

# Exp. 11

## Medidas de índices de refração

FSC5144 - Laboratório de Física IV  
FSC5123 - Física experimental II

lemo.ufsc.br  
Versão de 2 de setembro de 2019

### 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

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

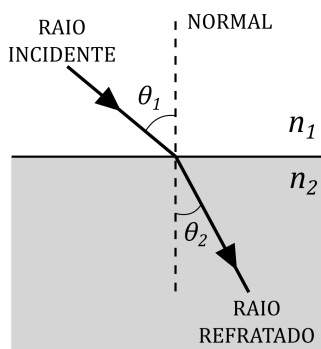
onde  $c = 299\,792\,458$  m/s é a velocidade da luz no vácuo, que costuma ser aproximada por  $3,0 \times 10^8$  m/s, e  $v$  é a velocidade da luz no meio material. Como  $v$  é normalmente menor que  $c$ , resulta que o índice de refração é maior que 1 para todos os meios materiais encontrados na natureza<sup>1</sup>. 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.

<sup>1</sup> 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**:

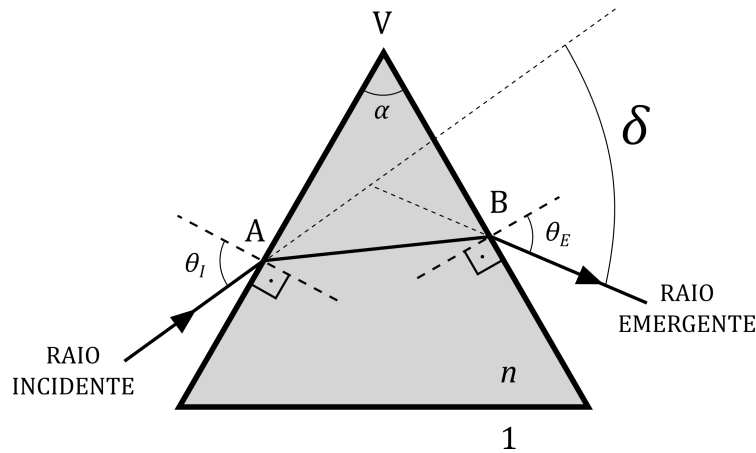
$$n_1 \sen \theta_1 = n_2 \sen \theta_2, \quad (2)$$

onde  $n_1$  e  $n_2$  são os índices de refração dos meios 1 e 2;  $\theta_1$  e  $\theta_2$  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 ótico transparente que refrata a luz. Ele possui duas faces polidas, não paralelas, formando um vértice com ângulo interno  $\alpha$  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  $\delta$  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  $\delta$  com relação ao raio incidente.

O desvio  $\delta$  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,  $\alpha$ , e do ângulo de incidência do feixe,  $\theta_I$ , 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  $\alpha$ . Neste caso, o único parâmetro livre capaz de influenciar no desvio  $\delta$  do raio luminoso é o seu ângulo de incidência  $\theta_I$  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  $\delta$  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).

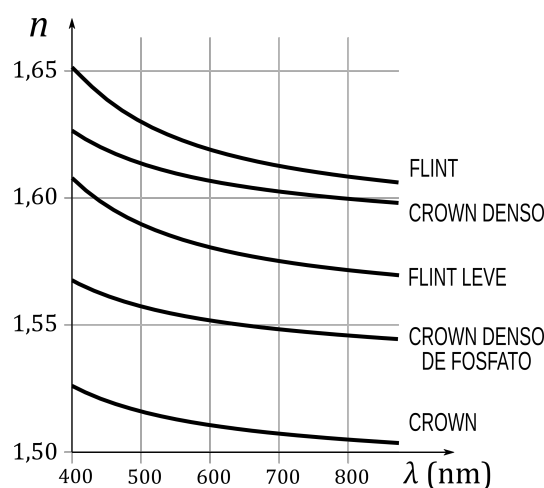
Mais detalhes e as demonstrações dos resultados acima podem ser encontrados no Anexo deste experimento, disponível no site da disciplina. A informação básica necessária para o entendimento e realização do experimento é a seguinte:

Medindo-se o ângulo do desvio mínimo  $D$  e conhecendo-se previamente o ângulo  $\alpha$  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  $\lambda$  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  $\lambda$  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*<sup>2</sup> apresentam uma inclinação ligeiramente mais forte no início do gráfico do que os vidros do tipo *Crown*<sup>3</sup>. Constata-se, portanto,

<sup>2</sup> 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.

<sup>3</sup> 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.

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  $\lambda$  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  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ , 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*<sup>4</sup>, assim definido:

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

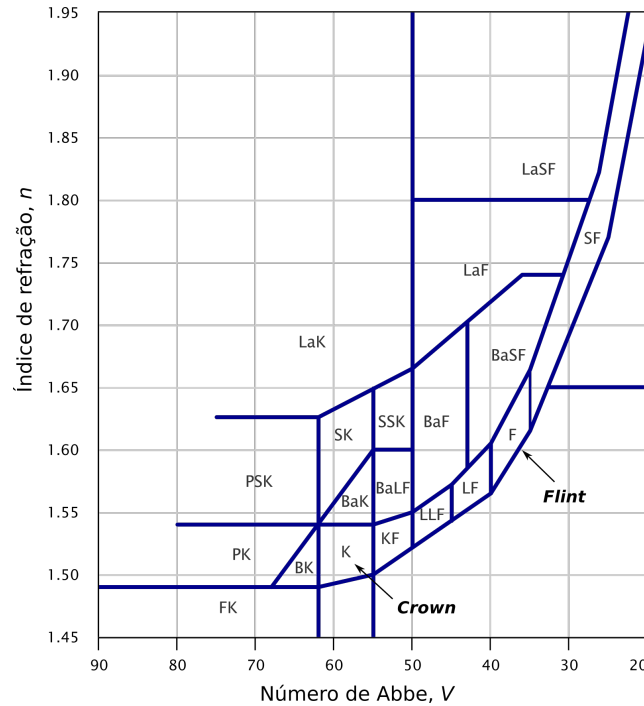
onde  $n_F$ ,  $n_D$  e  $n_C$  são os índices de refração para as cores violeta, amarela e vermelha, especificamente nos comprimentos de onda das linhas conhecidas por F (4861 Å), D (5893 Å) e C (6563 Å), nomeadas por Fraunhofer (ver Tabela 2). O fabricante do vidro Flint que é utilizado no laboratório 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 de mercúrio (Hg). Na Tabela 2, é fornecido o espectro de Hg, com uma indicação

<sup>4</sup> Ernst Abbe foi um físico e engenheiro alemão (1840-1905).



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

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	$\lambda$ (Å)	Linha	Elemento	$\lambda$ (Å)
vermelha	fraca	6234	Z	O <sub>2</sub>	8227
amarela I	muito forte	5791	A	O <sub>2</sub>	7594
amarela II	muito forte	5770	B	O <sub>2</sub>	6867
verde	forte	5461	C	H $\alpha$	6563
azul-verde I	fraca	4960	D	Na	5893
azul-verde II	média	4916	e	Hg	5461
azul	forte	4358	F	H $\beta$	4861
violeta I	média	4078	G	Fe/Ca	4308
violeta II	forte	4047	H	Ca <sup>+</sup>	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.

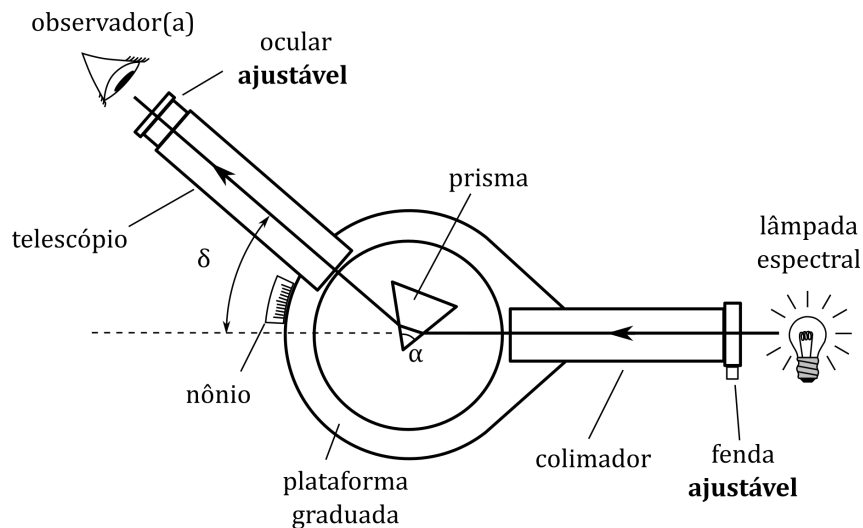
## **4 Referências Bibliográficas**

- Halliday, Resnick & Walker, *Fundamentos de Física*, Vol. 4, Ed. LTC
- Moysés Nussenzveig, *Curso de Física Básica*, Vol. 4, Ed. Blucher
- Piacentini, Grandi, Hofmann, de Lima & Zimmerman, *Introdução ao Laboratório de Física*, Ed. da UFSC.
- Helene & Vanin, *Tratamento estatístico de dados em física experimental*, Ed. Blucher

## 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  $\delta$  é o ângulo de desvio da luz e  $\alpha$  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  $\delta$  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  $\delta$  da linha verde (a Figura 5 mostra como é definido o ângulo  $\delta$ ).
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  $\lambda$ , 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	$\lambda$ (Å)	$\frac{1}{\lambda^2}$ ( $10^{-8}$ Å <sup>-2</sup> )	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)					