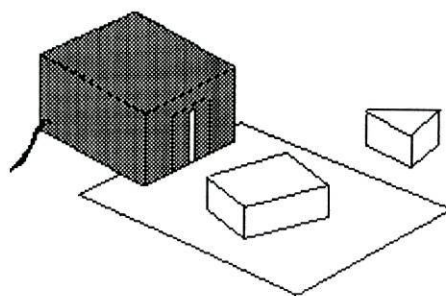


Figura 4B.1. Montagem utilizada

- (b) Substitua a lâmina de faces paralelas pelo prisma. Faça também variar o ângulo de incidência e observe a trajetória da luz.

EXPERIÊNCIA 4C - Sombra e penumbra

Equipamento utilizado

- fonte de luz extensa
- duas fontes de luz pontuais
- objecto pequeno (p.e. um cilindro)
- alvo

Objectivo

Estudar a formação da sombra e penumbra de um objecto.

Procedimento

- 1) Na obscuridade, coloque o objecto entre a fonte extensa e o alvo. Faça variar as respectivas distâncias relativas. Observa alguma sombra no alvo ?
- 2) Repita a experiência substituindo a fonte extensa por uma fonte pontual (ver figura 4C.1). Investigue o efeito da variação das distâncias fonte-objecto e objecto-alvo nas dimensões da sombra obtida. Faça um esquema representando a formação da sombra.

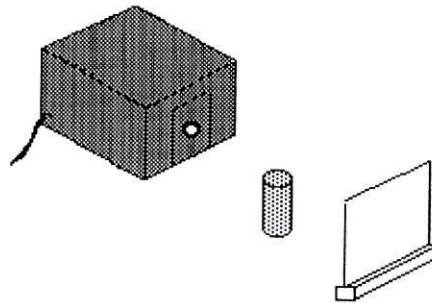


Figura 4C.1. Montagem utilizada

- 3) Utilize agora duas fontes pontuais, colocadas lado a lado, para iluminar o objecto. Que diferença nota em relação à situação de uma só fonte pontual ?

EXPERIÊNCIA 4D - Determinação da velocidade de propagação da luz numa fibra óptica

Equipamento utilizado

- laser modulável em amplitude (L) e fonte de tensão (P1)
- gerador de impulsos (largura < 100 ns e taxa de repetição ≈ 10 kHz) (G)
- osciloscópio (S)
- cabos de ligação
- fotodetector rápido (D) e fonte de tensão (P2)
- fibra óptica ($\ell < 1$ m) (f1)
- fibra óptica ($\ell > 30$ m) (f2)
- fita métrica (adequada ao comprimento das fibras ópticas)

Objectivo

Determinar o valor da velocidade de propagação da luz (numa fibra óptica), medindo apenas o tempo necessário para que esta percorra uma distância conhecida.

Procedimento

Atendendo à dificuldade desta montagem, os pontos 1) a 4) devem ser executados pelo professor, embora na presença dos alunos.

- 1) Efectue a montagem, de acordo com a figura 4D.1. As extremidades das fibras ópticas devem ficar juntas, lado a lado; para isso, a mais longa deve manter-se enrolada.

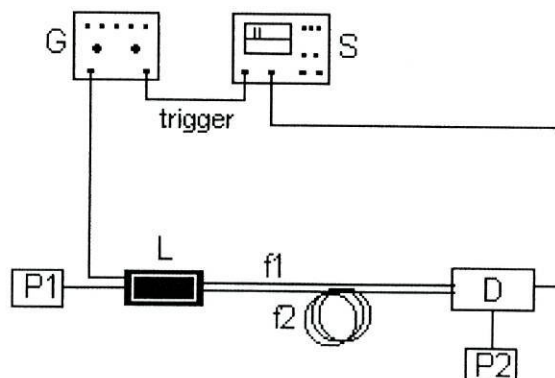


Figura 4D.1. Montagem utilizada

- 2) Alinhe o laser (F) de forma que o feixe seja introduzido simultaneamente em ambas as fibras.
- 3) Posicione o detector (D) à saída de ambas as fibras, de modo a receber os dois feixes emergentes.
- 4) Ajuste o sinal no osciloscópio, para observar os dois impulsos provenientes das fibras.
- 5) Meça na escala do osciloscópio a diferença temporal entre os dois impulsos, Δt .
- 6) Com a fita métrica, meça os comprimentos das duas fibras, e calcule a sua diferença, Δx .
- 7) Determine o valor da velocidade de propagação da luz na fibra óptica, aplicando a expressão

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

- 8) Compare o valor obtido, com o valor aceite para a velocidade de propagação da luz no vácuo (c), e determine o índice de refração (n) da radiação laser na fibra óptica utilizada. Recorde que

$$n = \frac{c}{v}$$

EXPERIÊNCIA 5A - A luz transporta energia ?

Equipamento utilizado

- radiómetro de Crookes
- pequeno painel solar de demonstração
- fonte de luz extensa (p.e. lâmpada eléctrica)
- voltímetro

Objectivo

Mostrar que a luz transporta energia, através da sua conversão noutras formas macroscópicas de energia

Procedimento

Com a sala pouco iluminada:

- 1) Observe o radiómetro de Crookes (figura 5A.1). Aproxime dele a lâmpada acesa. O que observa ? ⁵¹

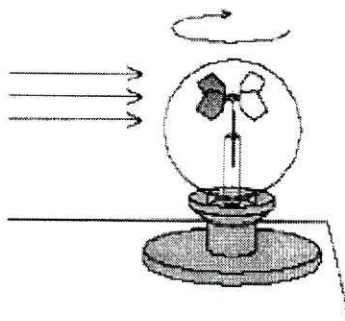


Figura 5A.1. Radiómetro de Crookes

- 2) Ligue o painel solar a um voltímetro, seleccionando a escala de mV. Aproxime e afaste a lâmpada eléctrica do painel solar. O que pode verificar no mostrador do aparelho ?

Qual a origem da energia produzida em ambas as situações ? O que pode concluir ?

⁵¹ O modo de funcionamento deste dispositivo não é evidente, tendo surgido várias explicações que foram objecto de polémicas. Apenas nos interessa aqui evidenciar que o movimento do molinete se deve à energia transportada pela luz.

EXPERIÊNCIA 5B - Lei do inverso do quadrado das distâncias

Equipamento utilizado

- fonte pontual
- fotómetro eléctrico
- banco de óptica
- retroprojector e ecrã

Objectivo

Verificar que a iluminação de uma superfície por uma fonte pontual é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre ambas.

Procedimento

- 1) Monte, no banco de óptica, a fonte pontual e o fotómetro eléctrico, de acordo com a figura 5B.1.

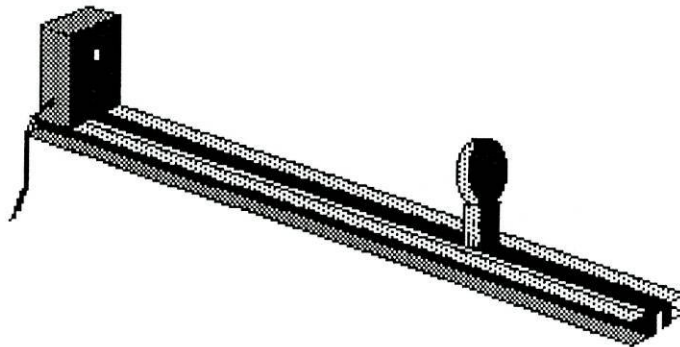


Figura 5B.1. Montagem utilizada

- (a) Com a sala obscurecida, efectue leituras de pares de valores distância-iluminação, começando por uma distância pequena. Efectue pelo menos cinco ensaios. Registe os valores obtidos na Tabela 5B.1.
- (b) Preencha a terceira coluna do quadro, indicando as respectivas unidades.
- (c) Represente graficamente $E = f(1/d^2)$. O que pode concluir da forma deste gráfico ?

Tabela 5B.1. Valores obtidos

Iluminação E / lux	Distância d / m	$1 / d^2$

2) Experimente agora com o retroprojector e o respectivo ecrã:

(a) Considerando que a iluminação é directamente proporcional à área iluminada, meça o valor da área iluminada no ecrã (A) para várias distâncias do retroprojector ao ecrã (d).

(b) Verifique que

$$A \propto 1 / d^2$$

EXPERIÊNCIA 5C - Comparação de intensidades luminosas

Equipamento utilizado

- 2 fontes pontuais (PASCO OS-8517)
- fotômetro de Bunsen (PASCO OS-8520)
- filtros de transmitância (100 %, 75 %, 50 % e 25 %)
- banco de óptica (PASCO OS-8518)

Objectivo

Comparar intensidades luminosas de duas fontes pontuais por comparação das iluminações verificadas num fotômetro de Bunsen

Procedimento

- 1) Monte o fotômetro na posição dos 70 cm do banco de óptica.
- 2) Coloque a fonte pontual a estudar na posição dos 40 cm. Aplique no fotômetro o filtro de transmitância, do lado oposto à fonte. Ver figura 5C.1. Coloque a outra fonte de luz pontual (que vai servir de referência) no banco de óptica, do mesmo lado que o filtro.

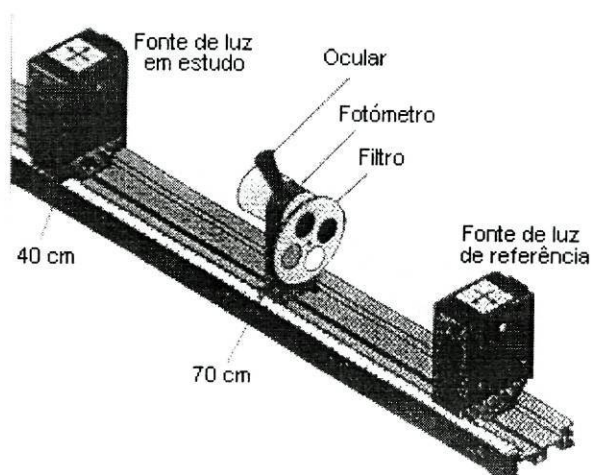


Figura 5C.1. Montagem utilizada
(adaptado de Hanks, A., Hanks, T., 1995)

- 3) Ajuste o filtro na posição de 100 % de transmitância.
- 4) Desligue as luzes da sala. As únicas fontes de luz devem ser as fontes pontuais.
- 5) Olhe através do fotômetro, e desloque a fonte de luz do lado do filtro para uma posição em que as iluminações sejam iguais. A fonte de luz do lado do filtro ficará nesta posição até ao fim da experiência. Fornecerá a iluminação de referência E_0 (para 100 % de transmitância). Registre as posições do fotômetro e da fonte em estudo (do lado oposto ao filtro) na Tabela 5C.1. A posição da fonte de referência (do lado do filtro) não é necessária. Realize três ensaios.
- 6) Rode o filtro para a posição de 75 % de transmitância. Desloque a fonte em estudo (do lado oposto ao filtro) para uma posição em que as iluminações sejam novamente iguais, quando observadas no fotômetro. Registre esta nova posição da fonte de luz na Tabela 5C.1. Realize três ensaios.
- 7) Repita o último passo para 50 % e 25 % de transmitância.
- 8) Determine a posição média da fonte pontual para cada um dos valores de transmitância. Registre na Tabela 5C.1.

Tabela 5C.1. Valores obtidos

Posição do Fotômetro =		Valor da iluminação da fonte de luz de referência			
		100 % de E_0	75 % de E_0	50 % de E_0	25 % de E_0
Posição da fonte pontual	Ensaio 1				
	Ensaio 2				
	Ensaio 3				
Posição média da fonte pontual					
Distância ao fotômetro					
Iluminação calculada					
% variação					

- 9) Usando as medidas de posições médias que se encontram na tabela, calcule as distâncias da fonte pontual ao fotômetro, e registre-as igualmente.

- 10) Para cada uma das diferentes distâncias, calcule o valor da iluminação, através da expressão

$$E = \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 E_0$$

em que r_0 é a distância inicial da fonte pontual (100 % de E_0) e r é a distância para cada valor de iluminação E . Note que esta é calculada em termos da iluminação inicial E_0 . Registe as suas respostas na Tabela 5C.1.

- 11) Calcule a percentagem de variação entre os valores de iluminação calculados e os respectivos valores esperados. Registe na Tabela 5C.1.

EXPERIÊNCIA 5D - Fração da luz incidente transmitida por uma placa de um material transparente

Equipamento utilizado

- 2 fontes pontuais (PASCO OS-8517)
- fotômetro de Bunsen (PASCO OS-8520)
- placa de um material semitransparente
- banco de óptica (PASCO OS-8518)

Objectivo

Determinar a percentagem da luz incidente que é transmitida por uma placa de um material transparente.

Procedimento

- 1) Monte o fotômetro na posição dos 70 cm do banco de óptica.
- 2) Coloque uma fonte de luz pontual (A) na posição dos 40 cm. Coloque a segunda fonte de luz pontual (B) do outro lado do fotômetro, de acordo com a figura 5D.1. Esta fonte funcionará como referência.

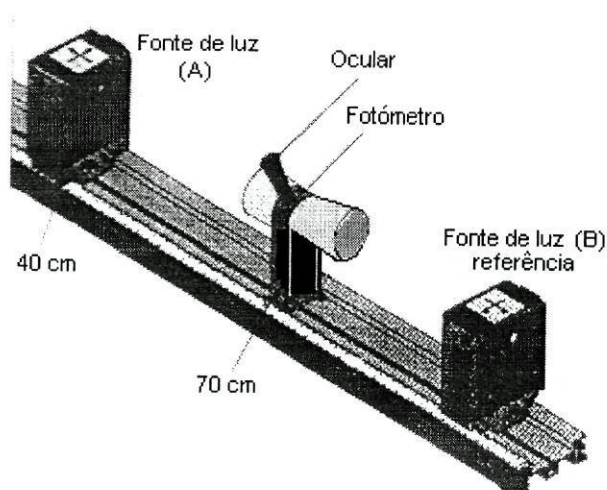


Figura 5D.1. Montagem utilizada
(adaptado de Hanks, A., Hanks, T., 1995)

- 3) Desligue as luzes da sala. As únicas fontes de luz devem ser as fontes pontuais.
- 4) Olhe através do fotômetro, e desloque a fonte de luz (B) para uma posição em que as iluminações sejam iguais. Meça e registre as distâncias d_1 , da fonte (A) ao fotômetro e d_2 , do fotômetro à fonte (B), na Tabela 5D.1.
- 5) Interponha a placa de material semitransparente entre a fonte (A) e o fotômetro. Desloque a fonte (A) para uma posição em que as iluminações sejam novamente iguais, quando observadas no fotômetro. Meça e registre a nova distância d'_1 entre a fonte (A) e o fotômetro, na Tabela 5D.1.
- 6) Repita a experiência para outras posições de (B), ou seja, outros valores de d_2 .

Tabela 5D.1. Valores obtidos

d_1	d'_1	d_2	$\% \left(\frac{I}{I_0} \right)$
Valor médio =			

- 7) Para cada ensaio, calcule a percentagem da luz incidente transmitida pela placa, através da expressão

$$\% \left(\frac{I}{I_0} \right) = \frac{d_1'^2}{d_1^2} \times 100 \%$$

Registe os resultados na Tabela 5D.1.

- 8) Calcule o valor médio dos resultados dos diferentes ensaios.

EXPERIÊNCIA 6A - Arco-íris

Equipamento utilizado

- projector de diapositivos
- balão de vidro (d semelhante ao do feixe luminoso)
- suporte com garra
- placa de cartão branco (P1)
- pequena placa de cartão (P2)

Objectivo

Simular a formação do arco-íris na sala de aula.

Procedimento

- 1) Encha completamente o balão com água, e prenda-o na garra acoplada ao suporte.
- 2) Faça um orifício circular na placa de cartão branco (P1), de diâmetro um pouco inferior ao do balão. Encaixe o balão no orifício, de acordo com a figura 6A.1.

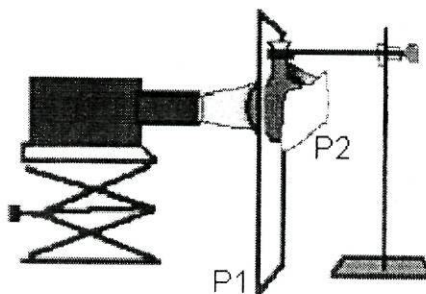


Figura 6A.1. Montagem utilizada

- 3) Com a sala obscurecida, faça incidir a luz do projector sobre o balão, segundo uma direcção oblíqua em relação ao cartão (P1).
- 4) Prenda com fita adesiva uma pequena placa de cartão (P2) na parte de trás do balão, de modo a bloquear o feixe principal.
- 5) Veja com cuidado a parte de trás do cartão (P1), do lado oposto à incidência da luz. Que fenómeno observa ? Procure explicá-lo.

EXPERIÊNCIA 6B - Dispersão da luz por um prisma

Equipamento utilizado

- fonte de luz (feixe delgado de raios paralelos)
- fonte de luz monocromática (p.e. laser)
- 2 prismas ópticos iguais
- folha de papel

Objectivo

Estudar a dispersão da luz por um prisma óptico.

Procedimento

- 1) Faça incidir um feixe paralelo e delgado de luz branca tangencialmente a uma folha de papel branco. No seu percurso interponha um prisma óptico, na posição indicada na figura 6B.1. Para máxima transmissão, faça incidir o feixe luminoso perto de um vértice do prisma.

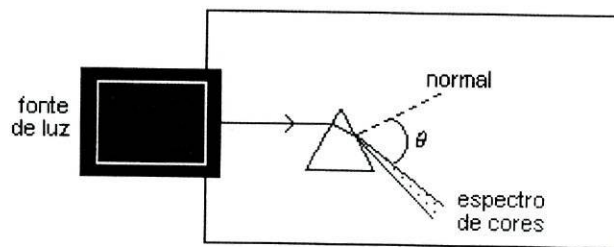


Figura 6B.1. Montagem utilizada (um prisma)

- 2) Rode o prisma até que o ângulo θ , feito pelo feixe emergente com a normal, seja o maior possível, e o feixe se separe nas diferentes cores. Qual a cor da radiação mais desviada? E menos desviada?
- 3) Coloque o segundo prisma, encostado ao primeiro, em posição invertida relativamente a ele. Ver figura 6B.2. Observe o raio emergente: continua a verificar-se uma separação de cores?

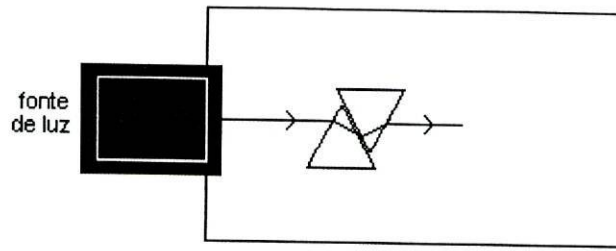


Figura 6B.2. Montagem utilizada (dois prismas)

- 4) Substitua a fonte de luz branca por uma fonte monocromática, e utilize um só prisma, como indicado na figura 6B.1. O raio emergente apresenta diferentes cores ?

Face às suas observações, procure concluir se a luz branca é simples, sendo o prisma responsável pelo aparecimento das cores, ou se é composta de radiações de várias cores, limitando-se o prisma a separá-las.

EXPERIÊNCIA 6C - Variação com a temperatura de um espectro de emissão por incandescência

Equipamento utilizado

- reóstato
- lâmpada de incandescência com filamento de tungstênio
- suporte de lâmpada
- fios de ligação
- espectroscópio de Kirchhoff-Bunsen
- tabela de comprimentos de onda do espectro electromagnético

Objectivo

Observar a variação com a temperatura do espectro de emissão de um filamento de tungstênio.

Procedimento

- 1) Coloque a lâmpada no suporte, e intercale o reóstato entre este e a tomada de corrente (220 V AC).
- 2) Posicione o espectroscópio em frente à lâmpada, de modo a que a fenda do colimador fique encostada ao vidro, e alinhada com o filamento. Ver figura 6C.1.

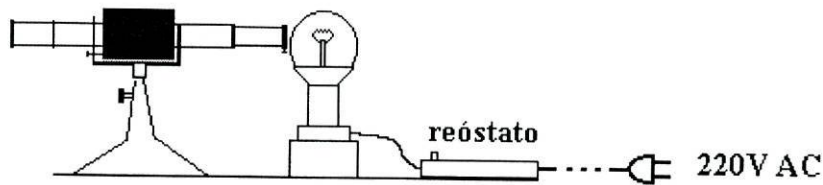


Figura 6C.1. Montagem utilizada

- 3) Desloque o cursor do reóstato, de modo a obter o mínimo de luminosidade possível da lâmpada.
- 4) Olhe através da luneta do espectroscópio, e observe o espectro correspondente; se necessário, efectue um ajuste na focagem.

- 5) Desloque o cursor do reóstato, de modo a intensificar a luminosidade da lâmpada.
- 6) Observe de novo o espectro correspondente.
- 7) Repita as operações, intensificando progressivamente a luminosidade da lâmpada, até ao máximo possível.
- 8) Relacione a temperatura do filamento da lâmpada com o comprimento de onda das radiações luminosas emitidas pela mesma. Para isso, consulte a tabela de comprimentos de onda do espectro electromagnético.

EXPERIÊNCIA 6D - Espectros de emissão obtidos por descargas eléctricas em gases rarefeitos

Equipamento utilizado

- fonte de alimentação
- bobina de Ruhmkorff
- 4 fios de ligação
- conjunto de 6 tubos de Plucker (contendo gases rarefeitos)
- espectroscópio de Kirchhoff-Bunsen
- fotografias de diversos espectros

ATENÇÃO: Durante este trabalho é utilizada a bobina de Ruhmkorff, que transforma corrente contínua de baixa voltagem em corrente de ALTA TENSÃO; não toque em qualquer peça do material disponível sem indicações do professor.

Objectivo

Identificar gases através da observação dos seus espectros de emissão.

Procedimento

- 1) Verifique se a montagem efectuada corresponde ao esquema da figura 6D.1.

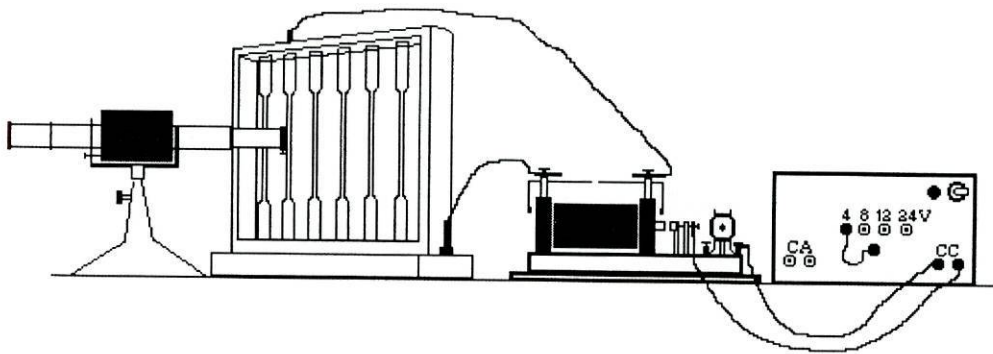


Figura 6D.1. Montagem utilizada

- 2) Ligue o interruptor da fonte de alimentação; apague as luzes da sala, que deve estar devidamente obscurecida.

- 3) Olhe através da luneta, e observe o espectro correspondente ao gás contido no tubo; se necessário, efectue um ajuste na focagem.
- 4) Compare o espectro observado com fotografias de espectros fornecidas pelo professor, e procure identificar o gás contido no tubo.
- 5) Acenda as luzes da sala e desligue o interruptor da fonte de alimentação.
- 6) Mude a posição do espectroscópio, colocando a fenda do colimador em frente de outro tubo de gás; troque o fio de ligação, do tubo de gás anterior para este.
- 7) Repita as operações a partir de 2).
- 8) Tendo observado os espectros dos 6 gases contidos nos tubos, compare-os entre si, e com o espectro da luz branca.

EXPERIÊNCIA 6E - Espalhamento de Rayleigh

Equipamento utilizado

- fonte de luz branca (feixe de raios paralelos)
- tanque de vidro de secção rectangular ($\ell \approx 40$ cm)
- espelho plano (M) e suporte (S)
- alvo (A)
- polarizador
- vareta de vidro
- reagentes: tiosulfato de sódio (ou potássio), cloreto de hidrogénio diluído

Objectivo

Observar o fenómeno do espalhamento e constatar o carácter polarizado da luz resultante.

Procedimento

1ª parte

- 1) Encha o tanque com água; adicione cerca de 150 cm^3 de uma solução aquosa saturada de tiosulfato de sódio (ou potássio). Agite com uma vareta de vidro para homogeneizar a solução, que deve ser incolor.
- 2) Posicione a fonte de luz e o alvo de modo que o feixe de luz branca se propague ao longo da dimensão maior da tina. Com a ajuda de um suporte adequado, monte o espelho plano sobre a tina, com uma inclinação de cerca de 45° . Ver figura 6E.1.

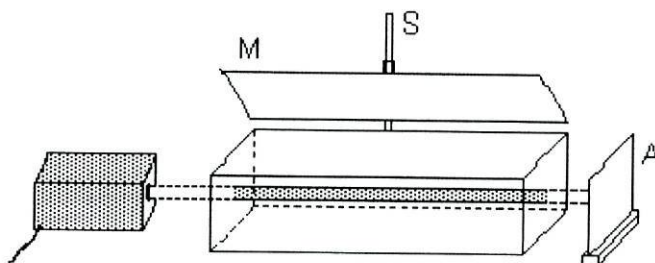


Figura 6E.1. Montagem utilizada

- 3) Adicione cerca de 100 cm^3 de HCl (aq) à solução contida no tanque e agite cuidadosamente com a vareta. Aguarde cerca de 2 min até a solução começar a ficar turva, devido à precipitação de pequenas partículas de enxofre.
- 4) Reduza a iluminação da sala e observe. De que cor aparece o feixe luminoso que atravessa o tanque ? E a luz transmitida para o alvo ? Qual a cor da radiação mais sujeita a espalhamento ?

Procure relacionar o que observou com a cor do céu diurno e a cor apresentada pelo Sol ao longo do dia.

2ª parte

- 5) Interponha um polarizador entre a fonte de luz e o tanque, e rode-o devagar (perpendicularmente ao feixe). Observe o tanque e o espelho, em simultâneo. O que sucede ao feixe luminoso? Relacione a sua observação com a posição do eixo do polarizador.

EXPERIÊNCIA 7A - Adição de cores

Equipamento utilizado

- fonte de luz (PASCO OS-8517)
- lente cilíndrica convexa
- folha de papel branco
- folhas de papel de várias cores

Objectivo

Determinar as cores resultantes da adição de duas ou três cores primárias, e mostrar o efeito de iluminar objectos coloridos com luz de diferentes cores.

Procedimento

1ª parte

- 1) Coloque a fonte de luz sobre uma folha de papel branco, em cima da mesa. Ajuste a fonte de modo a produzir as três cores primárias.
- 2) Coloque a lente convexa perto da fonte de luz, de modo a focar os raios luminosos e levá-los a encontrarem-se num ponto (foco). Ver figura 7A.1. Qual a cor da luz quando os três raios se reúnem ? Registe o resultado na Tabela 7A.1. Pode ser conveniente fazer uma prega no papel, de modo a criar uma "parede" onde o ponto focal é projectado.

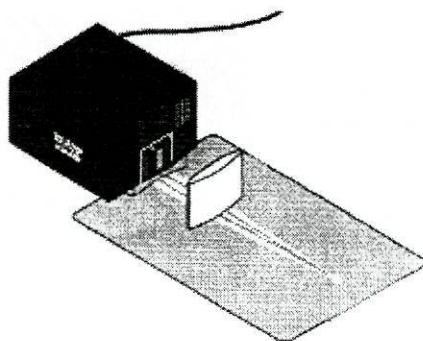


Figura 7A.1. Montagem utilizada
(adaptado de Hanks, A., Hanks, T., 1995)

- 3) Bloqueie agora o feixe verde com um objecto opaco. Qual a cor resultante da adição de vermelho e azul ? Registe na Tabela 7A.1.

Tabela 7A.1. Resultados da adição de cores

Cores adicionadas	Cor resultante
vermelho + azul + verde	
vermelho + azul	
vermelho + verde	
verde + azul	

- 4) Repita o passo 3), bloqueando sucessivamente uma cor de cada vez e completando a Tabela 7A.1.

2ª parte

- 5) Faça incidir as três cores primárias sobre cada uma das folhas de papel colorido. Qual a cor que a folha de papel aparenta ter, para cada cor da luz incidente ? Registe os resultados na Tabela 7A.2.

Tabela 7A.2. Observação da luz devolvida pelo papel colorido

Cor do papel sob luz branca	Cor do feixe luminoso	Cor do papel sob luz colorida
	vermelho	
	verde	
	azul	
	vermelho	
	verde	
	azul	
	vermelho	
	verde	
	azul	
	vermelho	
	verde	
	azul	

EXPERIÊNCIA 7B - Subtracção de cores

Equipamento utilizado

- retroprojector e ecrã
- filtros com as cores secundárias
- caixa de guaches
- pincel
- água
- papel branco

Objectivo

Determinar as cores resultantes da subtracção de duas ou três cores primárias, quer através do uso de filtros, quer de pigmentos.

Procedimento

1ª parte

- 1) Ligue o retroprojector e foque a sua imagem no ecrã. Recorde que, ao interpor um filtro no percurso da luz, uma determinada gama de frequências é subtraída ao espectro da luz branca.
- 2) Coloque os filtros sobre o vidro do retroprojector. Ver figura 7B.1. Qual a cor obtida quando sobrepõe os três filtros ? Registe o resultado na Tabela 7B.1.

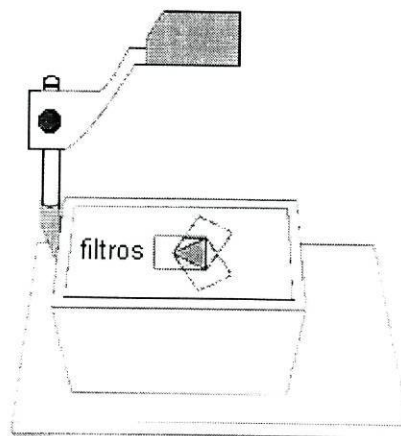


Figura 7B.1. Montagem utilizada

- 3) Sobreponha agora os filtros magenta e ciano. Qual a cor resultante ? Registe na Tabela 7B.1.

Tabela 7B.1. Resultados da subtração de cores

Cores subtraídas	Cor resultante
magenta, ciano, amarelo	
magenta, ciano	
magenta, amarelo	
ciano, amarelo	

- 4) Repita o passo 3), sobrepondo sucessivamente os filtros magenta e amarelo, ciano e amarelo. Registe na Tabela 7B.1.

2ª parte

- 5) Com as cores disponíveis na caixa de guaches, experimente misturar pigmentos:
- (a) Com as cores primárias (duas a duas, e as três em simultâneo).
 - (b) Com as cores secundárias (duas a duas, e as três em simultâneo).

Compare os resultados obtidos na 1ª e 2ª partes. Recorde ainda os resultados da experiência de adição de cores. O que pode concluir ?

EXPERIÊNCIA 8A - Leis da reflexão**Equipamento utilizado**

- fonte de luz (feixe delgado de raios paralelos)
- disco de Hartl ou papel polar ⁵²
- espelhos plano e curvos

Objectivo

Estudar o modo como os raios luminosos são reflectidos.

Procedimento

- 1) Faça incidir o feixe luminoso tangencialmente ao disco de Hartl (ou papel polar), coincidindo com o diâmetro cujas extremidades indicam 0° .
- 2) Posicione o espelho plano AB na superfície do disco de Hartl (ou papel polar), de acordo com a figura 8A.1.

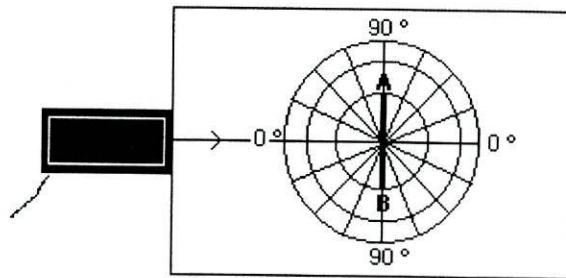


Figura 8A.1. Montagem utilizada

- 3) Verifique que, para um ângulo de incidência de 0° , ou seja, uma incidência normal à superfície do espelho, o raio reflectido tem a mesma direcção, e sentido oposto ao do raio incidente.
- 4) Rode o disco de Hartl (ou papel polar), de modo a obter um valor superior para o ângulo de incidência: anote esse valor na Tabela 8A.1. Meça também o correspondente ângulo de reflexão e anote igualmente o seu valor na tabela.

⁵² Em alternativa pode utilizar uma folha de papel branco e um transferidor. Como fonte de luz pode também usar um laser, desde que "abra" o respectivo feixe com uma lente cilíndrica, como p. e. uma vareta de vidro.

- 5) Repita o procedimento para mais três valores diferentes do ângulo de incidência.

Tabela 8A.1. Resultados experimentais

Ângulo de incidência, i	Ângulo de reflexão, r

- 6) Efectue ensaios idênticos utilizando um espelho convexo e um espelho côncavo.
- 7) O que pode concluir quanto ao modo como os raios luminosos são reflectidos por um espelho ?

EXPERIÊNCIA 8B - Reflexão especular e difusa

Equipamento utilizado

- fonte de luz (feixe de raios paralelos)
- espelho plano (M)
- alvo (A)
- saleiro contendo pó de giz

Objectivo

Distinguir em que condições a luz se reflecte especularmente, e de modo difuso.

Procedimento

- 1) Faça incidir o feixe luminoso sobre o espelho, de modo a obter o respectivo feixe reflectido num alvo; recorde as leis da reflexão. Ver figura 8B.1.

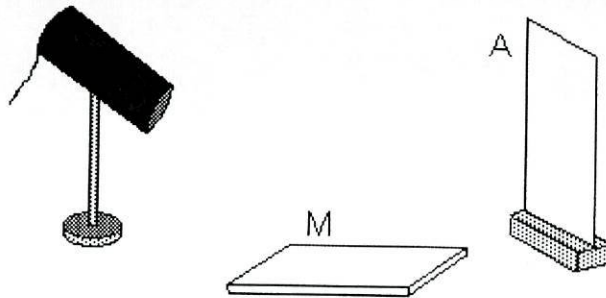


Figura 8B.1. Montagem utilizada

- 2) Com o saleiro espalhe lentamente pó de giz sobre a superfície do espelho. O que sucede à imagem (da luz reflectida) no alvo ?

A partir dos ensaios realizados, e de outras observações do seu quotidiano, procure inferir em que condições a luz se reflecte especularmente, ou de modo difuso.

EXPERIÊNCIA 9A - Tipos de espelhos

Equipamento utilizado

- fonte de luz (5 feixes delgados de raios paralelos)
- espelho plano e curvos
- folha de papel branco

Objectivo

Classificar os espelhos de acordo com as características dos feixes de luz por eles reflectidos.

Procedimento

- 1) Regule a fonte de luz de modo a obter cinco feixes delgados de raios paralelos. Faça incidir a luz tangencialmente à folha de papel branco pousada sobre a mesa.
- 2) Interponha o espelho plano no trajecto dos feixes luminosos. Ver figura 9A.1. Observe e desenhe os feixes reflectidos para diversos valores do ângulo de incidência: comece com uma incidência normal, e faça variar em seguida a posição do espelho.

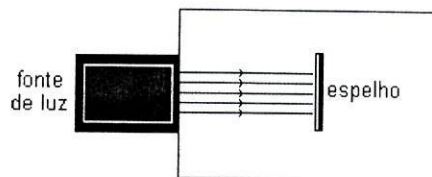


Figura 9A.1. Montagem utilizada

- 3) Substitua o espelho plano por um espelho côncavo e repita o procedimento descrito no ponto anterior. O que sucede aos feixes reflectidos ?
- 4) Utilize agora o espelho convexo e proceda do mesmo modo. No desenho efectuado, prolongue os feixes reflectidos para trás do espelho, até se intersectarem. O que pode concluir ?

Procure relacionar a forma dos espelhos com as características dos feixes reflectidos.

EXPERIÊNCIA 9B - Localização da imagem dada por um espelho

Equipamento utilizado

- placa de vidro com suporte
- 2 velas iguais com suportes
- fósforos

Objectivo

Pôr em evidência a localização da imagem de um objecto dada por um espelho.

Procedimento

- 1) Posicione a placa de vidro na vertical, com a ajuda do suporte.⁵³
- 2) Coloque uma vela de cada um dos lados do vidro, à mesma distância do mesmo. Ver figura 9B.1.

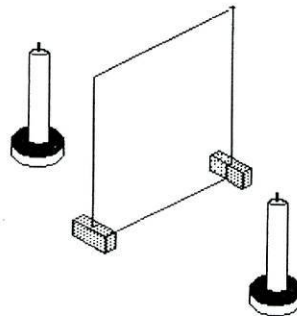


Figura 9B.1. Montagem utilizada

- 3) Escolha uma posição conveniente de observação, do lado mais iluminado do vidro. Deverá ver a imagem reflectida da vela que se encontra do seu lado (A), sobreposta com a outra vela (B).
- 4) Acenda agora a vela (A). Como lhe parece estar a vela (B), apagada ou acesa ? Experimente tocar com um dedo no pavio desta.

Face às suas observações, indique onde se encontra a imagem de um objecto dada por um espelho: atrás do mesmo, ou na sua superfície ?

⁵³ A montagem deve ser feita em cima de uma mesa, de tal modo que um dos lados do vidro esteja mais iluminado do que o outro (voltando-o, por exemplo, para uma janela), de modo a comportar-se como um espelho.

EXPERIÊNCIA 9C - Construção de imagens num espelho plano

Equipamento utilizado

- espelho plano com suporte
- placa de cortiça e alfinete
- papel branco
- lápis
- régua

Objectivo

Estudar as características das imagens dadas por um espelho plano.

Procedimento

- 1) Numa folha de papel branco, desenhe um segmento de recta, dividindo-a transversalmente em duas partes iguais.
- 2) Pouse essa folha de papel sobre a placa de cortiça, e, com a ajuda do suporte, coloque o espelho na posição vertical, sobre o segmento de recta.
- 3) Espete um alfinete na placa de cortiça, em frente ao espelho.
- 4) Trace um segmento de recta ($\overline{OA}$) entre o alfinete e o espelho, perpendicular a este. Trace outros dois segmentos ($\overline{OB}$) e ($\overline{OC}$) partindo também do alfinete, mas com direcções diferentes. Ver figura 9C.1.

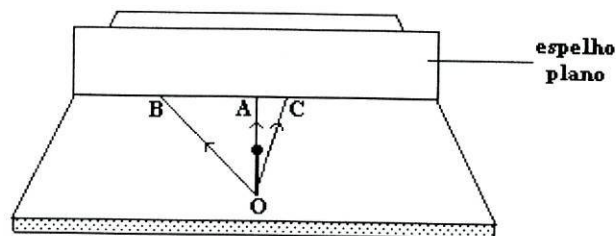


Figura 9C.1. Montagem utilizada

- 5) Observe a imagem do alfinete dada pelo espelho, e, com a ajuda da régua, trace os segmentos de recta que se encontram nos prolongamentos (para cá do espelho) das imagens de $\overline{OA}$, $\overline{OB}$ e $\overline{OC}$. Ver figura 9C.2.

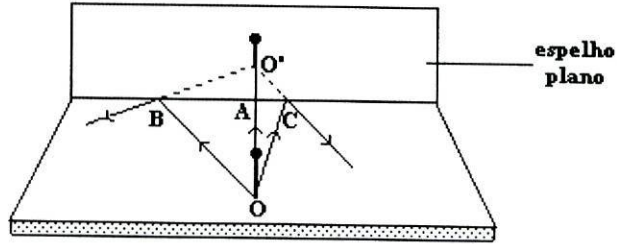


Figura 9C.2. Construção geométrica

- 6) Retire o espelho e prolongue a tracejado os raios reflectidos (que acabou de desenhar na alínea anterior) até se encontrarem num ponto (O').
- 7) Meça as distâncias OA e $O'A$ e procure formular uma conclusão.
- 8) Compare o triângulo OBC com a sua "imagem" $O'BC$. Quais as características das imagens dadas por um espelho plano ?

EXPERIÊNCIA 9D - Multiplicidade de imagens dadas por dois espelhos planos

Equipamento utilizado

- 2 espelhos planos, ligados por uma dobradiça
- objecto pequeno
- folha de papel e transferidor
- espelho plano e espelho semi-reflector (50 %) com suportes

Objectivo

Determinar a relação entre o ângulo que fazem dois espelhos planos e o número de imagens produzidas pelo conjunto.

Procedimento

1ª parte

- 1) Posicione os espelhos de acordo com a figura 9D.1.

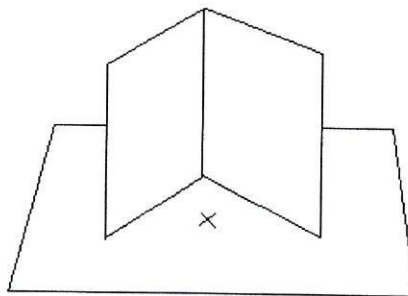


Figura 9D.1. Montagem utilizada

- 2) Coloque o objecto entre os espelhos, na posição assinalada com uma cruz, e, olhando para estes, verifique o que sucede quando:
 - faz variar o ângulo entre os dois espelhos;
 - afasta ou aproxima o objecto dos espelhos;
 - altera a posição de observação em relação aos espelhos.
- 3) Anote na Tabela 9D.1 o número de imagens do objecto dadas pelos dois espelhos, para um conjunto de valores particulares do ângulo por eles formado.

Tabela 9D.1. Registo de observações

Ângulo entre os espelhos, α	Número de imagens, n
180 °	
90 °	
60 °	
45 °	

- 4) Procure uma relação matemática entre esse número de imagens, n, e o ângulo α para aqueles valores.

2ª parte

- 5) Com a ajuda de um suporte, coloque o espelho plano na vertical, com a parte espelhada voltada para si.
- 6) Na frente do espelho monte o espelho semi-reflector, paralelo àquele e a uma distância de cerca de 10 cm.
- 7) Introduza o pequeno objecto entre os dois espelhos e observe, do lado do semi-reflector. Quantas imagens vê ? Procure explicar este facto.

2ª parte (alternativa)

- 5) Com a ajuda de um suporte, coloque o espelho plano na vertical, com a parte espelhada voltada para si.
- 6) Na frente do espelho monte um segundo espelho plano, no qual foi feito um orifício central (num vidraceiro !), paralelo àquele e a uma distância de cerca de 10 cm.
- 7) Introduza o pequeno objecto entre os dois espelhos e observe, através do orifício. Quantas imagens vê ? Procure explicar este facto.

EXPERIÊNCIA 9E - Características das imagens dadas pelos espelhos curvos**Equipamento utilizado**

- espelho côncavo ($f = +250$ mm)
- espelho convexo ($f = -250$ mm)
- vela e fósforos
- alvo
- suportes⁵⁴
- fita métrica

Objectivo

Estudar as características das imagens dadas por espelhos esféricos.

Procedimento

- 1) Coloque o espelho côncavo num suporte, em posição vertical. Neste espelho o foco principal F dista do mesmo 25 cm - distância focal; o centro de curvatura C encontra-se a uma distância dupla, 50 cm.
- 2) Prepare o alvo, acenda a vela, e alinhe o conjunto de acordo com a figura 9E.1.

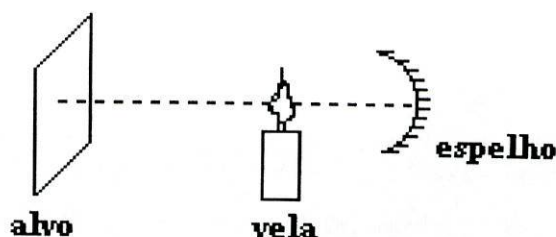


Figura 9E.1. Montagem utilizada

- 3) Efectue três ensaios, colocando a vela a diferentes distâncias do espelho:

1º ensaio vela a 15 cm do espelho (entre o foco F e o espelho);

2º ensaio vela a 40 cm do espelho (entre o foco e o centro de curvatura);

⁵⁴ Os diversos componentes deverão ser montados num banco de óptica, se possível.

3º ensaio vela a 90 cm do espelho (além do centro de curvatura).

PARA CADA ENSAIO - Desloque o alvo para a frente e para trás, procurando ver neste uma imagem (real) da vela; caso não consiga, procure ver no próprio espelho uma imagem (virtual) da vela. A imagem observada é direita ou invertida ? E o seu tamanho, é maior, igual ou menor que o do objecto ?

- 4) Repita o procedimento, de 1) a 3), para o espelho convexo. Este, embora de tipo diferente, tem uma distância focal idêntica.
- 5) Preencha a Tabela 9E.1 com os resultados das suas observações.

Tabela 9E.1. Registo de observações

Tipo de espelho	posição do objecto em relação ao espelho	características das imagens
côncavo	objecto entre o espelho e o foco	
	objecto entre o foco e o centro de curvatura	
	objecto além do centro de curvatura	
convexo	objecto em qualquer posição em frente ao espelho	

EXPERIÊNCIA 9F - Determinação da distância focal de um espelho côncavo, localizando o foco

Equipamento utilizado

- espelho côncavo
- alvo
- suportes
- fita métrica

Objectivo

Determinar de modo expedito o valor aproximado da distância focal de um espelho côncavo.

Procedimento

- 1) Coloque o espelho côncavo num suporte, em posição vertical, voltado para um objecto distante (janela da sala, árvore, nuvem).
- 2) Posicione o alvo de modo a obter uma imagem focada do objecto escolhido.
- 3) Meça a distância entre o centro óptico do espelho e o alvo. Mostre, através de uma construção geométrica simples, que esta distância representa o valor aproximado da distância focal do espelho.⁵⁵

⁵⁵ Este método é útil para obter um valor aproximado da distância focal, antes de aplicar métodos mais precisos.

EXPERIÊNCIA 9G - Determinação da distância focal de um espelho côncavo com o esferômetro

Equipamento utilizado

- espelho côncavo
- esferômetro
- placa de vidro
- craveira

Objectivo

Determinar a distância focal de um espelho côncavo, através da medição do seu raio de curvatura com um esferômetro.

Procedimento

- 1) Estude a escala do esferômetro, para determinar o avanço⁵⁶ do parafuso P (escala vertical) quando é rodado de uma volta (360 °). Indique então o valor da natureza do nônio circular N. Ver figura 9G.1.

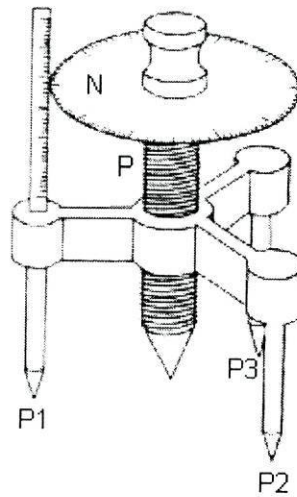
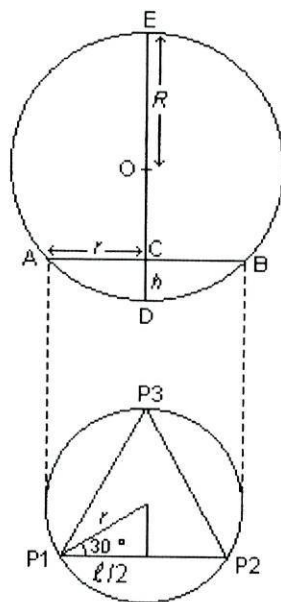


Figura 9G.1. Esferômetro

- 2) Pouse o esferômetro sobre uma placa de vidro e rode o parafuso até que o apoio central aflore a superfície do vidro. Esta operação será mais fácil se observar o parafuso de lado.

⁵⁶ Este avanço é geralmente de 0,5 mm ou 1 mm.

- 3) Verifique se os zeros da escala vertical e circular coincidem. Em caso negativo, determine o erro médio do zero, efectuando várias leituras, através da repetição das operações descritas em 2).
- 4) Pouse agora o esferômetro sobre a superfície do espelho côncavo e rode o parafuso até que o apoio central aflore a superfície do vidro. Efectue a leitura da medida indicada no aparelho.
- 5) Realize vários ensaios e calcule o valor médio.
- 6) Determine o valor da medição (h), levando em conta um eventual erro do zero, de acordo com 3).
- 7) Com a craveira meça a distância entre dois apoios externos (P1, P2, P3) consecutivos do esferômetro (ℓ). Ver figura 9G.2.



Os apoios P1, P2, P3, definem uma circunferência, de diâmetro AB

$$AC \times CB = DC \times CE$$

$$r^2 = h(2R - h)$$

$$r = \frac{\ell}{\sqrt{3}}$$

$$R = \frac{\ell^2 + 3h^2}{6h}$$

Figura 9G.2. Relações geométricas associadas à utilização do esferômetro

- 8) Calcule o raio de curvatura do espelho (R), através da relação

$$R = \frac{\ell^2 + 3h^2}{6h}$$

- 9) Determine a distância focal do espelho côncavo.

EXPERIÊNCIA 9H - Determinação da distância focal de um espelho côncavo, pelo método de coincidência da imagem e objecto

Equipamento utilizado

- espelho côncavo $f = +50 \text{ mm}$ (PASCO OS-8532)
- banco de óptica (PASCO OS-8518)
- fonte objecto (PASCO OS-8517)
- fita métrica
- alfinete
- placa rectangular de cortiça

Objectivo

Determinar a distância focal de um espelho côncavo, utilizando duas técnicas diferentes para o mesmo método.

Procedimento

1ª parte - técnica do banco de óptica com fonte objecto

- 1) Utilizando o método descrito na *EXP. 9F* determine a distância focal aproximada do espelho, d .
- 2) Adapte a fonte de luz numa extremidade do banco de óptica, na posição de fonte objecto (este consiste no desenho de um alvo com duas setas cruzadas, sobre um ecrã translúcido).
- 3) Monte o espelho côncavo no banco de óptica, com a parte espelhada voltada para a fonte e a uma distância deste de cerca de $2d$. Ver figura 9H.1.

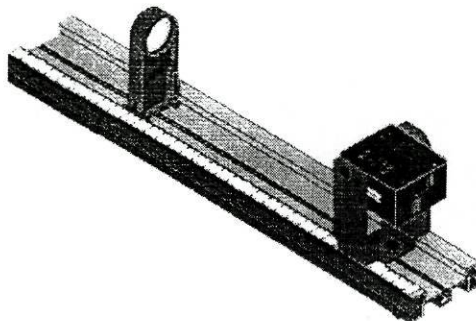


Figura 9H.1. Montagem utilizada
(adaptado de Hanks, A., Hanks, T., 1995)

- 4) Movimente o espelho lentamente para um lado e para o outro, até conseguir obter uma imagem focada e invertida do objecto sobre o ecrã da fonte.⁵⁷
- 5) Meça rigorosamente a distância entre a fonte objecto e o centro óptico do espelho. Esta representa o raio de curvatura do espelho, duplo da distância focal.
- 6) Repita os dois pontos anteriores três vezes, de modo a determinar um valor médio.

2ª parte - técnica de não-paralaxe, com alfinete

- 7) Caso não tenha executado o ponto 1), concretize-o agora, de modo a obter um valor aproximado da distância focal, d .
- 8) Coloque o espelho no suporte, com o seu eixo óptico horizontal, na extremidade da placa de cortiça.
- 9) Espete o alfinete na placa, a uma distância de cerca de $2d$ relativamente ao espelho. Ver figura 9H.2.

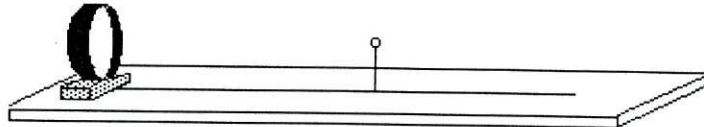


Figura 9H.2. Montagem utilizada

- 10) Olhe para o espelho, a partir do lado direito da placa. Deverá observar tanto o alfinete como a sua imagem invertida formada pelo espelho. Desloque o alfinete um pouco, para trás e para a frente, de modo a encontrar a posição em que o alfinete e a sua imagem deixam de exibir paralaxe um em relação ao outro.
- 11) Caso tenha dificuldade em executar o ponto anterior, comece por efectuar a seguinte actividade de treino, com as suas mãos:

⁵⁷ Se necessário, tape metade do ecrã com uma folha de papel branco, que servirá de alvo; imagem e objecto devem ter as mesmas dimensões.

Dobre os dedos, excepto os indicadores. Estique os braços, mantendo os indicadores em posição vertical. Experimente olhar para os dois dedos com um olho fechado. Mova a cabeça para a direita e para a esquerda, para cima e para baixo; se os dois dedos estiverem no mesmo plano (à mesma distância de si), mantêm-se juntos; caso contrário, movem-se um em relação ao outro.

- 12) Meça a distância do alfinete ao centro óptico do espelho, que representa o raio de curvatura do mesmo, duplo da distância focal.
- 13) Repita os pontos 10) e 12) três vezes, de modo a determinar um valor médio.

Efectue uma construção geométrica capaz de pôr em evidência que, quando o objecto e a imagem não exibem paralaxe, a respectiva distância ao espelho coincide com o seu raio de curvatura.

EXPERIÊNCIA 9I - Determinação da distância focal de um espelho côncavo, pelo método dos focos conjugados

Equipamento utilizado

- espelho côncavo $f = +50 \text{ mm}$
- meio ecrã (PASCO OS-8532)
- banco de óptica (PASCO OS-8518)
- fonte objecto (PASCO OS-8517)
- fita métrica
- 2 alfinetes
- placa rectangular de cortiça

Objectivo

Determinar a distância focal de um espelho côncavo, utilizando duas técnicas diferentes para o mesmo método.

Procedimento

1ª parte - técnica do banco de óptica com fonte objecto

- 1) Utilizando o método descrito na *EXP. 9F* determine a distância focal aproximada do espelho, d .
- 2) Adapte a fonte de luz numa extremidade do banco de óptica, na posição de fonte objecto (este consiste no desenho de um alvo com duas setas cruzadas, sobre um ecrã translúcido).
- 3) Monte o espelho côncavo no banco de óptica, com a parte espelhada voltada para a fonte e a uma distância deste um pouco superior a $2d$. Ver figura 9I.1.
- 4) Interponha o meio ecrã entre a fonte e o espelho. Mova-o para um lado e para o outro, cuidadosamente, até obter nele uma imagem focada do objecto. Meça as distâncias s_o e s_i , respectivamente do objecto ao espelho e da imagem ao espelho. Ver figura 9I.1.

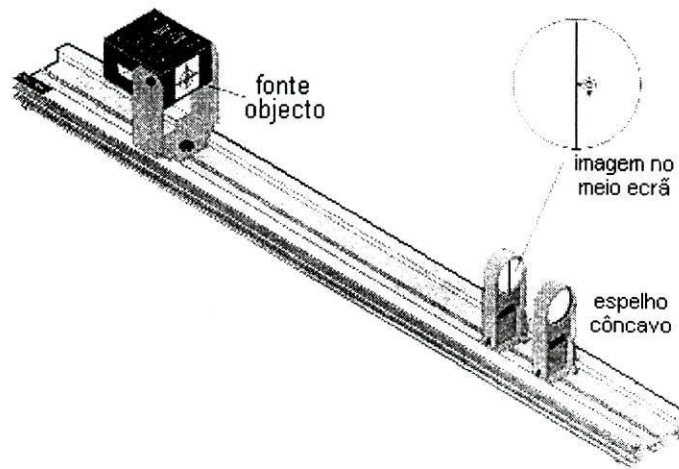


Figura 9I.1. Montagem utilizada
(adaptado de Hanks, A., Hanks, T., 1995)

- 5) Mova o meio ecrã um pouco (cerca de $d/6$) na direcção do espelho. Desloque a fonte objecto até obter de novo no meio ecrã uma imagem focada. Meça novamente as distâncias s_o e s_i .
- 6) Repita o ponto anterior, de modo a obter pelo menos cinco pares de leituras diferentes; os valores de s_o devem situar-se entre $2d$ e d .⁵⁸
- 7) Registe os valores experimentais na Tabela 9I.1. Efectue os cálculos necessários para preencher a terceira e quarta colunas da mesma.

Tabela 9I.1. Resultados obtidos

s_o	s_i	$1/s_o$	$1/s_i$

- 8) Represente graficamente $1/s_i$ em função de $1/s_o$.
- 9) Determine o valor da distância focal do espelho através da análise do gráfico obtido, que deve corresponder a uma recta, intersectando ambos os eixos nos pontos $(0, 1/f)$ e $(1/f, 0)$ respectivamente.

⁵⁸ Caso contrário, s_i tornar-se-á demasiado elevado para ser determinado.

- 10) Explique o procedimento da alínea anterior, tomando como referência a equação dos focos conjugados (equação de Gauss).

2ª parte - técnica de não-paralaxe, com alfinetes

- 11) Caso não tenha executado o ponto 1), concretize-o agora, de modo a obter um valor aproximado da distância focal, d .
- 12) Coloque o espelho no suporte, com o seu eixo óptico horizontal, na extremidade da placa de cortiça.
- 13) Espete um alfinete - que servirá de objecto - na placa, a uma distância de cerca de $2d$ relativamente ao espelho. Ver figura 9I.2.

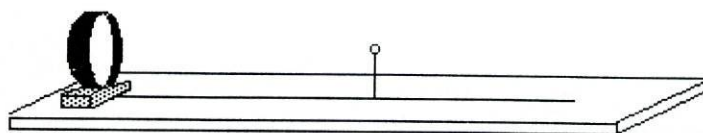


Figura 9I.2. Montagem utilizada

- 14) Ajuste a posição do alfinete, de modo a ver claramente uma imagem real junto do mesmo.⁵⁹
- 15) Segure um segundo alfinete com a mão, entre a imagem e o espelho, na mesma direcção do seu eixo óptico. Mova este alfinete para a frente e para trás, de modo a encontrar a posição em que ele e a imagem deixam de exibir paralaxe um em relação ao outro. Ver *EXP. 9H - 2ª parte*. Fixe o alfinete nesta posição, que representa a posição da imagem.
- 16) Meça as distâncias s_o e s_i , respectivamente do objecto ao espelho e da imagem ao espelho.
- 17) Mova o alfinete-objecto um pouco (cerca de $d/6$) na direcção do espelho; procure de novo a posição da imagem (como indicado em 15). Meça as distâncias s_o e s_i .

⁵⁹ Se necessário, corte um pequeno quadrado de papel, efectue um orifício no seu centro e observe através dele.

- 18) Repita o ponto anterior, de modo a obter pelo menos cinco pares de leituras diferentes; os valores de s_o devem situar-se entre $2d$ e d .
- 19) Registe os valores experimentais na Tabela 9I.2. Efectue os cálculos necessários para preencher a terceira e quarta colunas da mesma.

Tabela 9I.2. Resultados obtidos

s_o	s_i	$1/s_o$	$1/s_i$

- 20) Represente graficamente $1/s_i$ em função de $1/s_o$.
- 21) Determine o valor da distância focal do espelho através da análise do gráfico obtido, que deve corresponder a uma recta, intersectando ambos os eixos nos pontos $(0, 1/f)$ e $(1/f, 0)$ respectivamente.
- 22) Explique o procedimento da alínea anterior, tomando como referência a equação de Gauss.

EXPERIÊNCIA 9J - Verificação da equação de Newton para um espelho côncavo**Equipamento utilizado**

- espelho côncavo com suporte
- fita métrica
- 3 alfinetes
- placa rectangular de cortiça

Objectivo

Verificar a validade da equação de Newton para um espelho côncavo.

Procedimento

- 1) Determine a distância focal do espelho, f , utilizando o método descrito na *EXP. 9H - 2ª parte*.
- 2) Coloque o espelho no suporte, com o seu eixo óptico horizontal, na extremidade da placa de cortiça.
- 3) Espete um alfinete, F , na placa de cortiça, na posição correspondente ao foco do espelho. Ver figura 9J.1.

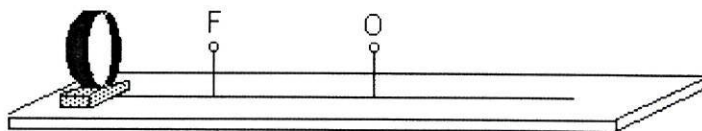


Figura 9J.1. Montagem utilizada

- 4) Espete outro alfinete, O , que funcionará como objecto, a uma distância um pouco superior à distância focal do espelho, na direcção do seu eixo óptico. Localize a sua imagem real, pelo método de não paralaxe, utilizando um terceiro alfinete, P .
- 5) Meça as distâncias OF e PF , x_o e x_i , respectivamente.

- 6) Afaste O um pouco mais de F e repita os pontos 4) e 5).
- 7) Efectue mais ensaios, de modo a obter pelo menos cinco pares de valores. Registe-os na Tabela 9J.1.
- 8) Efectue os cálculos necessários ao preenchimento da terceira coluna da tabela.

Tabela 9J.1. Valores obtidos

x_o	x_i	$1/x_o$

- 9) Represente graficamente x_i em função de $1/x_o$; deverá obter uma linha recta. Determine o respectivo declive, e compare-o com o quadrado do valor da distância focal, f , obtido em 1).
- 10) Procure repetir a experiência para imagens virtuais ⁶⁰, espetando o alfinete O entre F e o espelho. Use também um alfinete para localizar cada imagem, pela técnica de não-paralaxe.

⁶⁰ Esta operação será muito difícil de realizar se a distância focal do espelho tiver um valor inferior a +150 mm.

EXPERIÊNCIA 9K - Determinação da distância focal de um espelho convexo com o esferômetro

Equipamento utilizado

- espelho convexo
- esferômetro
- placa de vidro
- craveira

Objectivo

Determinar a distância focal de um espelho convexo, através da medição do seu raio de curvatura com um esferômetro.

Procedimento

- 1) Estude a escala do esferômetro, para determinar o avanço ⁶¹ do parafuso P (escala vertical) quando é rodado de uma volta (360 °). Indique então o valor da natureza do nónio circular N. Ver figura 9K.1.

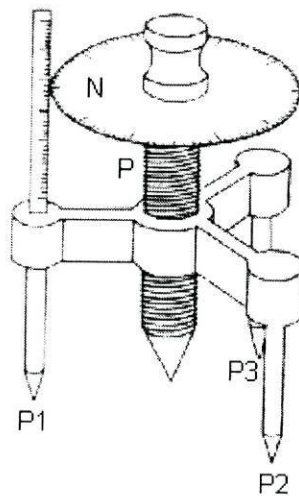
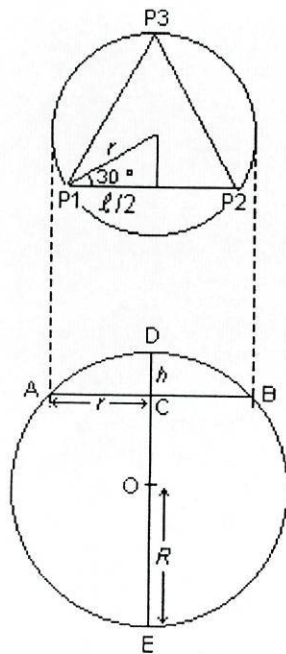


Figura 9K.1. Esferômetro

- 2) Pouse o esferômetro sobre uma placa de vidro e rode o parafuso até que o apoio central aflore a superfície do vidro. Esta operação será mais fácil se observar o parafuso de lado.

⁶¹ Este avanço é geralmente de 0,5 mm ou 1 mm.

- 3) Verifique se os zeros da escala vertical e circular coincidem. Em caso negativo, determine o erro médio do zero, efectuando várias leituras, através da repetição das operações descritas em 2).
- 4) Rode o parafuso, de modo a subir a apoio central. Pouse o esferómetro sobre a superfície do espelho convexo e ajuste o parafuso até que o apoio central aflore a superfície do vidro. Efectue a leitura da medida indicada no aparelho.
- 5) Realize vários ensaios e calcule o valor médio.
- 6) Determine o valor da medição (h), levando em conta um eventual erro do zero, de acordo com 3).
- 7) Com a craveira meça a distância entre dois apoios externos (P1, P2, P3) consecutivos do esferómetro (ℓ). Ver figura 9K.2.



Os apoios P1, P2, P3, definem —
uma circunferência, de diâmetro AB

$$AC \times CB = DC \times CE$$

$$r^2 = h (2R - h)$$

$$r = \frac{\ell}{\sqrt{3}}$$

$$R = \frac{\ell^2 + 3h^2}{6h}$$

Figura 9K.2. Relações geométricas associadas à utilização do esferómetro

- 8) Calcule o raio de curvatura do espelho (R), através da relação

$$R = \frac{\ell^2 + 3h^2}{6h}$$

- 9) Determine a distância focal do espelho convexo. Recorde a convenção de sinais.

EXPERIÊNCIA 9L - Determinação da distância focal de um espelho convexo usando uma lente convexa

Equipamento utilizado

- espelho convexo
- banco de óptica (PASCO OS-8518)
- fonte de luz objecto (PASCO OS-8517)
- lente convexa
- alvo

Objectivo

Determinar a distância focal de um espelho convexo, recorrendo a uma lente convexa auxiliar.

Procedimento

- 1) Adapte a fonte de luz numa extremidade do banco de óptica, na posição de fonte objecto (este consiste no desenho de um alvo com duas setas cruzadas, sobre um ecrã translúcido). Na figura 9L.1, corresponde ao ponto O.

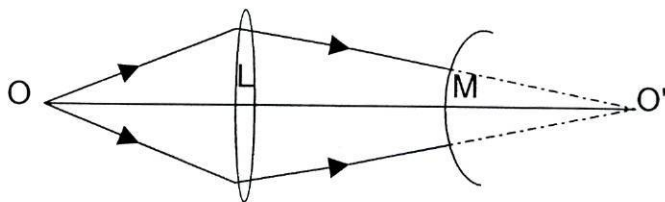


Figura 9L.1. Esquema da montagem utilizada

- 2) Coloque uma lente convexa, L, em frente da fonte de luz, distando da mesma alguns centímetros. Monte o alvo no banco de óptica, de modo a obter nele uma imagem real e nítida do objecto, O' ; se necessário afaste um pouco a lente da fonte.
- 3) Meça a distância LO', entre a lente e a imagem. Note que, para o método resultar, esta distância deve ser superior ao raio de curvatura do espelho.

- 4) Mantendo fixas a fonte objecto e a lente, intercale o espelho convexo, M, de acordo com a figura 9L.1. Movimente-o lentamente para um lado e para o outro, até conseguir obter uma imagem focada e direita do objecto sobre o ecrã da fonte.⁶²
- 5) Meça a distância LM, entre a lente e o espelho.
- 6) Repita o procedimento quatro vezes, variando a distância LO'.
- 7) Registe os valores obtidos na Tabela 9L.1. Efectue os cálculos necessários ao preenchimento da terceira coluna. Note que, nas condições da experiência, os raios luminosos provenientes da lente são normais ao espelho, pelo que O' coincide com o seu centro de curvatura, e MO' representa o raio de curvatura.

Tabela 9L.1. Valores obtidos

LO' / cm	LM / cm	$r = MO' = LO' - LM$

- 8) Determine o valor médio do raio de curvatura do espelho. Calcule então a sua distância focal.
- 9) Repita a experiência, utilizando um alfinete bem iluminado na posição O, em vez da fonte objecto; se tiver realizado a EXP. 9H, terá certamente maior facilidade. Compare a precisão das suas determinações através das duas técnicas.

⁶² Se necessário, tape metade do ecrã com uma folha de papel branco, que servirá de alvo; a imagem deve coincidir, ponto por ponto, com o objecto.

EXPERIÊNCIA 9M - Determinação da distância focal de um espelho convexo usando um espelho plano

Equipamento utilizado

- espelho convexo com suporte
- fita métrica
- alfinete
- pequeno espelho plano
- placa rectangular de cortiça

Objectivo

Determinar a distância focal de um espelho convexo, recorrendo a um espelho plano auxiliar.

Procedimento

- 1) Coloque o espelho convexo no suporte, com o seu eixo horizontal, na extremidade da placa de cortiça.
- 2) Espete o alfinete - que servirá de objecto - na placa, a uma distância tal que uma pequena imagem virtual possa ser observada no espelho, e na direcção do eixo óptico.
- 3) Coloque o pequeno espelho plano entre o alfinete e o espelho convexo, de modo a ocultar a sua metade inferior. Ver figura 9M.1.

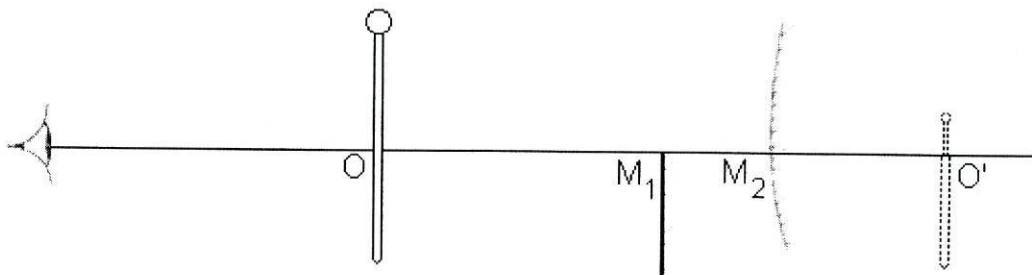


Figura 9M.1. Esquema da montagem utilizada

- 4) Olhando a partir do lado direito da figura, observe as duas imagens virtuais do alfinete, uma em cada espelho. Ajuste a posição do espelho plano, de modo a fazê-las coincidir, pela técnica de não-paralaxe, conforme a *EXP. 9H - 2ª parte*.
- 5) Meça a distância M_1M_2 , entre os dois espelhos, bem como a distância M_1O , entre o espelho plano e o alfinete.
- 6) Repita a experiência para diferentes valores de M_1O . Registe todos os dados na Tabela 9M.1.

Tabela 9M.1. Valores obtidos

M_1O / cm	M_1M_2 / cm	f / cm

- 7) Calcule os valores de s_o , distância do objecto ao espelho e s_i , distância da imagem ao espelho. Note que:

$$s_o = M_1O + M_1M_2$$

$$s_i = - (M_1O - M_1M_2) \quad \text{atendendo a que a imagem é virtual.}$$

- 8) Preencha a terceira coluna do quadro, calculando o valor da distância focal do espelho convexo, através da equação dos focos conjugados (ou equação de Gauss):

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i}$$

- 9) Calcule a média dos valores obtidos nos vários ensaios.

EXPERIÊNCIA 10A - Leis da refração

Equipamento utilizado

- fonte de luz (feixe delgado de raios paralelos)
- disco de Hartl ou papel polar⁶³
- semicilindro de vidro

Objectivo

Estudar o comportamento dos raios luminosos quando mudam de meio óptico.

Procedimento

- 1) Faça incidir o feixe luminoso tangencialmente ao disco de Hartl (ou papel polar), coincidindo com o diâmetro cujas extremidades indicam 0° .
- 2) Posicione o semicilindro de vidro na superfície do disco de Hartl (ou papel polar), de acordo com a figura 10A.1.

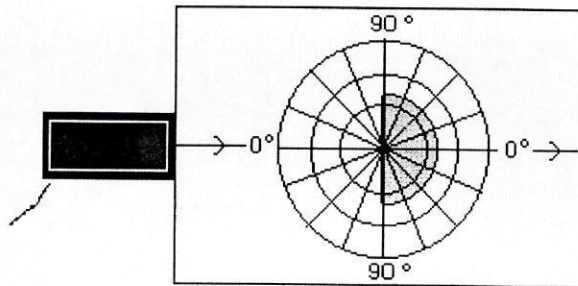


Figura 10A.1. Montagem utilizada

- 3) Verifique que, para um ângulo de incidência de 0° , ou seja, uma incidência normal à superfície de separação dos dois meios ópticos, o raio refractado tem a mesma direcção e sentido do raio incidente.
- 4) Rode o disco de Hartl (ou papel polar), de modo a obter um valor superior para o ângulo de incidência: anote esse valor na Tabela 10A.1. Meça também o correspondente ângulo de refração e anote igualmente o seu valor na tabela.

⁶³ Em alternativa pode utilizar uma folha de papel branco e um transferidor. Como fonte de luz pode também usar um laser, desde que "abra" o respectivo feixe com uma lente cilíndrica, como p. e. uma vareta de vidro.

Note que o feixe luminoso apenas muda de direcção na 1ª refacção, do ar para o vidro. Na 2ª refacção, do vidro para o ar, o feixe incide perpendicularmente à superfície curva, não sofrendo qualquer desvio.

- 5) Repita o procedimento para mais quatro valores diferentes do ângulo de incidência.

Tabela 10A.1. Resultados obtidos

Ângulo de incidência, i	$\text{sen } i$	Ângulo de reflexão, r	$\text{sen } r$

- 6) Efectue os cálculos necessários ao preenchimento da 2ª e 4ª colunas da Tabela 10A.1.
- 7) Represente graficamente $\text{sen } i = f(\text{sen } r)$. O que pode concluir a partir da forma do gráfico obtido ?

EXPERIÊNCIA 10B - Visibilidade e invisibilidade

Equipamento utilizado

- boneco de vidro (índice de refração $\approx 1,5$)
- gobelé com água (índice de refração $\approx 1,3$)
- gobelé com óleo vegetal (índice de refração $\approx 1,5$)
- papel absorvente

Objectivo

Constatar uma das condições necessárias para que os objectos transparentes sejam visíveis.

Procedimento

- 1) Observe o boneco de vidro, no ar.
- 2) Introduza-o com cuidado no gobelé com água. Consegue ainda vê-lo ?
- 3) Retire o boneco de vidro da água e seque-o muito bem com papel absorvente.
- 4) Introduza-o agora no gobelé com o óleo vegetal. Consegue ainda vê-lo ?
- 5) A partir das suas observações, procure inferir uma condição necessária para que os objectos transparentes sejam visíveis.

EXPERIÊNCIA 10C - Determinação do índice de refração de um líquido transparente, usando um espelho côncavo

Equipamento utilizado

- líquido a estudar
- espelho côncavo
- suporte com garra
- alfinete
- rolha de cortiça
- fita métrica
- papel branco

Objectivo

Determinar o índice de refração de um líquido transparente usando apenas uma pequena quantidade do mesmo.

Procedimento

- 1) Utilizando o método descrito na *EXP. 9F* determine a distância focal aproximada do espelho, d .
- 2) Coloque o espelho sobre a mesa, e segure o alfinete, espetado na rolha, com a garra, na posição indicada na figura 10C.1.



Figura 10C.1. Montagem utilizada

- 3) Posicione o alfinete a uma distância de cerca de $2d$ relativamente ao espelho. Olhando por cima do alfinete, para o espelho, deverá observar tanto o alfinete como a sua imagem invertida formada pelo espelho.

- 4) Mova a garra um pouco para cima e para baixo, de modo a encontrar a posição em que o alfinete e a sua imagem deixam de exibir paralaxe um em relação ao outro.
- 5) Caso tenha dificuldade em executar o ponto anterior, comece por efectuar a seguinte actividade de treino, com as suas mãos:

Dobre os dedos, excepto os indicadores. Estique os braços, mantendo os indicadores em posição vertical. Experimente olhar para os dois dedos com um olho fechado. Mova a cabeça para a direita e para a esquerda, para cima e para baixo; se os dois dedos estiverem no mesmo plano (à mesma distância de si), mantêm-se juntos; caso contrário, movem-se um em relação ao outro.

- 6) Meça a distância do alfinete ao centro óptico do espelho, que representa o raio de curvatura do mesmo, r .
- 7) Coloque um pouco do líquido transparente a estudar dentro da concavidade do espelho. Repita o procedimento descrito em 4). Meça a nova distância do alfinete ao centro óptico do espelho, r' . Por que razão r e r' são diferentes ?
- 8) Atendendo a que os ângulos de incidência da luz no espelho foram muito pequenos ao longo da experiência (qual a sua ordem de grandeza ?) calcule o índice de refacção do líquido, n , através da expressão:

$$n = \frac{r}{r'}$$

- 9) A expressão anterior pressupõe que a espessura da camada do líquido a estudar é desprezável face aos valores de r e r' . O que pensa dessa aproximação ?

EXPERIÊNCIA 10D - Determinação do índice de refração de um meio transparente, pelo método da profundidade aparente

Equipamento utilizado

- bloco sólido transparente
- líquido transparente
- gobelé
- câmara de vídeo/fotográfica e suporte
- fita métrica
- craveira
- papel branco
- moeda

Objectivo

Determinar o índice de refração de um meio transparente usando uma câmara de vídeo/fotográfica como auxiliar para medição da profundidade real e aparente.

Procedimento

1ª parte - bloco sólido transparente

- 1) Escolha uma câmara que tenha um sistema rigoroso de focagem manual. Monte-a no suporte, de tal modo que o eixo óptico da sua objectiva fique orientado verticalmente, sobre a mesa. Ver figura 10D.1.

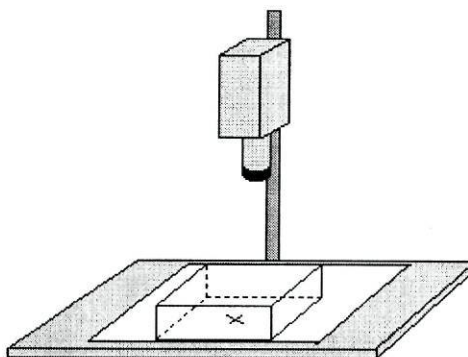


Figura 10D.1. Montagem utilizada

- 2) Coloque a folha de papel pousada na mesa, sob a objectiva da câmara. Desenhe nela uma pequena marca.

- 3) Ajuste a câmara de modo a focar perfeitamente a marca efectuada. Utilize apenas a focagem manual e não o sistema *autofocus*.
- 4) Posicione o bloco sobre a marca efectuada no papel. Desloque a câmara verticalmente até ver a marca outra vez focada, sem mexer no sistema de focagem.
- 5) Meça a distância correspondente ao deslocamento vertical da câmara, que representa a espessura aparente do bloco, e_{ap} .
- 6) Com a craveira determine a espessura real do bloco, e .
- 7) Determine o índice de refração do material que constitui o bloco, através da razão

$$n = \frac{e}{e_{ap}}$$

2ª parte - líquido transparente

- 8) Utilize a mesma montagem da figura 10D.1. Em vez da folha de papel com a marca, coloque sob a objectiva da câmara o gobelé com a moeda pousada no fundo.
- 9) Ajuste a câmara de modo a focar perfeitamente a superfície da moeda. Utilize apenas a focagem manual e não o sistema *autofocus*. Anote a sua posição vertical, x .
- 10) Lance água no gobelé, até cerca de metade da sua capacidade, com cuidado, de modo a não alterar a posição da moeda.
- 11) Desloque a câmara verticalmente até ver a superfície da moeda outra vez focada, sem mexer no sistema de focagem. Anote a nova posição da câmara, y .
- 12) Desloque a câmara verticalmente, de modo a focar agora a superfície da água. Se necessário, espalhe um pouco de pó de talco sobre a água. Anote novamente a posição vertical da câmara, z .

13) Calcule a profundidade aparente do líquido, $e_{ap} = x - z$, bem como a profundidade real, $e = y - z$.

14) Determine o índice de refração do líquido, através da razão

$$n = \frac{e}{e_{ap}}$$

EXPERIÊNCIA 10E - Determinação do índice de refração de um líquido transparente, pelo método da lente líquida

Equipamento utilizado

- líquido transparente
- lente biconvexa
- espelho plano
- alfinete
- rolha de cortiça
- suporte com garra
- fita métrica
- esferómetro

Objectivo

Determinar o índice de refração de um líquido transparente, dispondo de apenas algumas gotas, recorrendo a uma lente biconvexa e um espelho plano auxiliares.

Procedimento

- 1) Coloque o espelho plano sobre a mesa, e segure o alfinete, espetado na rolha, com a garra, na posição indicada na figura 10E.1. Pouse a lente sobre o espelho.
- 2) Mova a garra para cima e para baixo, de modo a encontrar a posição em que o alfinete e a sua imagem deixam de exibir paralaxe um em relação ao outro.
- 3) Caso tenha dificuldade em executar o ponto anterior, comece por efectuar a seguinte actividade de treino, com as suas mãos:

Dobre os dedos, excepto os indicadores. Estique os braços, mantendo os indicadores em posição vertical. Experimente olhar para os dois dedos com um olho fechado. Mova a cabeça para a direita e para a esquerda, para cima e para baixo; se os dois dedos estiverem no mesmo plano (à mesma distância de si), mantêm-se juntos; caso contrário, movem-se um em relação ao outro.

- 4) Meça a distância do alfinete ao centro óptico da lente, que representa a distância focal da mesma, f_1 .

- 5) Retire a lente. Coloque algumas gotas do líquido a estudar sobre o espelho. Pouse agora a lente sobre o líquido: obterá uma combinação de uma lente biconvexa (vidro) com uma lente planocôncava (líquido). Ver figura 10E.1.

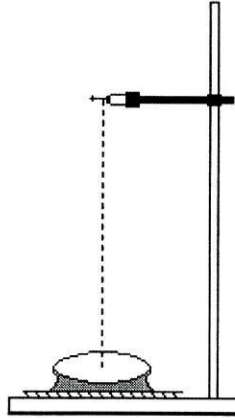


Figura 10E.1. Montagem utilizada

- 6) Repita o procedimento indicado em 2), de modo a determinar a distância focal desta combinação de lentes, F .
- 7) Determine a distância focal da lente líquida, f_2 , através da expressão

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

- 8) Com o esferômetro meça o raio de curvatura da lente biconvexa, que corresponde ao raio da concavidade da lente líquida, r .
- 9) Aplique a equação dos fabricantes de lentes à lente líquida, para calcular o índice de refração pretendido. Verifique que, atendendo ao outro raio de curvatura da lente líquida ser infinito (lado plano), se obtém simplesmente

$$n = 1 + \frac{r}{f_2}$$

EXPERIÊNCIA 10F - Determinação do índice de refração do vidro de uma lâmina de faces paralelas⁶⁴

Equipamento utilizado

- placa de cortiça
- 3 alfinetes
- lâmina de faces paralelas (vidro)
- folha de papel
- transferidor
- régua

Objectivo

Determinar o índice de refração do vidro que constitui uma lâmina de faces paralelas, recorrendo a alfinetes para assinalar as direcções dos feixes incidente e refractado.

Procedimento

Execute o trabalho sobre a placa de cortiça

1) Coloque a lâmina sobre uma folha de papel e contorne-a a lápis, com rigor.

2) Retire a lâmina, e, por um ponto I (ver figura 10F.1), trace:

- normal $\overline{NI}$
- direcção $\overline{LI}$ (representa um raio luminoso incidente qualquer).

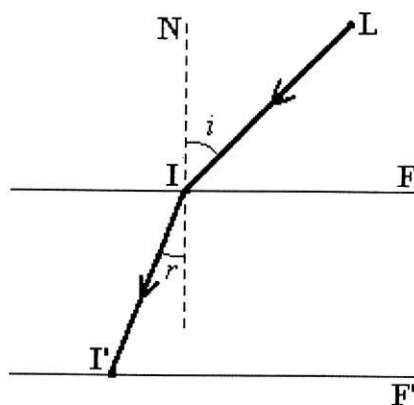


Figura 10F.1.

Traçado das direcções dos feixes incidente e refractado

⁶⁴ Este método pode igualmente ser utilizado para a determinação do índice de refração de um líquido transparente, contido numa tina rectangular de vidro de paredes muito finas.

- 3) Coloque verticalmente 2 alfinetes, nas posições I e L.
- 4) Pouse a lâmina na posição inicial e determine a direcção $\overline{II'}$ (raio refractado); para tal, procure ver, através do vidro, pela face F', os dois alfinetes em sobreposição, e coloque um terceiro alfinete encostado à face F', na direcção encontrada (ponto I').
- 5) Retire a lâmina e trace $\overline{II'}$.
- 6) Usando o transferidor, meça os valores dos ângulos de incidência, i , e de refacção, r . Registe esses valores na Tabela 10F.1.

Tabela 10F.1. Resultados obtidos

		i	r	$n = \text{sen } i / \text{sen } r$
ENSAIO	1º			
	2º			
	3º			

- 7) Variando o valor de i , efectue mais dois ensaios e registe também os valores obtidos.
- 8) Preencha a coluna da direita, calculando o índice de refacção n , do vidro, com a ajuda de uma tabela de senos ou de uma calculadora.
- 9) Determine o valor mais provável de n .

EXPERIÊNCIA 10G - Determinação do índice de refração do vidro de um prisma pelo método do desvio mínimo⁶⁵

Equipamento utilizado

- placa de cortiça
- 4 alfinetes
- prisma óptico
- folha de papel
- transferidor
- régua

Objectivo

Determinar o índice de refração do vidro que constitui um prisma, recorrendo a alfinetes para assinalar as direcções dos feixes incidente e refractado, na situação de desvio mínimo.

Procedimento

Execute o trabalho sobre a placa de cortiça

- 1) Numa folha de papel, assente o prisma pela base, na posição indicada na figura 10G.1; contorne-o levemente a lápis.

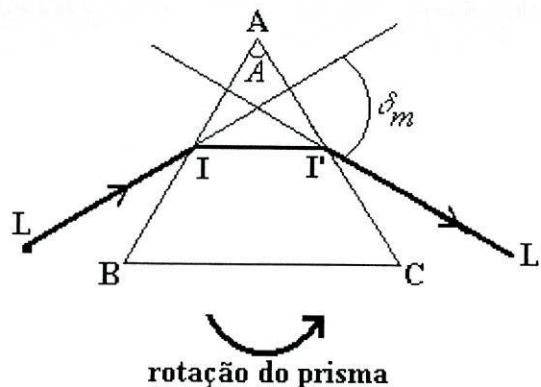


Figura 10G.1.
Traçado das direcções dos feixes incidente e refractado,
na situação de desvio mínimo

- 2) Retire o prisma e trace o segmento $\overline{LI}$ (representa um raio luminoso incidente) ;
I deve ser aproximadamente o ponto médio de $\overline{AB}$.

⁶⁵ Este método pode igualmente ser utilizado para a determinação do índice de refração de um líquido transparente, contido num prisma oco de vidro de paredes muito finas.

- 3) Coloque dois alfinetes nas posições L e I ; pouse o prisma na posição inicial.
- 4) Através da face $\overline{AC}$ do prisma procure ver os dois alfinetes justapostos; rode agora o prisma (ver figura 10G.1), em torno de I, sem o desencostar do alfinete, e verifique que as imagens dos alfinetes acompanham o deslocamento até uma posição particular (posição de *desvio mínimo*) a partir da qual, instantaneamente, passam a deslocar-se em sentido oposto. **Pare aí a rotação do prisma.**
- 5) Contorne a lápis, com o maior rigor, o prisma, nesta posição.
- 6) Coloque dois alfinetes nas posições I' e L', de forma que os quatro alfinetes sejam vistos alinhados quando se olha pela face $\overline{AC}$. Retire o prisma. Trace $\overline{I'L'}$ (raio emergente).
- 7) Usando o transferidor, meça e registre o valor dos ângulos:

A = ângulo do prisma

δ_m = ângulo de desvio mínimo

- 8) Efectue mais dois ensaios, variando a posição de L, e registre os valores obtidos na Tabela 10G.1.

Tabela 10G.1. Valores obtidos

		A	δ_m
ENSAIO	1º		
	2º		
	3º		

- 9) Determine o valor mais provável de A e de δ_m .
- 10) Calcule o índice de refração do vidro, utilizando a expressão seguinte:

$$n = \frac{\sin \frac{\delta_m + A}{2}}{\sin \frac{A}{2}}$$

(método do desvio mínimo ⁶⁶)

⁶⁶ Para a dedução desta expressão consulte, p. e. Oliveira, M. L., Sousa, A.S., 1995.

EXPERIÊNCIA 10H - Determinação do índice de refração de um líquido transparente, pelo método de Searle

Equipamento utilizado

- tanque de vidro rectangular, de paredes finas
- líquido em estudo
- célula de ar com suporte
- fonte laser
- 2 anteparos com orifício ($d < 1 \text{ mm}$)
- alvo
- transferidor

Objectivo

Determinar o índice de refração de um líquido transparente, através da medição do ângulo crítico, com uma célula de ar.

Procedimento

- 1) **Construa previamente uma célula de ar:** utilize, por exemplo, duas lamelas de microscópio, muito bem coladas num pequeno caixilho de acrílico. Este conjunto deve ser fixado a uma haste metálica vertical, que pode ser rodada. É conveniente dotar a haste de um ponteiro, para facilitar a medida do ângulo de rotação.
- 2) Faça incidir a luz da fonte laser perpendicularmente a um dos lados do tanque. Posicione os dois anteparos, A1 e A2, um de cada lado do tanque com o líquido, de modo a que o feixe atravessasse os dois orifícios e incida no alvo. Ver figura 10H.1.
- 3) Introduza a célula de ar no tanque, de modo a ser atravessada normalmente pelo feixe; este deve continuar a atingir o alvo.

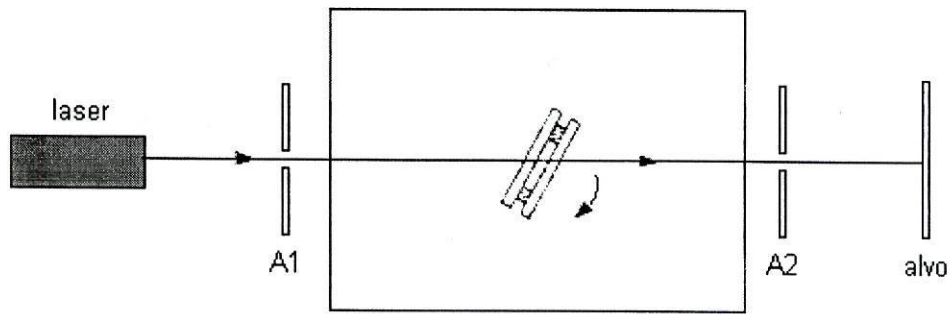


Figura 10H.1. Esquema da montagem utilizada

- 4) Rode a célula para a direita, até que o feixe deixe de atingir o alvo. Meça cuidadosamente o ângulo de rotação.
- 5) Reponha a célula na sua posição original e rode-a agora para a esquerda. Meça de novo o ângulo de rotação.
- 6) Repita os dois pontos anteriores, pelo menos três vezes. Determine o valor mais provável, que representa o ângulo crítico para uma superfície de separação líquido-ar, θ_c .
- 7) Calcule o valor do índice de refração do líquido, através da expressão

$$n = \frac{1}{\sin \theta_c}$$

EXPERIÊNCIA 10I - Determinação do índice de refração de um material transparente, com o refractômetro de Abbe

Equipamento utilizado

- refractômetro de Abbe
- bloco de vidro (1 face polida e restantes faces despolidas)
- frasco com líquido a estudar
- frasco conta-gotas com bromonaftaleno
- termômetro (temperatura ambiente)
- algodão e álcool etílico

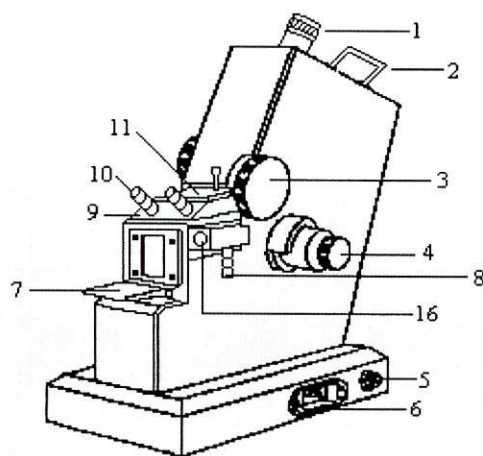
Objectivo

Determinar, com grande precisão, o índice de refração de um material transparente.

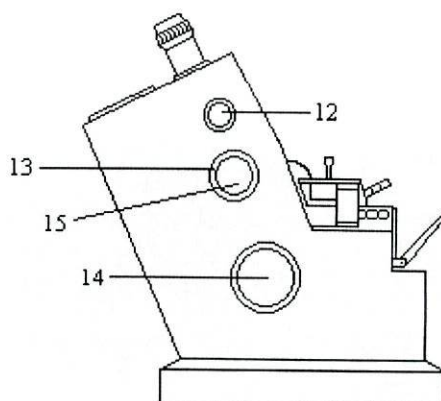
Procedimento

1ª parte - bloco de vidro

- 1) Identifique cada um dos componentes do refractômetro. Ver figura 10I.1.



1. Ocular (ampliação 2x)
2. Janela protectora
3. Comando de abertura do prisma superior
4. Suporte de lâmpada
5. Interruptor
6. Euroconector
7. Espelho reflector
8. Entrada para medição da temperatura da água



9. Cobertura da entrada de luz no prisma superior
10. Entradas para banho termostático
11. Prisma superior
12. Cobertura do parafuso de calibração
13. Escala de dispersão cromática
14. Botão de regulação do campo
15. Regulador de dispersão cromática
16. Entrada de termómetro

Figura 10I.1. Refractômetro de Abbe

Nota: O procedimento descrito a seguir pressupõe a calibração prévia do aparelho, feita pelo professor de acordo com instruções de fábrica.

- 2) Ligue o interruptor (5). Abra a janela protectora (2); se a iluminação do ecrã não for uniforme, rode o suporte da lâmpada (4) até conseguir as condições ideais; feche novamente a janela.
- 3) Rode o comando (3) no sentido dos ponteiros do relógio, de modo a permitir levantar o prisma superior (11). Mantenha o espelho reflector (7) fechado.
- 4) Com o prisma superior levantado, coloque uma gota de bromonaftaleno (índice de refração superior ao do vidro) na superfície polida do bloco de vidro e pouse-a sobre o prisma inferior, de forma a que o líquido se espalhe uniformemente.
- 5) Com o botão (14) faça coincidir a "linha de fronteira" com o ponto de intersecção das linhas cruzadas visíveis no campo, de acordo com a figura 10I.2.

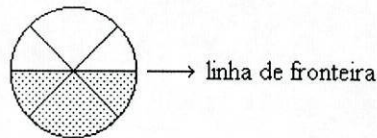


Figura 10I.2. Coincidência da "linha de fronteira" com o ponto de intersecção das linhas cruzadas

- 6) Olhando através da ocular, rode o regulador de dispersão cromática (15), de modo a eliminar a cor da "linha de fronteira" (pare na posição em que o vermelho e o azul desaparecem completamente).
- 7) Leia, no ecrã, através da janela protectora, o valor indicado para o índice de refração do material em estudo (n_1).
- 8) Efectue a correcção de temperatura:
 - leia a temperatura ambiente θ ($^{\circ}$ C);
 - aplique a relação

$$f_c = (\theta - 20,0) \times 0,0000078$$
 - adicione o valor encontrado ao índice n_1 :

$$n = n_1 + f_c$$

- 9) Desligue o aparelho e proceda à limpeza do prisma e da amostra com algodão embebido num pouco de álcool; deixe secar.

2ª parte - líquido transparente

- 10) Rode o comando (3) no sentido dos ponteiros do relógio, de modo a permitir levantar o prisma superior (11). Mantenha o espelho reflector (7) fechado.
- 11) Com o prisma superior levantado, coloque 2 a 3 gotas do líquido em estudo no centro da superfície do prisma inferior.
- 12) Baixe cuidadosamente o prisma superior e trave-o usando o comando (3). Abra a entrada de luz no prisma superior (9). Verifique a iluminação do campo.⁶⁷
- 13) Com o botão (14) faça coincidir a "linha de fronteira" com o ponto de intersecção das linhas cruzadas visíveis no campo, de acordo com a figura 10I.2. Com (9) fechado e (7) aberto, as zonas clara e escura aparecem invertidas.
- 14) Olhando através da ocular, rode o regulador de dispersão cromática (15), de modo a eliminar a cor da "linha de fronteira" (pare na posição em que o vermelho e o azul desaparecem completamente).
- 15) Leia, no ecrã, através da janela protectora, o valor indicado para o índice de refacção do material em estudo (n_1).
- 16) Efectue a correcção de temperatura:
- leia a temperatura ambiente θ (° C);
 - aplique a relação
$$f_c = (\theta - 20,0) \times 0,0000078$$
 - adicione o valor encontrado ao índice n_1 :

$$n = n_1 + f_c$$

- 17) Desligue o aparelho e proceda à limpeza dos prismas com algodão embebido num pouco de álcool; deixe secar.

⁶⁷ No caso de o líquido ser semitransparente, a iluminação do campo pode tornar-se insuficiente; feche então a entrada de luz do prisma (9) e abra o espelho reflector (7).

EXPERIÊNCIA 11A - Estudo da reflexão interna total com o tanque de refração de Nakamura⁶⁸

Equipamento utilizado

- tanque de refração de Nakamura
- fonte de luz (feixe delgado de raios paralelos)
- água destilada e fluoresceína

Objectivo

Estudar a refração e reflexão simultâneas numa interface água-ar, e determinar o valor do ângulo crítico, a partir do qual ocorre reflexão interna total.

Procedimento

O tanque de Nakamura consta essencialmente de um recipiente semicilíndrico de vidro acrílico transparente acoplado a um círculo graduado. A fonte está presa a um suporte que lhe permite descrever um movimento circular, emitindo luz segundo direcções radiais. Ver figura 11.A.

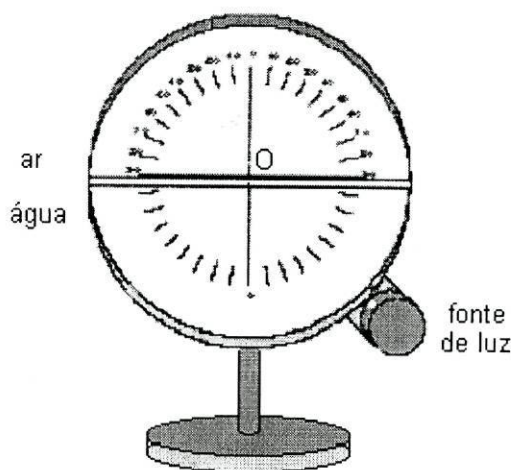


Figura 11A.1. Tanque de refração de Nakamura

- 1) Encha o recipiente com água, até o nível atingir exactamente o centro do círculo, O. Adicione algumas gotas de fluoresceína e agite, para homogeneizar; poderá, deste modo, observar melhor a trajectória da luz.

⁶⁸ Por vezes também designado por aparelho de Silbermann.

- 2) Ligue a fonte de luz e faça-a incidir inicialmente do ar para a água. Meça os ângulos de incidência e refração.
- 3) Aumente o valor do ângulo de incidência, lentamente, até um valor próximo de 90° . Descreva o que observa. Meça o valor do ângulo de refração máximo, θ_c .
- 4) Faça agora a luz incidir da água para o ar, segundo um ângulo de incidência próximo de 90° .
- 5) Diminua o valor deste ângulo lentamente. Descreva o que observa. Pare o movimento no instante em que o raio incidente deixa de sofrer reflexão total, e surge um raio refractado da água para o ar. Meça o valor dos ângulos de incidência e refração. O que pode concluir?
- 6) Continue a diminuir o valor do ângulo de incidência até 0° . Descreva o que observa.

EXPERIÊNCIA 11B - Reflexão interna total num prisma

Equipamento utilizado

- prisma óptico de reflexão total
- fonte de luz (feixe delgado de raios paralelos)
- papel branco
- transferidor

Objectivo

Determinar o ângulo crítico a partir do qual ocorre reflexão total num prisma.

Procedimento

- 1) Faça incidir um feixe paralelo e delgado de luz branca tangencialmente a uma folha de papel branco. No seu percurso interponha o prisma, na posição indicada na figura 11B.1.

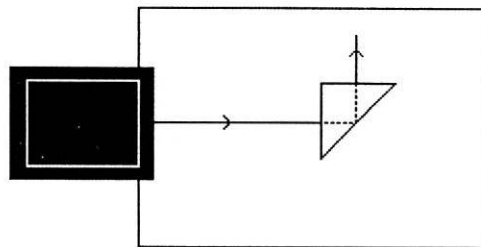


Figura 11B.1. Montagem utilizada

- 2) Rode o prisma até que o feixe emergente praticamente deixe de ser visto. À medida que isso sucede, verifica-se uma dispersão da luz branca. O prisma estará correctamente colocado, na posição em que a cor vermelha tiver acabado de desaparecer.
- 3) Com um lápis desenhe o contorno do prisma no papel. Marque com cuidado o ponto em que o feixe se reflecte internamente. Marque também o ponto de entrada do feixe incidente e o ponto de saída do feixe reflectido.
- 4) Retire o prisma e desenhe os feixes incidente, e reflectido na superfície interna do prisma. Meça o ângulo entre esses feixes com o auxílio do transferidor. Se

necessário, pode prolongar os feixes para tornar mais fácil a medição. Note que este ângulo é duplo do ângulo crítico, já que o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão.

- 5) Consulte uma tabela de índices de refração, e calcule o valor do ângulo crítico, aplicando a expressão, derivada da lei de Snell,

$$\text{sen } \theta_c = \frac{1}{n}$$

- 6) Determine a percentagem de erro entre o valor experimental do ângulo crítico e o valor teórico.

EXPERIÊNCIA 11C - Reflexão interna total com objectos do quotidiano

Equipamento utilizado

- fonte laser
- vareta de vidro
- fibra óptica de plástico
- garrafão de plástico (com água e algumas gotas de fluoresceína)
- balde
- pilha de lamelas de microscópio (50)
- elástico

Objectivo

Demonstrar o fenómeno de reflexão interna total com objectos do quotidiano.

Procedimento

- 1) Faça incidir o feixe laser numa das extremidades da vareta de vidro. Varie ligeiramente o ângulo de incidência para observar as sucessivas reflexões do feixe no interior da vareta, até emergir na outra extremidade.
- 2) Repita a experiência com a fibra óptica. Se necessário corte, com uma lâmina afiada, a extremidade de entrada da luz. Compare as intensidades do feixe luminoso à entrada e à saída da fibra.
- 3) Faça um pequeno orifício no garrafão, perto do fundo. Coloque o balde em posição adequada para recolher a água que escorre do garrafão. Aponte o feixe laser através do garrafão, de modo a incidir no orifício. Poderá observar a luz acompanhando a trajectória da água. Ver figura 11C.1.

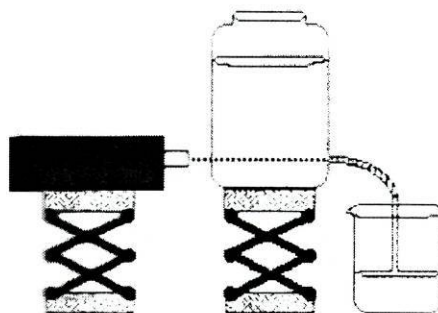


Figura 11C.1. Montagem utilizada

- 4) Prenda a pilha de lamelas com um elástico. Pouse-a em cima do texto escrito de um livro, assente nas arestas. Observe o lado de cima da pilha: poderá ver aí uma imagem real do texto, já que a pilha de lamelas funcionou como um "guia de luz" desde a superfície do livro.

EXPERIÊNCIA 12A - Tipos de lentes

Equipamento utilizado

- fonte de luz (5 feixes delgados de raios paralelos)
- lentes convexa e côncava
- folha de papel branco

Objectivo

Classificar as lentes de acordo com as características dos feixes de luz por elas refractados.

Procedimento

- 1) Regule a fonte de luz de modo a obter cinco feixes delgados de raios paralelos. Faça incidir a luz tangencialmente à folha de papel branco pousada sobre a mesa.
- 2) Interponha a lente convexa no trajecto dos feixes luminosos. Ver figura 12A.1. Observe e desenhe os feixes refractados para diversos valores do ângulo de incidência: comece com uma incidência normal, e faça variar em seguida a posição da lente. O que sucede aos feixes refractados ?

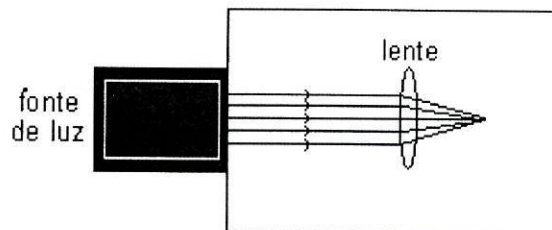


Figura 12A.1. Montagem utilizada

- 3) Utilize agora a lente côncava e proceda do mesmo modo. No desenho efectuado, prolongue os feixes refractados para o outro lado da lente, até se intersectarem. O que pode concluir ?

Procure relacionar a forma das lentes com as características dos feixes refractados. Compare as suas conclusões com aquelas a que chegou para os espelhos.

EXPERIÊNCIA 12B - Características das imagens produzidas pelas lentes**Equipamento utilizado**

- lente convexa ($f = +200$ mm)
- lente côncava ($f = -150$ mm)
- vela e fósforos
- alvo
- suportes⁶⁹
- fita métrica

Objectivo

Estudar as características das imagens dadas por lentes esféricas.

Procedimento

- 1) Coloque a lente convexa num suporte, em posição vertical. Nesta lente o foco principal F dista da mesma 20 cm - distância focal.
- 2) Prepare o alvo, acenda a vela, e alinhe o conjunto de acordo com a figura 12B.1.

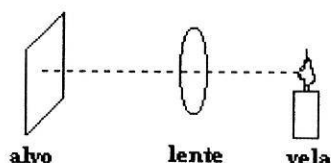


Figura 12B.1. Montagem utilizada

- 3) Efectue três ensaios, colocando a vela a diferentes distâncias do espelho:

1º ensaio vela a 10 cm da lente (entre o foco F e a lente);

2º ensaio vela a 25 cm da lente (entre o foco e a dupla distância focal);

3º ensaio vela a 45 cm do espelho (além da dupla distância focal).

⁶⁹ Os diversos componentes deverão ser montados num banco de óptica, se possível.

PARA CADA ENSAIO - Desloque o alvo para a frente e para trás, procurando ver neste uma imagem (real) da vela; caso não consiga, procure ver através da própria lente uma imagem (virtual) da vela. A imagem observada é direita ou invertida ? E o seu tamanho, é maior, igual ou menor que o do objecto ?

4) Repita o procedimento, de 1) a 3), para a lente côncava. Esta, para além de ser de tipo diferente, tem uma distância focal de - 15 cm.

5) Preencha a Tabela 12B.1 com os resultados das suas observações.

Tabela 12B.1. Registo de observações

Tipo de lente	posição do objecto em relação à lente	características das imagens
convexa	objecto entre a lente e o foco	
	objecto entre o foco e a dupla distância focal	
	objecto além da dupla distância focal	
côncava	objecto em qualquer posição em frente à lente	

EXPERIÊNCIA 12C - Determinação da distância focal de uma lente convexa, por localização directa do foco principal

Equipamento utilizado

- lente convexa
- alvo
- suportes
- fita métrica

Objectivo

Determinar de modo expedito o valor aproximado da distância focal de uma lente convexa.

Procedimento

- 1) Coloque a lente convexa num suporte, em posição vertical, voltada para um objecto distante (janela da sala, árvore, nuvem).
- 2) Posicione o alvo de modo a obter uma imagem focada do objecto escolhido.
- 3) Meça a distância entre o centro óptico da lente e o alvo. Mostre, através de uma construção geométrica simples, que esta distância representa o valor aproximado da distância focal da lente.⁷⁰

⁷⁰ Este método é útil para obter um valor aproximado da distância focal, antes de aplicar métodos mais precisos.

EXPERIÊNCIA 12D - Determinação da distância focal de uma lente convexa, usando um espelho plano

Equipamento utilizado

- lente convexa $f = 200 \text{ mm}$
- banco de óptica (PASCO OS-8518)
- fonte objecto (PASCO OS-8517)
- espelho plano
- suporte com garra
- alfinete
- rolha de cortiça
- fita métrica
- papel branco

Objectivo

Determinar a distância focal de uma lente convexa, utilizando duas técnicas diferentes para o mesmo método.

Procedimento

1ª parte - técnica do banco de óptica com fonte objecto

- 1) Utilizando o método descrito na *EXP. 12C* determine a distância focal aproximada da lente, d .
- 2) Adapte a fonte de luz numa extremidade do banco de óptica, na posição de fonte objecto (este consiste no desenho de um alvo com duas setas cruzadas, sobre um ecrã translúcido).
- 3) Monte a lente no banco de óptica, a uma distância da fonte aproximadamente igual a d .
- 4) Adapte igualmente o espelho plano no banco de óptica, de acordo com a figura 12D.1.

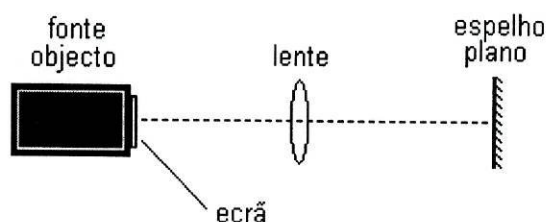


Figura 12D.1. Esquema da montagem

- 5) Movimente a lente devagar de um lado para o outro, até conseguir obter uma imagem focada e direita do objecto sobre o ecrã da fonte.⁷¹
- 6) Certifique-se de que se trata realmente da imagem correcta: se assim for, colocando a mão entre a lente e o espelho, deve desaparecer. Explique porquê.
- 7) Meça rigorosamente a distância entre a fonte objecto e o centro óptico da lente. Esta representa a sua distância focal, f .
- 8) Repita os dois pontos anteriores três vezes, de modo a determinar um valor médio.

2ª parte - técnica de não-paralaxe, com alfinete

- 9) Caso não tenha executado o ponto 1), concretize-o agora, de modo a obter um valor aproximado da distância focal, d .
- 10) Coloque o espelho plano na mesa, em posição horizontal, e sobre ele a lente. Segure o alfinete, espetado na rolha, com a garra, na posição indicada na figura 12D.2.

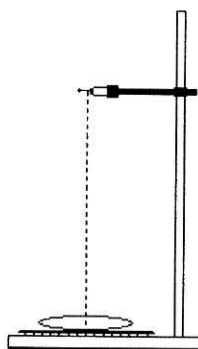


Figura 12D.2. Montagem utilizada

⁷¹ Se necessário tape metade do ecrã com uma folha de papel branco, que servirá de alvo; a imagem deve coincidir ponto por ponto com o objecto.

- 11) Posicione o alfinete a uma distância da lente aproximadamente igual a d . Olhando por cima do alfinete, para a lente, deverá observar tanto o alfinete como a sua imagem formada pela lente.
- 12) Mova a garra um pouco para cima e para baixo, de modo a encontrar a posição em que o alfinete e a sua imagem deixam de exibir paralaxe um em relação ao outro - nessa posição, objecto e imagem são do mesmo tamanho.
- 13) Caso tenha dificuldade em executar o ponto anterior, comece por efectuar a seguinte actividade de treino, com as suas mãos:

Dobre os dedos, excepto os indicadores. Estique os braços, mantendo os indicadores em posição vertical. Experimente olhar para os dois dedos com um olho fechado. Mova a cabeça para a direita e para a esquerda, para cima e para baixo; se os dois dedos estiverem no mesmo plano (à mesma distância de si), mantêm-se juntos; caso contrário, movem-se um em relação ao outro.

- 14) Meça a distância do alfinete ao centro óptico da lente, que representa a sua distância focal, f .
- 15) Repita os pontos 12) e 14) pelo menos três vezes, de modo a determinar um valor médio.

EXPERIÊNCIA 12E - Determinação da distância focal de uma lente convexa, pelo método dos focos conjugados

Equipamento utilizado

- lente convexa $f = +200$ mm
- banco de óptica (PASCO OS-8518)
- fonte objecto (PASCO OS-8517)
- alvo
- fita métrica
- 2 alfinetes
- placa rectangular de cortiça

Objectivo

Determinar a distância focal de uma lente convexa, utilizando duas técnicas diferentes para o mesmo método.

Procedimento

1ª parte - técnica do banco de óptica com fonte objecto

- 1) Utilizando o método descrito na *EXP. 12C* determine a distância focal aproximada da lente, d .
- 2) Adapte a fonte de luz numa extremidade do banco de óptica, na posição de fonte objecto (este consiste no desenho de um alvo com duas setas cruzadas, sobre um ecrã translúcido).
- 3) Monte a lente convexa no banco de óptica, a uma distância da fonte aproximadamente igual a $2d$.
- 4) Monte o alvo no banco de óptica, de acordo com a figura 12E.1. Mova-o para um lado e para o outro, cuidadosamente, até obter nele uma imagem focada do objecto. Meça as distâncias s_o e s_i , respectivamente do objecto à lente e da imagem à lente.

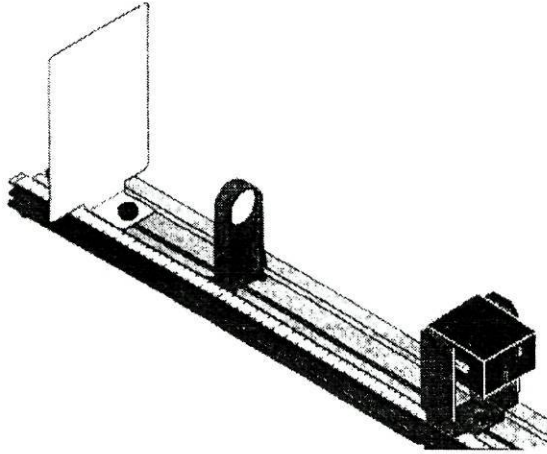


Figura 12E.1. Montagem utilizada
(adaptado de Hanks, A., Hanks, T., 1995)

- 5) Mova a lente um pouco (cerca de $d/6$) na direcção da fonte. Desloque o alvo até obter de novo uma imagem focada. Meça novamente as distâncias s_o e s_i .
- 6) Repita o ponto anterior, de modo a obter pelo menos cinco pares de leituras diferentes; os valores de s_o devem situar-se entre $2d$ e d .⁷²
- 7) Registe os valores experimentais na Tabela 12E.1. Efectue os cálculos necessários para preencher a terceira e quarta colunas da mesma.

Tabela 12E.1. Resultados obtidos

s_o	s_i	$1/s_o$	$1/s_i$

- 8) Represente graficamente $1/s_i$ em função de $1/s_o$.
- 9) Determine o valor da distância focal da lente através da análise do gráfico obtido, que deve corresponder a uma recta, intersectando ambos os eixos nos pontos $(0, 1/f)$ e $(1/f, 0)$ respectivamente.
- 10) Explique o procedimento da alínea anterior, tomando como referência a equação dos focos conjugados (equação de Gauss).

⁷² Caso contrário, s_i tornar-se-á demasiado elevado para ser determinado.

2ª parte - técnica de não-paralaxe, com alfinetes

- 11) Caso não tenha executado o ponto 1), concretize-o agora, de modo a obter um valor aproximado da distância focal, d .
- 12) Coloque a lente no suporte, com o seu eixo óptico horizontal, sensivelmente a meio da placa de cortiça.

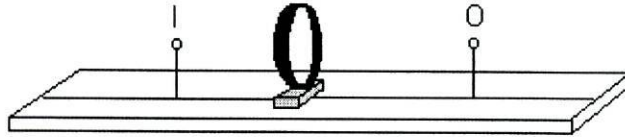


Figura 12E.2. Montagem utilizada

- 13) Espete um alfinete - que servirá de objecto (O) - na placa, a uma distância de cerca de $2d$ relativamente à lente. Ver figura 12E.2.
- 14) Segure um segundo alfinete com a mão, do outro lado da lente, na mesma direcção do seu eixo óptico. Mova este alfinete para a frente e para trás, de modo a encontrar a posição em que ele e a imagem do primeiro alfinete deixam de exibir paralaxe um em relação ao outro. Fixe o alfinete nesta posição, que representa a posição da imagem (I).
- 15) Meça as distâncias s_o e s_i , respectivamente do objecto à lente e da imagem à lente.
- 16) Mova o alfinete-objecto um pouco (cerca de $d/6$) na direcção da lente; procure de novo a posição da imagem (como indicado em 14). Meça as distâncias s_o e s_i .
- 17) Repita o ponto anterior, de modo a obter pelo menos cinco pares de leituras diferentes; os valores de s_o devem situar-se entre $2d$ e d .
- 18) Registe os valores experimentais na Tabela 12E.2. Efectue os cálculos necessários para preencher a terceira e quarta colunas da mesma.

Tabela 12E.2. Resultados obtidos

s_o	s_i	$1/s_o$	$1/s_i$

- 19) Represente graficamente $1/s_i$ em função de $1/s_o$.
- 20) Determine o valor da distância focal da lente através da análise do gráfico obtido, que deve corresponder a uma recta, intersectando ambos os eixos nos pontos $(0, 1/f)$ e $(1/f, 0)$ respectivamente.
- 21) Explique o procedimento da alínea anterior, tomando como referência a equação de Gauss.

EXPERIÊNCIA 12F - Determinação da distância focal de uma lente convexa, pelo método do deslocamento (ou de Bessel)

Equipamento utilizado

- lente convexa $f = +100$ mm
- banco de óptica (PASCO OS-8518)
- fonte objecto (PASCO OS-8517)
- alvo

Objectivo

Determinar a distância focal de uma lente convexa através de um método simples e preciso, baseado na propriedade de as posições do objecto e da imagem serem inter-mutáveis ⁷³.

Procedimento

- 1) Adapte a fonte de luz numa extremidade do banco de óptica, na posição de fonte objecto (este consiste no desenho de um alvo com duas setas cruzadas, sobre um ecrã translúcido).
- 2) Monte o alvo no banco de óptica, numa posição o mais afastada possível da fonte. Meça a distância entre ambos, d .

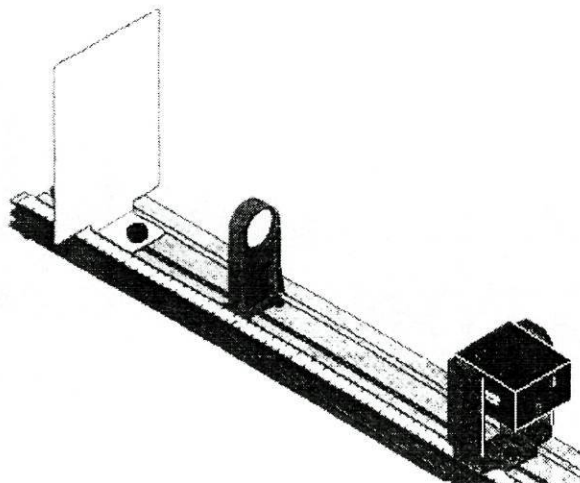


Figura 12F.1. Montagem utilizada
(adaptado de Hanks, A., Hanks, T., 1995)

⁷³ Como consequência do princípio de reversibilidade do raio luminoso.

- 3) Adapte o suporte com a lente no banco de óptica, de acordo com a figura 12F.1. Mova-o para um lado e para o outro, cuidadosamente, até obter no alvo uma imagem focada do objecto. Anote esta posição (A) da lente.
- 4) Mova o suporte com a lente, até encontrar outra posição para a qual se obtém, do mesmo modo, uma imagem nítida do objecto no alvo. Anote esta posição (B).
- 5) Diminua um pouco a distância d e repita os dois pontos anteriores.
- 6) Efectue pelo menos mais três ensaios, diminuindo sucessivamente o valor de d .
- 7) Registe os valores experimentais na Tabela 12F.1. Efectue os cálculos necessários para preencher a quarta coluna da mesma.

Tabela 12F.1. Resultados obtidos

d / cm	<i>posição A / cm</i>	<i>posição B / cm</i>	$\varepsilon = A - B$

- 8) Para cada ensaio, calcule o valor da distância focal da lente, f , através da expressão

$$f = \frac{d^2 - \varepsilon^2}{4d}$$

- 9) Determine o valor mais provável de f .
- 10) Mostre que a expressão utilizada resulta facilmente da equação de Gauss, atendendo a que (figura 12F.2)

$$s_o^A = s_i^B \quad \text{e} \quad s_o^B = s_i^A$$

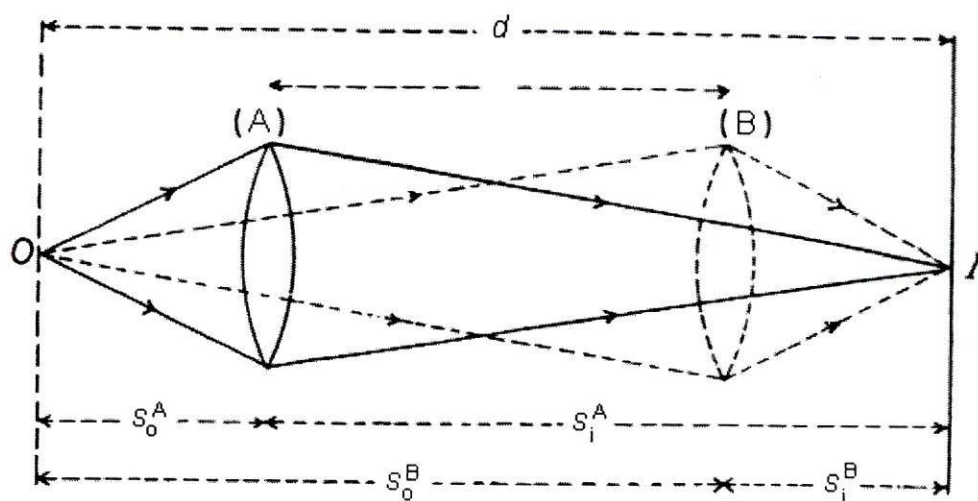


Figura 12F.2. Relações geométricas subjacentes a este método

EXPERIÊNCIA 12G - Determinação da distância focal de uma lente convexa, através do gráfico da distância objecto- imagem em função da distância do objecto à lente**Equipamento utilizado**

- lente convexa $f = +100$ mm
- banco de óptica (PASCO OS-8518)
- fonte objecto (PASCO OS-8517)
- alvo

Objectivo

Determinar a distância focal de uma lente convexa através de um método que evidencia graficamente a propriedade de as posições do objecto e da imagem serem inter-mutáveis ⁷⁴.

Procedimento

- 1) Adapte a fonte de luz numa extremidade do banco de óptica, na posição de fonte objecto (este consiste no desenho de um alvo com duas setas cruzadas, sobre um ecrã translúcido).
- 2) Monte o alvo no banco de óptica, numa posição o mais afastada possível da fonte. Meça a distância entre ambos, d .

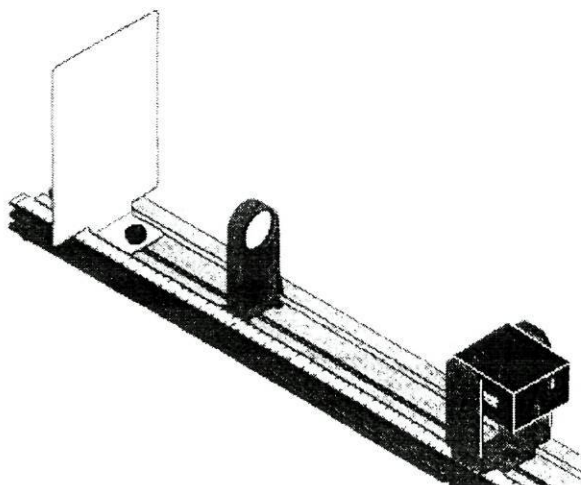


Figura 12G.1. Montagem utilizada
(adaptado de Hanks, A., Hanks, T., 1995)

⁷⁴ Como consequência do princípio de reversibilidade do raio luminoso.

- 3) Adapte o suporte com a lente no banco de óptica, de acordo com a figura 12G.1. Mova-o para um lado e para o outro, cuidadosamente, até obter no alvo uma imagem focada do objecto. Com a lente nesta posição (A), meça a sua distância ao objecto, s_o^A .
- 4) Mova o suporte com a lente, até encontrar outra posição para a qual se obtém, do mesmo modo, uma imagem nítida do objecto no alvo. Com a lente nesta nova posição (B), meça a sua distância ao objecto, s_o^B .
- 5) Diminua um pouco a distância d e repita os dois pontos anteriores.
- 6) Efectue pelo menos mais dez ensaios, diminuindo sucessivamente o valor de d . O número de valores experimentais deve ser maior à medida que s_o^A e s_o^B se tornam mais próximos.
- 7) Registe os valores experimentais na Tabela 12G.1.

Tabela 12G.1. Resultados obtidos

d / cm	s_o^A / cm	s_o^B / cm

- 8) Represente graficamente, em papel milimétrico, $d = f(s_o)$. Tome em atenção que, para cada valor da ordenada, a abcissa toma dois valores diferentes (excepto para o mínimo da função).
- 9) Verifique que, fazendo, na equação de Gauss, $s_i = d - s_o$, se obtém, resolvendo em ordem a d ,

$$d = \frac{s_o^2}{s_o - f}$$

10) Analise o gráfico obtido em 8), tendo em conta a equação anterior, que, teoricamente, lhe corresponde.

Sugestões:

- Trace as assíntotas da função: a vertical tem como abcissa $s_o = f$ e a oblíqua tem como ordenada na origem $d = f$.
- Localize o ponto de intersecção das assíntotas, de coordenadas $(f; 2f)$.
- Procure determinar o mínimo da função, de coordenadas $(2f; 4f)$.

11) Determine a distância focal da lente, f , com base nas três sugestões anteriores.

12) Compare os diversos valores obtidos e critique a respectiva precisão.

EXPERIÊNCIA 12H - Determinação da distância focal de uma lente convexa, pelo método da ampliação

Equipamento utilizado

- lente convexa $f = +100$ mm
- banco de óptica (PASCO OS-8518)
- fonte objecto (PASCO OS-8517)
- alvo
- papel milimétrico

Objectivo

Determinar a distância focal de uma lente convexa através de um método simples, que recorre ao conceito de ampliação linear transversa.

Procedimento

- 1) Adapte a fonte de luz numa extremidade do banco de óptica, na posição de fonte objecto (este consiste no desenho de um alvo com duas setas cruzadas, sobre um ecrã translúcido). Meça a altura do objecto, h .
- 2) Monte o alvo no banco de óptica, numa posição o mais afastada possível da fonte. Revista a superfície do alvo com papel milimétrico, de modo a poder medir facilmente as dimensões das imagens obtidas.

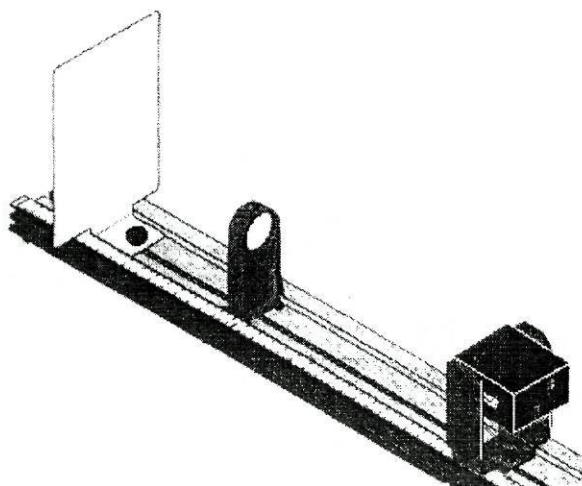


Figura 12H.1. Montagem utilizada
(adaptado de Hanks, A., Hanks, T., 1995)

- 3) Adapte o suporte com a lente no banco de óptica, de acordo com a figura 12H.1. Mova-o para um lado e para o outro, até obter no alvo uma imagem focada do objecto. Meça a distância da lente à imagem, s_i e a altura da imagem (invertida), h' .
- 4) Anote os valores obtidos na Tabela 12H.1. Calcule o valor da ampliação linear transversa, M_T , e inscreva-a na quarta coluna da tabela:

$$M_T = -\frac{h'}{h}$$

(O sinal negativo evidencia que a imagem obtida é invertida.)

Tabela 12H.1. Resultados obtidos

s_i / cm	h / cm	h' / cm	M_T	f / cm

- 5) Repita os dois pontos anteriores, para distâncias menores entre a fonte e o alvo. Realize pelo menos mais quatro ensaios.
- 6) Calcule a distância focal da lente, f , com os valores obtidos em cada ensaio, através da expressão

$$f = \frac{s_i}{M_T + 1}$$

- 7) Verifique que a expressão utilizada resulta facilmente da equação de Gauss, atendendo a que $M_T = -s_i/s_o$.
- 8) Determine o valor mais provável de f .

EXPERIÊNCIA 12I - Verificação da equação de Newton para uma lente convexa**Equipamento utilizado**

- lente convexa $f = +100$ mm, com suporte
- fita métrica
- 4 alfinetes
- espelho plano (M) com suporte
- placa rectangular de cortiça

Objectivo

Verificar a validade da equação de Newton para uma lente convexa.

Procedimento

- 1) Coloque a lente no suporte, com o seu eixo óptico horizontal, sensivelmente a meio da placa de cortiça.
- 2) Posicione o espelho atrás da lente, com o seu plano normal ao eixo óptico daquela. Ver figura 12I.1.

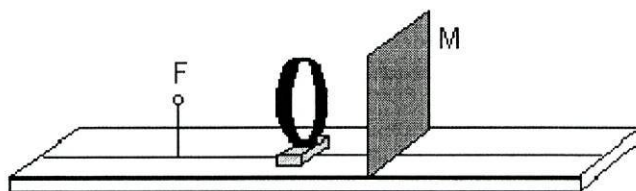


Figura 12I.1. Montagem utilizada

- 3) Espete um alfinete F, na placa de cortiça, do lado oposto ao espelho, a uma distância da lente próxima da distância focal. Coloque-se numa posição tal que, olhando verticalmente para baixo, possa ver o alfinete e a sua imagem. Ajuste a posição do alfinete até que objecto e imagem deixem de exibir paralaxe, um em relação ao outro. Mantenha o alfinete nesta posição até ao fim do trabalho: representa um dos focos principais da lente.
- 4) Posicione agora o espelho do outro lado da lente e repita o ponto 3) usando um segundo alfinete, F', de modo a localizar o outro foco principal da lente.

- 5) Meça a distância FF' que representa o dobro da distância focal, f .
- 6) Usando um terceiro alfinete (O) como objecto (situado além do foco F, para obter imagens reais), e um quarto alfinete (I) para localizar a sua imagem pelo método de não-paralaxe, determine pelo menos três pares de distâncias OF (x_o) e IF' (x_i). Registe esses valores na Tabela 12I.1.

Tabela 12I.1. Valores obtidos

x_o	x_i	$1/x_o$

- 7) Efectue os cálculos necessários ao preenchimento da terceira coluna da tabela.
- 8) Represente graficamente x_i em função de $1/x_o$; deverá obter uma linha recta. Determine o respectivo declive, e compare-o com o quadrado do valor da distância focal, f , obtido em 5).
- 9) Procure repetir a experiência para imagens virtuais, espetando o alfinete O entre F e a lente. Use também o alfinete I para localizar a imagem, que desta vez deve ser procurada do mesmo lado do objecto.

EXPERIÊNCIA 12J - Estudo da relação entre a distância focal de uma associação de duas lentes delgadas em contacto, e as respectivas distâncias focais

Equipamento utilizado

- lente convexa $f = +100$ mm, com suporte
- lente convexa $f = +200$ mm, com suporte
- espelho plano com suporte
- banco de óptica e acessórios *ou*
- alfinete e placa rectangular de cortiça

Objectivo

Estudar a validade da relação $\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$ para uma combinação de duas lentes delgadas em contacto.

Procedimento

- 1) Utilizando o método descrito na *EXP. 12D (1ª ou 2ª partes)*, determine a distância focal de cada lente separadamente, f_1 e f_2 , e do conjunto das duas em contacto, F .
- 2) Calcule a distância focal da combinação das duas lentes, através da relação

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

- 3) Compare o valor calculado com o valor experimental. Discuta a validade daquela expressão, tendo em atenção que ela resulta da simplificação de uma outra, mais rigorosa,

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{x}{f_1 f_2}$$

em que x é a distância entre os centros ópticos das duas lentes.

EXPERIÊNCIA 12K - Determinação da distância focal de uma lente côncava, usando uma lente convexa (método das lentes coladas)⁷⁵**Equipamento utilizado**

- lente côncava (L1) $f = -150$ mm, com suporte
- lente convexa (L2) $f = +100$ mm, com suporte
- banco de óptica (PASCO OS-8518)
- fonte objecto (PASCO OS-8517)
- alvo (A)

Objectivo

Determinar a distância focal de uma lente côncava, utilizando as propriedades das associações de lentes delgadas.

Procedimento

- 1) Efectue a montagem indicada na figura 12K.1.

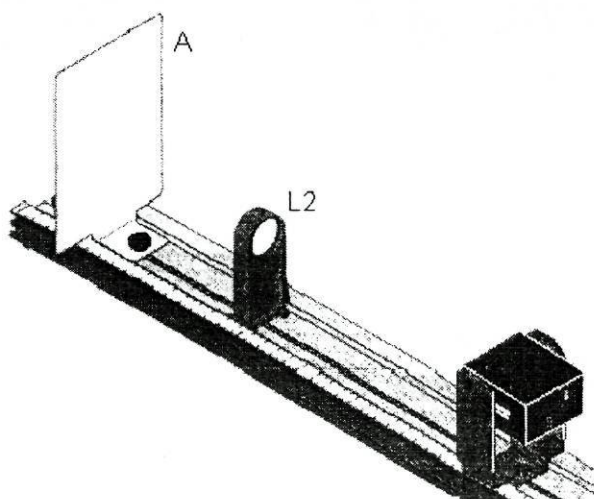


Figura 12K.1. Montagem utilizada
(adaptado de Hanks, A., Hanks, T., 1995)

- 2) Desloque o alvo (A) de modo a obter nele uma imagem real e direita do objecto (desenho de um alvo com duas setas cruzadas); desloque-o em sentido contrário, de modo a obter agora uma imagem real e invertida. Na transição

⁷⁵ Para este método resultar, a distância focal da lente convexa deve ser inferior à distância focal da lente côncava (em módulo), de modo a que o conjunto seja convergente.

entre os dois tipos de imagens deve encontrar uma posição em que obterá um simples ponto, extremamente brilhante.

- 3) Coloque o alvo (A) nessa posição. Meça a distância entre (A) e o centro óptico de L2, que representa a distância focal da lente convexa, f_2 . Registe o seu valor.
- 4) Monte a lente côncava, L1, no banco de óptica, encostada a L2, de modo a que fique entre L2 e A.⁷⁶
- 5) Seguindo o procedimento indicado em 2) e 3), determine a distância focal do sistema das duas lentes, F . Registe o valor encontrado.
- 6) Calcule a distância focal da lente côncava, f_1 , através da expressão

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

- 7) Repita o procedimento para outras distâncias entre a lente (ou conjunto de lentes) e a fonte. Determine o valor mais provável de f_1 .

⁷⁶ Deste modo, a imagem real formada pela lente convexa servirá de objecto virtual para a lente côncava.

EXPERIÊNCIA 12L - Determinação da distância focal de uma lente côncava, usando um espelho côncavo

Equipamento utilizado

- lente côncava (L) $f = -150$ mm, com suporte
- espelho côncavo (M) $f = +50$ mm, com suporte
- banco de óptica (PASCO OS-8518)
- fonte objecto (PASCO OS-8517)

Objectivo

Determinar a distância focal de uma lente côncava, utilizando um espelho côncavo auxiliar.

Procedimento

- 1) Adapte a fonte de luz sensivelmente a meio do banco de óptica, na posição de fonte objecto (este consiste no desenho de um alvo com duas setas cruzadas, sobre um ecrã translúcido).
- 2) Monte o espelho no banco de óptica, de frente para a fonte objecto. Desloque-o cuidadosamente para a frente e para trás até conseguir obter uma imagem focada e direita do objecto sobre o ecrã da fonte.⁷⁷
- 3) Anote a posição do objecto (O_1). Ver figura 12L.1.

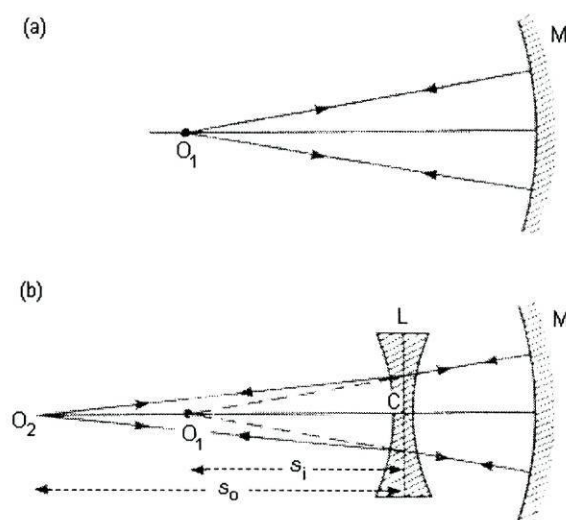


Figura 12L.1. Esquema da montagem utilizada

(a) só com o espelho; (b) já com a lente.

⁷⁷ Se necessário, tape metade do ecrã com uma folha de papel branco, que servirá de alvo; imagem e objecto devem coincidir ponto por ponto.

- 4) Coloque agora a lente côncava entre a fonte objecto e o espelho côncavo. Desloque a fonte objecto, afastando-a da lente, até conseguir obter novamente uma imagem focada e direita do objecto sobre o ecrã da fonte.
- 5) Anote a nova posição do objecto (O_2).
- 6) Determine as distâncias do centro óptico da lente (C), respectivamente a O_1 e O_2 .
- 7) Atendendo a que O_1 e O_2 são pontos conjugados em relação à lente (O_2 , posição do objecto e O_1 , posição da imagem virtual) considere $s_o = CO_2$ e $s_i = CO_1$ e calcule a distância focal da lente côncava, f , aplicando a equação de Gauss

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i}$$

EXPERIÊNCIA 12M - Determinação do raio de curvatura das faces de uma lente (método de Boys)

Equipamento utilizado

- lente biconvexa $f = +200$ mm
- espelho plano
- folha de cartolina preta
- alfinete
- rolha de cortiça
- suporte com garra
- fita métrica
- micrómetro

Objectivo

Determinar o raio de curvatura das faces de uma lente biconvexa.

Procedimento

- 1) Utilizando o método descrito na EXP. 12C determine a distância focal aproximada da lente, d .
- 2) Coloque o espelho plano na mesa, em posição horizontal, e sobre ele a lente. Segure o alfinete, espetado na rolha, com a garra, na posição indicada na figura 12M.1.

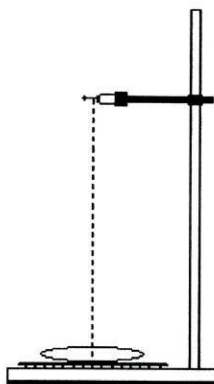


Figura 12M.1. Montagem utilizada

- 3) Posicione o alfinete a uma distância da lente aproximadamente igual a d . Olhando por cima do alfinete, para a lente, deverá observar tanto o alfinete como a sua imagem formada pela lente.
- 4) Mova a garra um pouco para cima e para baixo, de modo a encontrar a posição em que o alfinete e a sua imagem deixam de exibir paralaxe um em relação ao outro - nessa posição, objecto e imagem são do mesmo tamanho.
- 5) Meça a distância do alfinete ao centro óptico da lente, que representa a sua distância focal, f .
- 6) Repita os dois pontos anteriores, de modo a determinar um valor médio.
- 7) Substitua o espelho plano por uma placa de cartolina preta.⁷⁸
- 8) Posicione agora o alfinete (bem iluminado) a uma distância da lente próxima de $f/2$. Procure ver a imagem invertida do alfinete formada por reflexão na face inferior da lente (A). Ver figura 12M.2.

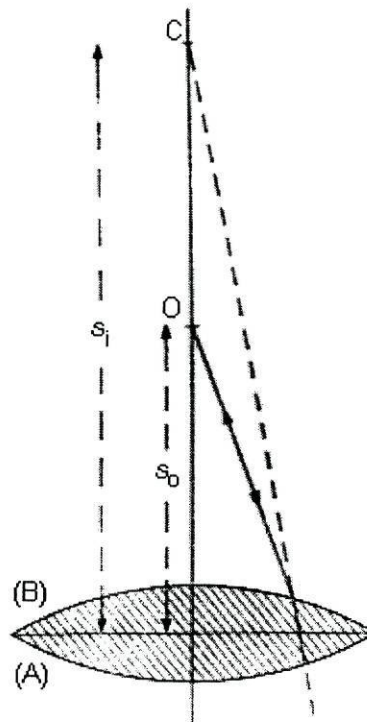


Figura 12M.2. Interpretação do método utilizado

⁷⁸ Obtêm-se melhores resultados fazendo a lente flutuar num pequeno recipiente contendo mercúrio; contudo, a manipulação desta substância não é, obviamente, aconselhável.

- 9) Mova a garra um pouco para cima e para baixo, de modo a encontrar a posição em que o alfinete e a sua imagem deixam de exibir paralaxe um em relação ao outro, O.
- 10) Meça a distância do alfinete ao centro óptico da lente, s_o .
- 11) Repita os dois pontos anteriores, de modo a determinar um valor médio.
- 12) Considerando que, na figura 12M.2, C é o centro de curvatura da face (A), este ponto representa a posição da imagem virtual de O formada pela lente. Calcule então o valor de s_i , através da equação de Gauss

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i}$$

(recorde as convenções de sinais)

- 13) Determine r_A , raio de curvatura da face (A), adicionando a s_i metade da espessura da lente, que pode medir utilizando um micrómetro (cuidado para não danificar a lente!).
- 14) Caso a lente não seja equiconvexa, volte-a e repita o procedimento indicado nos pontos 8) a 13) de modo a determinar r_B , raio de curvatura da face (B).⁷⁹

⁷⁹ Seria agora simples determinar o índice de refração do material de que a lente é feita, substituindo os valores obtidos na equação de Halley (ou dos fabricantes de lentes).

EXPERIÊNCIA 12N - Estudo do efeito da abertura na luminosidade da imagem e na profundidade de campo

Equipamento utilizado

- banco de óptica (PASCO OS-8518)
- fonte objecto (PASCO OS-8517)
- alvo
- lente convexa $f = +100$ mm
- disco de aberturas (PASCO OS-8524)
- fotómetro eléctrico

Objectivo

Estudar o efeito da abertura nas características da imagem obtida, por exemplo numa máquina fotográfica.

Procedimento

1ª parte - Luminosidade da imagem

- 1) Adapte a fonte de luz numa extremidade do banco de óptica, na posição de fonte objecto (este consiste no desenho de um alvo com duas setas cruzadas, sobre um ecrã translúcido).
- 2) Monte a lente convexa no banco de óptica, a uma distância conveniente da fonte.
- 3) Instale também o alvo no banco de óptica, de acordo com a figura 12N.1.

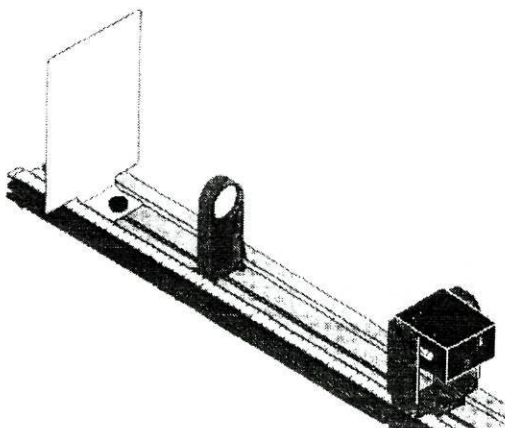


Figura 12N.1. Montagem utilizada
(adaptado de Hanks, A., Hanks, T., 1995)

- 4) Encaixe o disco de aberturas na lente e ajuste-o para o seu valor máximo ($f/4$).
- 5) Desloque o suporte da lente de modo a obter no alvo uma imagem focada do objecto luminoso. Use o fotómetro, na posição do alvo, para medir a intensidade luminosa da imagem.
- 6) Seleccione a abertura seguinte ($f/5.6$) e meça a nova intensidade luminosa. Repita o procedimento para todas as aberturas. O que pode concluir ?

2ª parte - Profundidade de campo

- 7) Coloque o alvo a uma distância de 50 cm da fonte de luz. Use a lente de 100 mm com abertura $f/4$ para focar o objecto luminoso no alvo.
- 8) Verifique até onde pode afastar o alvo sem notar alteração na nitidez da imagem.
- 9) Repita o procedimento usando uma abertura menor. Compare os resultados obtidos. O que pode concluir ?

EXPERIÊNCIA 120 - Estudo das aberrações de uma lente esférica

Equipamento utilizado

- banco de óptica (PASCO OS-8518)
- fonte objecto (PASCO OS-8517)
- alvo
- lente convexa $f = +100$ mm
- dispositivo de aberração esférica (PASCO OS-8524)

Objectivo

Evidenciar algumas das principais aberrações que podem surgir nas imagens formadas por uma lente esférica.

Procedimento

1ª parte - Aberração esférica

- 1) Adapte a fonte de luz numa extremidade do banco de óptica, na posição de fonte objecto (este consiste no desenho de um alvo com duas setas cruzadas, sobre um ecrã translúcido).
- 2) Monte a lente convexa no banco de óptica, a uma distância conveniente da fonte.
- 3) Instale também o alvo no banco de óptica, de acordo com a figura 120.1.

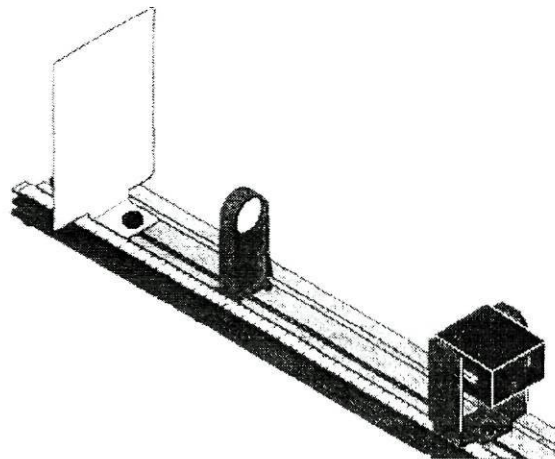


Figura 120.1. Montagem utilizada
(adaptado de Hanks, A., Hanks, T., 1995)

- 4) Desloque o suporte da lente de modo a obter no alvo uma imagem focada do objecto luminoso.
- 5) Encaixe a máscara periférica na lente e volte a focar a imagem, movendo o alvo. Observe para que lado este tem de ser deslocado.
- 6) Substitua a máscara periférica pela máscara central e volte a focar a imagem, movendo o alvo. Observe para que lado este tem de ser deslocado.

Os raios que passam pela periferia da lente são mais, ou menos desviados do que aqueles que passam pela parte central ?

2ª parte - Aberração de cor

- 7) Utilize ainda a mesma lente convexa, com a máscara central, para focar a imagem do objecto luminoso no alvo.
- 8) Desloque o alvo, afastando-o da lente, até desfocar a imagem. De que cor aparenta ser a imagem ?
- 9) Desloque agora o alvo, aproximando-o da lente, passando pela posição em que a imagem aparece focada, até desfocar de novo. De que cor aparenta ser a imagem ?

Qual a cor (vermelho ou azul) correspondente à radiação mais desviada, ao atravessar a periferia da lente ?

EXPERIÊNCIA 13A - Demonstração do funcionamento do microscópio

Equipamento utilizado

- banco de óptica (PASCO OS-8518)
- alvo (A)
- lente convexa (L1) $f = +100$ mm
- lente convexa (L2) $f = +200$ mm
- papel quadriculado (anexo)

Objectivo

Demonstrar, de forma qualitativa, o funcionamento do microscópio, bem como determinar a sua ampliação.

Procedimento

- 1) Adapte o alvo sensivelmente a meio do banco de óptica e revista-o com o papel quadriculado fornecido. As quadrículas servirão como objecto.
- 2) Monte as duas lentes convexas no banco de óptica, próximas de uma das extremidades do banco de óptica. Ver figura 13A.1.

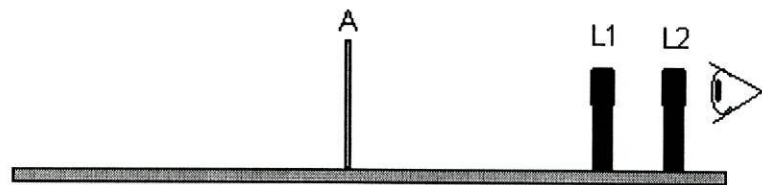
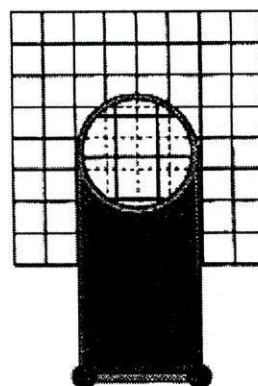


Figura 13A.1. Esquema da montagem utilizada

- 3) Foque a imagem do objecto (quadriculado no alvo) movendo a objectiva - lente mais próxima do objecto. Para ver a imagem, deve aproximar um olho da lente ocular.
- 4) Observe a imagem através da lente, com um olho e, em simultâneo, o objecto com o outro, olhando directamente para o alvo. Deverá observar as linhas da imagem (a cheio na figura 13A.2) sobrepostas às linhas do objecto (a tracejado na figura 13A.2).

Figura 13A.2. Eliminação da paralaxe
(adaptado de Hanks, A., Hanks, T., 1995)



- 5) Mova a cabeça de trás para a frente e de cima para baixo. À medida que desloca a cabeça, as linhas da imagem mover-se-ão relativamente às linhas do objecto, devido à paralaxe. Para a eliminar, desloque a ocular até que as linhas da imagem não se movam em relação às linhas do objecto, quando move a cabeça.
- 6) Com a paralaxe eliminada, a imagem virtual encontra-se no mesmo plano do objecto. Meça directamente a ampliação do microscópio, contando o número de quadrados do objecto contidos num lado de um quadrado da imagem, com a técnica de observação indicada em 4).
- 7) Registe as posições das lentes e do objecto na Tabela 13.A.1.

Tabela 13A.1. Resultados obtidos

Posição da objectiva (100 mm)	
Posição da ocular (200 mm)	
Posição do objecto (alvo)	
Ampliação observada	
s_{o1}	
s_{i2}	
s_{i1}	
s_{o2}	
Ampliação calculada	
% variação	

- 8) Meça s_{o1} , distância do objecto à objectiva.
- 9) Meça igualmente s_{i2} , distância da imagem à ocular. Dado que a imagem se encontra no mesmo plano do objecto, esta é também a distância do objecto à ocular.

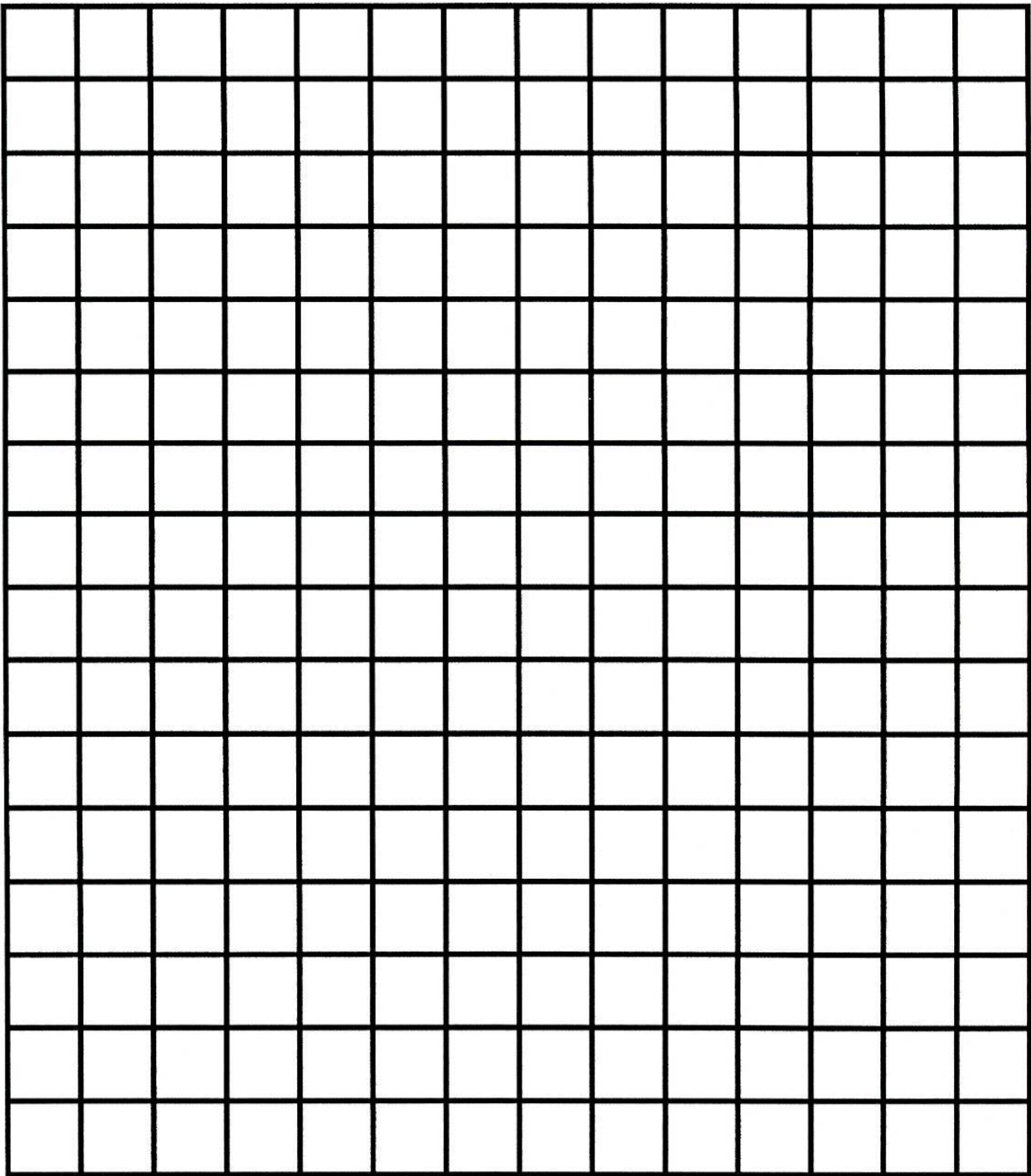
- 10) Calcule s_{i1} , substituindo s_{o1} e a distância focal da objectiva na equação de Gauss.
- 11) Calcule s_{o2} , substituindo s_{i2} e a distância focal da ocular na equação de Gauss.
- 12) Calcule a ampliação do microscópio, atendendo a que a ampliação de um sistema de duas lentes é igual ao produto das ampliações das lentes individuais, ou seja:

$$M = M_1 M_2 = \left(\frac{-s_{i1}}{s_{o1}} \right) \left(\frac{-s_{i2}}{s_{o2}} \right)$$

- 13) Determine a percentagem de variação entre este valor e o valor observado.

Anexo

Papel quadriculado para revestir o alvo



EXPERIÊNCIA 13B - Demonstração do funcionamento do telescópio**Equipamento utilizado**

- banco de óptica (PASCO OS-8518)
- alvo (A)
- lente convexa (L1) $f = +100$ mm
- lente convexa (L2) $f = +200$ mm
- papel quadriculado (anexo)

Objectivo

Demonstrar, de forma qualitativa, o funcionamento do telescópio, bem como determinar a sua ampliação.

Procedimento

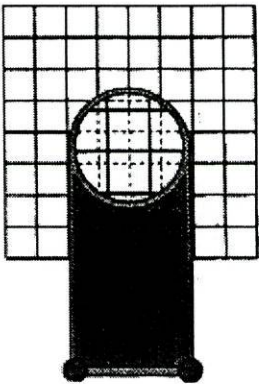
- 1) Adapte o alvo numa extremidade do banco de óptica e revista-o com o papel quadriculado fornecido. As quadrículas servirão como objecto.
- 2) Monte as duas lentes convexas no banco de óptica, próximas da outra extremidade do banco de óptica. Ver figura 13B.1.



Figura 13B.1. Esquema da montagem utilizada

- 3) Foque a imagem do objecto (quadriculado no alvo) movendo a objectiva - lente mais próxima do objecto. Para ver a imagem, deve aproximar um olho da lente ocular.
- 4) Observe a imagem através da lente, com um olho e, em simultâneo, o objecto com o outro, olhando directamente para o alvo. Deverá observar as linhas da imagem (a cheio na figura 13B.2) sobrepostas às linhas do objecto (a tracejado na figura 13B.2).

Figura 13B.2. Eliminação da paralaxe
(adaptado de Hanks, A., Hanks, T., 1995)



- 5) Mova a cabeça de trás para a frente e de cima para baixo. À medida que desloca a cabeça, as linhas da imagem mover-se-ão relativamente às linhas do objecto, devido à paralaxe. Para a eliminar, desloque a ocular até que as linhas da imagem não se movam em relação às linhas do objecto, quando move a cabeça.
- 6) Com a paralaxe eliminada, a imagem virtual encontra-se no mesmo plano do objecto. Meça directamente a ampliação do telescópio, contando o número de quadrados do objecto contidos num lado de um quadrado da imagem, com a técnica de observação indicada em 4).
- 7) Registe as posições das lentes e do objecto na Tabela 13.B.1.

Tabela 13B.1. Resultados obtidos

Posição da objectiva (200 mm)	
Posição da ocular (100 mm)	
Posição do objecto (alvo)	
Ampliação observada	
S_{o1}	
S_{i2}	
S_{i1}	
S_{o2}	
Ampliação calculada	
% variação	

- 8) Meça s_{o1} , distância do objecto à objectiva.
- 9) Meça igualmente s_{i2} , distância da imagem à ocular. Dado que a imagem se encontra no mesmo plano do objecto, esta é também a distância do objecto à ocular.

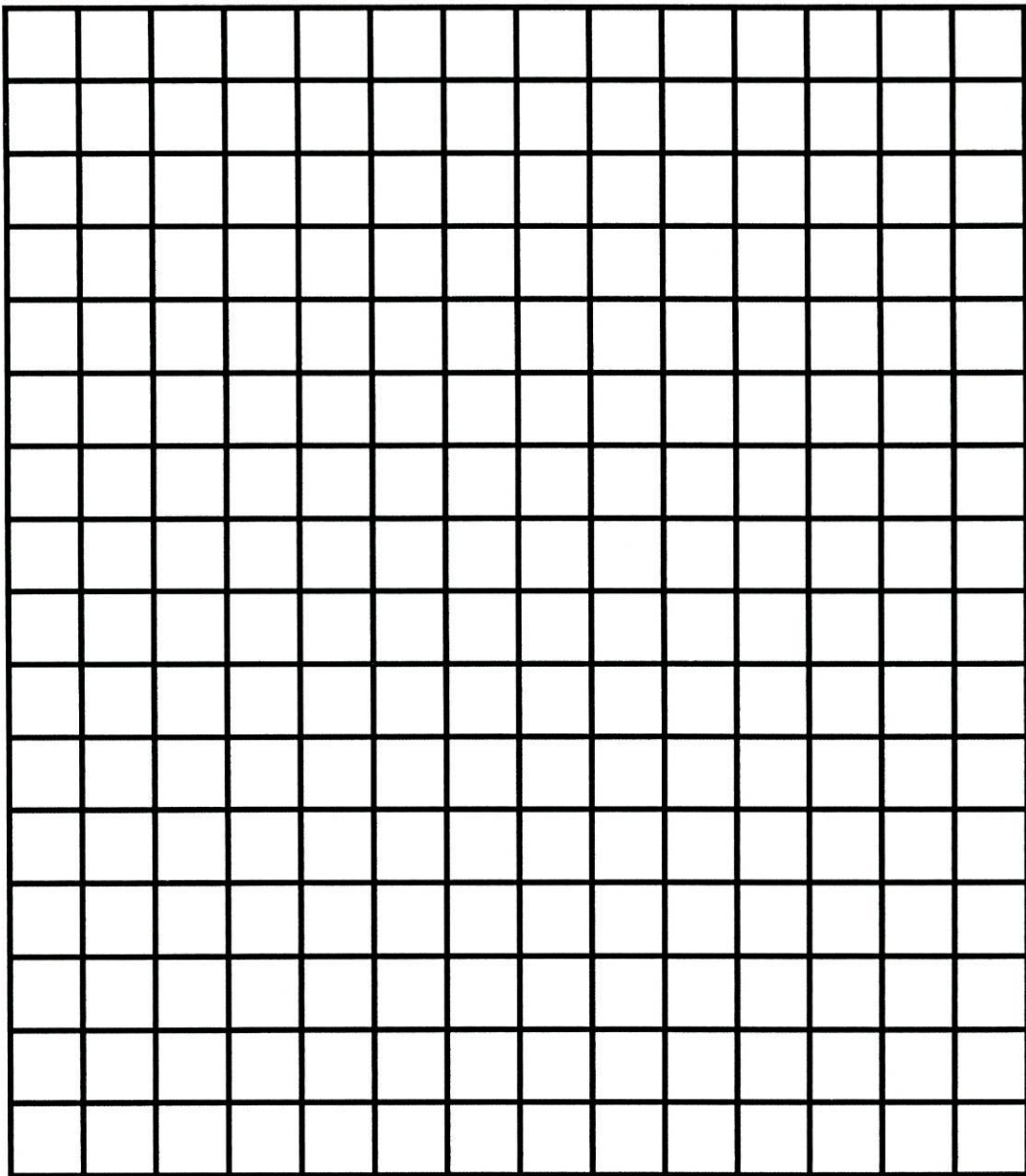
- 10) Calcule s_{i1} , substituindo s_{o1} e a distância focal da objectiva na equação de Gauss.
- 11) Calcule s_{o2} , substituindo s_{i2} e a distância focal da ocular na equação de Gauss.
- 12) Calcule a ampliação do telescópio, atendendo a que a ampliação de um sistema de duas lentes é igual ao produto das ampliações das lentes individuais, ou seja:

$$M = M_1 M_2 = \left(\frac{-s_{i1}}{s_{o1}} \right) \left(\frac{-s_{i2}}{s_{o2}} \right)$$

- 13) Determine a percentagem de variação entre este valor e o valor observado.

Anexo

Papel quadriculado para revestir o alvo



EXPERIÊNCIA 13C - Estudo do poder resolvente de um telescópio

Equipamento utilizado

- pequeno telescópio com suporte
- 2 LED com alimentação
- barra metálica com suporte
- fita métrica
- régua

Objectivo

Determinar, de modo aproximado, o limite de resolução angular de um telescópio.

Procedimento

Esta experiência pressupõe um espaço disponível, em linha recta, de algumas dezenas de metros, dependendo esse valor da distância entre os LED, e do diâmetro da objectiva do telescópio.

- 1) Monte os dois LED na barra, lado a lado, a uma distância d um do outro, de apenas alguns milímetros. Meça essa distância com o maior rigor possível.
- 2) Coloque o telescópio no suporte, a uma distância adequada dos LED. Olhe através da ocular, e procure focar o instrumento de modo a observar nitidamente os dois LED separados. Ver figura 13C.1.

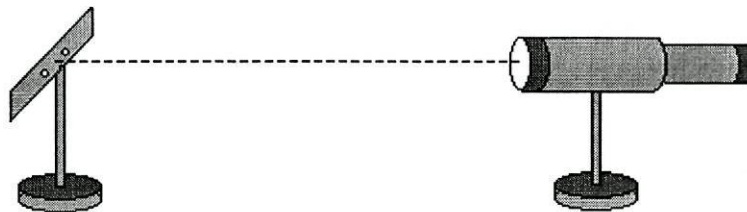


Figura 13C.1. Esquema da montagem utilizada

- 3) Afaste progressivamente o telescópio e repita o ponto 2), até já não conseguir ver separadamente as imagens dos dois LED. Meça então a distância L entre estes e o telescópio.

- 4) Determine o limite de resolução angular do telescópio, através da razão d/L rad.
- 5) Compare o valor obtido com o valor teórico, que é igual a $1,22 \lambda/D$, sendo λ o comprimento de onda da luz emitida pelos LED e D o diâmetro da objectiva do telescópio.⁸⁰

⁸⁰ De acordo com a cor do LED, tome um valor médio para λ , consultando um esquema do espectro da luz visível.

EXPERIÊNCIA 14A - Modelo do olho humano

Equipamento utilizado

- fonte de luz (feixe cilíndrico de luz branca)
- lentes convergentes com suporte (100 mm, 200 mm e 250 mm)
- balão de vidro de fundo plano ($d = 20$ cm)
- quadrado de papel branco (4 cm^2)
- reagentes: fluoresceína, álcool etílico e água

Objectivo

Demonstrar o funcionamento óptico do olho normal, do olho míope e do olho hiper-métrope.

Procedimento

- 1) Dissolva um pouco de fluoresceína em álcool etílico; dilua então com bastante água ($5 \times 10^{-4}\text{ g dm}^{-3}$ a $5 \times 10^{-3}\text{ g dm}^{-3}$). Encha o balão de vidro com esta solução.
- 2) Com a sala muito pouco iluminada, faça incidir o feixe de luz no balão, através da lente de 200 mm, encostada a este, de acordo com a figura 14A.1.

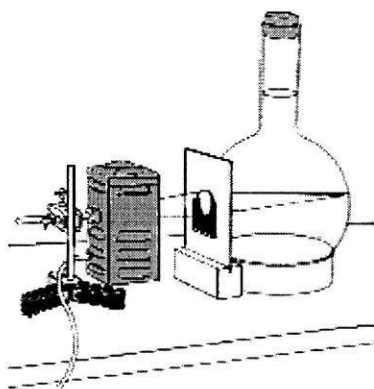


Figura 14A.1. Esquema da montagem utilizada

- 3) Movimente ligeiramente a lente até que se forme uma imagem nítida na superfície posterior do balão. O pequeno quadrado de papel, colocado na superfície exterior deste, depois de humedecido, ajudará a tornar a imagem mais visível.

Esta situação corresponde ao funcionamento óptico do olho normal, em que a imagem se forma na retina.

4) Substitua a lente inicial pela de 100 mm e observe.

Esta situação corresponde à visão "curta" ou míope. Onde se forma, agora, a imagem ? Que tipo de lente usaria para corrigir este defeito de visão ?

5) Substitua a lente anterior pela de 250 mm e observe novamente. Afaste um pouco o pequeno quadrado de papel do gobelé, de modo a focar a imagem.

Esta situação corresponde à visão "longa" ou hipermetrópe. Onde se forma a imagem ? Que tipo de lente usaria para corrigir este defeito de visão ?

EXPERIÊNCIA 14B - Ponto cego

Equipamento utilizado

- Folha de papel com a figura 14B.1.

Objectivo

Demonstrar, de modo simples, a existência do "ponto cego".

Procedimento

- 1) Observe a figura 14B.1. Com o olho esquerdo fechado, fixe o olho direito no gato.



Figura 14B.1. Ponto cego
(adaptado de Máximo, A., Alvarenga, B., sem data)

- 2) Aproxime o rosto da figura. A uma certa distância deixará de ver o rato, pois a sua imagem estará a formar-se sobre o ponto cego da retina.

EXPERIÊNCIA 14C - Características da imagem formada na retina

Equipamento utilizado

- rectângulo de cartolina
- alfinete

Objectivo

Efectuar uma auto-observação para verificar as características da imagem formada na retina.

Procedimento

- 1) Efectue um orifício com cerca de 1 mm de diâmetro no rectângulo de cartolina, utilizando o alfinete.
- 2) Olhe para o céu claro (ou uma superfície fortemente iluminada) através do orifício, segurando a cartolina a uma distância de cerca de 2,5 cm a 5 cm de distância dos olhos: o orifício produz uma espécie de mancha brilhante no campo de visão.
- 3) Segure o alfinete pela ponta e aproxime-o do rosto, de modo a ficar entre o orifício da cartolina e o olho, muito próximo deste (quase nas pestanas). Ver figura 14C.1.

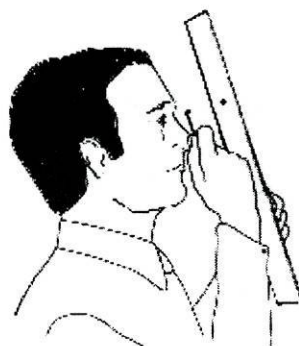


Figura 14C.1. Posição de observação

- 4) Observe a sombra da cabeça do alfinete na mancha brilhante. Note que se encontra invertida.

Interpretação

Com o alfinete tão próximo do olho, não é possível formar uma imagem invertida, por refração, sobre a retina. Apenas se forma uma sombra direita e desfocada, do alfinete.

O cérebro interpreta as imagens invertidas como se fossem direitas e, neste caso, a sombra, que é direita, é interpretada como invertida.

Esta interpretação resulta, segundo se pensa, de uma aprendizagem realizada durante a primeira infância, e não de qualquer estranho cruzamento de nervos como algumas pessoas crêem.

EXPERIÊNCIA 14D - Demonstração do poder resolvente do olho

Equipamento utilizado

- 2 LED com alimentação
- barra metálica com suporte
- fita métrica
- régua

Objectivo

Determinar, de modo aproximado, o limite de resolução do olho humano.

Procedimento

- 1) Monte os dois LED na barra, lado a lado, a uma distância d um do outro, de alguns milímetros. Meça essa distância com o maior rigor possível.
- 2) Feche um dos olhos e observe os dois LED com o outro. Ver figura 14D.1.

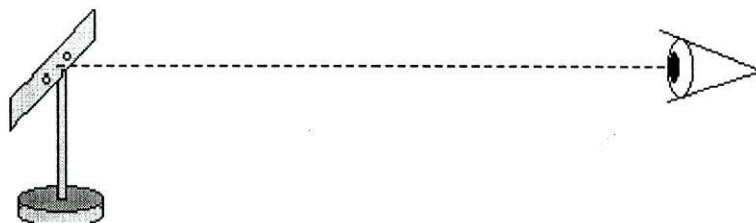


Figura 14D.1. Esquema da observação

- 3) Afaste-se progressivamente ⁸¹, até já não conseguir ver separadamente os dois LED. Meça então a distância L entre o olho e a placa com os LED.
- 4) Determine o limite de resolução angular do olho, através da razão d/L rad.
- 5) Compare o valor obtido com o valor teórico, que é igual a $1,22 \lambda/D$, sendo λ o comprimento de onda da luz emitida pelos LED e D o diâmetro da pupila. ⁸²

⁸¹ Note que para uma pupila de diâmetro médio (0,2 cm), $\lambda = 550$ nm, e uma separação de 1 cm entre os LED, o valor de L é de cerca de 30 m.

⁸² De acordo com a cor do LED, tome um valor médio para λ , consultando um esquema do espectro da luz visível.

EXPERIÊNCIA 14E - Demonstração do efeito de persistência de visão com o disco de Newton

Equipamento utilizado

- disco de Newton
- motor ou sistema manual de manivela

Objectivo

Demonstrar o efeito de persistência das diferentes cores na retina e a respectiva adição.

Procedimento

- 1) Se não dispuser de um disco de Newton, construa um, com um diâmetro entre 15 a 20 cm, utilizando cartolina branca e tintas (ou através de colagem com papel de lustro), de acordo com a figura 14E.1.

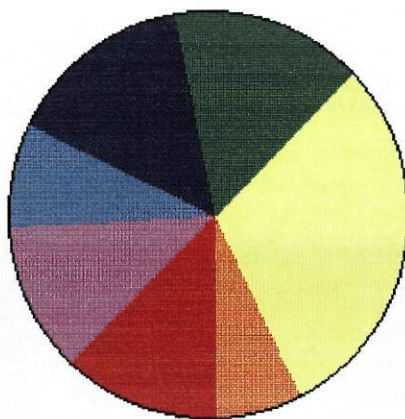


Figura 14E.1. Disco de Newton

- 2) Com a ajuda do motor ou sistema de manivela, faça o disco rodar; o eixo de rotação do dispositivo deve ser normal ao disco, passando pelo seu centro.
- 3) Descreva o que observa. Por que razão a sensação de cor resultante não é exactamente o branco ?

EXPERIÊNCIA 14F - Demonstração do efeito de ilusão de cor com o disco de Benham

Equipamento utilizado

- disco de Benham
- motor ou sistema manual de manivela

Objectivo

Demonstrar o efeito de ilusão de cor causado pela rotação de arcos concêntricos pretos.

Procedimento

- 1) Se não dispuser de um disco de Benham, construa um, com um diâmetro entre 15 a 20 cm, utilizando cartolina branca e tinta preta (ou através de colagem com papel de lustro), de acordo com a figura 14F.1.

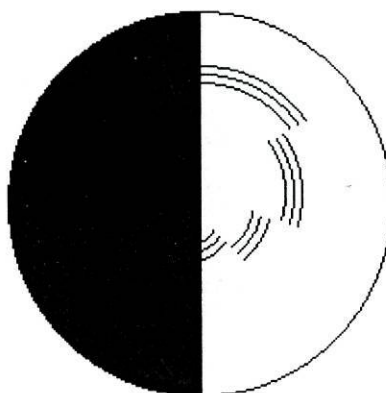


Figura 14F.1. Disco de Benham

- 2) Com a ajuda do motor ou sistema de manivela, faça o disco rodar; o eixo de rotação do dispositivo deve ser normal ao disco, passando pelo seu centro.
- 3) Descreva o que observa. Quais as cores que aparentam ter as diferentes coroaas circulares ?
- 4) Pare a rotação. Faça agora o disco rodar no sentido inverso. Compare o que observa com a situação anterior.

Interpretação

A explicação desta ilusão de cor não é conhecida de forma cabal. Aparentemente os arcos em rotação ocasionam estimulação de baixa frequência na retina do olho.

EXPERIÊNCIA 14G - Demonstração do efeito de Purkinje

Equipamento utilizado

- projector de diapositivos
- diafragma com suporte
- diapositivo com dois filtros (azul e vermelho)

Objectivo

Demonstrar que o olho humano é mais sensível à luz azul do que à luz vermelha, a baixas intensidades.

Procedimento

- 1) Ligue o projector de diapositivos, de modo a obter as suas imagens num ecrã branco.
- 2) Monte o diafragma em frente da objectiva do projector, com a ajuda do respectivo suporte; selecione a abertura máxima. Ver figura 14G.1.
- 3) Insira o diapositivo com os filtros no projector, e foque-o com cuidado. Observe as duas manchas, vermelha e azul, no ecrã.

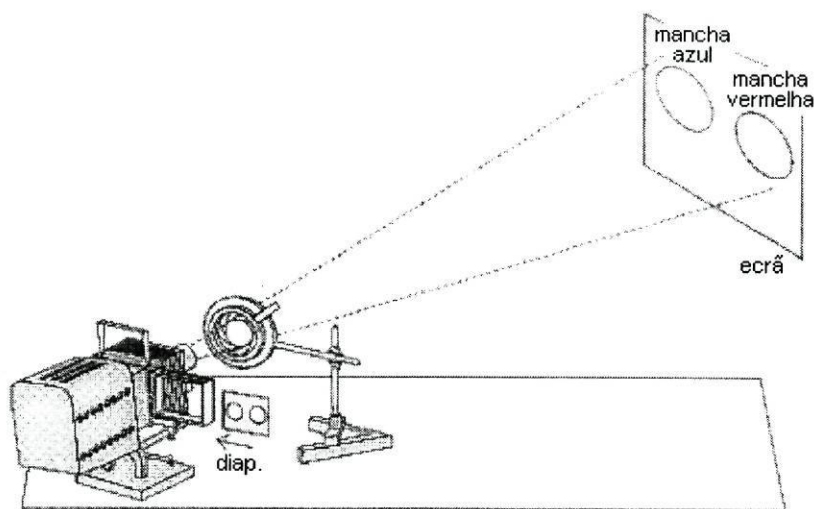


Figura 14G.1. Montagem utilizada

- 4) Feche lentamente o diafragma, até deixar de ver a mancha vermelha. Observe que a mancha azul, embora ténue, continua a ser visível.

EXPERIÊNCIA 14H - Demonstração do efeito de Pulfrich

Equipamento utilizado

- pêndulo mecânico com suporte
- filtro de densidade neutro (25 % de transmitância)⁸³

Objectivo

Demonstrar que, condições de diferente iluminação para os dois olhos, criam distorções na percepção de profundidade, dimensões, velocidade e posição.

Procedimento

- 1) Faça o pêndulo oscilar num plano perpendicular à sua direcção de observação. Ver figura 14H.1.

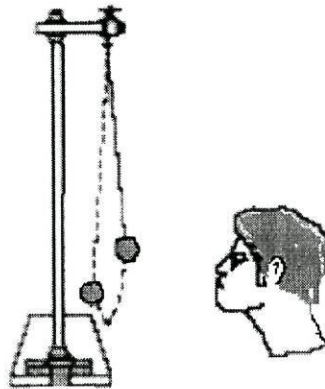


Figura 14H.1. Posição de observação

- 2) Coloque o filtro de densidade em frente do olho esquerdo. Observe o movimento do pêndulo, com ambos os olhos abertos. Como lhe parece ser a trajetória do pêndulo? Procure comparar as dimensões aparentes da esfera nas posições em que parece estar mais perto e mais longe.
- 3) Repita a experiência para diferentes velocidades da esfera. Procure relacionar este factor com uma maior ou menor distorção da trajetória.

⁸³ Poderá ser utilizado o filtro que acompanha o fotómetro PASCO OS-8520.

Interpretação

Esta ilusão é devida a mecanismos perceptuais no olho e cérebro. O olho esquerdo, através do filtro, vê uma imagem mais tênue da esfera do pêndulo. Os cones e bastonetes deste olho demoram mais tempo a registar e enviar a imagem para o cérebro (período de latência).

Quando o pêndulo oscila da esquerda para a direita, a combinação das imagens desfasadas obtidas pelos dois olhos resulta numa imagem que aparenta estar num plano mais distante do observador. Quando o pêndulo oscila da direita para a esquerda, a combinação das duas imagens aparenta estar num plano mais próximo do observador. Assim, a trajectória do pêndulo parece ser uma elipse.

O efeito de Pulfrich tem sido considerado responsável por acidentes de viação, em diversas situações nas quais os olhos estão sujeitos a diferentes condições de iluminação.

EXPERIÊNCIA 15A - Demonstração da polarização por absorção

Equipamento utilizado

- retroprojector e ecrã
- duas placas de material polarizador
- óculos *polaroid*
- amostras de celofane e plástico transparente (sacos, réguas, ...)

Objectivo

Demonstrar a propriedade que alguns materiais têm de polarizar a luz por absorção e ilustrar a sua aplicação no estudo do "stress" de materiais transparentes.

Procedimento

- 1) Ligue o retroprojector, fazendo incidir a luz no ecrã. Pouse uma das placas polarizadoras sobre o vidro.
- 2) Coloque a segunda placa sobre a primeira e rode-a, mantendo fixa a primeira. Ver figura 15A.1. O que observa ?

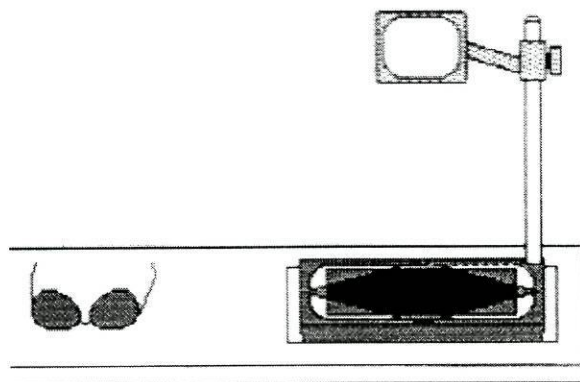


Figura 15A.1. Montagem utilizada

- 3) Repita o procedimento descrito no ponto anterior usando os óculos *polaroid*.
- 4) Interponha as amostras de celofane e plástico, uma a uma, entre as duas placas polarizadoras. Rode a que se encontra por cima e observe.

Interpretação

O "stress" a que os materiais foram submetidos provocou alterações na sua estrutura, tornando-os anisotrópicos e induzindo uma birrefringência, que é proporcional à tensão aplicada.

EXPERIÊNCIA 15B - Verificação da lei de Malus

Equipamento utilizado

- banco de óptica (PASCO OS-8518)
- fotômetro com filtros (PASCO OS-8520)
- 2 fontes de luz pontuais (PASCO OS-8517)
- 2 polarizadores (PASCO OS-8520)

Objectivo

Verificar que a intensidade de luz transmitida através de dois polarizadores é directamente proporcional ao quadrado do co-seno do ângulo entre os eixos dos dois polarizadores.

Procedimento

- 1) Monte o fotômetro no meio do banco de óptica. Encaixe o filtro de transmitância num dos lados do fotômetro.
- 2) Coloque uma fonte pontual de cada lado do banco de óptica. Ver figura 15B.1.

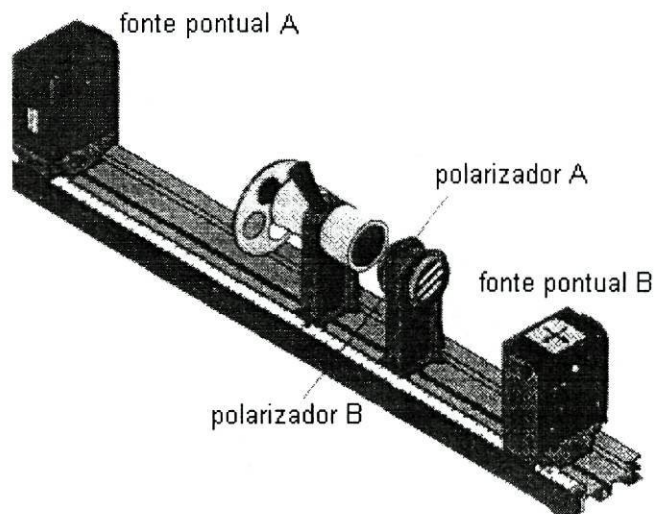


Figura 15B.1. Montagem utilizada
(adaptado de Hanks, A., Hanks, T., 1995)

- 3) Encaixe um polarizador de cada lado do respectivo suporte, alinhando a posição 0° das respectivas escalas com a marca existente no suporte. Nesta posição, a luz é totalmente transmitida.
- 4) Coloque o suporte com os polarizadores no banco de óptica, entre a fonte B e o fotômetro, encostando-o a este, de modo que apenas luz polarizada possa entrar por este lado do fotômetro.
- 5) Regule o filtro para 100 % de transmitância.
- 6) Obscureça totalmente a sala e mantenha-a assim até ao final da experiência.
- 7) Olhando através da ocular do fotômetro, ajuste a posição da(s) fonte(s) de luz até que os dois lados do indicador laranja apresentem igual iluminação.
- 8) Regule o filtro para 75 % de transmitância.
- 9) Olhando através da ocular do fotômetro, rode o polarizador B até que os dois lados do indicador laranja voltem a ter igual iluminação. Registe o ângulo de rotação (ϕ) na Tabela 15B.1. Rode o polarizador novamente para a posição zero e repita a medição duas vezes.
- 10) Repita o procedimento para 50 % e 25 % de transmitância.

Tabela 15B.1. Dados e resultados

% transmitância	75 %	50 %	25 %
ensaio 1			
ensaio 2			
ensaio 3			
valor médio do ângulo			
$\cos^2 \phi$			
% variação			

- 11) Para cada valor de transmitância, calcule a média dos três ensaios e registe o valor médio do ângulo.
- 12) Para calcular a percentagem prevista de transmitância para cada caso, calcule o quadrado do co-seno de cada ângulo médio e registe.
- 13) Calcule a percentagem de variação entre a percentagem de transmitância experimental o valor previsto para cada caso.

EXPERIÊNCIA 15C - Demonstração da polarização por reflexão**Equipamento utilizado**

- candeeiro de secretária
- placa de vidro
- transferidor com braço rotativo (T)
- polarizador (P)

Objectivo

Demonstrar que a luz reflectida pelas superfícies dieléctricas, como as de vidro, tende a ser polarizada.

Procedimento

- 1) Como fonte de luz utilize apenas um candeeiro de secretária (fonte extensa).
- 2) Faça incidir a luz na placa de vidro, com o transferidor acoplado e o pequeno braço rotativo, que facilitará a leitura do ângulo de reflexão ⁸⁴.

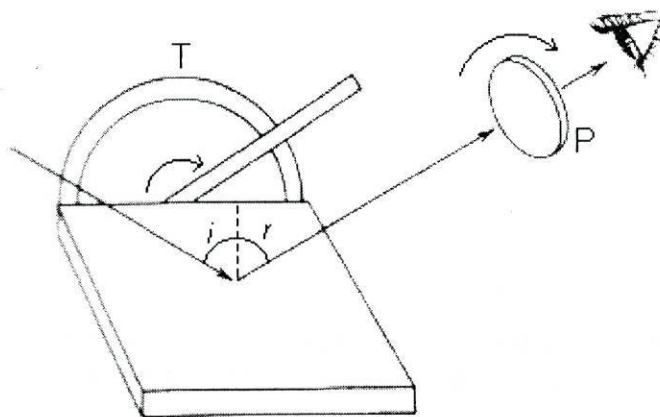


Figura 15C.1. Montagem utilizada

- 3) Observe a luz reflectida através do polarizador, rodando-o lentamente.
- 4) Faça variar o ângulo de reflexão, até encontrar o valor para o qual a polarização é total, ou seja, é possível observar a extinção da luz, para uma posição adequada do polarizador. Esse valor é o ângulo de Brewster para a interface ar-vidro.

⁸⁴ E consequentemente do ângulo de incidência, que tem o mesmo valor.

EXPERIÊNCIA 15D - Demonstração da polarização por dupla refração

Equipamento utilizado

- retroprojector e ecrã
- rectângulo de cartolina
- placa de material polarizador
- cristal romboédrico de calcite (espato da Islândia)

Objectivo

Demonstrar a propriedade da dupla refração, manifestada por alguns cristais, e verificar a polarização linear e ortogonal dos dois feixes refractados (ordinário e extraordinário).

Procedimento

- 1) Efectue um orifício com cerca de 3 mm de diâmetro no centro do rectângulo de cartolina; este deve ter dimensões que permitam cobrir completamente o vidro do retroprojector.
- 2) Ligue o retroprojector, fazendo incidir a luz no ecrã. Coloque a cartolina com o orifício sobre o vidro.
- 3) Pouse o cristal de calcite sobre o orifício e rode-o até observar dois feixes de luz no ecrã. Ver figura 15D.1.

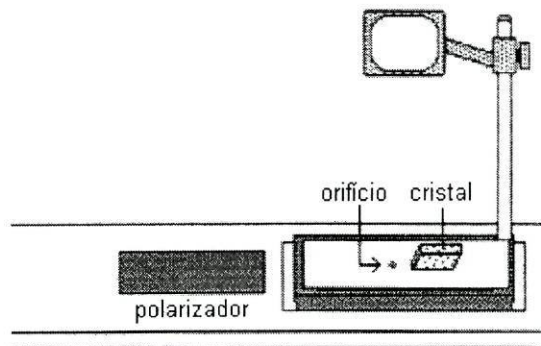


Figura 15D.1. Montagem utilizada

- 4) Rode a placa polarizadora por cima do cristal, paralelamente ao vidro do retroprojector. Descreva o que observa.

EXPERIÊNCIA 15E - Determinação do poder rotatório específico de uma substância opticamente activa

Equipamento utilizado

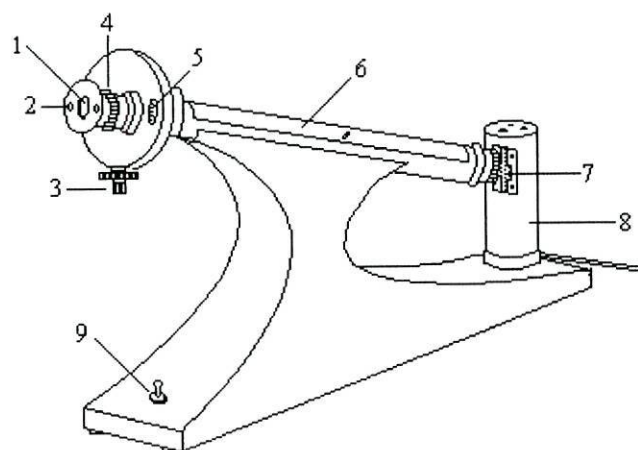
- polarímetro
- tubos polarimétricos
- gobelé de 150 cm^3
- funil
- termómetro
- recipiente com água destilada
- solução aquosa da substância em estudo⁸⁵

Objectivo

Verificar a actividade óptica de uma substância conhecida e determinar o seu poder rotatório específico.

Procedimento

- 1) Identifique cada um dos componentes do polarímetro. Ver figura 15E.1.



1. Ocular
2. Lente de ampliação
3. Parafuso de rotação do analisador
4. Anel de focagem
5. Escala com nónio ($N = 1/20$)
6. Compartimento onde se coloca a amostra
7. Filtro de vidro fosco
8. Cobertura da lâmpada
9. Interruptor

Figura 15E.1. Polarímetro

Nota: O procedimento descrito a seguir pressupõe a calibração prévia do aparelho, feita pelo professor de acordo com instruções de fábrica.

⁸⁵ Neste trabalho foi utilizada uma solução aquosa de sacarose com a concentração de $0,200\text{ g cm}^{-3}$.

- 2) Ligue o interruptor e aguarde 5 min até que a fonte luminosa estabilize (lâmpada de sódio, de comprimento de onda λ).
- 3) Encha completamente um dos tubos polarimétricos (por exemplo, aquele para o qual $\ell = 2,00$ dm) com água destilada; eventuais bolhas de ar devem ficar retidas na zona dilatada do tubo.
- 4) Coloque o tubo no compartimento próprio do polarímetro, de forma a que a parte dilatada fique a um nível superior.
- 5) Olhando através da ocular, rode o anel de focagem até obter uma imagem nítida.
- 6) Rode o parafuso (3) até que o campo visual apareça uniformemente iluminado (b), entre duas imagens dos tipos (a) e (c), na figura 15E.2:

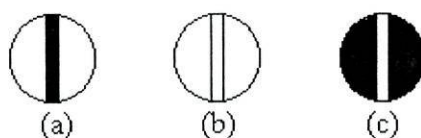


Figura 15E.2. Campo visual do polarímetro

- 7) Leia o valor indicado na escala ($\alpha_{\text{água}}$).
- 8) Coloque no gobelé cerca de 100 cm^3 da solução aquosa da substância em estudo (de concentração c), e meça a sua temperatura (θ).
- 9) Substitua a água do tubo polarimétrico pela solução e repita o procedimento, de 3) a 6).
- 10) Leia o valor indicado na escala (α'). Se a rotação do parafuso tiver sido no sentido positivo da escala, a substância é dextrógira (d); caso contrário, é levógira (l) e deve subtrair 180° ao valor lido.
- 11) Calcule o valor do ângulo de rotação óptica (α):

$$\alpha = \alpha' - \alpha_{\text{água}}$$

12) Determine o poder rotatório específico, através da sua expressão de definição:

$$[\alpha]_{\lambda}^{\theta} = \frac{\alpha}{\ell c}$$

13) Compare o valor obtido com o valor tabelado.

14) Determine o poder rotatório óptico molar $[\alpha_n]$, efectuando o cálculo da massa molar da substância em estudo e as conversões de unidades necessárias.

EXPERIÊNCIA 16A - Observação de padrões de difracção

Equipamento utilizado

- laser de He-Ne
- alvo
- obstáculo com fenda estreita
- fio metálico fino
- obstáculo com orifício circular
- alfinete

Objectivo

Comparar padrões de difracção produzidos por obstáculos complementares, verificando assim o princípio de Babinet.

Procedimento

- 1) Ligue o laser meia hora antes de iniciar a demonstração, orientando-o de modo a obter a respectiva imagem no alvo. Ver figura 16A.1.

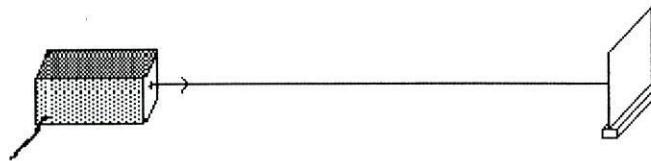


Figura 16A.1. Montagem utilizada

- 2) Interponha o obstáculo com a fenda estreita entre o laser e o alvo, junto à saída do feixe, de modo que a fenda fique alinhada com este. Observe e desenhe o padrão de difracção obtido.
- 3) Repita o ponto anterior, utilizando como obstáculo o fio metálico fino.
- 4) Compare os padrões de difracção obtidos em 2) e 3).
- 5) Utilize em seguida o obstáculo com o orifício circular. Observe e desenhe o padrão de difracção.

6) Repita o ponto anterior com a cabeça de alfinete.

7) Compare igualmente os padrões obtidos em 5) e 6).

Que relação geométrica existe entre os obstáculos em 2) e 3) e em 5) e 6) ? O que pode concluir das suas observações ?

EXPERIÊNCIA 16B - Determinação do comprimento de onda de um laser usando uma fenda de abertura conhecida

Equipamento utilizado

- banco de óptica (PASCO OS-8515)
- laser de diodo (L) (PASCO OS-8525)
- disco de fendas simples (F) (PASCO OS-8523)
- alvo (A)
- papel branco para cobrir o alvo
- lápis
- régua

Objectivos

Determinar o comprimento de onda de um laser por difracção através de uma fenda de abertura conhecida, e estudar o efeito da largura da fenda no padrão observado.

Procedimento

- 1) Monte o laser numa das extremidades do banco de óptica e coloque o disco de fendas simples, no seu suporte, cerca de 3 cm à frente do laser. Ver figura 16B.1.



Figura 16B.1. Montagem utilizada

- 2) Cubra o alvo com uma folha de papel branco, e coloque-o na outra extremidade do banco, de frente para o laser.
- 3) Seleccione a fenda de largura $a = 0,04$ mm, rodando o disco até que esta fique centrada na abertura circular do suporte. Ajuste a posição do laser com os

parafusos de alinhamento que se encontram na sua parte de trás, até que o feixe fique centrado na fenda.

- 4) Meça a distância da fenda ao alvo (D).
- 5) Desligue as luzes da sala e, com um lápis bem afiado, marque as posições dos mínimos do padrão de difracção no alvo.
- 6) Ligue novamente as luzes, meça a distância entre as marcas correspondentes à primeira ordem, e divida-a por 2. Registe o valor obtido (y) na Tabela 16B.1.

Tabela 16B.1. Valores obtidos

	Primeira ordem ($n = 1$)	Segunda ordem ($n = 2$)
Distância do centro do padrão ao mínimo (y)		

- 7) Repita o procedimento do ponto anterior para as marcas correspondentes à segunda ordem.
- 8) Efectue um desenho, à escala, do padrão de difracção.
- 9) Mude a largura da fenda para 0,02 mm e 0,08 mm e faça igualmente desenhos à escala de cada um dos respectivos padrões de difracção. Compare os padrões obtidos com as três fendas. O que pode concluir ?
- 10) Utilizando os valores da Tabela 16B.1, calcule o valor do comprimento de onda do laser, através da expressão:

$$\lambda = \frac{a \sin \theta}{n} \approx \frac{a y}{n D}$$

- 11) Determine a percentagem de erro entre os valores experimentais obtidos e o valor inscrito no laser.

EXPERIÊNCIA 16C - Determinação da espessura de um cabelo e do diâmetro de uma célula de sangue, conhecido o comprimento de onda do laser

Equipamento utilizado

- laser de He-Ne de comprimento de onda conhecido (λ)
- alvo
- papel branco para cobrir o alvo
- lápis
- régua
- fita métrica
- cabelo humano
- cartolina, tesoura, fita adesiva
- lâmina de microscópio c/ mancha de sangue fresco
- suporte

Objectivo

Aplicar os conhecimentos acerca da difracção para determinar a espessura de um cabelo humano e o diâmetro de um glóbulo vermelho sanguíneo.

Procedimento

- 1) Ligue o laser meia hora antes de iniciar a experiência, orientando-o de modo a obter a respectiva imagem no alvo. Ver figura 16C.1.

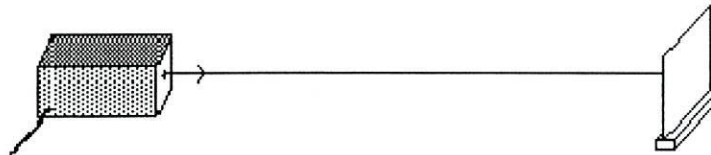


Figura 16C.1. Montagem utilizada

- 2) Cubra o alvo com uma folha de papel branco.

1ª parte - Espessura de um cabelo

- 3) Corte um quadrado de cartolina com cerca de 6 cm de lado. Efectue um orifício de diâmetro igual a 1 cm no respectivo centro. Com a fita adesiva prenda o fio de cabelo, de acordo com a figura 16C.2.

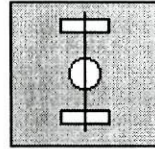


Figura 16C.2. Montagem do fio de cabelo na cartolina

- 4) Coloque o quadrado de cartolina assim preparado entre o laser e o alvo, junto à saída do feixe, de modo que este intersecte o fio de cabelo. Observe o padrão de difracção obtido.
- 5) Meça a distância do fio de cabelo ao alvo (D).
- 6) Desligue as luzes da sala e, com um lápis bem afiado, marque as posições dos mínimos do padrão de difracção no alvo.
- 7) Ligue novamente as luzes, meça a distância entre as marcas correspondentes à primeira ordem, e divida por 2. Registe o valor obtido (y) na Tabela 16C.1.

Tabela 16C.1. Valores obtidos

	Primeira ordem ($n = 1$)	Segunda ordem ($n = 2$)
Distância do centro do padrão ao mínimo (y)		

- 8) Repita o procedimento do ponto anterior para as marcas correspondentes à segunda ordem.
- 9) Utilizando os valores da Tabela 16C.1., calcule a espessura do fio de cabelo (a), através da expressão:

$$a = \frac{n \lambda}{\sin \theta} \approx \frac{n \lambda D}{y}$$

2ª parte - Diâmetro de um glóbulo vermelho sanguíneo

- 10) Substitua o quadrado de cartolina com o cabelo pela lâmina de microscópio com a mancha de sangue.
- 11) Assegure-se que o feixe laser atravessa o rebordo da mancha de sangue, onde esta é menos espessa. O alvo deve ser agora colocado a uma distância de cerca de 8 cm da lâmina de microscópio. Meça esse valor (D). Observe o padrão de difracção obtido.⁸⁶
- 12) Substitua a folha de papel que recobre o alvo e repita o procedimento descrito nos pontos 6) a 8) para determinar o diâmetro de um glóbulo vermelho (a).

⁸⁶ A figura de difracção da mancha de sangue é idêntica à de uma única célula, desde que a distribuição das diversas células possa ser considerada aleatória.

EXPERIÊNCIA 16D - Estudo da interferência e difracção usando uma fenda dupla

Equipamento utilizado

- banco de óptica (PASCO OS-8515)
- laser de diodo (L) (PASCO OS-8525)
- disco de fendas múltiplas (F) (PASCO OS-8523)
- alvo (A)
- papel branco para cobrir o alvo
- lápis
- régua

Objectivos

Observar os padrões de difracção e interferência resultantes da passagem do feixe laser através de duas fendas, e verificar que as posições dos máximos do padrão de interferência coincidem com as previstas pela teoria.

Procedimento

- 1) Monte o laser numa das extremidades do banco de óptica e coloque o disco de fendas múltiplas, no seu suporte, cerca de 3 cm à frente do laser. Ver figura 16D.1.

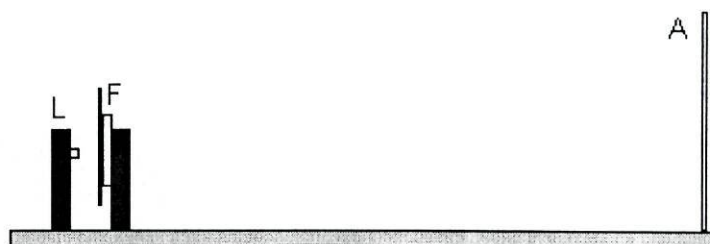


Figura 16D.1. Montagem utilizada

- 2) Cubra o alvo com uma folha de papel branco, e coloque-o na outra extremidade do banco, de frente para o laser.
- 3) Seleccione a fenda dupla de largura 0,04 mm e separação $d = 0,25$ mm, rodando o disco até que esta fique centrada na abertura circular do suporte. Ajuste a

posição do laser com os parafusos de alinhamento que se encontram na sua parte de trás, até que o feixe fique centrado na fenda.

- 4) Meça a distância da fenda dupla ao alvo (D).
- 5) Desligue as luzes da sala e, com um lápis bem afiado, marque as posições dos máximos do padrão de interferência no alvo.
- 6) Ligue novamente as luzes, meça a distância entre as marcas correspondentes à primeira ordem, e divida-a por 2. Registe o valor obtido (y) na Tabela 16D.1.

Tabela 16D.1. Valores obtidos

	Primeira ordem ($m = 1$)	Segunda ordem ($m = 2$)
Distância do centro do padrão ao máximo (y)		

- 7) Repita o procedimento do ponto anterior para as marcas correspondentes à segunda ordem.
- 8) Efectue um desenho, à escala, do padrão de interferência.
- 9) Seleccione outra fenda dupla do disco, com a mesma largura (0,04 mm) mas diferente separação (0,50 mm) e faça um desenho à escala deste novo padrão de interferência.
- 10) Compare os padrões obtidos em 9) e 10). O que pode concluir quanto ao efeito da separação entre as fendas no padrão de interferência ?
- 11) Seleccione outra fenda dupla com maior largura (0,08 mm) e a separação original (0,25 mm) e faça um desenho à escala deste novo padrão de interferência.
- 12) Compare os padrões obtidos em 9) e 11). O que pode concluir quanto ao efeito da largura das fendas no padrão de interferência ?

- 13) Utilizando os valores da Tabela 16D.1, e o valor médio do comprimento de onda do laser de diodo ($\lambda = 670 \text{ nm}$), calcule a separação das fendas, através da expressão:

$$d = \frac{m \lambda}{\sin \theta} \approx \frac{m \lambda D}{y}$$

- 14) Determine a percentagem de erro entre os valores experimentais obtidos e o valor fornecido de 0,25 mm.

EXPERIÊNCIA 16E - Comparação dos padrões de difracção e interferência para fendas múltiplas

Equipamento utilizado

- banco de óptica (PASCO OS-8515)
- laser de díodo (L) (PASCO OS-8525)
- discos de fendas simples e múltiplas (F) (PASCO OS-8523)
- alvo (A)
- papel branco para cobrir o alvo
- lápis

Objectivo

Comparar os padrões de difracção e interferência resultantes da passagem do feixe laser através de várias combinações de fendas.

Procedimento

- 1) Monte o laser numa das extremidades do banco de óptica e coloque o disco de fendas múltiplas, no seu suporte, cerca de 3 cm à frente do laser. Ver figura 16E.1.

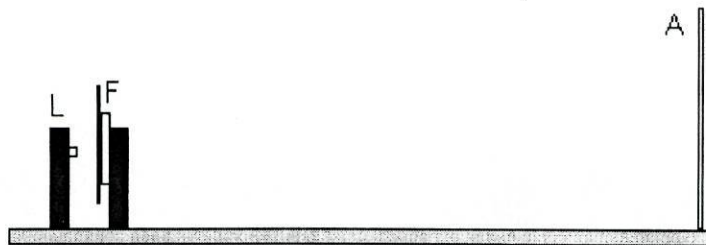


Figura 16E.1. Montagem utilizada

- 2) Cubra o alvo com uma folha de papel branco, e coloque-o na outra extremidade do banco, de frente para o laser.
- 3) Seleccione a comparação fenda simples/fenda dupla, rodando o disco até que esta fique centrada na abertura circular do suporte. Ajuste a posição do laser com os parafusos de alinhamento que se encontram na sua parte de trás, de tal modo que ambas as fendas, simples e dupla, sejam iluminadas simultanea-

mente. Os padrões produzidos por ambas as fendas devem aparecer no alvo um ao lado do outro, em posição vertical.

- 4) Desenhe os dois padrões, aproximadamente à escala. Quais as semelhanças e diferenças entre ambos ?
- 5) Rode o disco para o próximo conjunto de comparação (2 fendas duplas com a mesma largura mas diferentes separações de fendas). Desenhe os dois padrões aproximadamente à escala. Como varia o padrão da fenda dupla quando a separação entre fendas aumenta ?
- 6) Rode o disco para o próximo conjunto de comparação (2 fendas duplas com a mesma separação mas diferentes larguras de fendas). Desenhe os dois padrões aproximadamente à escala. Como varia o padrão da fenda dupla quando a largura das fendas aumenta ?
- 7) Rode o disco para o próximo conjunto de comparação (fenda dupla/fenda tripla com a mesma separação e mesma largura de fendas). Desenhe os dois padrões aproximadamente à escala. Que diferenças existem entre eles ?
- 8) Substitua o disco de fendas múltiplas pelo disco de fendas simples. Seleccione a comparação linha/fenda. Desenhe os dois padrões aproximadamente à escala. Que diferenças existem entre eles ?
- 9) Seleccione a distribuição de pontos. Desenhe o padrão de difracção resultante, aproximadamente à escala.
- 10) Seleccione a distribuição de orifícios. Desenhe o padrão de difracção resultante, aproximadamente à escala. Em que difere o padrão de difracção da distribuição de pontos, do padrão de difracção da distribuição de orifícios ?

EXPERIÊNCIA 16F - Influência da frequência da luz na interferência

Equipamento utilizado

- lâmpada de filamento cilíndrica
- 3 filtros (azul, verde e vermelho)
- rede de difracção (20 linhas/mm) (D)

Objectivo

Verificar a influência da frequência luminosa utilizada no padrão de interferência.

Procedimento

- 1) Monte a lâmpada num suporte vertical. Cubra-a com os filtros, de acordo com a figura 16F.1. Não é necessário que estes envolvam a lâmpada, mas apenas que filtrem a sua luz do lado em que a observação vai ser efectuada.

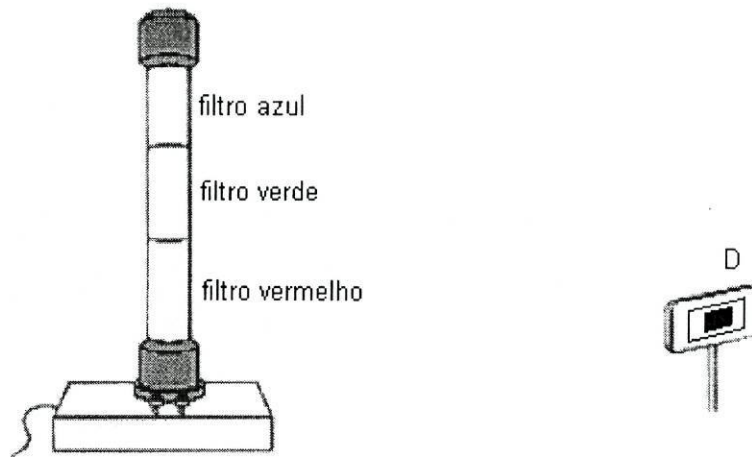


Figura 16F.1. Montagem utilizada

- 2) Obscureça totalmente a sala e acenda a lâmpada cilíndrica. Deverá observar o efeito de uma linha luminosa, azul na parte superior, verde na parte central e vermelha na parte inferior.
- 3) Segure com a mão o suporte com a fenda dupla e observe a lâmpada através dela. O que pode observar ? Qual a relação entre a frequência luminosa e a distância entre os máximos do padrão de interferência ?

EXPERIÊNCIA 16G - Interferômetro de Michelson

Equipamento utilizado

- interferômetro de Michelson (modelo didático) ⁸⁷
- laser de He-Ne (F)
- alvo (A)
- lente (L)

Objectivo

Familiarizar-se com um instrumento de precisão de inegável importância histórica e didática.

Procedimento

- 1) Ligue o laser, que deve ter sido previamente alinhado pelo professor.
- 2) Ajuste o interferômetro de modo a obter no alvo (A) uma figura de interferência constituída por círculos concêntricos alternadamente brilhantes e escuros.
- 3) Com um lápis assinale no alvo a posição do ponto central da figura de interferência, a qual deve manter-se fixa ao longo da experiência.
- 4) Rodando lenta e cuidadosamente o parafuso micrométrico (P1), desloque o espelho primário (E1); verifique qual o deslocamento Δx_{mic} correspondente a um número N de alternâncias "brilhante-escuro-brilhante" do ponto central do padrão de interferência. Ver figura 16G.1.

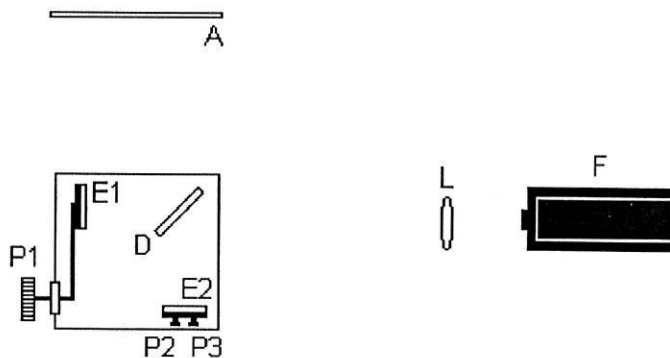


Figura 16G.1. Montagem utilizada

⁸⁷ Inclui um braço mecânico que permite ajustar a posição do espelho primário por meio de um parafuso micrométrico.

- 5) Determine o deslocamento do espelho correspondente a $1/2$ comprimento de onda:

$$\Delta x = \frac{\Delta x_{\text{mic}}}{10 N}$$

sendo 10 o factor de escala do braço do interferómetro.

- 6) Efectue pelo menos cinco ensaios e determine o valor mais provável para Δx . Sempre que necessário ajuste o interferómetro, rodando lenta e cuidadosamente os parafusos (P2) e (P3) que controlam a posição do espelho secundário (E2), de modo a manter fixa a posição do ponto central do padrão de interferência.
- 7) Calcule um valor *aproximado* do comprimento de onda do laser (λ), através da relação

$$\lambda_{\text{exp}} = 2\Delta x$$

- 8) Interponha uma lâmina delgada de vidro entre o espelho secundário (E2) e o divisor de feixe (D); desloque-a perpendicularmente ao feixe. Verifique a homogeneidade da lâmina, observando possíveis deformações na figura de difracção.
- 9) Se o seu interferómetro dispuser de acessórios adequados (célula transparente e bomba de vácuo com manómetro de pressão) poderá ainda estudar a variação do índice de refracção do ar com a pressão a que se encontra.