

Exp. 11

Medidas de índices de refração

FSC2144 - Laboratório de Física IV
FSC5123 - Física experimental II

lemo.ufsc.br
Versão de 1 de abril de 2024

1 Objetivos

Técnicas para medir índices de refração são especialmente atraentes na caracterização de materiais. Isso se deve a dois fatores: em geral empregam métodos não destrutivos, e os resultados são alcançados rapidamente. Em técnicas óticas, o índice de refração tem importância primordial, por exemplo, no desenvolvimento de fibras óticas e lentes e na obtenção da concentração de produtos químicos em soluções transparentes.

Neste experimento, vamos medir:

- índices de refração em **diferentes materiais** para um **mesmo comprimento de onda** da luz;
- índices de refração em um **mesmo material** para **diferentes comprimentos de onda**.

2 Teoria Básica

2.1 Índice de refração

O índice de refração é um número adimensional que descreve como a luz se propaga através de um meio. Ele é definido como

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

onde $c = 299\,792\,458$ m/s é a velocidade da luz no vácuo, que costuma ser aproximada por $3,0 \times 10^8$ m/s, e v é a velocidade da luz no meio material. Como v é normalmente menor que c , resulta que o índice de refração é maior que 1 para todos os meios materiais encontrados na natureza¹. Por exemplo, o índice de refração da água é 1,33, o que significa que a luz se propaga 1,33 vezes mais devagar na água que no vácuo. Dizemos que, quanto maior o índice de refração de um material, mais ele é *refringente*, ou ainda, maior sua *densidade ótica*. A tabela 1, mostra o índice de refração de alguns materiais para referência.

¹ Uma exceção são os chamados *metamateriais*, materiais artificiais projetados para ter propriedades não encontradas na natureza, que podem apresentar índice de refração negativo!

Sólidos		Líquidos (20°C)	
gelo	1,31	água	1,333
vidro comum	1,50	álcool etílico	1,361
vidro Crown	1,511	parafina líquida	1,44
vidro Flint	1,620	azeite de oliva	1,47
diamante	2,423	benzeno	1,502

Tabela 1 Índices de refração em diferentes líquidos e sólidos da luz da linha D do sódio ($\lambda = 589,3 \text{ nm} = 5893 \text{ \AA}$).

No ar, material muito pouco refringente, a velocidade da luz é bastante próxima de c . De fato, o índice de refração do ar nas condições normais de temperatura e pressão é de aproximadamente 1,0003. Por isso, para efeitos práticos, muitas vezes consideramos o índice do ar como sendo igual a 1.

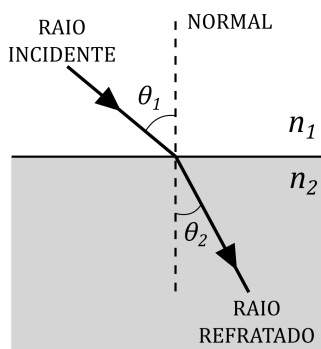


Figura 1 Refração de um raio luminoso na passagem de um meio 1 para o meio 2, com índices de refração diferentes. Este fenômeno é descrito pela lei de Snell. O raio incidente, o raio refratado e a normal ficam necessariamente no mesmo plano, denominado *plano de incidência*.

O índice de refração também determina o quanto a trajetória da luz é desviada, ou *refratada*, ao adentrar num meio. Este foi, de fato, o primeiro uso prático do índice de refração de que se tem conhecimento e é descrito pela **Lei de Snell**:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2, \quad (2)$$

onde n_1 e n_2 são os índices de refração dos meios 1 e 2; θ_1 e θ_2 são, respectivamente, os ângulos de incidência e refração, definidos com relação à reta normal (perpendicular) à superfície que separa os dois meios, como mostra a Figura 1.

2.2 O Prisma

O prisma é um dispositivo óptico transparente que refrata a luz. Ele possui duas faces polidas, não paralelas, formando um vértice com ângulo interno α como mostra a

Figura 2. Se um raio luminoso monocromático penetrar num prisma por uma das faces polidas, ele sofrerá duas refrações ditadas, naturalmente, pela lei de Snell (uma em cada face polida) e a direção do raio emergente do prisma formará um ângulo δ com a direção do raio incidente. Este é o *ângulo de desvio* provocado pelo prisma.

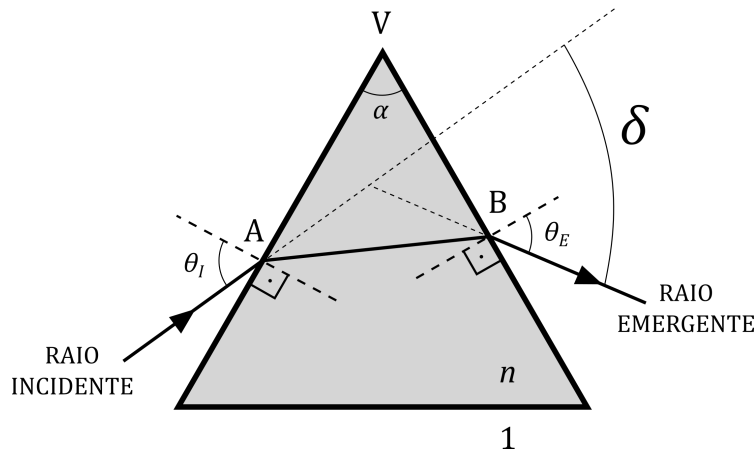


Figura 2 Esquema representando o desvio sofrido por um raio luminoso ao incidir num prisma. O raio é refratado duas vezes, nos pontos A e B das faces polidas do prisma. O raio emergente é desviado de um ângulo δ com relação ao raio incidente.

O desvio δ depende do índice de refração n do material de que é feito o prisma: por exemplo, quanto mais refringente o material, maior o desvio. Ele depende também do ângulo do vértice, α , e do ângulo de incidência do feixe, θ_I , com relação à normal da primeira face. Como veremos a seguir, a medida desse desvio pode ser útil na determinação experimental do índice de refração do próprio material que constitui o prisma.

Ângulo de desvio mínimo D

Suponhamos que dispomos de um prisma constituído de material de índice de refração n e vértice com ângulo α . Neste caso, o único parâmetro livre capaz de influenciar no desvio δ do raio luminoso é o seu ângulo de incidência θ_I na primeira face polida. É possível mostrar que, com tal prisma, é impossível obter um desvio menor que um certo valor. **O valor mínimo possível de δ é chamado de ângulo de desvio mínimo e é denotado D .** Ele ocorre para o ângulo de incidência $\theta_I = \arcsen(n \sen(\alpha/2))$. Mostra-se também que, na configuração de desvio mínimo, os ângulos de incidência e emergência são iguais ($\theta_I = \theta_E$), ou seja, no caso de um prisma isósceles, o raio no interior do prisma se propagará paralelamente à sua base (face normalmente não polida).

Mais detalhes e as demonstrações dos resultados acima podem ser encontrados no Anexo deste experimento, disponível no site da disciplina. A informação básica necessária para o entendimento e realização do experimento é a seguinte:

Medindo-se o ângulo do desvio mínimo D e conhecendo-se previamente o ângulo α do prisma, obtém-se o índice de refração n da substância que constitui o prisma através da expressão

$$n = \frac{\text{sen}\left(\frac{D + \alpha}{2}\right)}{\text{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}. \quad (3)$$

2.3 Dispersão Cromática

O índice de refração n de um material depende do comprimento de onda λ da luz incidente. Isto significa, fisicamente, que a velocidade de propagação da luz, num meio material, varia em função da cor da luz. Podemos verificar este fato incidindo luz branca sobre um prisma e observando que cada cor é desviada com um ângulo diferente, pois cada cor “enxerga” um índice de refração distinto no material do prisma. A esse fenômeno de separação das componentes de cor de um feixe damos o nome de *dispersão cromática*.

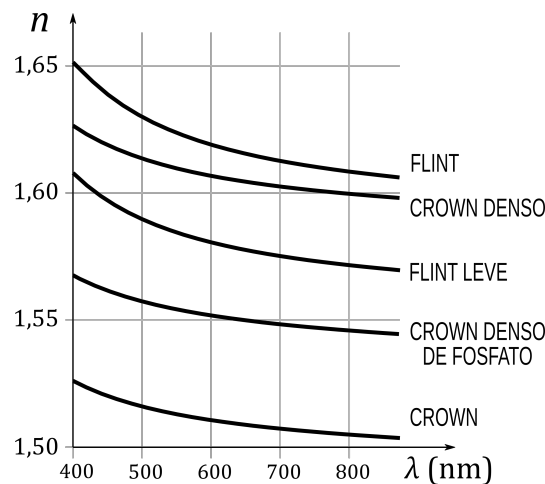


Figura 3 Gráfico $n \times \lambda$ para diferentes vidros do tipo Flint e Crown produzidos pela empresa alemã Schott. Fonte: *refractiveindex.info*.

Quanto mais um material é capaz de separar desta forma as cores que compõem a luz branca, maior é a sua dispersão cromática na região visível do espectro eletromagnético, o que indica que n depende mais fortemente de λ para este material. Na Figura 3, é possível ver o gráfico de $n(\lambda)$ para alguns vidros. Observa-se, em particular, que os vidros do tipo *Flint*² apresentam uma inclinação ligeiramente mais

² O termo “flint” é a palavra inglesa para o sílex, um tipo de rocha constituída de quartzo originalmente usada na produção de cristal no século XVII.

forte no início do gráfico do que os vidros do tipo *Crown*³. Constatase, portanto, que aquele tipo de vidro apresenta uma maior dispersão cromática na região do visível.

Vejamos, abaixo, duas formas de mensurar a dispersão cromática de um material: fórmula de Cauchy e número de Abbe.

Fórmula empírica de Cauchy

Em 1836, o matemático francês Augustin-Louis Cauchy desenvolveu uma fórmula empírica que descreve bem a relação entre n e λ na região visível do espectro:

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2}, \quad (4)$$

onde A e B são constantes específicas de cada material e que podem ser determinadas experimentalmente. Se forem conhecidos, ou medidos, os índices de refração n_1 e n_2 para dois comprimentos de onda λ_1 e λ_2 , a substituição destes valores na equação de Cauchy permite calcular A e B . No entanto, é mais confiável construir um gráfico $n \times 1/\lambda^2$ a partir de diversos pontos experimentais e obter estas constantes através dos coeficientes linear e angular. Como regra geral, quanto maior o coeficiente B , maior a dispersão do material.

Número de Abbe

Uma outra maneira de quantificar aproximadamente a dispersão cromática é através do *número de Abbe*⁴, assim definido:

$$V = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}, \quad (5)$$

onde n_F , n_D e n_C são os índices de refração para as cores violeta, amarela e vermelha, especificamente nos comprimentos de onda das linhas conhecidas por F (4861 Å), D (5893 Å) e C (6563 Å), nomeadas por Fraunhofer (ver Tabela 2). O fabricante do vidro Flint que é utilizado no laboratório forneceu $n_D = 1,620$ e $n_F - n_C = 0,017$.

Quanto menor o número de Abbe, maior a dispersão cromática do material. Para os vidros normalmente utilizados nos sistemas óticos, os valores de V estão entre 30 e 60. A figura 4 mostra um diagrama $n \times V$ onde constam diversos tipos de vidro, incluindo o Flint (F) e o Crown (K).

3 Sobre a experiência

Num primeiro momento, a experiência consistirá em medir o índice de refração de um prisma de vidro em função dos comprimentos de onda da luz de uma lâmpada

³ O vidro Crown é assim chamado devido ao seu processo de fabricação, que inclui soprar o vidro saindo do forno até que este atinja o formato aproximado de uma coroa.

⁴ Ernst Abbe foi um físico e engenheiro alemão (1840-1905).

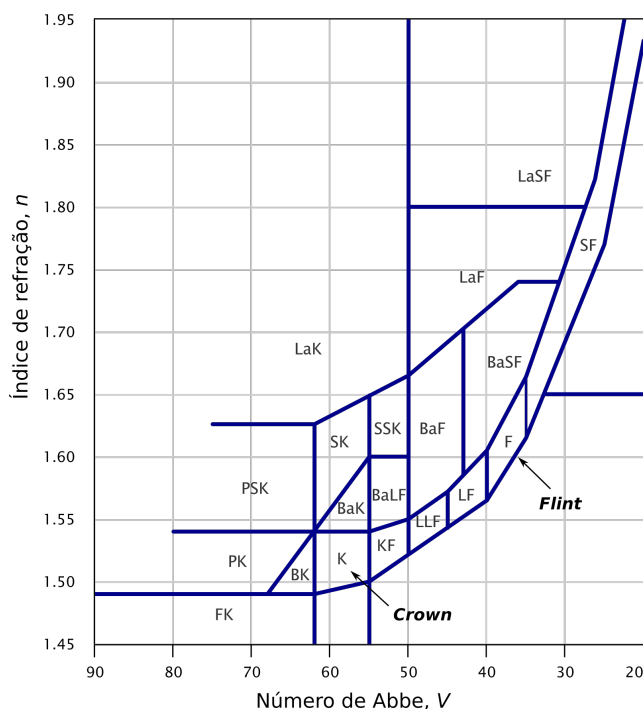


Figura 4 Diagrama de Abbe com diversos tipos de vidro. Fonte: *refractiveindex.info*.

de mercúrio (Hg). Na Tabela 2, é fornecido o espectro de Hg, com uma indicação aproximada da intensidade de cada linha espectral e seus respectivos comprimentos de onda. É importante salientar que a cor vermelha observada não pertence ao espectro de mercúrio, sendo em geral observada devido a impurezas presentes em lâmpadas comerciais.

Espectro do Mercúrio			Espectro de Fraunhofer		
Cor	Intensidade	λ (Å)	Linha	Elemento	λ (Å)
vermelha	fraca	6234	Z	O ₂	8227
amarela I	muito forte	5791	A	O ₂	7594
amarela II	muito forte	5770	B	O ₂	6867
verde	forte	5461	C	H α	6563
azul-verde I	fraca	4960	D	Na	5893
azul-verde II	média	4916	e	Hg	5461
azul	forte	4358	F	H β	4861
violeta I	média	4078	G	Fe/Ca	4308
violeta II	forte	4047	H	Ca ⁺	3968

Tabela 2 Espectro da lâmpada de mercúrio (Hg) e espectro de Fraunhofer. O angstrom (Å) é uma unidade frequentemente utilizada para expressar comprimentos de onda ($1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$). Outra unidade comum é o nanômetro ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 10 \text{ Å}$).

Na segunda parte, uma lâmpada de sódio (Na) será usada para medir o índice de refração de diferentes materiais para um mesmo comprimento de onda ($\lambda = 589$ nm). Os materiais incluem água e parafina líquida e, para isso, os grupos dispõem na bancada de prismas preenchidos com estes líquidos.

Espectrômetro Ótico

O espectrômetro ótico é o instrumento utilizado nesta experiência para medir os espectros fornecidos pelas fontes luminosas. Suas partes essenciais são:

- Colimador, cuja função é produzir um feixe de luz paralela;
- Plataforma suporte do prisma, que dispersa o feixe colimado;
- Telescópio, que permite examinar o efeito dispersivo causado pelo prisma;
- Plataforma goniométrica, escala graduada que permite a medida do efeito dispersivo, isto é, o deslocamento angular de cada cor em relação ao feixe colimado original.

O telescópio e a plataforma graduada podem ser girados de maneira independente em torno de um eixo vertical comum, que passa pelo centro da plataforma. O parafuso B (indicado no instrumento) permite travar a plataforma. O telescópio possui uma ocular que permite a focalização da imagem da fenda do colimador sobre uma cruz visível. Fixo ao braço do telescópio há um nônio que permite leituras sobre a plataforma graduada.

4 Referências Bibliográficas

- Site refractiveindex.info
- Anexo lemo.paginas.ufsc.br/files/2024/04/prisma.pdf

5 Relação do material

- 01 espectrômetro ótico;
- 01 lâmpada de vapor de mercúrio, com reator;
- 01 lâmpada espectral de sódio com reator;
- 01 prisma de vidro Flint médio (F);
- 01 prisma de vidro Crown (C);
- 01 prisma oco com água (A);
- 01 prisma oco com parafina líquida (P).

6 Esquema Experimental

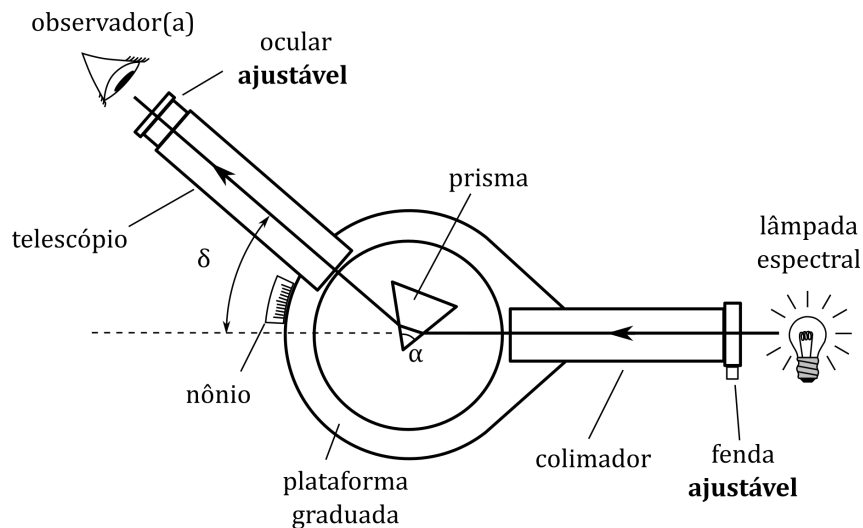


Figura 5 Representação esquemática do experimento, onde δ é o ângulo de desvio da luz e α é o ângulo interno formado pelas faces de entrada e saída do prisma. Para um dado prisma, o ângulo de desvio mínimo, D , é definido como o menor valor possível de δ e pode ser obtido experimentalmente.

7 Procedimento Experimental

PRIMEIRA PARTE - Dispersão do espectro (lâmpada de Hg)

1. Ligue a lâmpada de mercúrio (Hg). Usando o telescópio, verifique se a lâmpada está iluminando perfeitamente a fenda. Esta deve estar tão próxima da janela da lâmpada quanto possível.
2. A ocular do telescópio pode ser deslocada para dentro ou para fora na direção do tubo do telescópio. Olhe através da ocular e ajuste-a até obter uma imagem nítida e brilhante da fenda. A fenda possui uma largura que também pode ser ajustada, por meio de um parafuso no instrumento, próximo à janela da lâmpada.
3. Coloque o prisma *fornecido pelo professor* sobre a plataforma na posição e orientação adequadas (ver Figura 5). Você poderá reorientar o prisma girando a plataforma (para que a plataforma gire livremente, é preciso desapertar o parafuso B). Busque observar, através do telescópio, a luz emergente do prisma: você deve ver o espectro do Hg, constituído de linhas verticais finas e coloridas. A fim de comparação, veja o quadro exposto na sala com os espectros de diferentes elementos químicos.
4. Tomemos como referência a linha de cor verde. Centralize-a sobre a cruz da ocular. Identifique em qual sentido a plataforma deve ser girada de modo a reduzir o desvio δ da linha verde (a Figura 5 mostra como é definido o ângulo δ).
5. Gire a plataforma com o prisma até atingir o menor desvio possível, observando sempre a linha verde. Se você observar que as linhas simplesmente saíram do campo de visão, movimente o telescópio (sem girar a plataforma) para recuperá-las.
6. Atingido o desvio mínimo, trave a plataforma com o parafuso B. Meça, usando a cruz do telescópio como referência, a posição angular de cada linha espectral e anote os resultados na Tabela I.
7. Concluídas as medidas para as diversas linhas, retire o prisma e alinhe a cruz do telescópio com a imagem da fenda. A posição angular medida indicará o "zero". Anote este valor na Tabela I.

Nota: *O desvio mínimo de cada cor será a diferença entre a leitura da posição angular da sua linha espectral e o zero. Considere o ângulo do prisma $\alpha = 60,00^\circ$.*

SEGUNDA PARTE - Índices de refração (lâmpada de Na)

1. Ligue a lâmpada de sódio (Na) através do seu reator.
2. Coloque o prisma de vidro Crown (C) centrado sobre a plataforma.
3. Procure o desvio mínimo, tomando como referência a linha amarela. O procedimento é idêntico ao da primeira parte. Anote na Tabela II a posição angular da linha espectral amarela e o zero.
4. Repita o procedimento para os prismas com água (A) e com parafina líquida (P).

8 Questionário

1. Para o prisma da primeira parte:
 - (a) Faça um gráfico de n em função de λ , sem ajuste de reta.
 - (b) Faça um gráfico de n em função de $1/\lambda^2$, com ajuste de reta.
 - (c) Calcule as constantes A e B da equação empírica de Cauchy.

2. (a) Através da equação obtida no item anterior, calcule n_F , n_D e n_C (conforme espectro de Fraunhofer);
 - (b) Determine o número de Abbe do material do prisma.
 - (c) Baseando-se nestes resultados e no diagrama da Figura 4, determine o tipo de vidro que compõe o prisma da primeira parte.

3. (a) Dentre as cores observadas no espectro do mercúrio na experiência, qual delas tem a maior velocidade de propagação neste vidro? Justifique.
 - (b) Calcule esta velocidade de propagação, comparando-a com a velocidade da luz no vácuo, c .

4. (a) Baseando-se nos resultados da Tabela II, ordene os materiais dos prismas em ordem crescente de índice de refração.
 - (b) Calcule o erro percentual dos valores de n obtidos com relação aos valores nominais que constam na Tabela 1.

Exp. 11 - Medidas de índices de refração

GRUPO: _____

ALUNOS: _____

TURMA: _____

DATA: _____

➤ Primeira Parte - Lâmpada de mercúrio

TABELA I

zero (°):

cor	λ (Å)	$\frac{1}{\lambda^2}$ (10^{-8} Å ⁻²)	posição angular (°)	D (°)	$\text{sen}\left(\frac{D+\alpha}{2}\right)$	n
Vermelho	6234					
Amarelo I	5791					
Verde	5461					
Azul-verde	4916					
Azul	4358					
Violeta II	4047					

➤ Segunda Parte - Lâmpada de Sódio

TABELA II

$\lambda = 5893$ Å

Substância	posição angular (°)	zero (°)	D (°)	$\text{sen}\left(\frac{D+\alpha}{2}\right)$	n
Vidro Crown (C)					
Água (A)					
Parafina (P)					