

Capítulo

13

Refração luminosa

A refração da luz é o fenômeno que ocorre quando a luz passa de um meio para outro, sofrendo variação em sua velocidade de propagação.

▶ 13.1 Considerações preliminares

A refração da luz dá origem a um grande número de fenômenos que observamos em nosso dia a dia. A ocorrência das miragens e do arco-íris e o funcionamento das lentes são explicados pela refração.

▶ 13.2 Leis da refração

Quando a refração ocorre com desvio, no meio mais refringente o raio de luz está mais próximo da normal.

▶ 13.3 Dioptro plano

Vista de fora, uma piscina parece mais rasa do que realmente é. Isso é uma consequência da refração da luz ao passar da água para o ar.

▶ 13.4 Lâmina de faces paralelas

Para a incidência oblíqua, ao atravessar uma lâmina de faces paralelas, imersa num único meio, um raio de luz sofre apenas desvio lateral.

▶ 13.5 Prisma

Os prismas de reflexão total são utilizados, nos instrumentos ópticos, para substituir os espelhos planos.

▶ 13.6 Refração da luz na atmosfera

A atmosfera terrestre não é um meio homogêneo. Daí decorrem fenômenos como a elevação aparente dos astros e as miragens.

Há uma série de fenômenos observáveis na atmosfera terrestre decorrentes da refração e da reflexão total da luz. Esses fenômenos são determinados pela diferença entre o índice de refração das diferentes regiões da atmosfera, que não é um meio homogêneo. Um desses fenômenos é a formação de miragens nos desertos.



Considerações preliminares

Objetivos

- ▶ Compreender o fenômeno da refração da luz.
- ▶ Definir índice de refração absoluto e refringência dos meios.
- ▶ Perceber que o índice de refração absoluto de um meio depende do tipo de luz monocromática que nele se propaga.

Termos e conceitos

- luz monocromática
- grandeza adimensional
- continuidade óptica

Uma moeda colocada num copo vazio fora da linha de visão do observador (fig. 1A) pode tornar-se visível ao se colocar água dentro do recipiente (fig. 1B). Um canudo parcialmente mergulhado num líquido transparente parece estar quebrado (fig. 2).

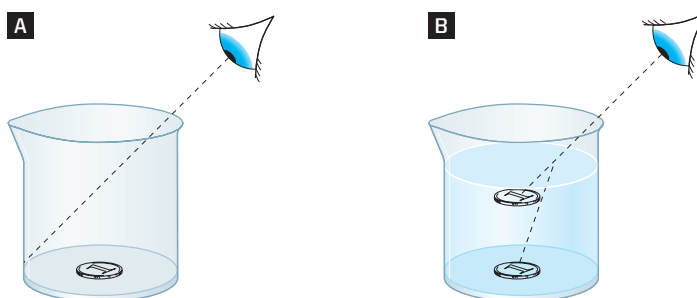


Figura 1. Ao se colocar água no recipiente, a moeda torna-se visível para o observador.

Esses fatos e muitos outros são explicados pela **refração da luz**, fenômeno que ocorre quando a luz passa de um meio de propagação para outro, sofrendo variação em sua velocidade de propagação.

Vimos que a luz, propagando-se num meio ① e incidindo sobre a superfície S de separação com um meio ②, apresenta simultaneamente os fenômenos de reflexão, refração e absorção. Para que a refração seja o fenômeno predominante, o meio ② deve ser transparente, como, por exemplo, a água (fig. 3).

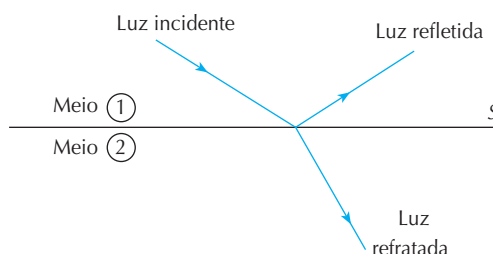
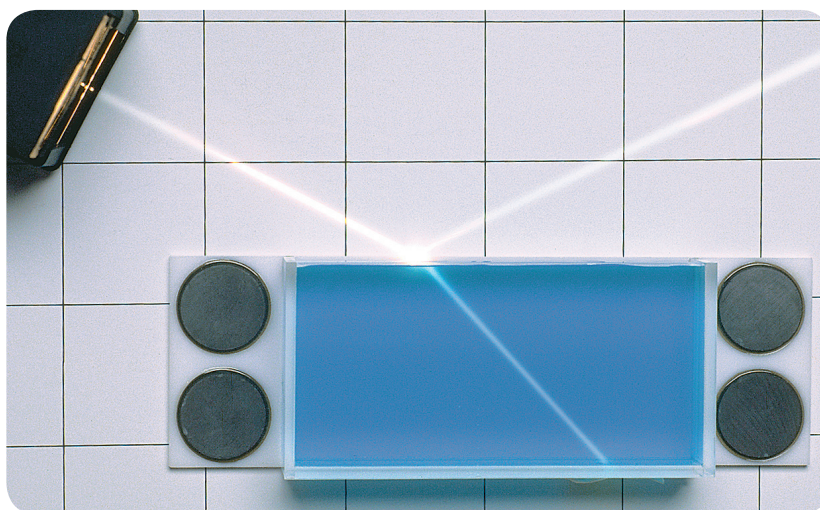


Figura 3. Na superfície da água, a luz é parcialmente refletida, refratada e absorvida.



Figura 2. O canudo colocado obliquamente em relação à superfície do líquido parece estar quebrado.



Na reflexão, a luz não altera o seu meio de propagação; já na refração, passa a se propagar em outro meio, mudando sua velocidade.

Se a incidência for oblíqua, a refração é acompanhada de mudança de direção (fig. 4A). Por outro lado, se a incidência for perpendicular (fig. 4B), a refração ocorre sem desvio.

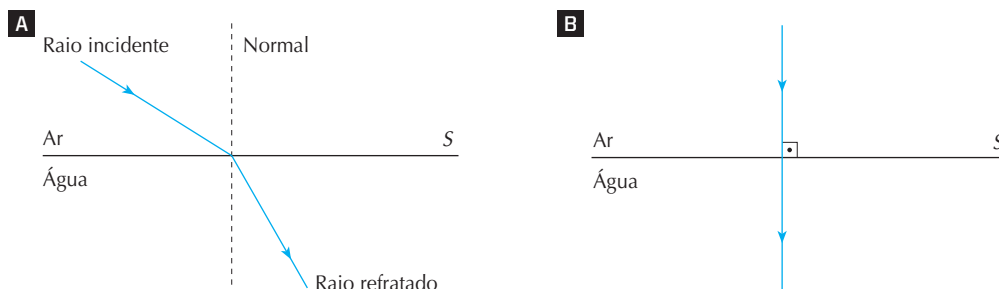
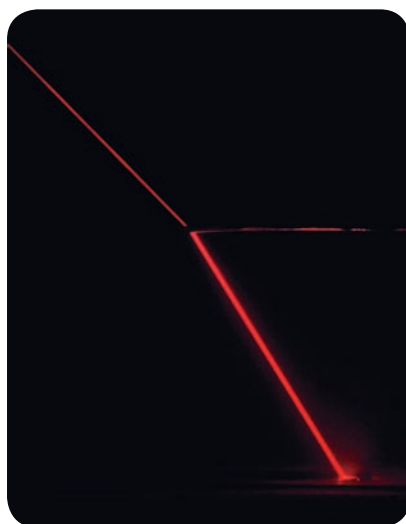


Figura 4. Na incidência oblíqua (A), há mudança de direção; na incidência normal (B), não ocorre mudança de direção, ou seja, a refração ocorre sem desvio.

Podemos, então, dizer que:

A refração da luz pode ser entendida como a variação de velocidade sofrida pela luz ao passar de um meio de propagação para outro.



Incidência oblíqua: ocorre mudança na direção de propagação da luz.



Incidência normal: a refração ocorre sem desvio.

Reprodução proibida. Art.184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

Índice de refração. Refringência

Opticamente, um meio transparente e homogêneo é caracterizado pelo seu índice de refração absoluto.

O **índice de refração absoluto** n de um meio, para determinada luz monocromática, é a razão entre a velocidade da luz no vácuo (c) e a velocidade da luz no meio em questão (v):

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

O índice de refração n é adimensional e maior do que a unidade, para qualquer meio material, pois:

$$c > v \Rightarrow n > 1$$

Note que o índice de refração corresponde a uma comparação entre a velocidade da luz no meio (v) e a velocidade da luz no vácuo (c). Assim, n indica quantas vezes a velocidade da luz no vácuo é maior que a velocidade no meio considerado.



Para o vácuo, o índice de refração é unitário, pois:

$$v = c \Rightarrow n = 1$$

Para o ar o índice de refração é praticamente igual a 1, pois a velocidade de propagação da luz no ar é aproximadamente igual ao valor da velocidade de propagação da luz no vácuo.

O índice de refração de um meio material depende do tipo de luz que se propaga, apresentando **valor máximo para a luz violeta** e **mínimo para a luz vermelha**. Salvo consideração em contrário, admitiremos sempre a propagação da luz monocromática amarela de sódio.

Para indicar entre dois meios aquele que tem maior ou menor índice de refração, é comum usarmos o termo **refringência**. Assim, o meio que possui **maior índice de refração** é o que apresenta **maior refringência** (mais refringente).

Quando dois meios apresentam a **mesma refringência**, ou seja, o mesmo índice de refração, um é invisível em relação ao outro. Dizemos que entre esses meios existe **continuidade óptica**.



▲ No frasco da esquerda, a parte do bastão de vidro imersa na água é visível. Já no da direita, a parte do bastão de vidro imersa no tetracloretileno (C_2Cl_4) é invisível. Esse fenômeno ocorre porque os índices de refração do vidro que constitui o bastão e do tetracloretileno são iguais. Os dois meios se comportam, do ponto de vista óptico, como se fossem um só, isto é, entre esses meios existe continuidade óptica.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

R. 85 A velocidade de propagação da luz em certo meio é $\frac{2}{3}$ da velocidade de propagação da luz no vácuo. Qual é o índice de refração absoluto desse meio?

Solução:

Sendo $v = \frac{2}{3} \cdot c$, resulta:

$$n = \frac{c}{v} \Rightarrow n = \frac{c}{\left(\frac{2}{3} \cdot c\right)} \Rightarrow n = \frac{3}{2} \Rightarrow n = 1,5$$

Resposta: 1,5

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 285 A luz amarela de sódio propaga-se no vidro com a velocidade de $2 \cdot 10^8$ m/s. Sendo a velocidade da luz no vácuo igual a $3 \cdot 10^8$ m/s, determine o índice de refração do vidro para a luz amarela de sódio.

P. 286 O índice de refração absoluto de um meio é $n = 2$. Qual é a velocidade de propagação da luz nesse meio, sabendo-se que sua velocidade de propagação no vácuo é $c = 3 \cdot 10^8$ m/s?

P. 287 (UFBA) A luz reduz sua velocidade em 25% ao penetrar numa placa de vidro. Sabendo-se que a velocidade da luz no vácuo é de 300.000 km/s, determine o índice de refração do vidro e a velocidade da luz nesse meio.

Leis da refração

Objetivos

- ▶ Enunciar a primeira lei da refração.
- ▶ Enunciar a lei de Snell-Descartes.
- ▶ Compreender o fenômeno da reflexão total.

Termos e conceitos

- ângulo de incidência
- ângulo de refração
- índice de refração relativo
- ângulo limite

Considere uma luz monocromática se propagando de um meio ① para outro mais refringente ② (fig. 5). Seja I o raio incidente que forma, com a normal à superfície S no ponto de incidência O , o ângulo i , que chamaremos **ângulo de incidência**. Após a refração, origina-se o raio refratado R , que forma com a normal o ângulo r , denominado **ângulo de refração**.

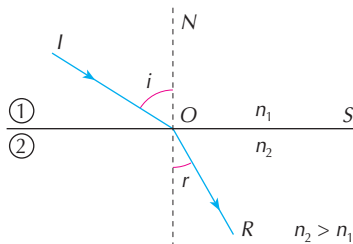


Figura 5. O raio de luz se aproxima da normal ao passar do meio menos refringente para o mais refringente.

A refração luminosa é regida por duas leis:

1ª lei:

O raio incidente I , o raio refratado R e a normal N à superfície de separação S pertencem ao mesmo plano.

2ª lei ou lei de Snell*-Descartes**:

Para cada par de meios e para cada luz monocromática que se refrata, é constante o produto do seno do ângulo que o raio forma com a normal e o índice de refração do meio em que o raio se encontra.

No caso considerado na figura 5, sendo n_1 o índice de refração do meio ① e n_2 o índice de refração do meio ②, podemos escrever:

$$n_1 \cdot \sen i = n_2 \cdot \sen r$$

Desse modo, se $n_2 > n_1$, então $\sen r < \sen i$; logo, $r < i$ (fig. 5). Assim, para incidência oblíqua da luz, temos:

Quando a luz passa de um meio menos refringente para um meio mais refringente, o raio luminoso se aproxima da normal.

* **SNELL**, Wilebrord (1580-1626), matemático e astrônomo holandês. Professor de Matemática em Leyden, descobriu a lei da refração, que leva seu nome, em 1621.

** **DESCARTES**, René (1596-1650), filósofo, matemático e físico francês. É o criador da Geometria Analítica, tendo estabelecido os princípios da Óptica Geométrica.

Invertendo-se o sentido de propagação da luz na **figura 5**, podemos concluir, para incidência oblíqua, que:

Quando a luz passa de um meio mais refringente para um meio menos refringente, o raio luminoso se afasta da normal.

A lei de Snell-Descartes pode também ser escrita na forma:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

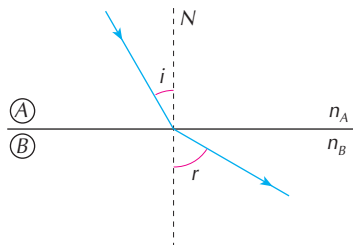
Nessa fórmula, n_{21} é o **índice de refração relativo** do meio ② em relação ao meio ①.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 86 Um raio luminoso, ao passar de um meio A para um meio B, forma com a normal à superfície de separação ângulos respectivamente iguais a 30° e 60° . O meio B é o ar, cujo índice de refração absoluto é 1,0 e no qual a luz se propaga com velocidade de $3,0 \cdot 10^8$ m/s. Determine o índice de refração do meio A e a velocidade da luz nesse meio.

(Dados: $\text{sen } 30^\circ = \frac{1}{2}$; $\text{sen } 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}$)

Solução:



Os ângulos de incidência e de refração valem, respectivamente:

$$i = 30^\circ \text{ e } r = 60^\circ$$

Aplicando a lei de Snell-Descartes (sendo $n_B = 1,0$;

$$\text{sen } i = \text{sen } 30^\circ = \frac{1}{2}; \text{sen } r = \text{sen } 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2},$$

obtemos:

$$n_A \cdot \text{sen } i = n_B \cdot \text{sen } r \Rightarrow$$

$$\Rightarrow n_A \cdot \frac{1}{2} = 1,0 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \Rightarrow \boxed{n_A = \sqrt{3}}$$

A relação entre os índices de refração dos meios A e B é igual à relação inversa entre as respectivas velocidades de propagação da luz. Temos:

$$n_A = \frac{c}{v_A} \text{ ①}$$

$$n_B = \frac{c}{v_B} \text{ ②}$$

Dividindo a expressão ① pela expressão ②, obtemos:

$$\frac{n_A}{n_B} = \frac{\left(\frac{c}{v_A}\right)}{\left(\frac{c}{v_B}\right)} \Rightarrow \frac{n_A}{n_B} = \frac{v_B}{v_A} \Rightarrow v_A = v_B \cdot \frac{n_B}{n_A}$$

Como $v_B = 3,0 \cdot 10^8$ m/s, $n_B = 1,0$ e $n_A = \sqrt{3}$, vem:

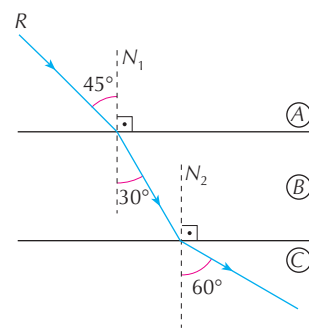
$$v_A = 3,0 \cdot 10^8 \cdot \frac{1,0}{\sqrt{3}} \Rightarrow v_A = 3,0 \cdot 10^8 \cdot \frac{\sqrt{3}}{3} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{v_A = \sqrt{3} \cdot 10^8 \text{ m/s}}$$

Resposta: $n_A = \sqrt{3}$; $v_A = \sqrt{3} \cdot 10^8$ m/s

R. 87 Um raio de luz monocromática atravessa três meios homogêneos e transparentes A, B e C, conforme indica a figura.

- Qual dos meios é o mais refringente?
- Em qual dos meios é maior a velocidade de propagação da luz?



Solução:

- No meio B o raio de luz está mais próximo da normal, sendo, portanto, o meio mais refringente.
- O meio C é o menos refringente, pois nele o raio de luz está mais afastado da normal. No meio menos refringente, a velocidade de propagação da luz é maior.

Respostas: a) meio B; b) meio C

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 288 Um raio luminoso que se propaga no ar atinge a superfície livre de um líquido em repouso segundo um ângulo de incidência de 60° . Sabendo-se que o ângulo de refração correspondente vale 30° , determine o índice de refração desse líquido. O índice de refração do ar vale 1.

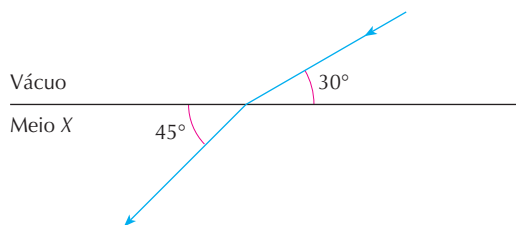
$$\left(\text{Dados: } \sin 30^\circ = \frac{1}{2}; \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

P. 289 Quando a luz se propaga do vácuo ($n = 1$) para um líquido, o ângulo de incidência vale 45° e o de refração, 30° . Determine o índice de refração absoluto do líquido e a velocidade com que a luz se propaga nele.

$$\left(\text{Dados: } \sin 30^\circ = \frac{1}{2}; \sin 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2}; \right)$$

$$\text{velocidade da luz no vácuo } c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

P. 290 Um raio luminoso forma ângulos iguais a 30° e 45° com a superfície que separa o vácuo ($n = 1$) e o meio X, como mostra a figura.

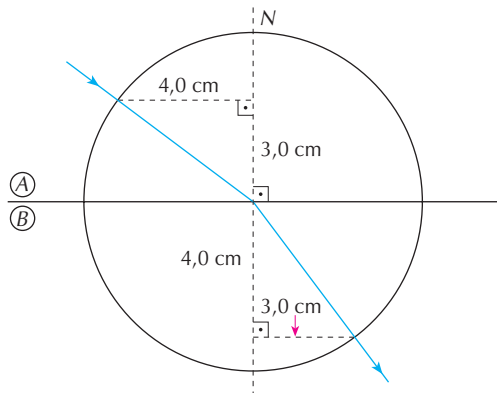


Determine o índice de refração do meio X e a velocidade da luz nesse meio.

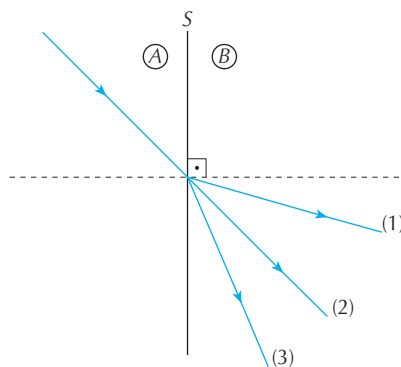
$$\left(\text{Dados: } \sin 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2}; \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}; \sin 30^\circ = \frac{1}{2}; \right)$$

$$\text{velocidade da luz no vácuo } c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

P. 291 A figura representa um raio de luz monocromática refratando-se do meio A para o meio B. Determine o índice de refração do meio B em relação ao meio A.



P. 292 Um raio de luz monocromática, propagando-se num meio A, incide numa superfície de separação S e passa a se propagar num meio B, mais refringente do que A. Dos raios apresentados, qual representa melhor o raio refratado correspondente ao raio incidente?



P. 293 (Fuvest-SP) As figuras a e b indicam os raios de luz incidente i e refratado r na interface entre o meio ① e os meios ② e ③, respectivamente.

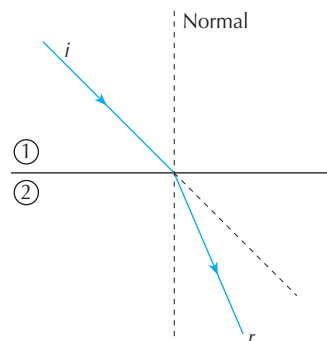


Figura a.

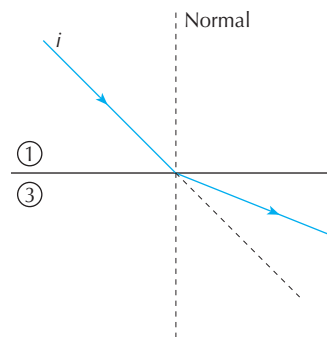


Figura b.

- Represente graficamente a refração de um raio de luz que passa do meio ② para o meio ③.
- Um desses três meios é o vácuo. Qual deles? Justifique.

Entre na rede No endereço eletrônico <http://www.glenbrook.k12.il.us/gbssci/phys/mmedia/optics/bp.html> (acesso em agosto/2009) você encontra animações e textos a respeito da formação da imagem de um lápis disposto perpendicularmente à superfície de água em um copo.

Ângulo limite. Reflexão total

Quando uma luz monocromática se propaga do meio menos refringente para o meio mais refringente, não existe nenhuma restrição à ocorrência da refração.

Considere dois meios A e B separados pela superfície S (fig. 6) tais que $n_A < n_B$. Quando a luz incide normalmente (fig. 6A), propagando-se do meio A para o meio B , não ocorre desvio do raio luminoso. Ao incidir obliquamente no mesmo sentido (fig. 6B), o raio luminoso se aproxima da normal ($r < i$). Aumentando-se o ângulo de incidência, verifica-se que, à medida que o ângulo de incidência i tende para 90° (incidência rasante), o ângulo de refração r tende para um valor máximo L , denominado ângulo limite (fig. 6C).

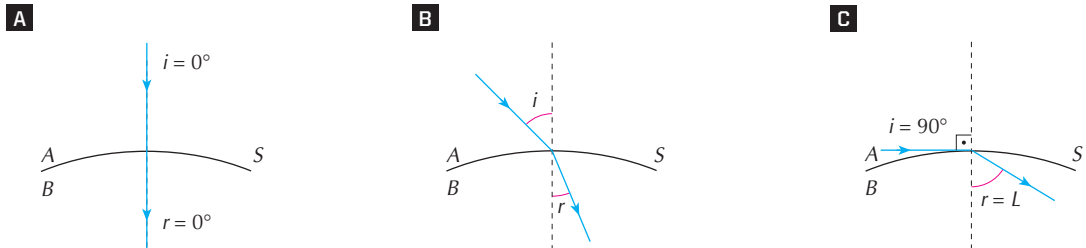


Figura 6. Comportamento da luz ao passar de um meio menos refringente para um meio mais refringente.

Aplicando a lei de Snell-Descartes a este último caso de refração, obtemos:

$$n_A \cdot \sin i = n_B \cdot \sin r \Rightarrow n_A \cdot \sin 90^\circ = n_B \cdot \sin L$$

Como $\sin 90^\circ = 1$, vem: $\sin L = \frac{n_A}{n_B}$ (em que $n_A < n_B$)

Para quaisquer dos meios, podemos escrever: $\sin L = \frac{n_{\text{menor}}}{n_{\text{maior}}}$

Assim, o seno do ângulo limite L é dado pela relação entre os índices de refração dos meios entre os quais a luz se propaga. O valor do ângulo limite depende, portanto, da cor da luz que se propaga e dos meios de propagação.

Quando uma luz monocromática se propaga do meio mais refringente para o meio menos refringente, nem todo raio luminoso sofre refração.

Considere os mesmos dois meios A e B da figura 6 ($n_A < n_B$), mas agora com a luz propagando-se do meio B para o meio A . Na incidência normal (fig. 7A), não há desvio. Na incidência oblíqua (fig. 7B), o raio luminoso se afasta da normal ($r > i$). Se aumentarmos gradativamente o ângulo de incidência i , a última refração vai ocorrer quando o ângulo i for igual ao ângulo limite L (fig. 7C), sendo o ângulo de refração r igual a 90° (emergência rasante). Assim, se $i = L$, então $r = 90^\circ$.

Ainda nesse sentido de propagação, ou seja, do meio mais refringente para o menos refringente, o ângulo de incidência i pode ser maior que o ângulo limite L . Quando isso ocorre, não há refração e a luz sofre o fenômeno da **reflexão total** ou **reflexão interna** (fig. 7D).

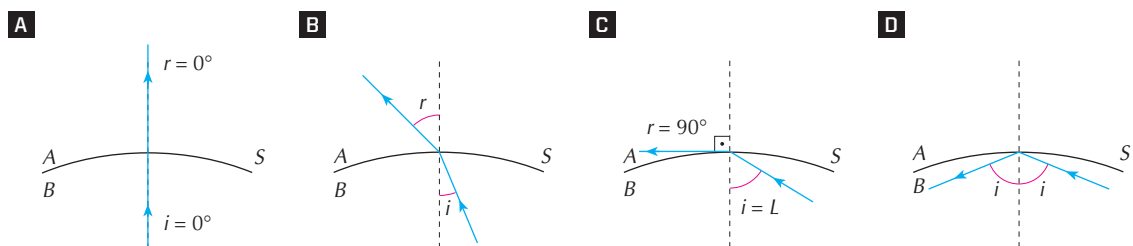


Figura 7. Comportamento da luz ao passar de um meio mais refringente para um meio menos refringente. Para $i > L$, ocorre reflexão total ou interna.

Assim, para haver reflexão total, há duas condições:

1ª condição: Sentido de propagação da luz: do meio mais refringente para o menos refringente.

2ª condição: Ângulo de incidência maior que o ângulo limite ($i > L$).

Ao ocorrer reflexão total ou interna, nenhuma parcela de luz se refrata. Portanto, esse fenômeno é diferente da reflexão externa, que sempre é acompanhada de refração.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 88 O ângulo limite para uma luz monocromática que se propaga de um líquido para o ar vale 60° .

Determine o índice de refração do líquido (dados: $n_{\text{ar}} = 1$; $\text{sen } 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}$).

Solução:

Chamando de $n_{\text{liq.}}$ o índice de refração do líquido e sendo $n_{\text{liq.}} > n_{\text{ar}}$, vem:

$$\text{sen } L = \frac{n_{\text{menor}}}{n_{\text{maior}}} \Rightarrow \text{sen } L = \frac{n_{\text{ar}}}{n_{\text{liq.}}} \Rightarrow \text{sen } 60^\circ = \frac{1}{n_{\text{liq.}}} \Rightarrow \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{1}{n_{\text{liq.}}} \Rightarrow n_{\text{liq.}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \Rightarrow n_{\text{liq.}} = \frac{2\sqrt{3}}{3}$$

Resposta: $\frac{2\sqrt{3}}{3}$

R. 89 Um raio de luz monocromática se propaga num meio de índice de refração igual a 2 e atinge a superfície que separa esse meio do ar segundo um ângulo de incidência i . Sendo o índice de refração do ar igual a 1, determine:

- o ângulo limite desse par de meios para a luz monocromática dada;
- para quais ângulos de incidência i ocorre reflexão total.

Solução:

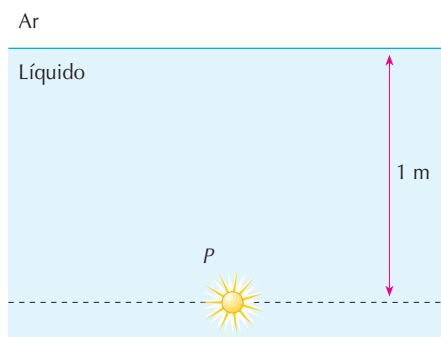
a) De $\text{sen } L = \frac{n_{\text{menor}}}{n_{\text{maior}}}$, vem: $\text{sen } L = \frac{1}{2} \Rightarrow L = 30^\circ$

b) Para haver reflexão total devemos ter $i > L$, ou seja: $i > 30^\circ$

Respostas: a) $L = 30^\circ$; b) $i > 30^\circ$

R. 90 A uma profundidade de 1 m, no interior de um líquido de índice de refração $\sqrt{2}$, encontra-se uma fonte luminosa pontual P , como mostra a figura. Determine o diâmetro mínimo que deve ter um disco opaco para que, convenientemente colocado na superfície que separa o líquido do ar, não permita a emergência de nenhuma luz para o ar

(dados: $n_{\text{ar}} = 1$; $\text{sen } 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2}$; $\text{tg } 45^\circ = 1$).



Conteúdo digital Moderna PLUS <http://www.modernaplus.com.br>
Atividade experimental: *Determinação do ângulo limite*
A Física em nosso Mundo: *As fibras ópticas*



Solução:

Apenas um feixe cônico de abertura $2L$ (sendo L o ângulo limite) chega a emergir no ar. A luz, portanto, sai pela superfície através de uma região circular, em cujas bordas os raios incidem pelo ângulo limite. Os raios não pertencentes a esse feixe cônico incidem por ângulos maiores que o limite e sofrem reflexão total.

Se na região circular pela qual a luz emerge for colocado um disco opaco de mesmo diâmetro, nenhuma luz poderá passar do líquido para o ar.

Na figura ao lado, temos no triângulo destacado:

$$\operatorname{tg} L = \frac{R}{H} \quad \textcircled{1}$$

$$\text{Mas: } \operatorname{sen} L = \frac{n_{\text{menor}}}{n_{\text{maior}}} \Rightarrow \operatorname{sen} L = \frac{n_1}{n_2}$$

Como $n_1 = 1$ e $n_2 = \sqrt{2}$, vem:

$$\operatorname{sen} L = \frac{1}{\sqrt{2}} \Rightarrow \operatorname{sen} L = \frac{\sqrt{2}}{2} \Rightarrow L = 45^\circ$$

Retomando a expressão $\textcircled{1}$, temos:

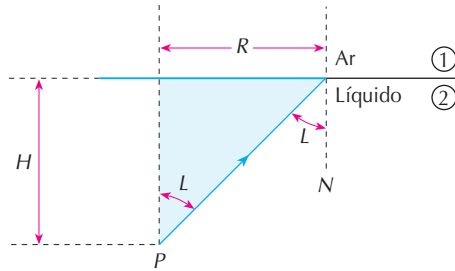
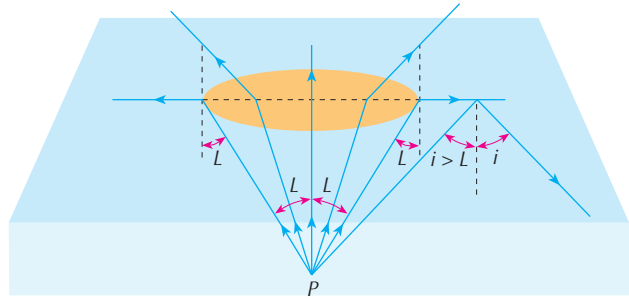
$$\operatorname{tg} L = \frac{R}{H} \Rightarrow \frac{R}{H} = 1 \Rightarrow \boxed{R = H}$$

Como $H = 1$ m, temos: $R = 1$ m

O diâmetro vale:

$$D = 2R \Rightarrow D = 2 \cdot 1 \text{ m} \Rightarrow \boxed{D = 2 \text{ m}}$$

Resposta: 2 m

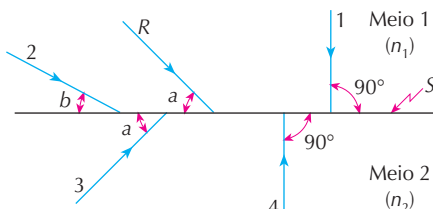


EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 294 O ângulo limite para determinado par de meios é 45° . Determine o índice de refração relativo entre eles (dado: $\operatorname{sen} 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2}$).

P. 295 Um raio de luz monocromática se propaga num líquido de índice de refração igual a $\sqrt{2}$ e atinge a superfície que separa o líquido do ar segundo um ângulo de incidência i . O índice de refração do ar é igual a 1. Verifique se há refração ou reflexão total nos casos:
 a) $i = 30^\circ$ b) $i = 60^\circ$

P. 296 (Vunesp) A figura mostra a superfície S de separação entre dois meios transparentes, 1 e 2, cujos índices absolutos de refração são n_1 e n_2 , respectivamente. Mostra, também, cinco raios luminosos incidindo nessa superfície sob diferentes ângulos, tais que $b < a < 90^\circ$.



Sabendo-se que o raio luminoso R sofre reflexão total ao incidir nessa superfície, responda:

- Qual dos raios numerados de 1 a 4 também sofrerá reflexão total?
- n_1 é igual, menor ou maior que n_2 ? Justifique sua resposta.

P. 297 A uma profundidade de 40 cm, dentro de um líquido colocado num tanque exposto ao ar, há uma fonte pontual. Quer-se colocar junto à superfície do líquido um disco opaco capaz de impedir a emergência de qualquer luz para o ar. Sendo o índice de refração do líquido igual a $\sqrt{2}$, determine o diâmetro mínimo que deve ter o disco.

P. 298 (PUC-SP) No fundo de uma camada de água de espessura uniforme h e de grande extensão existe uma pequena mancha, de dimensões desprezíveis. Um disco opaco de raio r é colocado sobre a água, de tal forma que seu centro esteja situado na vertical que passa pela mancha. Para que esse disco impeça a visão da mancha, de qualquer ponto fora da água, qual deve ser seu raio mínimo?

$$\left(\text{Dados: } n_{\text{ar}} = 1; n_{\text{água}} = \frac{4}{3} \right)$$

Dioptro plano

Objetivos

- ▶ Compreender o que é um dioptro plano.
- ▶ Analisar a formação de imagens num dioptro plano.

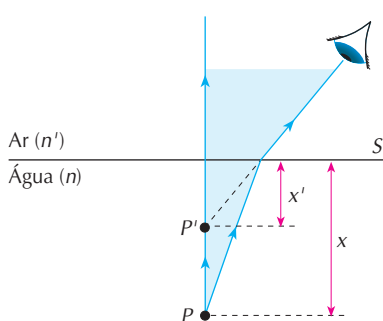
Termos e conceitos

- meio de incidência
- meio de emergência

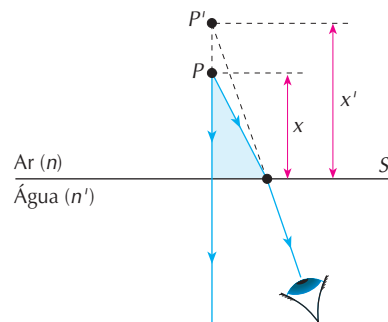
Dioptro plano é o conjunto de dois meios homogêneos e transparentes separados por uma superfície plana S . Por exemplo, a água tranquila de um lago e o ar, separados pela superfície livre do líquido, constituem um dioptro plano (fig. 8).

Considere, no dioptro ar-água, um ponto-objeto real P dentro da água. Na **figura 8**, representamos um feixe luminoso que, saindo do ponto P , chega ao olho de um observador. Note que o raio perpendicular não se desvia e que os raios oblíquos, ao se refratarem, afastam-se da normal, determinando a imagem virtual P' , mais próxima da superfície que o ponto-objeto P . Assim, ao observar um peixe dentro d'água, o que na verdade você vê é a imagem do peixe acima da sua posição real.

Considere agora, ainda no dioptro ar-água, um ponto-objeto real P situado no ar sendo observado por uma pessoa dentro da água. A **figura 9** representa um feixe luminoso que parte do ponto P e chega ao olho do observador. O raio perpendicular não se desvia; já os raios oblíquos, ao se refratarem, aproximam-se da normal, definindo a imagem virtual P' , mais afastada da superfície que o ponto-objeto P . Portanto, se você estiver imerso nas águas de uma piscina observando uma ave que a sobrevoa, verá a imagem da ave acima de sua posição real.



▶ **Figura 8.** Objeto real na água tem imagem mais próxima da superfície.



▶ **Figura 9.** Objeto real no ar tem imagem mais afastada da superfície.



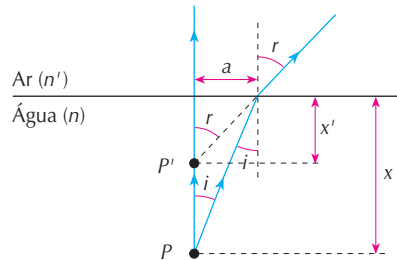
▶ Devido à refração da luz, as pernas do menino e os azulejos verticais imersos na água parecem ser mais curtos.

Quando os raios que determinam a formação da imagem formam ângulos pequenos com a normal à superfície S (até cerca de 10°), verifica-se que a relação entre as distâncias de objeto e imagem à superfície S de separação (x e x') é igual à relação entre os índices de refração (n e n') dos dois meios:

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

Nessa fórmula, n é o índice de refração do **meio de incidência** e n' é o índice de refração do **meio de emergência**.

Demonstração da equação do dioptro plano



Aplicando a lei de Snell-Descartes, temos: $n \cdot \text{sen } i = n' \cdot \text{sen } r$ ①

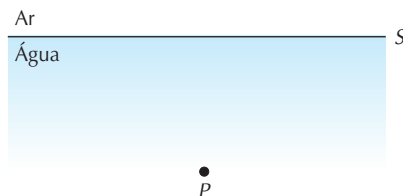
Sendo os ângulos pequenos, vem: $\text{sen } i \approx \text{tg } i = \frac{a}{x}$ ② e $\text{sen } r \approx \text{tg } r = \frac{a}{x'}$ ③

Substituindo-se ② e ③ em ①, obtemos:

$$n \cdot \frac{a}{x} = n' \cdot \frac{a}{x'} \Rightarrow \frac{x}{x'} = \frac{n}{n'}$$

EXERCÍCIO RESOLVIDO

R. 91 Na figura abaixo, O é um olho de uma pessoa a 48 cm da superfície S e P é um peixe localizado a 16 cm da mesma superfície.



Considerando raios pouco inclinados em relação à vertical, determine:

- a posição em que a pessoa vê o peixe;
- a posição em que o peixe vê a pessoa.

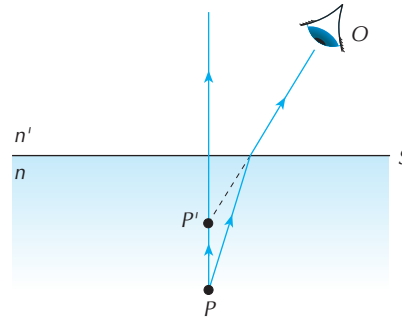
(Dados: $n_{\text{ar}} = 1$; $n_{\text{água}} = \frac{4}{3}$)



Solução:

- a) O peixe é o objeto e, portanto, a água é o meio de incidência (n) e o ar é o meio de emergência (n'): $n = \frac{4}{3}$ e $n' = 1$. Sendo a posição do objeto $x = 16$ cm, temos:

$$\frac{x}{x'} = \frac{n}{n'} \Rightarrow \frac{16}{x'} = \frac{\frac{4}{3}}{1} \Rightarrow x' = \frac{16 \cdot 3}{4} \Rightarrow x' = 12 \text{ cm}$$

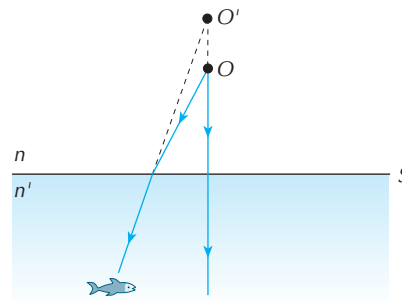


- b) A pessoa é o objeto. Assim, o ar é o meio de incidência (n) e a água é o meio de emergência (n'), portanto:

$$n = 1 \text{ e } n' = \frac{4}{3}$$

Como a posição do objeto O é $x = 48$ cm, temos:

$$\frac{x}{x'} = \frac{n}{n'} \Rightarrow \frac{48}{x'} = \frac{1}{\frac{4}{3}} \Rightarrow x' = \frac{48 \cdot 4}{3} \Rightarrow x' = 64 \text{ cm}$$



Respostas: a) imagem do peixe a 12 cm da superfície S; b) imagem da pessoa a 64 cm da superfície S.

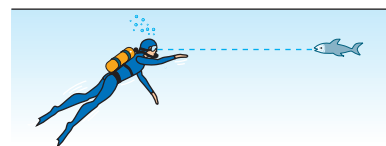
EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 299 Uma pessoa vê um peixe num aquário, numa direção quase vertical. Estando o peixe a 24 cm da superfície livre da água e sendo $\frac{4}{3}$ o índice de refração da água, determine a posição aparente em que a pessoa, no ar, vê o peixe.

P. 300 (UFBA) De pé sobre uma canoa, um pescador vê um peixe a aproximadamente 30 cm da superfície imóvel do lago, através de um feixe luminoso perpendicular a essa superfície. Considerando-se que o índice de refração da água é $\frac{4}{3}$ e o do ar é 1, calcule, em cm, a que profundidade exata se encontra o peixe em relação à superfície do lago.

P. 301 A que distância da superfície de uma piscina uma pessoa dentro da água vê um avião que voa a 1.500 m de altura? (Dados: $n_{\text{ar}} = 1$; $n_{\text{água}} = \frac{4}{3}$)

P. 302 (UFRJ) Temos dificuldade em enxergar com nitidez debaixo da água porque os índices de refração da córnea e das demais estruturas do olho são muito próximos do índice de refração da água ($n_{\text{água}} = \frac{4}{3}$). Por isso usamos máscaras de mergulho, o que interpõe uma pequena camada de ar ($n_{\text{ar}} = 1$) entre a água e o olho. Um peixe está a uma distância de 2,0 m de um mergulhador. Suponha o vidro da máscara plano e de espessura desprezível. Calcule a que distância o mergulhador vê a imagem do peixe.



Lâmina de faces paralelas

Objetivos

- ▶ Compreender o que é uma lâmina de faces paralelas.
- ▶ Analisar o comportamento da luz ao atravessar uma lâmina de faces paralelas.
- ▶ Obter o desvio lateral sofrido pela luz ao atravessar uma lâmina de faces paralelas.

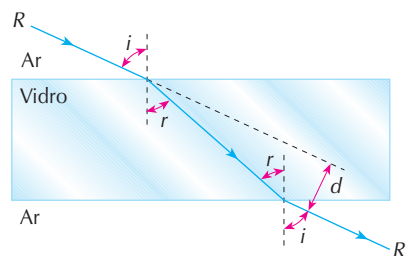
Termos e conceitos

- desvio angular
- desvio lateral

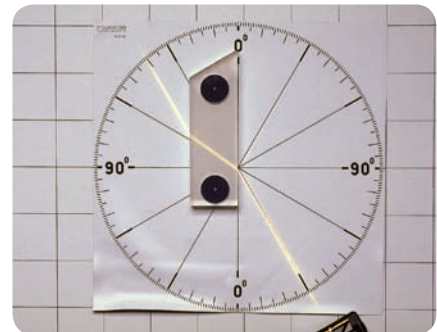
Lâmina de faces paralelas é o conjunto de três meios homogêneos e transparentes separados por duas superfícies planas e paralelas. O vidro de uma vidraça é um exemplo desse sistema.

Considere uma lâmina de vidro colocada no ar. Os meios extremos são idênticos (ar) e o meio intermediário é o mais refringente, isto é, $n_{\text{vidro}} > n_{\text{ar}}$ (fig. 10). Um raio de luz monocromática R , incidindo sobre a primeira face, sofre duas refrações ao atravessar a lâmina e emerge na segunda face, na direção R' paralela a R . Portanto, ao atravessar a lâmina de faces paralelas, sendo os **meios extremos idênticos**, um raio luminoso **não sofre desvio angular**, ocorrendo apenas um **desvio lateral** d .

Observe que, se os meios extremos não forem idênticos, o raio emergente não será paralelo ao raio incidente.



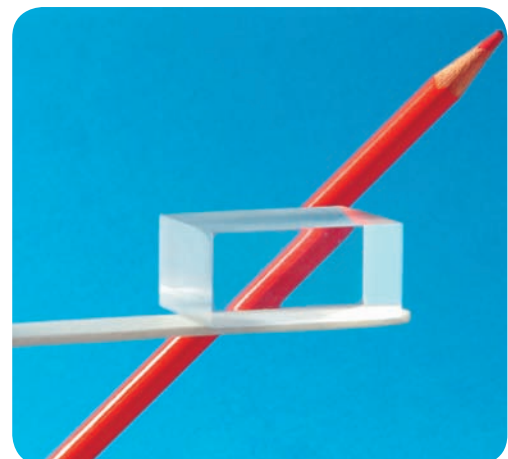
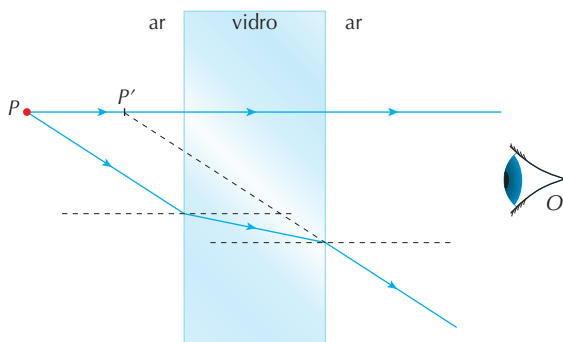
▶ **Figura 10.** O raio emergente R' é paralelo ao raio incidente R .



▶ **Trajetória da luz ao atravessar uma lâmina de vidro de faces paralelas imersa no ar: os raios incidente e emergente são paralelos.**

Imagem de um objeto através da lâmina de faces paralelas

A imagem P' de um objeto P , observado através de uma lâmina de vidro de faces paralelas, é virtual e está mais próxima da lâmina que o objeto P . É o que ocorre com a imagem da parte do lápis ilustrada na foto.



▶ **Imagem de parte de um lápis fornecida por uma lâmina de vidro de faces paralelas.**

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 92 Um raio luminoso monocromático incide numa lâmina de faces paralelas de índice de refração $\sqrt{3}$, imersa no ar, cujo índice de refração é 1, conforme mostra a figura.

$$\left(\text{Dados: } \sin 30^\circ = \frac{1}{2}; \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

- Esboce o trajeto do raio luminoso ao atravessar a lâmina.
- Determine o ângulo de refração do raio luminoso dentro da lâmina.
- Determine o ângulo de emergência.

Solução:

- O raio luminoso, ao penetrar na lâmina, aproxima-se da normal, pois se dirige do meio menos refringente para o meio mais refringente

$$(n_{\text{ar}} < n_{\text{lâmina}} \Rightarrow i > r).$$

O raio chega à segunda face formando um ângulo r' com a normal e, ao emergir, afasta-se da normal (segundo um ângulo de emergência e), pois se dirige do meio mais refringente para o meio menos refringente

$$(n_{\text{lâmina}} > n_{\text{ar}} \Rightarrow r' < e).$$

Como pode ser verificado pelos cálculos dos itens seguintes, os ângulos de incidência e de emergência são iguais ($i = e$), isto é, o raio emergente é paralelo ao raio incidente na lâmina.

- Aplicando a lei de Snell-Descartes à refração que ocorre na primeira face, obtemos:

$$n_{\text{ar}} \cdot \sin i = n_{\text{lâmina}} \cdot \sin r$$

Sendo $\sin i = \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}$, $n_{\text{ar}} = 1$ e $n_{\text{lâmina}} = \sqrt{3}$, vem:

$$1 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} \cdot \sin r \Rightarrow \sin r = \frac{1}{2} \Rightarrow r = 30^\circ$$

- O ângulo r' de incidência na segunda face é igual ao ângulo r de refração na primeira face, pois são ângulos alternos internos ($r' = r = 30^\circ$).

Aplicando a lei de Snell-Descartes à refração na segunda face, obtemos:

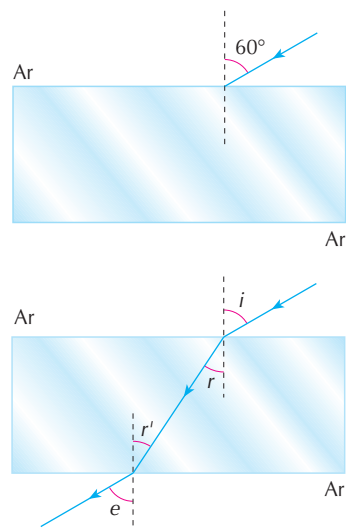
$$n_{\text{lâmina}} \cdot \sin r' = n_{\text{ar}} \cdot \sin e$$

Como $\sin r' = \sin 30^\circ = \frac{1}{2}$, $n_{\text{lâmina}} = \sqrt{3}$ e $n_{\text{ar}} = 1$, vem:

$$\sqrt{3} \cdot \frac{1}{2} = 1 \cdot \sin e \Rightarrow \sin e = \frac{\sqrt{3}}{2} \Rightarrow e = 60^\circ$$

Observação: Esse resultado confirma o paralelismo entre o raio incidente e o raio emergente na lâmina de faces paralelas, no caso em que os meios externos são idênticos.

Respostas: a) esquema; b) 30° ; c) 60°



R. 93 Um raio luminoso incide formando um ângulo i com a normal numa lâmina de índice de refração n e de espessura e colocada no ar. O ângulo com a normal no interior da lâmina é r . Demonstre que o desvio lateral d sofrido pelo raio, após atravessar a lâmina, é dado por: $d = e \cdot \frac{\sin(i - r)}{\cos r}$

Aplicação numérica: Determine o desvio lateral d para: $i = 60^\circ$; $n = \sqrt{3}$; $n_{\text{ar}} = 1$; $e = \sqrt{3}$ cm

Solução:

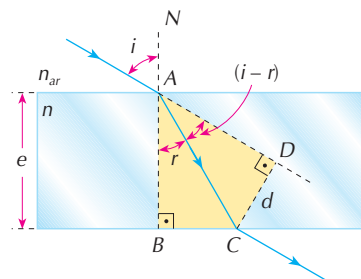
Na figura, está esquematizado o trajeto do raio ao atravessar a lâmina.

Do triângulo ACD: $\sin(i - r) = \frac{d}{AC}$ ①

Do triângulo ABC: $\cos r = \frac{e}{AC}$ ②

Dividindo a expressão ① pela expressão ②, obtemos:

$$\frac{\sin(i - r)}{\cos r} = \frac{d}{e} \Rightarrow d = e \cdot \frac{\sin(i - r)}{\cos r}$$



Aplicação numérica:

O ângulo de incidência é $i = 60^\circ$.

O ângulo de refração r é calculado pela lei de Snell-Descartes:

$$n_{\text{ar}} \cdot \text{sen } i = n \cdot \text{sen } r$$

Sendo $n_{\text{ar}} = 1$, $n = \sqrt{3}$ e $\text{sen } i = \text{sen } 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}$, vem:

$$1 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} \cdot \text{sen } r \Rightarrow \text{sen } r = \frac{1}{2} \Rightarrow r = 30^\circ$$

Como $e = \sqrt{3}$ cm, temos que o desvio lateral (d) é dado por:

$$d = e \cdot \frac{\text{sen}(i - r)}{\cos r} \Rightarrow d = \sqrt{3} \cdot \frac{\text{sen}(60^\circ - 30^\circ)}{\cos 30^\circ} = \sqrt{3} \cdot \frac{\text{sen } 30^\circ}{\cos 30^\circ} \Rightarrow d = \sqrt{3} \cdot \frac{\left(\frac{1}{2}\right)}{\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)} \Rightarrow d = 1 \text{ cm}$$

Resposta: 1 cm

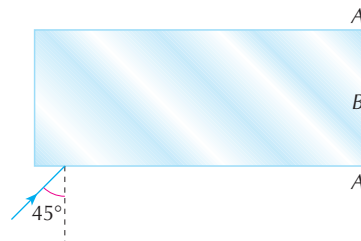
Entre na rede No endereço eletrônico <http://br.geocities.com/saladefisica3/laboratorio/lamina/lamina.htm> (acesso em agosto/2009) você pode simular a trajetória da luz ao atravessar uma lâmina de faces paralelas.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

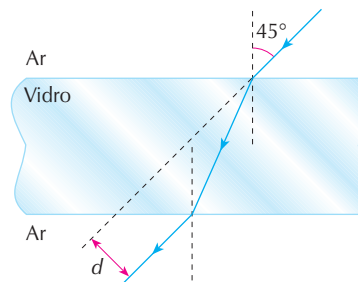
P. 303 Uma lâmina de faces paralelas é feita de um material B, cujo índice de refração é $n_B = \sqrt{2}$. Essa lâmina está imersa num meio A, de índice de refração $n_A = \sqrt{3}$. Um raio luminoso monocromático incide na lâmina como mostra a figura, formando com a normal um ângulo de 45° .

$$\left(\text{Dados: } 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2}; \text{sen } 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

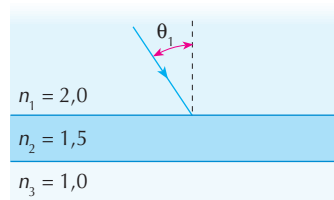
- Reproduza a figura e esboce o trajeto do raio luminoso através da lâmina.
- Determine o ângulo de refração do raio no interior da lâmina.
- Determine o ângulo de emergência do raio.



P. 304 Um raio de luz monocromática incide em uma lâmina de vidro de índice de refração $\sqrt{2}$, segundo um ângulo de incidência de 45° . A lâmina está imersa no ar, cujo índice de refração é igual a 1. Sendo de 2 cm a espessura da lâmina, determine o desvio lateral d (considere $\text{sen } 15^\circ = 0,25$).



P. 305 (UFRJ) Uma lâmina homogênea de faces paralelas é constituída de um material com índice de refração $n_2 = 1,5$. De um lado da lâmina, há um meio homogêneo de índice de refração $n_1 = 2,0$; do outro lado, há ar, cujo índice de refração n_3 consideramos igual a 1,0. Um raio luminoso proveniente do primeiro meio incide sobre a lâmina com ângulo de incidência θ_1 , como indica a figura. Calcule o valor de θ_1 a partir do qual o raio que atravessa a lâmina sofre reflexão total na interface com o ar.



Prisma

Objetivos

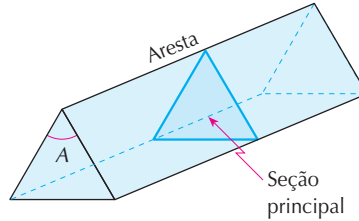
- ▶ Analisar o comportamento da luz ao atravessar um prisma.
- ▶ Conhecer o desvio angular sofrido pela luz ao atravessar um prisma.
- ▶ Compreender o funcionamento de um prisma de reflexão total.
- ▶ Analisar a dispersão da luz policromática ao se refratar.

Termos e conceitos

- seção principal
- desvio mínimo
- dispersão

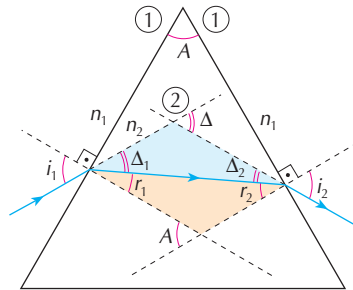
Em Óptica, **prisma** é o conjunto de três meios homogêneos e transparentes separados por duas superfícies planas não paralelas, que são as faces. As faces interceptam-se numa reta chamada **aresta** do prisma (fig. 11).

Todos os fenômenos ópticos no prisma são analisados na **seção principal**, definida por um plano perpendicular à aresta. O ângulo A entre as faces do prisma é chamado **ângulo de refração**.



◀ **Figura 11.** Prisma óptico: o ângulo A entre as faces é o ângulo de refração do prisma.

Considere um prisma de vidro colocado no ar e um raio de luz monocromática que o atravessa, conforme é mostrado na figura 12.



◀ **Figura 12.** Trajeto luminoso no prisma. i_1 : ângulo de incidência na primeira face. r_1 : ângulo de refração na primeira face. i_2 : ângulo de incidência na segunda face. e_2 : ângulo de emergência. Δ_1 : desvio angular na primeira face. Δ_2 : desvio angular na segunda face. Δ : desvio angular total. A : ângulo de refração (entre as faces).

Podemos obter a partir da figura as seguintes relações geométricas, considerando o triângulo destacado em bege:

$$A = r_1 + r_2 \quad \textcircled{1}$$

No triângulo destacado em azul-claro: $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$

Mas: $\Delta_1 = i_1 - r_1$ e $\Delta_2 = i_2 - r_2$

Assim, temos:

$$\Delta = i_1 - r_1 + i_2 - r_2 \Rightarrow \Delta = i_1 + i_2 - A \quad \textcircled{2}$$

As fórmulas ① e ② são as relações geométricas do prisma, sendo a segunda denominada **fórmula do desvio**.



▶ Trajetória da luz ao atravessar um prisma de vidro imerso no ar.

Verifica-se que o **desvio da luz**, ao atravessar o prisma, tem **valor mínimo** δ , quando o ângulo de incidência i_1 é igual ao ângulo de emergência i_2 ; assim, $i_1 = i_2 = i$ (fig. 13).

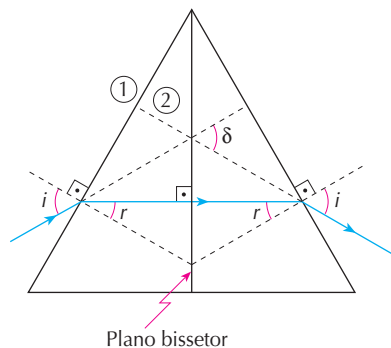


Figura 13.
O desvio mínimo (δ)
ocorre quando:
 $i_1 = i_2 = i$; $r_1 = r_2 = r$.

Nessas condições, temos:

$$n_1 \cdot \sin i = n_2 \cdot \sin r_1 \text{ e } n_1 \cdot \sin i = n_2 \cdot \sin r_2$$

$$\text{Logo: } r_1 = r_2 = r$$

Portanto, o raio no interior do prisma é perpendicular ao seu plano bissetor, como é mostrado na **figura 13**. Em condições de desvio mínimo, as fórmulas do prisma são:

$$A = 2r \text{ pois: } r_1 = r_2 = r$$

$$\delta = 2i - A \text{ pois: } i_1 = i_2 = i$$

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 94 Um raio luminoso incide sobre um prisma cuja seção principal é um triângulo equilátero (ângulo de refração 60°). O ângulo de incidência é igual a 60° . O índice de refração do prisma é $\sqrt{3}$ e o do ar, onde está imerso, é 1.

Determine o desvio do raio ao atravessar o prisma (dados: $\sin 30^\circ = \frac{1}{2}$; $\sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}$).

Solução:

Para aplicar a fórmula do desvio $\Delta = i_1 + i_2 - A$ devemos determinar inicialmente o valor do ângulo i_2 . Aplicando a lei de Snell-Descartes à refração na primeira face, vem:

$$n_{\text{ar}} \cdot \sin i_1 = n \cdot \sin r_1$$

Como $\sin i_1 = \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}$; $n_{\text{ar}} = 1$; $n = \sqrt{3}$; temos:

$$1 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} \cdot \sin r_1 \Rightarrow \sin r_1 = \frac{1}{2} \Rightarrow r_1 = 30^\circ$$

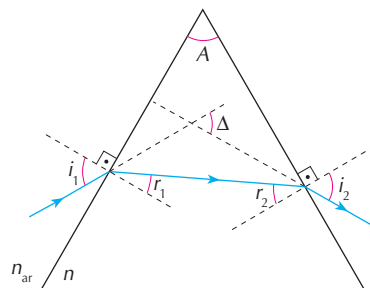
Mas: $r_1 + r_2 = A$, sendo $A = 60^\circ$;

logo: $30^\circ + r_2 = 60^\circ \Rightarrow r_2 = 30^\circ$

A lei de Snell-Descartes, aplicada à refração na segunda face, fornece: $n \cdot \sin r_2 = n_{\text{ar}} \cdot \sin i_2$

Portanto:

$$\sqrt{3} \cdot \frac{1}{2} = 1 \cdot \sin i_2 \Rightarrow \sin i_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} \Rightarrow i_2 = 60^\circ$$

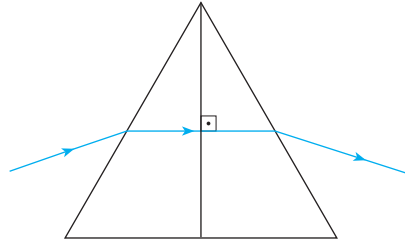


Na fórmula do desvio:

$$\Delta = i_1 + i_2 - A \Rightarrow \Delta = 60^\circ + 60^\circ - 60^\circ \Rightarrow \Delta = 60^\circ$$

Resposta: 60°

Observação: Note que o prisma em questão está funcionando em condições de desvio mínimo ($\Delta = \delta$), pois $i_1 = i_2 = 60^\circ$ e $r_1 = r_2 = 30^\circ$. Então, o raio no interior do prisma é paralelo à base e perpendicular ao plano bissetor, como se indica na figura ao lado.



R. 95 O desvio mínimo sofrido por um raio luminoso vale 30° quando ele atravessa um prisma de ângulo de refração 90° . Determine:

- o ângulo de incidência e o ângulo de refração na primeira face do prisma;
- o índice de refração do prisma, suposto no ar.

(Dados: $n_{\text{ar}} = 1$; $\sin 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2}$; $\sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}$)

Solução:

a) Como o desvio é mínimo, temos:

$$i_1 = i_2 = i; r_1 = r_2 = r; \Delta = \delta = 2i - A$$

Mas $\delta = 30^\circ$ e $A = 90^\circ$

Assim:

$$30^\circ = 2i - 90^\circ \Rightarrow 2i = 120^\circ \Rightarrow i = 60^\circ$$

Sendo $A = r_1 + r_2 = 2r$, temos:

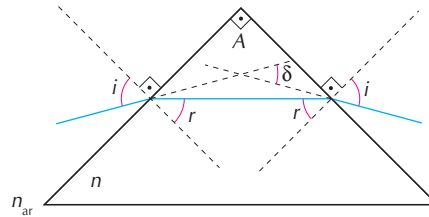
$$90^\circ = 2r \Rightarrow r = \frac{90^\circ}{2} \Rightarrow r = 45^\circ$$

b) Aplicando a lei de Snell-Descartes (sendo $\sin i = \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}$, $\sin r = \sin 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2}$

e $n_{\text{ar}} = 1$), temos:

$$n_{\text{ar}} \cdot \sin i = n \cdot \sin r \Rightarrow 1 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = n \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \Rightarrow n = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \Rightarrow n = \frac{\sqrt{6}}{2}$$

Respostas: a) 60° e 45° ; b) $\frac{\sqrt{6}}{2}$



EXERCÍCIOS PROPOSTOS

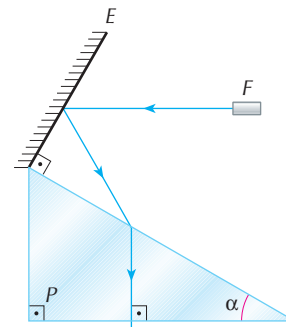
P. 306 Num prisma de ângulo de refração 45° , um raio luminoso incide por um ângulo de 60° com a normal e emerge com ângulo de 30° também com a normal. Determinar o desvio angular total que o raio sofre ao atravessar o prisma.

P. 307 (Mackenzie-SP) É dado um prisma de vidro de ângulo refringente A e índice de refração $\sqrt{2}$ no ar. Um raio de luz incide normalmente sobre uma face, atravessa o prisma, incide sobre a outra face e emerge rasante (dados: incidência normal $i_1 = 0^\circ$; emergência rasante $i_2 = 90^\circ$). Quanto mede o ângulo refringente do prisma?

P. 308 Num prisma cuja seção principal é um triângulo equilátero, o desvio mínimo sofrido por um raio é igual a 30° . Determine:

- os ângulos de incidência e de emergência;
- o ângulo de refração na primeira face;
- o índice de refração do prisma, suposto no ar.

P. 309 (UFG-GO) Como ilustrado na figura, a luz colimada de uma fonte F incide no espelho E , no ar, e é refletida para a face maior do prisma reto P . A luz emerge da face horizontal do prisma, formando com ela um ângulo reto. O espelho E é perpendicular à face maior do prisma. Sabendo que a luz incide na direção horizontal e que $\alpha = 30^\circ$, calcule o índice de refração do prisma (dado: $n_{\text{ar}} = 1,0$).



Prismas de reflexão total

Há prismas nos quais determinados raios incidentes sofrem sempre reflexão total no seu interior. De larga utilização em Óptica Aplicada, são denominados **prismas de reflexão total**. A vantagem da aplicação desses prismas nos instrumentos ópticos em substituição a espelhos planos é que eles proporcionam rendimento de cerca de 95% na reflexão, enquanto os espelhos raramente refletem mais que 80% da luz incidente.

Os prismas de reflexão total de vidro mais utilizados (**fig. 14**) apresentam, como seção principal, um triângulo retângulo isósceles.

No chamado **prisma de Amici*** (**fig. 14A**), os raios incidentes sofrem um desvio de 90° , pois incidem perpendicularmente em uma das faces-cateto do prisma, ocorrendo reflexão total dos raios na face-hipotenusa. Note que, dentro do prisma, os raios incidem por um ângulo de 45° , que é maior que o ângulo limite para o par de meios ar-vidro, cujo valor é cerca de 42° ($i > L$).

No denominado **prisma de Porro**** (**fig. 14B**), os raios que incidem perpendicularmente sobre a face-hipotenusa sofrem um desvio de 180° , o que torna os raios emergentes paralelos aos incidentes. Há duas reflexões totais dentro do prisma em cada uma das faces-cateto: o ângulo de incidência (45°) é maior que o ângulo limite ($L \approx 42^\circ$).

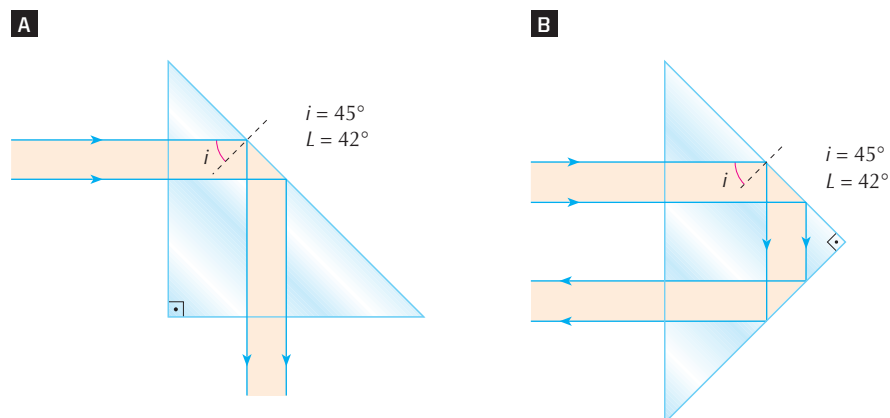
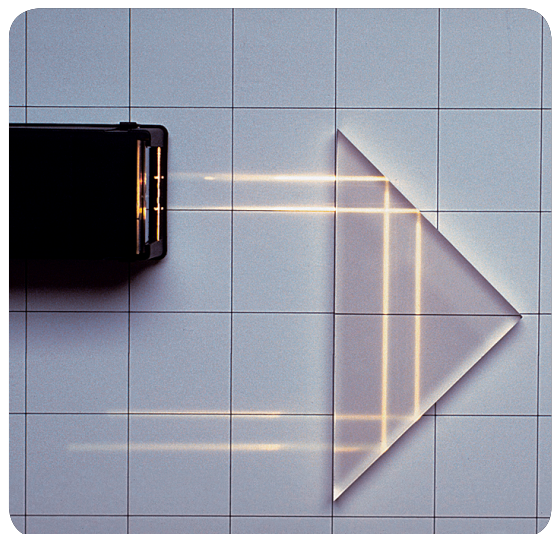


Figura 14. Prismas de reflexão total. (A) prisma de Amici; (B) prisma de Porro.



As três fases da fabricação de um prisma de reflexão total: prisma bruto, lapidado e acabado.

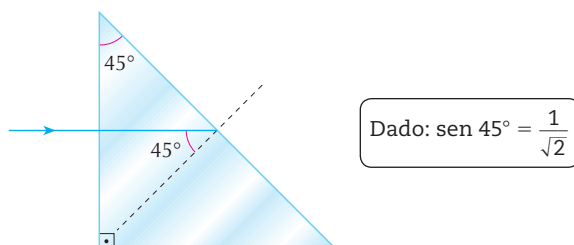


Trajeto da luz num prisma de reflexão total.

* **AMICI**, Giovanni Battista (1786-1863), astrônomo italiano. Foi diretor do Observatório de Florença.
 ** **PORRO**, Ignazio (1801-1875), inventor italiano de instrumentos ópticos.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

- R. 96** Um prisma óptico, cuja seção principal é um triângulo retângulo isósceles, encontra-se imerso no ar ($n_{\text{ar}} = 1$). A que condição o índice de refração n do prisma deve obedecer para que o raio luminoso indicado sofra reflexão total?



Solução:

Para que o raio indicado sofra reflexão total no interior do prisma, devemos ter $i > L$, em que L é o ângulo limite para o par de meios ar-prisma. Assim, sendo $i = 45^\circ$, temos: $45^\circ > L$. Essa desigualdade também pode ser estabelecida para os senos, pois 45° e L são ângulos menores que 90° . Assim, temos: $\text{sen } 45^\circ > \text{sen } L$.

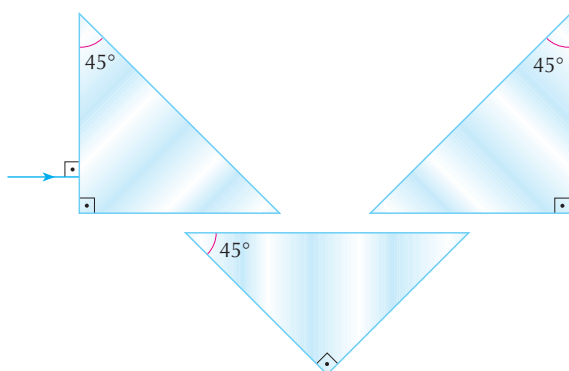
Por outro lado, temos: $\text{sen } 45^\circ = \frac{1}{\sqrt{2}}$ e $\text{sen } L = \frac{n_{\text{ar}}}{n} = \frac{1}{n}$; portanto:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} > \frac{1}{n} \Rightarrow n > \sqrt{2}$$

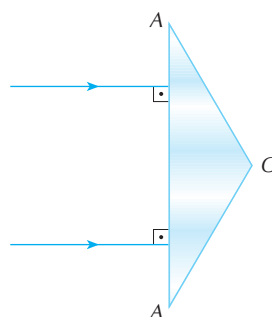
Resposta: O índice de refração do prisma deve ser maior que $\sqrt{2}$.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

- P. 310** Esquematize o trajeto do raio luminoso indicado, admitindo que todos os prismas da figura sejam de reflexão total.



- P. 311** (UFSCar-SP) O prisma da figura está colocado no ar e o material de que é feito tem um índice de refração igual a $\sqrt{2}$. Os ângulos A são iguais a 30° . Considere dois raios de luz incidentes perpendiculares à face maior.
- Calcule o ângulo com que os raios emergem do prisma.
 - Qual deve ser o índice de refração do material do prisma para que haja reflexão total nas faces OA ?



- P. 312** (FEI-SP) Um prisma de vidro, de ângulos 45° , 45° e 90° , está totalmente imerso em água de índice de refração $\frac{4}{3}$. Que valores o índice de refração do material do prisma pode ter para que um raio de luz, que incide perpendicularmente a uma face menor, sofra reflexão total na outra face?

Dispersão luminosa

O índice de refração de um meio depende do tipo de luz que se propaga, pois é inversamente proporcional à velocidade de propagação da luz $(n = \frac{c}{v})$. Em qualquer meio material, a luz de

maior velocidade é a **luz vermelha**, e a de **menor velocidade** é a **luz violeta**. Por conseguinte, qualquer que seja o meio material considerado, o **índice de refração é máximo para a luz violeta e mínimo para a luz vermelha**:

$$v_{ve.} > v_{vi.} \Rightarrow n_{ve.} < n_{vi.}$$

Admitamos que uma luz policromática como a luz branca solar esteja se propagando no ar – meio em que todas as componentes têm praticamente a mesma velocidade de propagação. Ao incidir sobre a superfície de uma placa de vidro (**fig. 15**), as diferentes componentes sofrem diferentes desvios, pois a velocidade não varia da mesma maneira para todas. À componente mais rápida (luz vermelha) corresponde o maior ângulo de refração; à mais lenta (violeta) corresponde o menor ângulo de refração. Esse fato se verifica pela lei de Snell-Descartes:

$$n_{ar} \cdot \text{sen } i = n_{ve.} \cdot \text{sen } r_{ve.} = n_{vi.} \cdot \text{sen } r_{vi.}$$

Como $n_{ve.} < n_{vi.}$, vem: $r_{ve.} > r_{vi.}$

Consequentemente, há a **decomposição da luz incidente policromática**. A componente que **mais se desvia**, isto é, a que mais se aproxima da normal (N), é a **violeta**; a que **menos se desvia**, isto é, a que menos se aproxima da normal, é a **vermelha**. As demais apresentam desvios intermediários, segundo a ordem apresentada na **figura 15**.

A esse fenômeno dá-se o nome de **dispersão luminosa**. A formação do arco-íris se deve, em parte, à ocorrência da dispersão da luz, como veremos adiante.

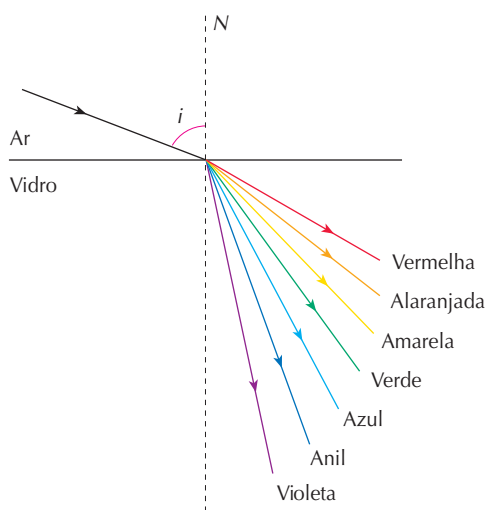


Figura 15. Dispersão luminosa: a luz violeta é a que mais se desvia, e a luz vermelha, a que menos se desvia.

Num prisma, a dispersão da luz branca se verifica de modo mais acentuado, pois nesse caso a luz atravessa duas superfícies diópticas. Assim, além da separação das luzes na primeira face do prisma, o desvio de cada luz monocromática se acentua na segunda (**fig. 16**).

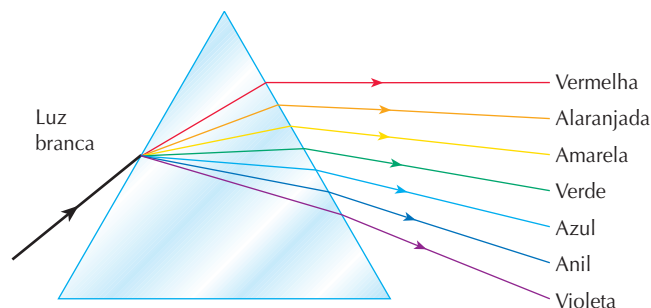


Figura 16. Dispersão da luz branca no prisma.

Do mesmo modo que ocorre numa única superfície, a componente que sofre menor desvio é a vermelha (menor índice de refração, maior velocidade no prisma) e a que sofre maior desvio é a violeta (maior índice de refração, menor velocidade no prisma).

Os prismas de refringência são largamente utilizados em **Espectroscopia** para análise de luzes policromáticas.

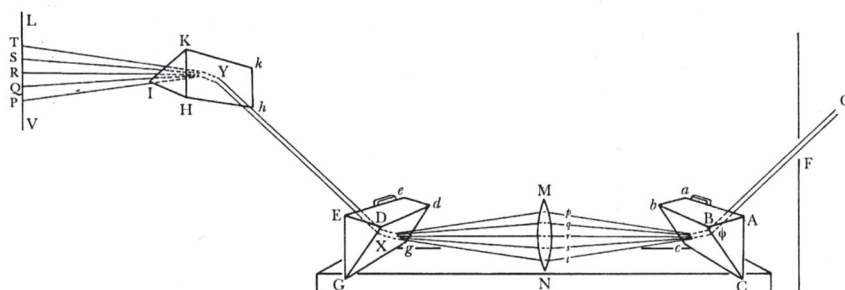


▶ A gravura representa Isaac Newton realizando uma experiência na qual um feixe de luz solar, ao atravessar um prisma de vidro, decompõe-se num feixe colorido denominado espectro da luz solar.



▶ Decomposição da luz branca ao atravessar um prisma.

Por meio de uma associação de prismas, Newton foi capaz de decompor e recompor a luz branca, decompondo-a novamente em seguida.



▶ Reprodução da figura publicada no livro *Óptica*, de Isaac Newton, a respeito da decomposição e recomposição da luz branca, usando prismas.

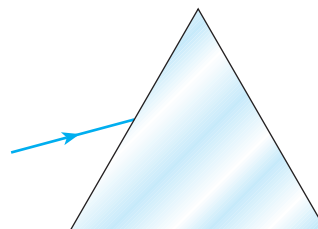
Reprodução proibida. Art.184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.



Conteúdo digital Moderna PLUS <http://www.modernaplus.com.br>
Simulador: Refração

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 313 (Vunesp) Um feixe paralelo de luz branca incide sobre um prisma de vidro transparente, conforme o esquema. Transfira o desenho ao lado e complete-o com a trajetória da luz depois de sair do prisma, explicitando a posição relativa das principais cores do espectro (três ou quatro).



P. 314 Um feixe de luz branca atravessa um prisma de vidro e sofre dispersão. Cada componente da luz branca é desviada diferentemente pelo prisma.

- Qual das componentes sofre maior desvio?
- A que componente corresponde o menor índice de refração do prisma?



Objetivos

- ▶ Analisar a posição aparente de um astro e a ocorrência de miragens.
- ▶ Compreender como se forma um arco-íris.

Termos e conceitos

- posição aparente
- imagem especular
 - miragem
- arco-íris principal e secundário

Há uma série de fenômenos observáveis na atmosfera terrestre determinados pela refração e/ou reflexão total da luz ao percorrê-la. A seguir, descrevemos alguns desses fenômenos.

Quando diminui a densidade de um meio, seu índice de refração também diminui. Dessa forma, como a atmosfera terrestre não é um meio homogêneo, sendo tanto mais rarefeita quanto maior a altitude, a densidade atmosférica e seu índice de refração diminuem da superfície para o espaço. Esse fato faz com que a luz proveniente de um astro, ao atravessar a atmosfera, siga uma trajetória não retilínea. Em consequência, o astro é visto da Terra não em sua posição real P , mas sim numa **posição aparente** P' (fig. 17).

Quando a **temperatura do ar aumenta**, sua densidade diminui e, conseqüentemente, seu **índice de refração também diminui**. Assim se explica a ocorrência de **miragens** no deserto e a **ilusão de poças-d'água** no asfalto, em dias quentes e secos. O ar, em contato com o solo, está mais aquecido e, por isso, menos denso que as camadas superiores. Os raios luminosos que partem do objeto a distância (fig. 18), ao descenderem, passam de meios mais densos (mais refringentes) para meios menos densos (menos refringentes) e se afastam da normal, até ocorrer reflexão total em uma das camadas. A partir daí os raios sobem, aproximando-se da normal, até chegar ao observador, que vê então uma **imagem especular** do objeto, determinada pela luz refletida. A impressão é de que há água no solo produzindo a reflexão.

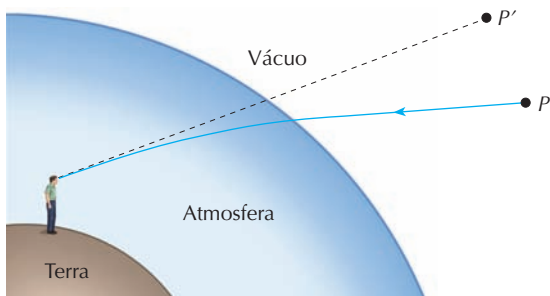


Figura 17. O astro P é visto na posição aparente P' .

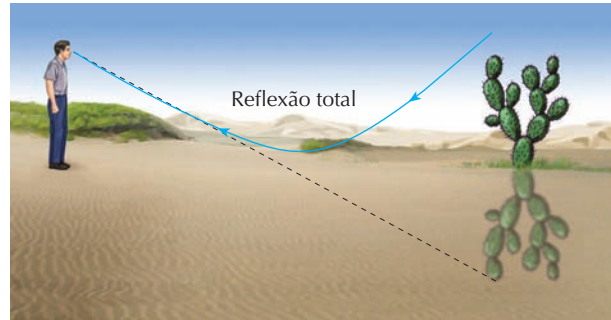
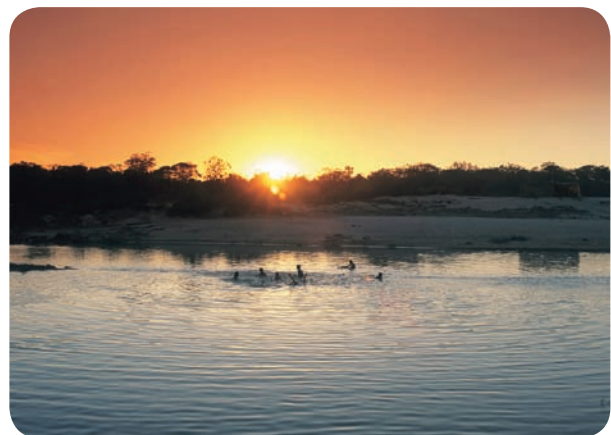


Figura 18.



Olhando para uma pista asfaltada em um dia quente e seco, podemos ter a impressão de que o asfalto está molhado.



A posição aparente de um astro é mais elevada do que a real. Por isso, continuamos a assistir ao pôr do sol, por alguns instantes, mesmo depois que o astro já está posicionado abaixo da linha do horizonte.

Miragens também podem ocorrer em regiões frias. O ar em contato com o solo está mais frio e, portanto, mais denso do que o ar das camadas superiores. Os raios luminosos que partem de um objeto, ao subirem, passam de meios mais densos (mais refringentes) para meios menos densos (menos refringentes) e se afastam da normal, até ocorrer reflexão total. A partir daí os raios descem, aproximando-se da normal, até atingir o observador, que vê a imagem de um objeto no solo pairando no ar (fig. 19). Esse mesmo tipo de miragem pode ocorrer nos mares, onde o ar em contato com a água está mais frio do que o ar de camadas superiores.

O **arco-íris** é outro fenômeno que ocorre na atmosfera, determinado pela **refração e posterior reflexão** da luz solar no interior de gotículas de chuva em suspensão no ar (fig. 20). Na refração, a luz solar se decompõe, sendo mais desviada a luz violeta e menos desviada a luz vermelha.

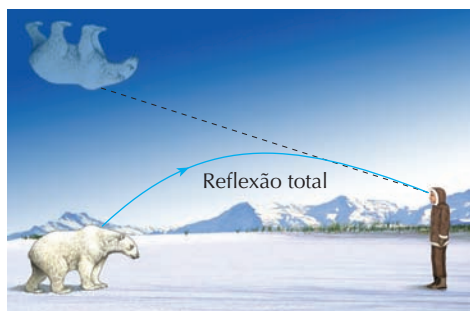


Figura 19.

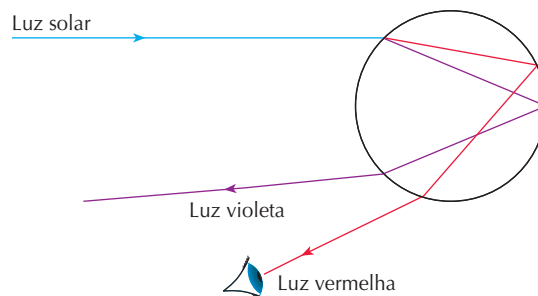


Figura 20.

A luz vermelha que emerge das gotículas forma com a luz solar incidente um ângulo de aproximadamente 43° , enquanto a luz violeta forma um ângulo de aproximadamente 41° (fig. 21). Para receber os raios refletidos, segundo determinado ângulo, o observador deve estar no vértice de uma superfície cônica (fig. 22). Essa superfície é definida pelos raios refletidos, e as gotículas pertencem ao círculo que forma a base desse cone. Por essa razão, o arco-íris é circular.

Considerando as gotículas formadoras do arco-íris, o observador recebe a luz vermelha do arco mais externo (maior ângulo) e a luz violeta do arco mais interno (menor ângulo). As luzes de outras cores têm posições intermediárias.

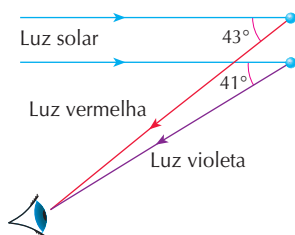


Figura 21.

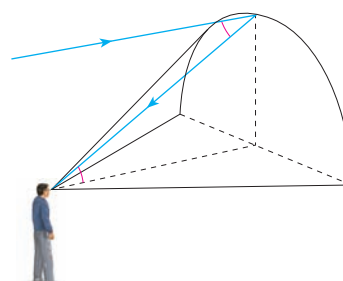
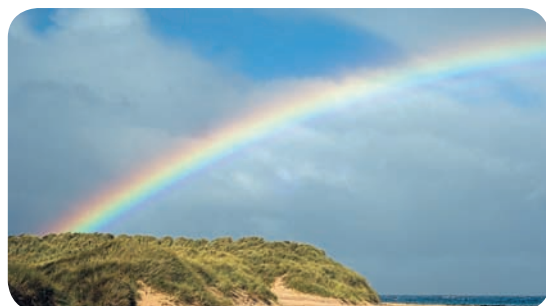
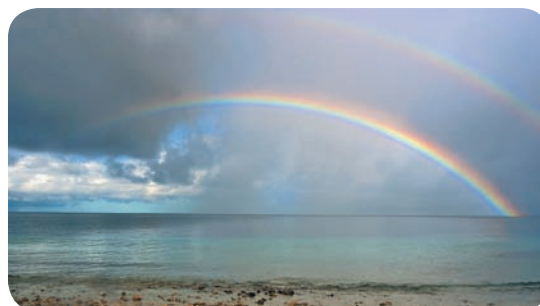


Figura 22.



A refração e a posterior reflexão da luz solar no interior das gotículas de chuva em suspensão no ar dão origem ao arco-íris. O arco mais externo é vermelho e o mais interno é violeta. Entre eles temos as cores intermediárias.



Eventualmente, além do arco-íris principal pode-se formar um arco-íris secundário, mais externo, devido à dupla reflexão da luz no interior das gotículas. No arco-íris secundário, ao contrário do principal, o arco mais externo é violeta e o mais interno é vermelho.

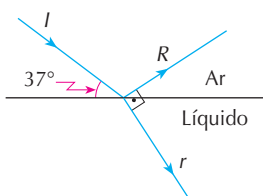
Entre na rede No endereço eletrônico <http://www.seara.ufc.br/folclore/folclore60.htm> (acesso em agosto/2009), você encontra a história do estudo do arco-íris desde a Grécia antiga.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE RECAPITULAÇÃO

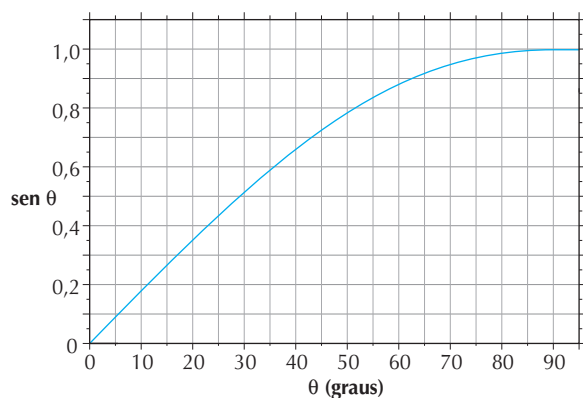
P. 315 O índice de refração absoluto do vidro é igual a 1,5 e o do diamante é 2,4. Calcule:

- o índice de refração do diamante em relação ao vidro;
- a relação entre a velocidade de propagação da luz no diamante e a velocidade de propagação da luz no vidro.

P. 316 (Vunesp) Um raio de luz monocromática incide sobre a superfície de um líquido, de tal modo que o raio refletido R forma um ângulo de 90° com o raio refratado r . O ângulo entre o raio incidente I e a superfície de separação dos dois meios mede 37° , como mostra a figura.



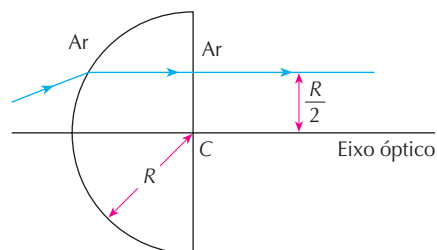
- Determine o valor do ângulo de incidência e do ângulo de refração.
- Usando os valores obtidos, o gráfico seguinte e a lei de Snell, determine o valor aproximado do índice de refração n desse líquido em relação ao ar.



P. 317 (Unifei-MG) Um feixe estreito de luz entra pela superfície superior da água de um aquário retangular, sob um ângulo de incidência de 41° (dado: $\text{sen } 41^\circ = 0,66$). O feixe refratado continua até o fundo do aquário, incidindo sobre um espelho plano situado horizontalmente, que o reflete de novo para a superfície, sendo ele novamente refratado ao emergir para o ar. Sabendo-se que o índice de refração da água é 1,3, determine:

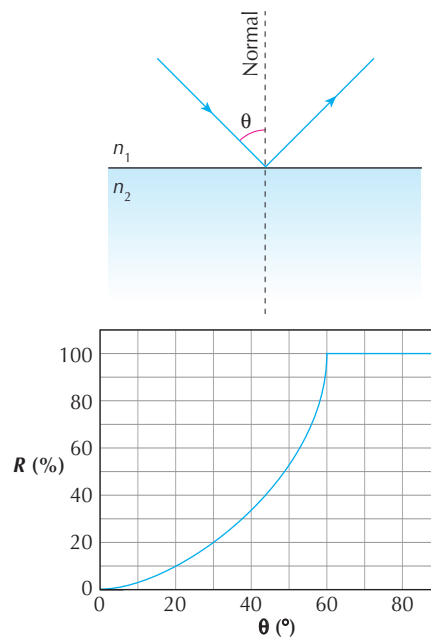
- o ângulo de refração na passagem do feixe do ar para a água;
- a distância entre os pontos da superfície da água que correspondem à incidência e à emergência do raio, se a profundidade da água do aquário é de $10\sqrt{3}$ cm.

P. 318 (UFRJ) Um raio de luz monocromática, propagando-se no ar, incide sobre a face esférica de um hemisfério maciço de raio R e emerge perpendicularmente à face plana, a uma distância $\frac{R}{2}$ do eixo óptico, como mostra a figura.



O índice de refração do material do hemisfério, para esse raio de luz, é $n = \sqrt{2}$. Calcule o desvio angular sofrido pelo raio ao atravessar o hemisfério.

P. 319 (UFJF-MG) Numa experiência em que se mediu a razão R entre a energia luminosa refletida e a energia luminosa incidente na interface entre dois meios de índices de refração n_1 e n_2 em função do ângulo de incidência θ , obteve-se o gráfico abaixo, em que R é dada em porcentagem.

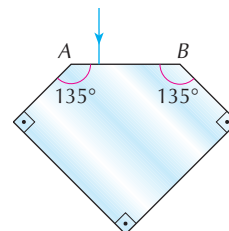


- Calcule a razão entre n_2 e n_1 .
- Tomando como referência a direção do raio de incidência, o raio refratado deve se aproximar ou se afastar da normal? Justifique.
- Calcule a relação entre a energia refletida e a energia refratada, quando $\theta = 30^\circ$.

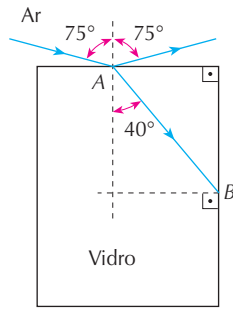
P. 320 (Fuvest-SP) A figura ilustra um raio de luz, proveniente do ar, penetrando perpendicularmente na face AB de um diamante lapidado, com índice de refração 2,4.

(Dado: velocidade da luz no ar = $3 \cdot 10^8$ m/s)

- Qual é a velocidade da luz no interior do diamante?
- Represente a trajetória do raio até sair do diamante.

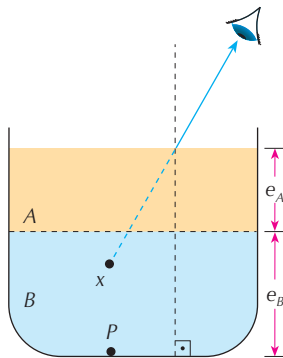


P. 321 (Vunesp) A figura mostra um raio de luz monocromática propagando-se no ar e atingindo o ponto A da superfície de um paralelepípedo retângulo feito de vidro transparente. A linha pontilhada, normal à superfície no ponto de incidência do raio luminoso, e os três raios representados estão situados num mesmo plano paralelo a uma das faces do bloco.



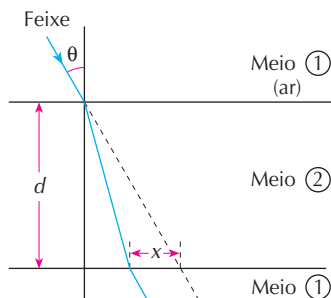
- De acordo com a figura, que fenômenos estão ocorrendo no ponto A?
- O ângulo limite para um raio da luz considerado, quando se propaga desse vidro para o ar, é 42° . Reproduza a figura e mostre o que acontecerá com o raio no interior do vidro ao atingir o ponto B.

P. 322 (UFBA) Um objeto pontual P encontra-se na base de um recipiente que contém duas camadas de líquidos, A e B, com espessuras $e_A = 28$ cm e $e_B = 39$ cm. Os líquidos são homogêneos, transparentes e miscíveis. Considere o índice de refração do ar igual a 1 e os dos líquidos A e B iguais a 1,4 e 1,3, respectivamente. Conforme indica a figura, um observador, olhando numa direção aproximadamente perpendicular à base do recipiente, enxergará P na posição x.

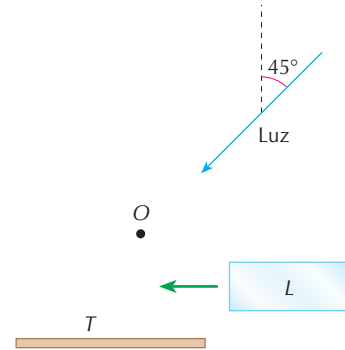


Determine, em centímetros, a distância entre x e a superfície livre do líquido.

P. 323 (UnB-DF) Um feixe de luz passa do meio ① (ar) para um meio ② e chega novamente ao meio ① (figura). A linha tracejada representa um prolongamento do feixe incidente. Sendo $\theta = 30^\circ$, $d = 2\sqrt{3}$ cm e $x = 1$ cm, calcule o índice de refração do meio ②.

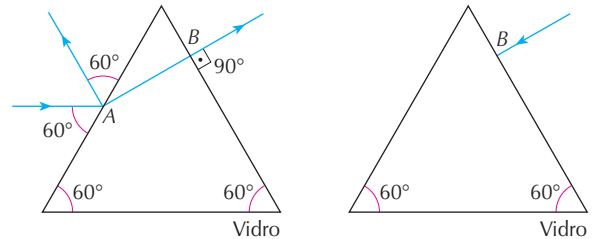


P. 324 (Unicamp-SP) A figura abaixo representa uma tela T, um pequeno objeto O e luz incidindo a 45° em relação à tela. Na situação da figura, o objeto O faz sombra sobre a tela. Colocando-se uma lâmina L de plástico plano, de 1,2 cm de espessura e índice de refração $n = 1,18 \approx \frac{5\sqrt{2}}{6}$, paralelamente entre a tela e o objeto, a sombra se desloca sobre a tela.



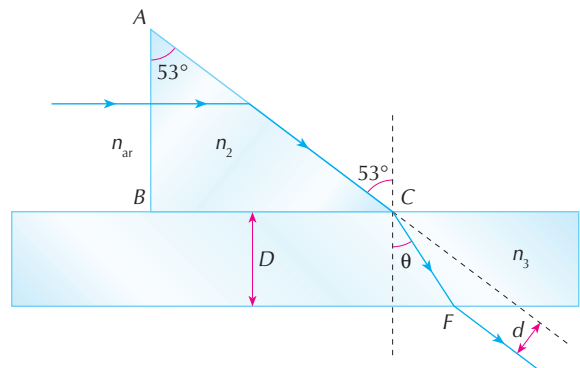
- Faça um esquema mostrando os raios de luz passando junto ao objeto e atingindo a tela, **com** e **sem** a lâmina de plástico.
- Calcule o deslocamento da sombra na tela ao se introduzir a lâmina de plástico.

P. 325 (Fuvest-SP) O esquema representa um bloco de vidro com uma cavidade prismática vazia e a trajetória percorrida por um raio de luz incidente no ponto A (dados: $\sin 30^\circ = \frac{1}{2}$; $\sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}$).



- Desenhe a trajetória de um outro raio que entra na cavidade, no ponto B, perpendicularmente à face.
- Calcule o índice de refração do vidro.

P. 326 (Olimpíada Brasileira de Física) Um raio de luz monocromático, vindo do ar, incide na face AB do prisma representado na figura e emerge rasante, paralelo à face AC, até encontrar uma lâmina de faces paralelas, justaposta à face BC.



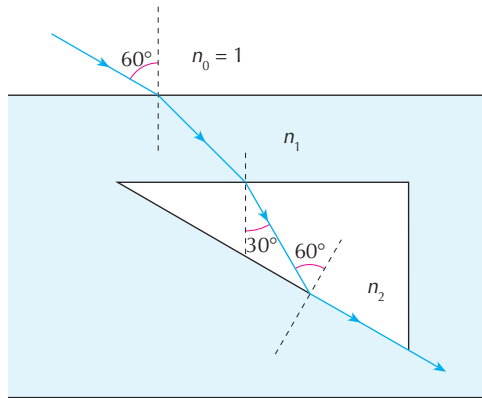
Dados:

$n_{\text{ar}} = 1,0$ (índice de refração do ar)
 $n_3 = 1,6$ (índice de refração do material da lâmina)
 $D = 2,0$ cm (espessura da lâmina de faces paralelas)
 $c = 3,0 \times 10^8$ m/s (velocidade da luz no ar)
 $\text{sen } 53^\circ = 0,80$; $\text{sen } 37^\circ = 0,60$; $\text{sen } 23^\circ = 0,40$;
 $\text{cos } 30^\circ = 0,87$

Determine:

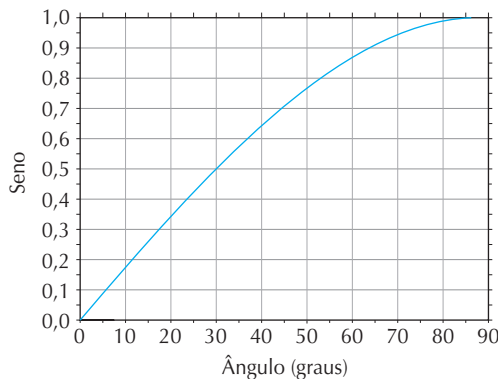
- a velocidade da luz no interior do prisma;
- o ângulo de refração θ ;
- o desvio lateral d sofrido pelo raio de luz.

P. 327 (Olimpíada Brasileira de Física) Um feixe de luz incide sobre um líquido de índice de refração n_1 , com ângulo de incidência de 60° . No interior do líquido existe um prisma de vidro, de índice de refração n_2 , o qual está posicionado de forma que uma de suas faces é paralela à superfície do líquido. Observa-se que o ângulo de refração nesta face é de 30° . Observa-se também que, dentro do prisma, o feixe incide sobre outra face com ângulo de 60° e emerge tangenciando esta face.



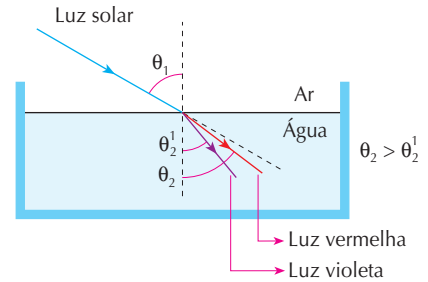
Determine n_1 e n_2 .

P. 328 (Unicamp-SP) Um mergulhador, dentro do mar, vê a imagem do Sol nascendo numa direção que forma um ângulo agudo (ou seja, menor que 90°) com a vertical.



- Faça um desenho esquemático mostrando um raio de luz vindo do Sol ao nascer e o raio refratado. Represente também a posição aparente do Sol para o mergulhador.
- Se $n = 1,33 \approx \frac{4}{3}$ o índice de refração da água do mar, use o gráfico para calcular aproximadamente o ângulo entre o raio refratado e a vertical.

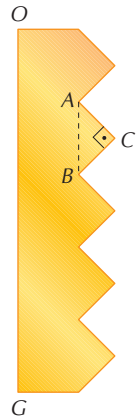
P. 329 (PUC-SP) Responda à seguinte questão, do ponto de vista da Óptica Geométrica: quando a luz solar “branca” atinge a superfície de separação entre dois meios, por exemplo, ar e água, o desvio sofrido por cada uma de suas cores (componentes de frequências diferentes) é desigual, sendo que, na água, a luz vermelha é a que menos se desvia e a luz violeta se desvia mais (ver figura).



Qual das duas componentes se desloca na água com maior velocidade? Justifique.

P. 330 (Unicamp-SP) Um tipo de sinalização utilizado em estradas e avenidas é o chamado *olho de gato*, o qual consiste na justaposição de vários prismas retos feitos de plástico, que refletem a luz incidente dos faróis dos automóveis.

- Reproduza o prisma ABC, indicado na figura ao lado, e desenhe a trajetória de um raio de luz que incide perpendicularmente sobre a face OG e sofre reflexões totais nas superfícies AC e BC.
- Determine o mínimo valor do índice de refração do plástico, acima do qual o prisma funciona como um refletor perfeito (toda a luz que incide perpendicularmente à superfície OG é refletida). Considere o prisma no ar, onde o índice de refração vale 1,0.



P. 331 (PUC-MG) Observe a figura. Como você explicaria a curvatura da luz mostrada nela, levando em conta a lei da refração?



▲ A explicação das miragens dos desertos. Esta gravura, geralmente encontrada nos manuais de ensino, mostra quão abruptamente os raios se inclinam para o solo.