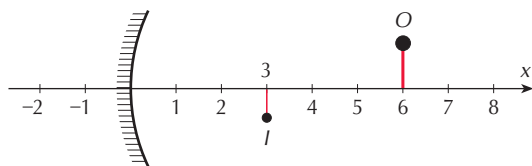


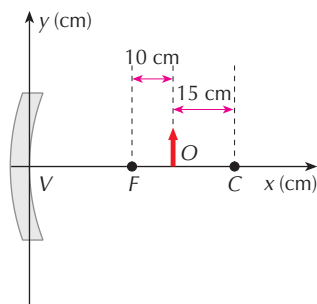
- T. 265** (UFF-RJ) A figura abaixo representa um objeto O e sua imagem I formada por um espelho côncavo. O eixo do espelho coincide com o eixo x , que está graduado em centímetros.



Se o objeto for deslocado para a posição $x = 1$ cm, a posição de sua nova imagem será, em cm:

- a) -2
b) -1
c) 0,5
d) 1
e) 2
- T. 266** (PUC-Campinas-SP) Um objeto, de 2,0 cm de altura, é colocado a 20 cm de um espelho esférico. A imagem que se obtém é virtual e possui 4,0 mm de altura. O espelho utilizado é:
- a) côncavo, de raio de curvatura igual a 10 cm.
b) côncavo e a imagem se forma a 4,0 cm do espelho.
c) convexo e a imagem obtida é invertida.
d) convexo, de distância focal igual a 5,0 cm, em módulo.
e) convexo e a imagem se forma a 30 cm do objeto.

- T. 267** (Mackenzie-SP) Um objeto real O está diante de um espelho esférico côncavo de Gauss, conforme ilustra a figura abaixo.



A distância entre esse objeto e sua respectiva imagem conjugada é de:

- a) 25 cm
b) 30 cm
c) 32,5 cm
d) 52,5 cm
e) 87,5 cm
- T. 268** (Vunesp) A imagem do Sol é formada em um espelho esférico côncavo, de distância focal igual a 1 metro. Considerando a distância do Sol à Terra 250 vezes maior que o diâmetro do Sol, o diâmetro da imagem formada será:
- a) 250 m
b) 40 m
c) 4 m
d) $4 \cdot 10^{-1}$ m
e) $4 \cdot 10^{-3}$ m

- T. 269** (UFU-MG) A distância entre uma lâmpada e sua imagem projetada em um anteparo por um espelho esférico é 30 cm. A imagem é quatro vezes maior que o objeto. Podemos afirmar que:

- a) o espelho é convexo.
b) a distância da lâmpada ao espelho é 40 cm.
c) a distância do espelho ao anteparo é 10 cm.
d) a distância focal do espelho é 7 cm.
e) o raio de curvatura do espelho é 16 cm.

- T. 270** (UEM-PR) Um espelho esférico côncavo tem raio de curvatura igual a 40 cm. Um objeto retilíneo está colocado na frente do espelho, perpendicular ao seu eixo principal. Considerando que a altura do objeto é 2 cm e que ele dista 60 cm do espelho, assinale o que for correto.

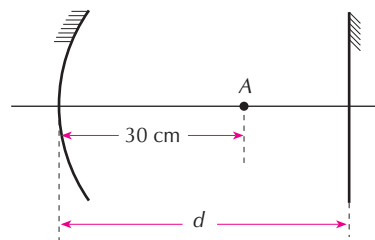
- 01) O objeto está colocado a 40 cm do foco do espelho.
02) A imagem produzida pelo espelho dista 20 cm do objeto.
04) A imagem produzida pelo espelho é virtual.
08) A imagem produzida pelo espelho é maior do que o objeto.
16) A imagem produzida pelo espelho é direita em relação ao objeto.
32) O aumento linear transversal (amplificação) é -0,5.
64) Se o objeto estivesse colocado a 40 cm do vértice do espelho, a imagem produzida seria real, invertida em relação ao objeto e teria 2 cm de altura.

Dê como resposta a soma dos números que precedem as proposições corretas.

- T. 271** (UFG-GO) Um espelho côncavo, cujo raio de curvatura mede 20 cm, fornece uma imagem de um objeto colocado entre o centro de curvatura e o foco principal. Se afastarmos o objeto 5 cm do espelho, sua imagem se formará a 20 cm do vértice. A distância primitiva do objeto ao espelho é:

- a) 10 cm
b) 20 cm
c) 30 cm
d) 40 cm
e) 15 cm

- T. 272** (ITA-SP) Um espelho plano está colocado na frente de um espelho côncavo, perpendicularmente ao eixo principal. Uma fonte luminosa A , centrada no eixo principal entre os dois espelhos, emite raios que se refletem sucessivamente sobre os dois espelhos e formam, sobre a própria fonte A , uma imagem real dela. O raio de curvatura do espelho é 40 cm e a distância do centro da fonte A até o vértice do espelho esférico é de 30 cm.



A distância d do espelho plano até o centro do espelho côncavo é, então:

- a) 20 cm
b) 30 cm
c) 40 cm
d) 45 cm
e) 50 cm



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 Dióptro 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.



Seção 13.1

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

Considerações preliminares

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).

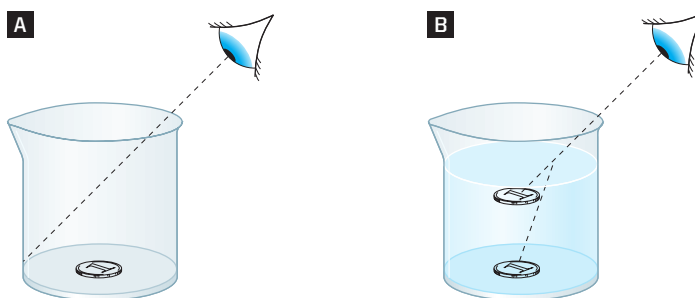


Figura 1. Ao se colocar água no recipiente, a moeda torna-se visível para o observador.

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).

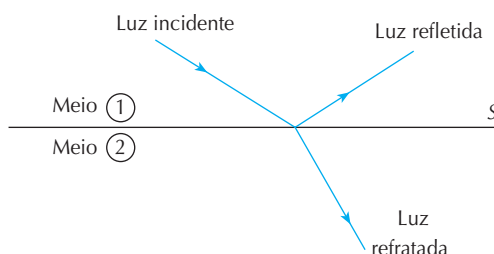
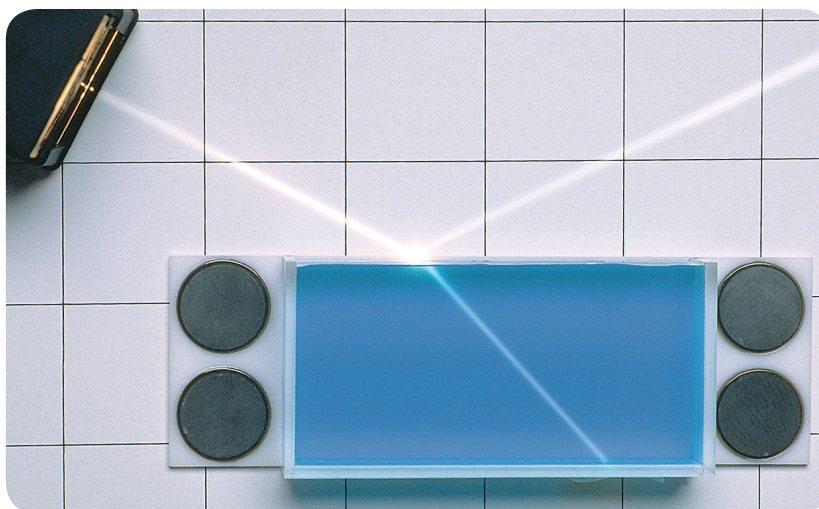


Figura 3. Na superfície da água, a luz é parcialmente refletida, refratada e absorvida.

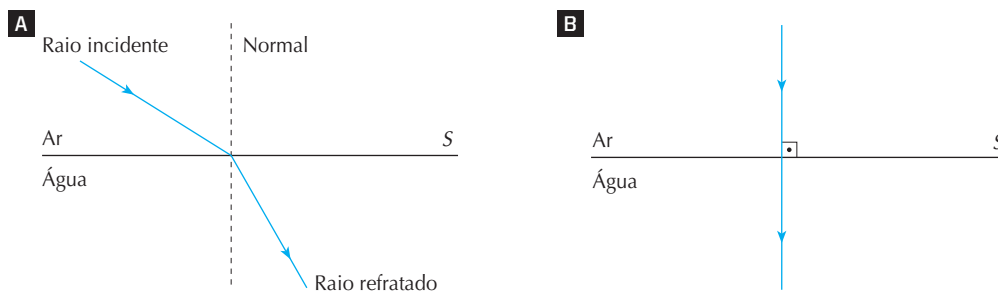


Figura 2. O canudo colocado obliquamente em relação à superfície do líquido parece estar quebrado.



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

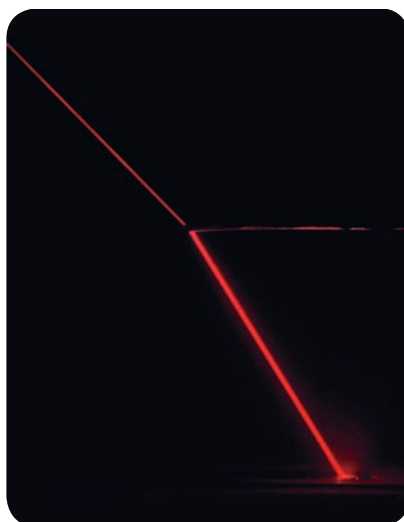
Se a incidência for oblíqua, a refração é acompanhada de mudança de direção (**fig. 4A**). Por outro lado, se a incidência for perpendicular (**fig. 4B**), a refração ocorre sem desvio.



► **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.

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.



Seção 13.2

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

Leis da refração

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**.

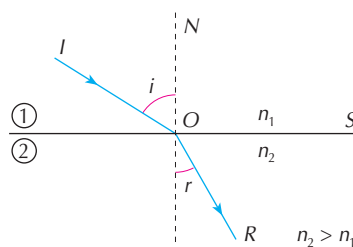


Figura 5. O raio de luz se aproxima da normal ao passar do meio menos refringente para o mais refringente.

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:

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

Desse modo, se $n_2 > n_1$, então $\sin r < \sin i$; 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**, Willebrord (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:

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

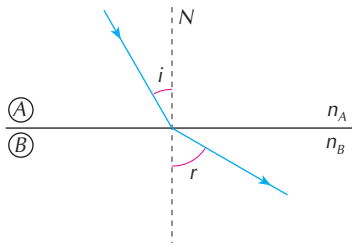
Nessa fórmula, n_{21} é o **índice de refração relativo** do meio ② em relação ao meio ①.

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: $\sin 30^\circ = \frac{1}{2}$; $\sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}$)

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 $n_B = 1,0$;

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

obtemos:

$$\begin{aligned} n_A \cdot \sin i &= n_B \cdot \sin r \Rightarrow \\ \Rightarrow n_A \cdot \frac{1}{2} &= 1,0 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \Rightarrow \boxed{n_A = \sqrt{3}} \end{aligned}$$

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:

$$n_A = \frac{c}{v_A} \quad \text{①} \qquad n_B = \frac{c}{v_B} \quad \text{②}$$

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:

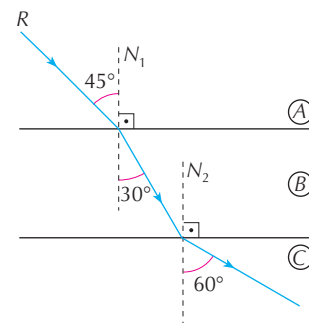
$$v_A = 3,0 \cdot 10^8 \cdot \frac{1,0}{\sqrt{3}} \Rightarrow v_A = 3,0 \cdot 10^8 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \Rightarrow$$

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

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

Entre na rede No endereço eletrônico http://www.walter-fendt.de/ph11br/refraction_br.htm (acesso em agosto/2009) você pode simular a refração da luz, variando os índices de refração dos meios e o ângulo de incidência.

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.

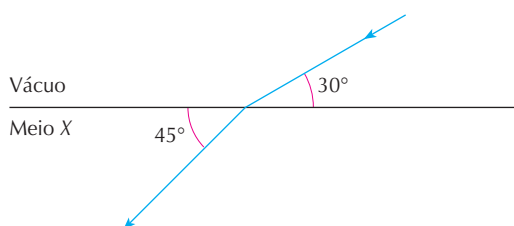
$$\left(\text{Dados: } \sin 30^\circ = \frac{1}{2}; \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

- 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.

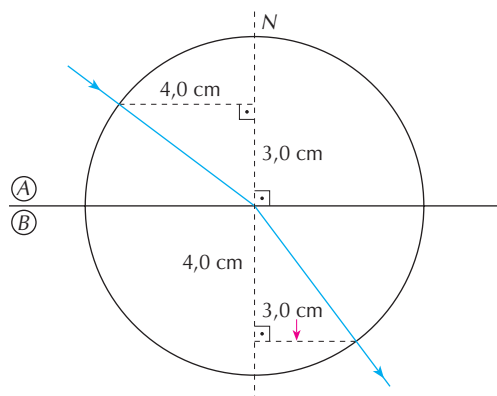


Determine o índice de refração do meio X e a velocidade da luz nesse meio.

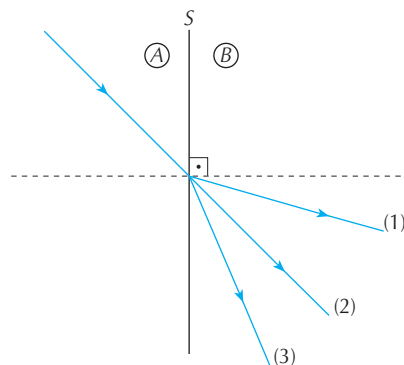
$$\left(\text{Dados: } \sin 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2}; \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}; \sin 30^\circ = \frac{1}{2} \right)$$

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

- 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.

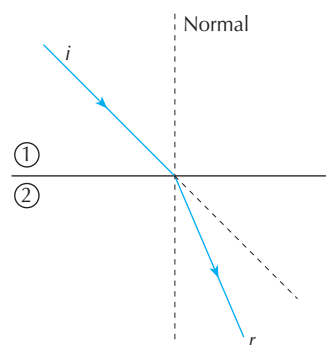


Figura a.

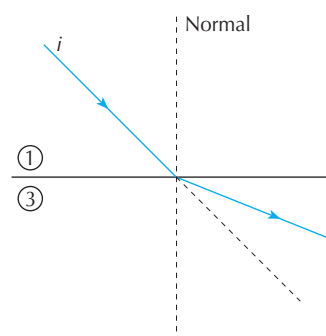


Figura b.

- a) Represente graficamente a refração de um raio de luz que passa do meio ② para o meio ③.
b) 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).

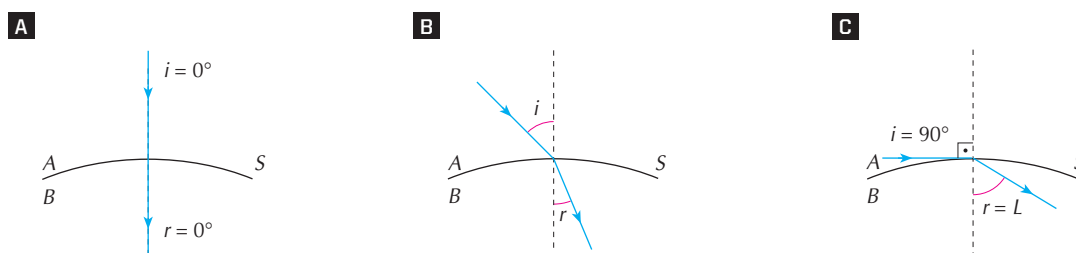


Figura 6. Comportamento da luz ao passar de um meio menos refringente para um meio mais refringente.

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:

$$\sin L = \frac{n_A}{n_B} \quad (\text{em que } n_A < n_B)$$

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).

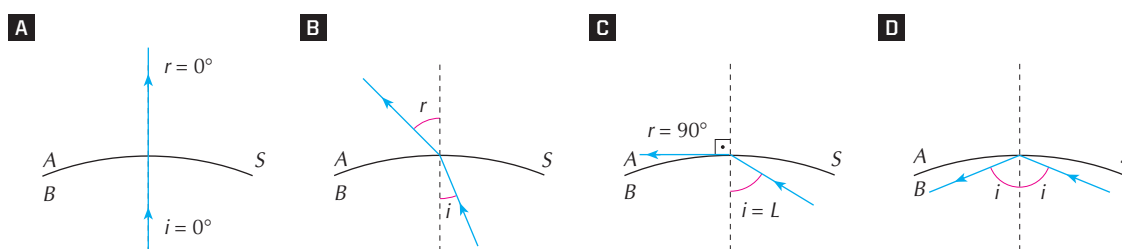


Figura 7. Comportamento da luz ao passar de um meio mais refringente para um meio menos refringente. Para $i > L$, ocorre reflexão total ou interna.

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

Solução:

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

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

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.

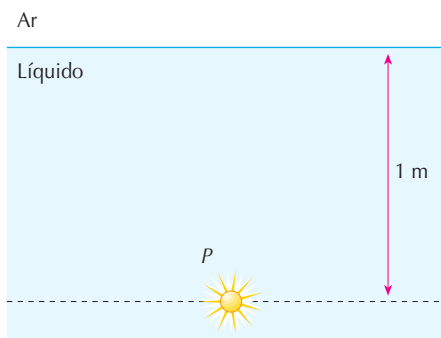
Solução:

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

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: $n_{\text{ar}} = 1$; $\sin 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2}$; $\tan 45^\circ = 1$).



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:

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

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

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 (1), temos:

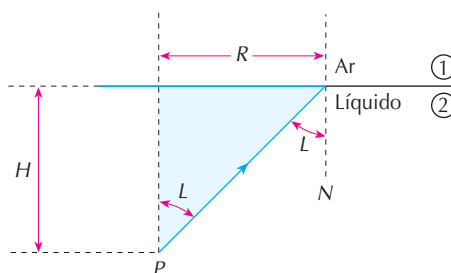
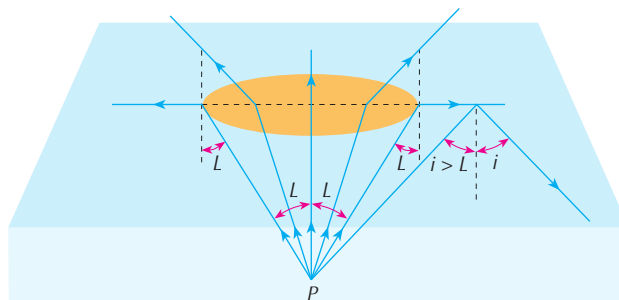
$$\operatorname{tg} L = \frac{R}{H} \Rightarrow \frac{R}{H} = 1 \Rightarrow R = H$$

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

O diâmetro vale:

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

Resposta: 2 m



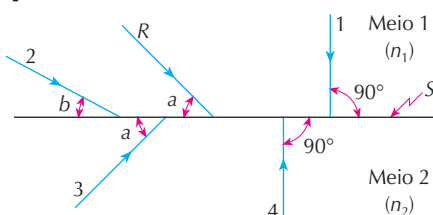
EXERCÍCIOS PROPOSTOS

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:

- a) Qual dos raios numerados de 1 a 4 também sofrerá reflexão total?
b) 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?

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

Seção 13.3

Objetivos

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

Termos e conceitos

- meio de incidência
- meio de emergência

Dióptro plano

Dióptro 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 dióptro plano (fig. 8).

Considere, no dióptro 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 dióptro 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.

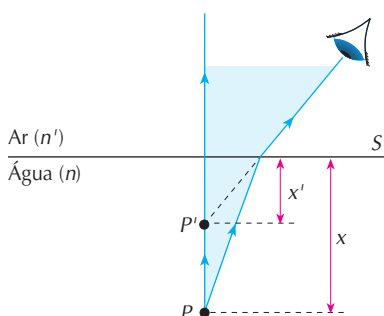


Figura 8. Objeto real na água tem imagem mais próxima da superfície.

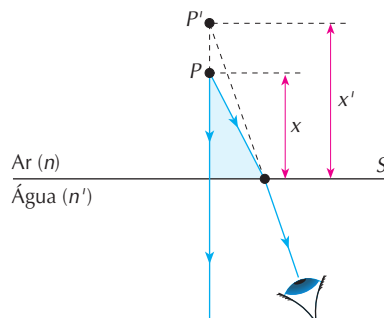


Figura 9. Objeto real no ar tem imagem mais afastada da superfície.



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

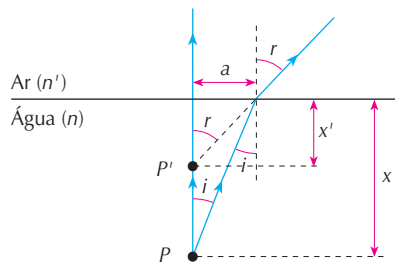


Quando os raios que determinam a formação da imagem formam ângulos pequenos com a normal à superfície S (até cerca de 10°), verifica-se que a relação entre as distâncias de objeto e imagem à superfície S de separação (x e x') é igual à relação entre os índices de refração (n e n') dos dois meios:

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

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: $n \cdot \sin i = n' \cdot \sin r$ ①

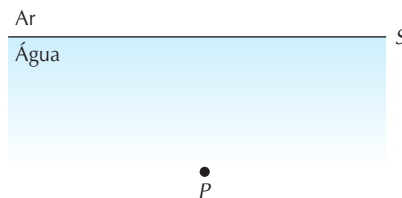
Sendo os ângulos pequenos, vem: $\sin i \approx \tan i = \frac{a}{x}$ ② e $\sin r \approx \tan r = \frac{a}{x'}$ ③

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.

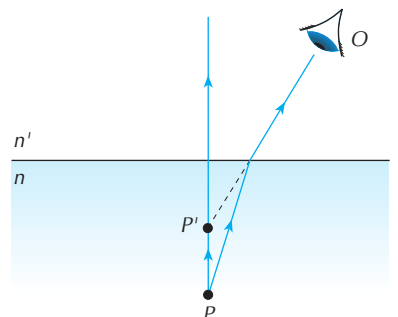
(Dados: $n_{\text{ar}} = 1$; $n_{\text{água}} = \frac{4}{3}$)

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:

$$\frac{x}{x'} = \frac{n}{n'} \Rightarrow \frac{16}{x'} = \frac{\frac{4}{3}}{1} \Rightarrow$$

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



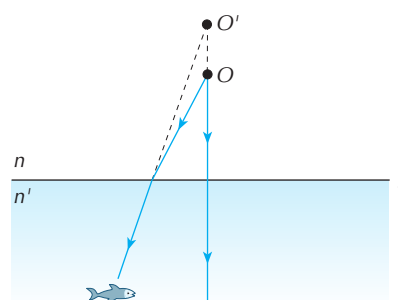
- b) A pessoa é o objeto. Assim, o ar é o meio de incidência (n) e a água é o meio de emergência (n'), portanto:

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

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

$$\frac{x}{x'} = \frac{n}{n'} \Rightarrow \frac{48}{x'} = \frac{1}{\frac{4}{3}} \Rightarrow$$

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



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.



Seção 13.4

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

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.

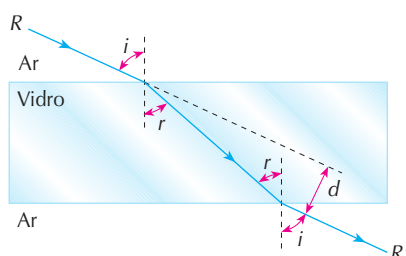
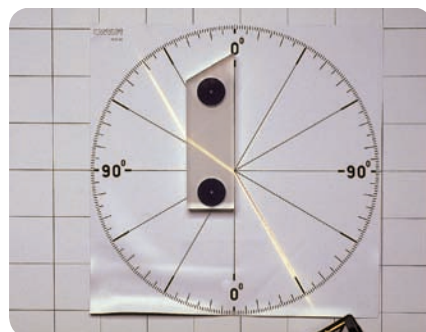


Figura 10. O raio emergente R' é paralelo ao raio incidente R .



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.

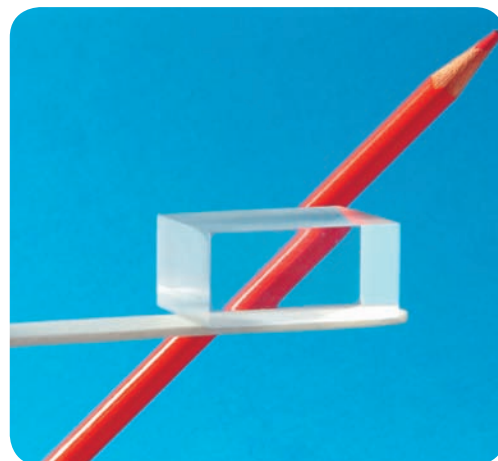
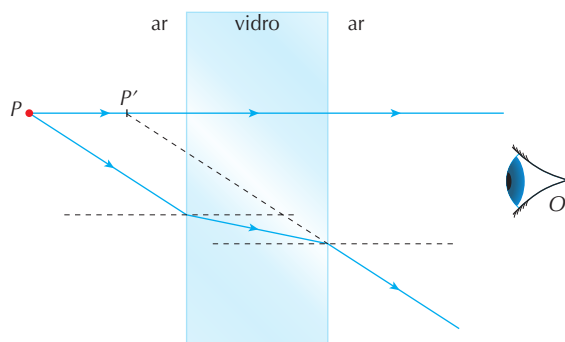


Imagem de parte de um lápis fornecida por uma lâmina de vidro de faces paralelas.

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:

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

- 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:

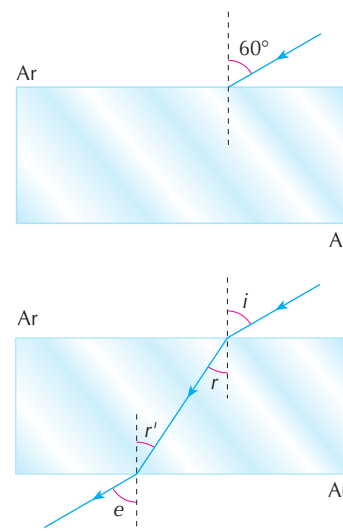
$$n_{\text{lâmina}} \cdot \sin r' = n_{\text{ar}} \cdot \sin e$$

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

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

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:

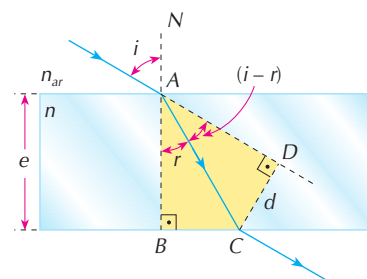
Na figura, está esquematizado o trajeto do raio ao atravessar a lâmina.

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

$$\text{Do triângulo ABC: } \cos r = \frac{e}{AC} \quad (2)$$

Dividindo a expressão (1) pela expressão (2), obtemos:

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



Aplicação numérica:

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

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

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

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

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

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

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

Resposta: 1 cm

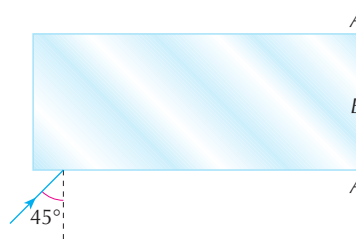
Entre na rede No endereço eletrônico <http://br.geocities.com/saladefisica3/laboratorio/lamina/lamina.htm> (acesso em agosto/2009) você pode simular a trajetória da luz ao atravessar uma lâmina de faces paralelas.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

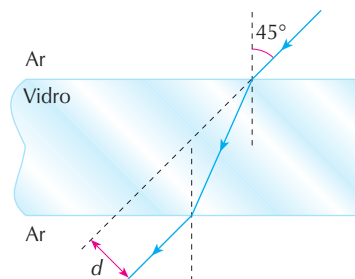
- P. 303** Uma lâmina de faces paralelas é feita de um material B, cujo índice de refração é $n_B = \sqrt{2}$. Essa lâmina está imersa num meio A, de índice de refração $n_A = \sqrt{3}$. Um raio luminoso monocromático incide na lâmina como mostra a figura, formando com a normal um ângulo de 45° .

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

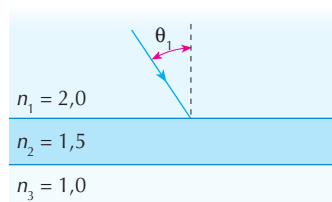
- Reproduza a figura e esboce o trajeto do raio luminoso através da lâmina.
- Determine o ângulo de refração do raio no interior da lâmina.
- Determine o ângulo de emergência do raio.



- 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 $\sin 15^\circ = 0,25$).



- 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.



Seção 13.5

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

Prisma

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 refringência**.

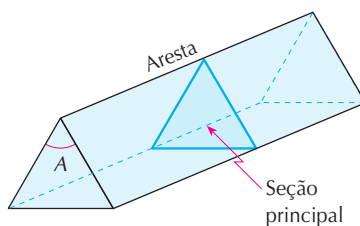


Figura 11. Prisma óptico: o ângulo A entre as faces é o ângulo de refringência do prisma.

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

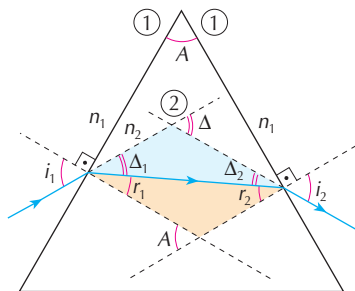


Figura 12. Trajeto luminoso no prisma. i_1 : ângulo de incidência na primeira face. r_1 : ângulo de refração na primeira face. r_2 : ângulo de incidência na segunda face. i_2 : ângulo de emergência. Δ_1 : desvio angular na primeira face. Δ_2 : desvio angular na segunda face. Δ : desvio angular total. A : ângulo de refringência (entre as faces).

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

$$A = r_1 + r_2 \quad (1)$$

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:

$$\Delta = i_1 - r_1 + i_2 - r_2 \Rightarrow \Delta = i_1 + i_2 - A \quad (2)$$

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).

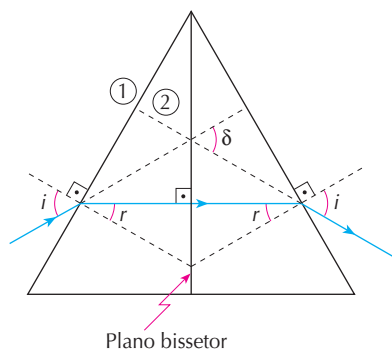


Figura 13.
O desvio mínimo (δ)
ocorre quando:
 $i_1 = i_2 = i$; $r_1 = r_2 = r$.

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:

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

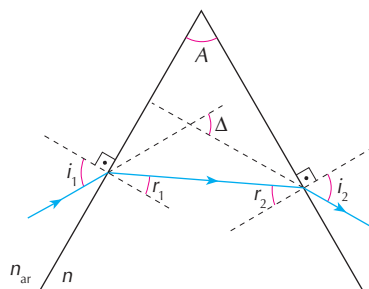
Mas: $r_1 + r_2 = A$, sendo $A = 60^\circ$;

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

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:

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

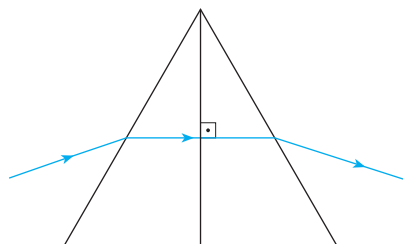


Na fórmula do desvio:

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

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.

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

Solução:

- Como o desvio é mínimo, temos:

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

$$\text{Mas } \delta = 30^\circ \text{ e } A = 90^\circ$$

Assim:

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

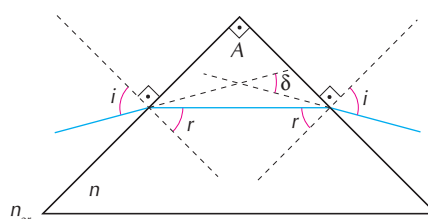
Sendo $A = r_1 + r_2 = 2r$, temos:

$$90^\circ = 2r \Rightarrow r = 45^\circ$$

- 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

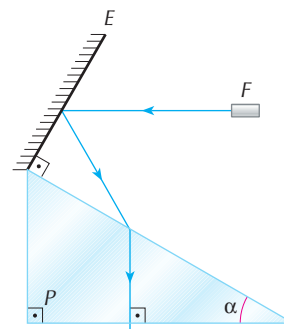
P. 306 Num prisma de ângulo de refração 45° , um raio luminoso incide por um ângulo de 60° com a normal e emerge com ângulo de 30° também com a normal. Determinar o desvio angular total que o raio sofre ao atravessar o prisma.

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: $n_{\text{ar}} = 1,0$).



1 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 ($L \approx 42^\circ$).

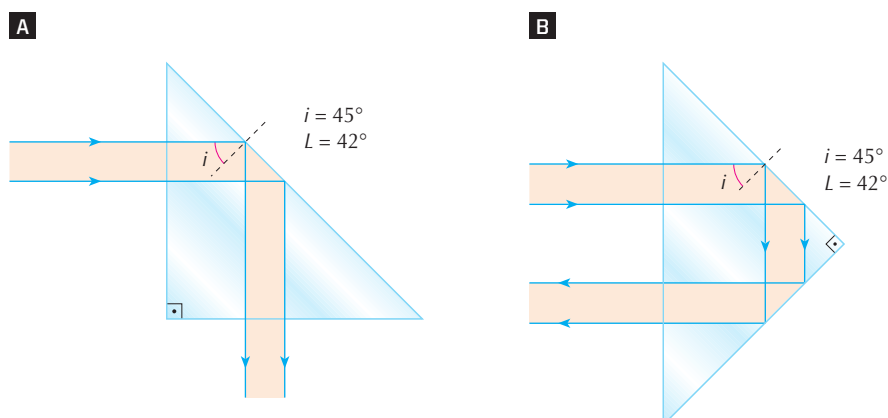
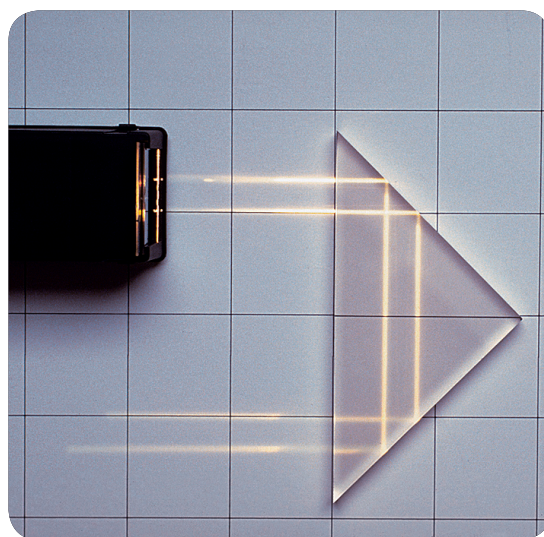


Figura 14. Prismas de reflexão total. (A) prisma de Amici; (B) prisma de Porro.



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

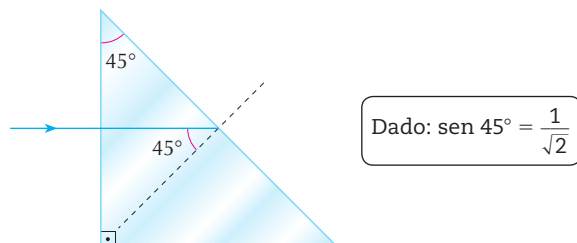


Trajeto da luz num prisma de reflexão total.

* **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: $\text{sen } 45^\circ > \text{sen } L$.

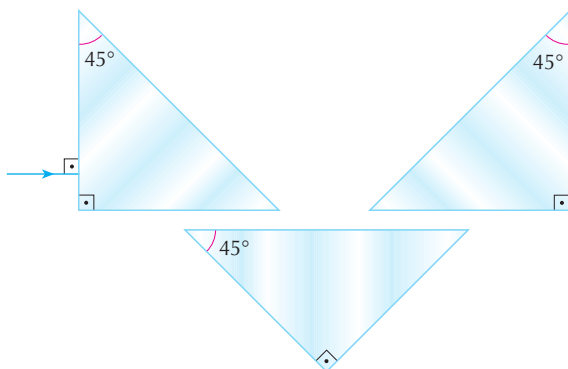
Por outro lado, temos: $\text{sen } 45^\circ = \frac{1}{\sqrt{2}}$ e $\text{sen } L = \frac{n_{\text{ar}}}{n} = \frac{1}{n}$; portanto:

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

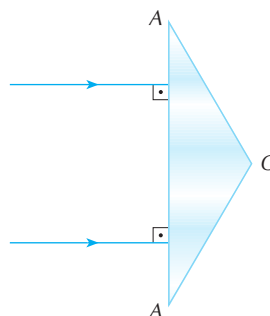
Resposta: O índice de refração do prisma deve ser maior que $\sqrt{2}$.

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?



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:

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

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.

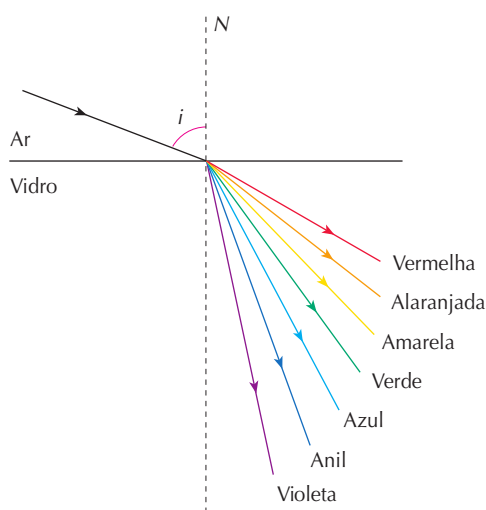


Figura 15. Dispersão luminosa: a luz violeta é a que mais se desvia, e a luz vermelha, a que menos se desvia.

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**).

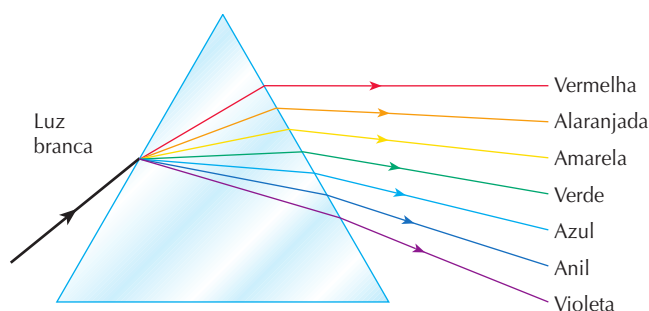


Figura 16. Dispersão da luz branca no prisma.

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.

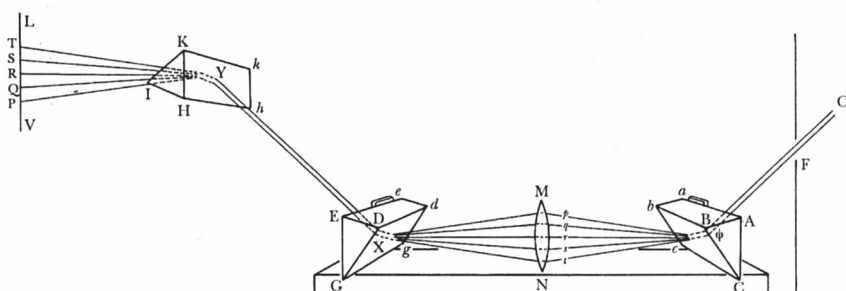


▶ A gravura representa Isaac Newton realizando uma experiência na qual um feixe de luz solar, ao atravessar um prisma de vidro, decompõe-se num feixe colorido denominado espectro da luz solar.



▶ 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.



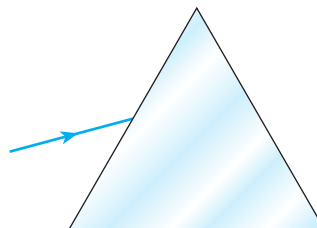
▶ Reprodução da figura publicada no livro *Óptica*, de Isaac Newton, a respeito da decomposição e recomposição da luz branca, usando prismas.



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?



Seção 13.6

Refração da luz na atmosfera

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, consequentemente, 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.

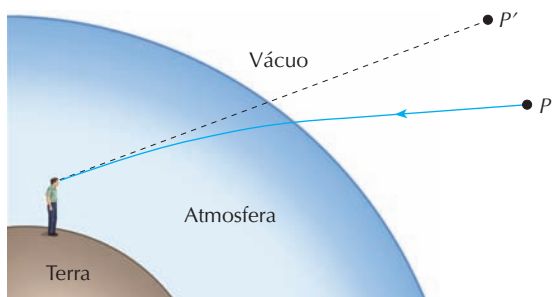


Figura 17. O astro P é visto na posição aparente P' .

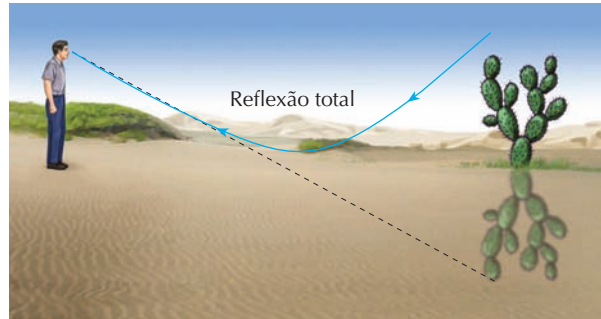


Figura 18.



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.

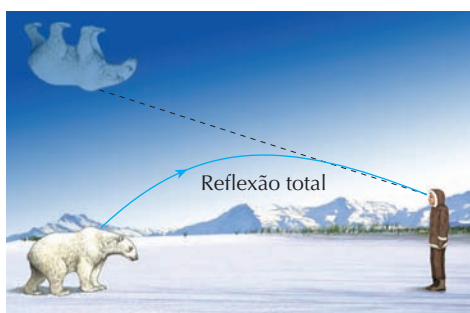


Figura 19.

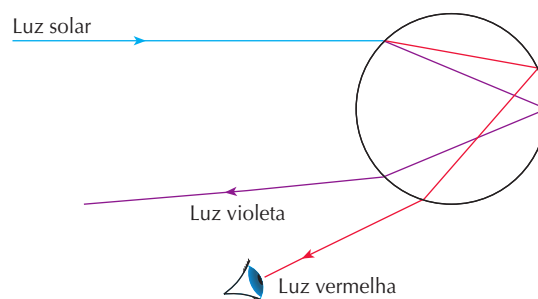


Figura 20.

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.

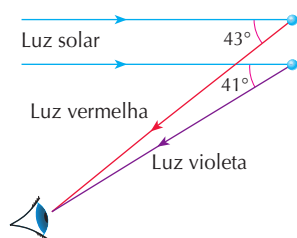


Figura 21.

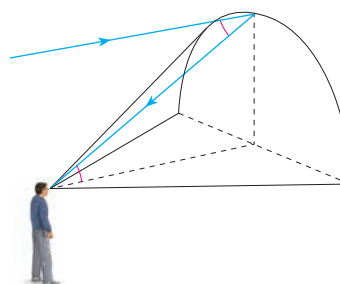
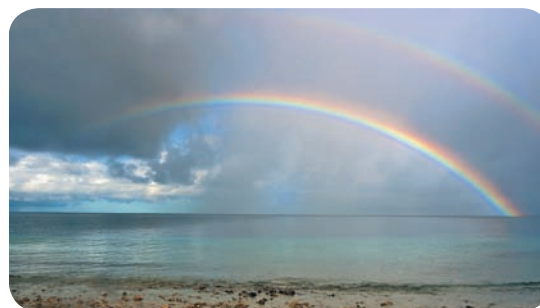


Figura 22.



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.

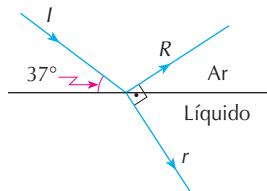
Entre na rede No endereço eletrônico <http://www.seara.ufc.br/folclore/folclore60.htm> (acesso em agosto/2009), você encontra a história do estudo do arco-íris desde a Grécia antiga.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE RECAPITULAÇÃO

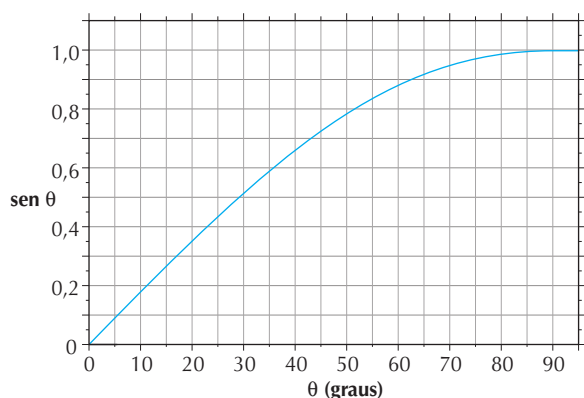
P. 315 O índice de refração absoluto do vidro é igual a 1,5 e o do diamante é 2,4. Calcule:

- 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.



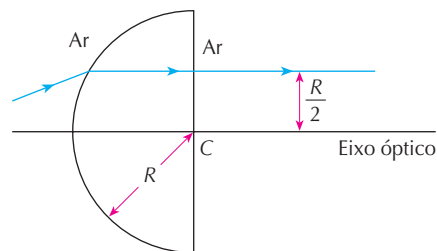
- Determine o valor do ângulo de incidência e do ângulo de refração.
- Usando os valores obtidos, o gráfico seguinte e a lei de Snell, determine o valor aproximado do índice de refração n desse líquido em relação ao ar.



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: $\sin 41^\circ = 0,66$). 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:

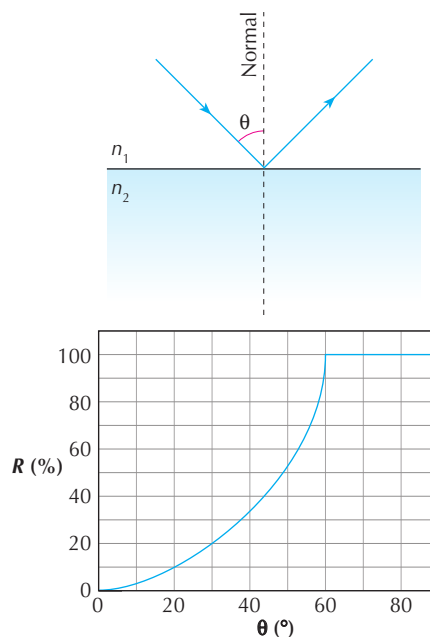
- o ângulo de refração na passagem do feixe do ar para a água;
- a distância entre os pontos da superfície da água que correspondem à incidência e à emergência do raio, se a profundidade da água do aquário é de $10\sqrt{3}$ cm.

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.

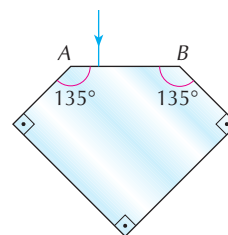


- Calcule a razão entre n_2 e n_1 .
- Tomando como referência a direção do raio de incidência, o raio refratado deve se aproximar ou se afastar da normal? Justifique.
- Calcule a relação entre a energia refletida e a energia refratada, quando $\theta = 30^\circ$.

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)

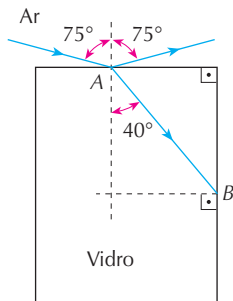
- Qual é a velocidade da luz no interior do diamante?
- Represente a trajetória do raio até sair do diamante.



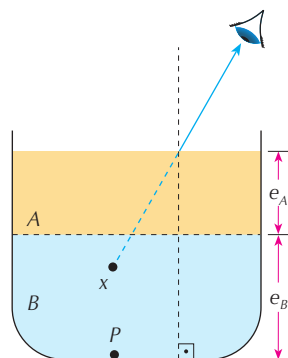
P. 321 (Vunesp) A figura mostra um raio de luz monocromática propagando-se no ar e atingindo o ponto A da superfície de um paralelepípedo retângulo feito de vidro transparente. A linha pontilhada, normal à superfície no ponto de incidência do raio luminoso, e os três raios representados estão situados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

a) De acordo com a figura, que fenômenos estão ocorrendo no ponto A?

b) 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.

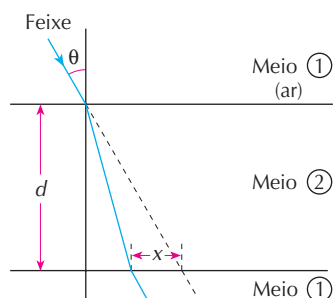


P. 322 (UFBA) Um objeto pontual P encontra-se na base de um recipiente que contém duas camadas de líquidos, A e B, com espessuras $e_A = 28$ cm e $e_B = 39$ cm. Os líquidos são homogêneos, transparentes e imiscíveis. Considere o índice de refração do ar igual a 1 e os dos líquidos A e B iguais a 1,4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

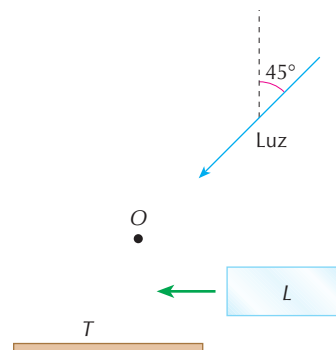


Determine, em centímetros, a distância entre x e a superfície livre do líquido.

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.



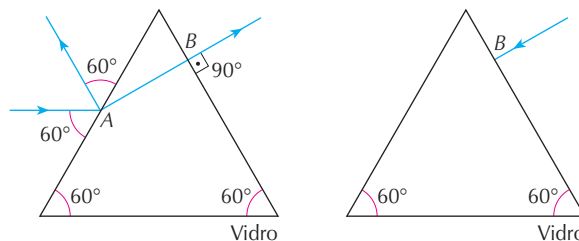
P. 324 (Unicamp-SP) A figura abaixo representa uma tela T, um pequeno objeto O e luz incidindo a 45° em relação à tela. Na situação da figura, o objeto O faz sombra sobre a tela. Colocando-se uma lâmina L de plástico plano, de 1,2 cm de espessura e índice de refração $n = 1,18 \approx \frac{5\sqrt{2}}{6}$,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



a) Faça um esquema mostrando os raios de luz passando junto ao objeto e atingindo a tela, com e sem a lâmina de plástico.

b) Calcule o deslocamento da sombra na tela ao se introduzir a lâmina de plástico.

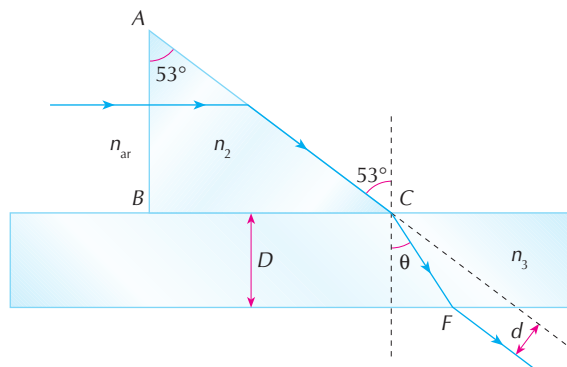
P. 325 (Fuvest-SP) O esquema representa um bloco de vidro com uma cavidade prismática vazia e a trajetória percorrida por um raio de luz incidente no ponto A (dados: $\sin 30^\circ = \frac{1}{2}$; $\sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}$).



a) Desenhe a trajetória de um outro raio que entra na cavidade, no ponto B, perpendicularmente à face.

b) 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.



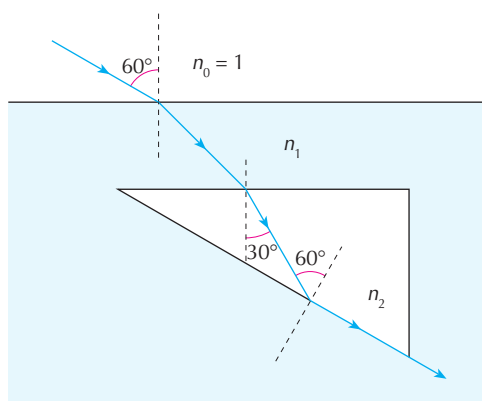
Dados:

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

Determine:

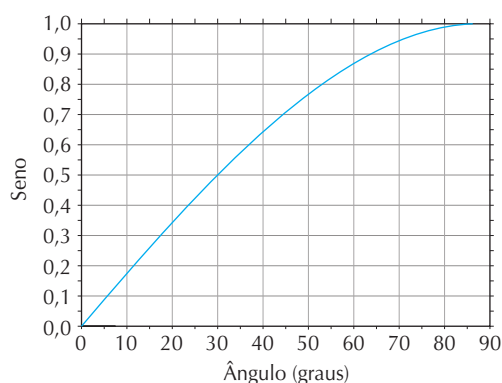
- a velocidade da luz no interior do prisma;
- o ângulo de refração θ ;
- o desvio lateral d sofrido pelo raio de luz.

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.



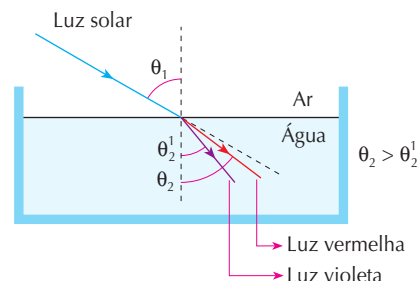
Determine n_1 e n_2 .

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.
- Sendo $n = 1,33 \approx \frac{4}{3}$ o índice de refração da água do mar, use o gráfico para calcular aproximadamente o ângulo entre o raio refratado e a vertical.

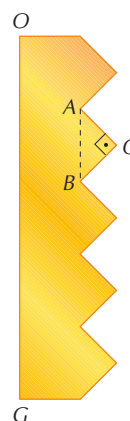
P. 329 (PUC-SP) Responda à seguinte questão, do ponto de vista da Óptica Geométrica: quando a luz solar “branca” atinge a superfície de separação entre dois meios, por exemplo, ar e água, o desvio sofrido por cada uma de suas cores (componentes de frequências diferentes) é desigual, sendo que, na água,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

TESTES PROPOSTOS

- T. 273** (PUC-SP) À noite, numa sala iluminada, é possível ver os objetos da sala, por reflexão numa vidraça, com muito maior nitidez que durante o dia, porque:
- aumenta a parcela de luz refletida.
 - não há luz refletida.
 - diminui a parcela de luz refratada proveniente do exterior.
 - aumenta a parcela de luz absorvida pelo vidro.
 - diminui a quantidade de luz difundida.

- T. 274** (UEA-AM) Num dia claro, uma pessoa passa diante dos vidros semiespelhados da fachada de um banco e consegue ver nitidamente sua imagem, sem perceber nenhuma imagem do interior do banco. Ao entrar no estabelecimento, percebe que, olhando o mesmo vidro, tem uma boa imagem do que acontece fora do banco, mas não vê sua própria imagem refletida. Isso ocorre porque:
- nessa situação a luz se propaga apenas de fora para dentro do banco.
 - nessa situação a luz se propaga apenas de dentro para fora do banco.
 - a luz externa que incide no vidro sofre somente refração.
 - a luz externa que incide no vidro sofre reflexão e refração.
 - a luz externa que incide no vidro não sofre reflexão nem refração.

- T. 275** (Unifesp) O gráfico da **figura 1** representa a intensidade da radiação transmitida ou refratada (curva T) e a intensidade da radiação refletida (R) em função do ângulo de incidência da luz numa superfície plana de vidro transparente. A **figura 2** mostra três direções possíveis — I, II e III — pelas quais o observador O olha para a vitrina plana de vidro transparente, V.

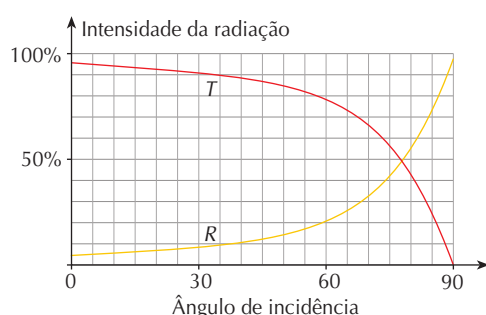


Figura 1.

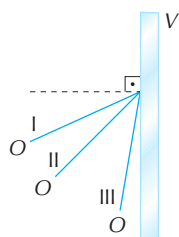


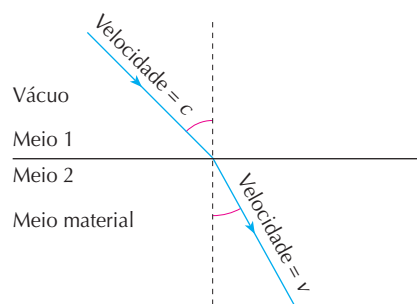
Figura 2.

Comparando as duas figuras, pode-se concluir que esse observador vê melhor o que está dentro da vitrina quando olha na direção:

- I e vê melhor o que a vitrina reflete quando olha na direção II.
- I e vê melhor o que a vitrina reflete quando olha na direção III.
- II e vê melhor o que a vitrina reflete quando olha na direção I.
- II e vê melhor o que a vitrina reflete quando olha na direção III.
- III e vê melhor o que a vitrina reflete quando olha na direção I.

- T. 276** (UFPB) Em 1621, o cientista holandês Willebrord van Roijen SNELL (1591-1626) investigou o fenômeno físico da propagação da luz em diversos meios, e estabeleceu, baseado na evidência experimental, a lei que levou o seu nome — Lei de Snell ou Lei da Refração.

Considere essa lei aplicada à seguinte situação: o índice de refração absoluto (n) de um meio material (conforme a figura) é definido como a razão entre a velocidade da luz no meio 1 e a velocidade da luz no meio 2.



A tabela a seguir relaciona o índice de refração para sete meios materiais diferentes. Se necessário, adote $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

Meio	Índice de refração
Vácuo	1,0000
Ar	1,0003
Água	1,3300
Álcool etílico	1,3600
Óleo	1,4800
Vidro crown	1,5000
Vidro flint	1,6600

Com base nessa tabela, é correto afirmar que:

- a velocidade da luz não se altera quando muda de meio.
- a velocidade da luz no vidro crown é a mesma que no vidro flint.
- o ar é o meio onde a luz apresenta maior velocidade.
- o vidro flint é o meio onde a luz viaja mais rápido do que no óleo.
- na água a luz viaja mais rápido do que no álcool etílico.

T. 277 (UFPel-RS) Um raio luminoso monocromático passa do vácuo para um meio material de índice de refração igual a $\frac{4}{3}$. Sendo a velocidade de propagação da luz no vácuo igual a $3,00 \cdot 10^5$ km/s, podemos afirmar que a velocidade da luz no meio material é de:

- a) $4,00 \cdot 10^5$ km/s
- b) $2,25 \cdot 10^5$ km/s
- c) $3,00 \cdot 10^5$ km/s
- d) $2,00 \cdot 10^5$ km/s
- e) $3,25 \cdot 10^5$ km/s

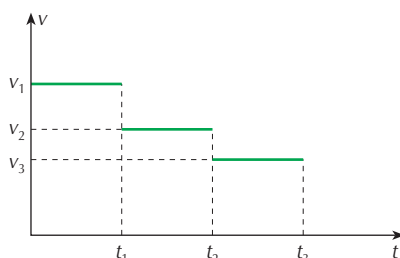
T. 278 (Mackenzie-SP) O índice de refração da água em relação ao vidro é $\frac{8}{9}$. Sabendo que o índice de refração absoluto da água é $\frac{4}{3}$ e que a velocidade da luz no vácuo é $3 \cdot 10^8$ m/s, podemos afirmar que a velocidade da luz no vidro é:

- a) $2,5 \cdot 10^8$ m/s
- b) $2,0 \cdot 10^8$ m/s
- c) $1,5 \cdot 10^8$ m/s
- d) $1,0 \cdot 10^8$ m/s
- e) $0,8 \cdot 10^8$ m/s

T. 279 (Ufac) A velocidade da propagação da luz em um determinado líquido é de 80% daquela verificada no vácuo. O índice de refração desse líquido é:

- a) 1,50
- b) 1,25
- c) 1,00
- d) 0,80
- e) 0,20

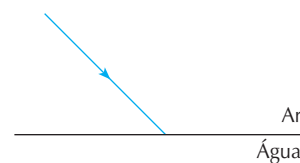
T. 280 (PUC-SP) Um raio de luz monocromática passa do meio ① para o meio ② e deste para o meio ③. Sua velocidade de propagação relativa aos meios citados é v_1 , v_2 e v_3 , respectivamente. O gráfico representa a variação da velocidade de propagação da luz em função do tempo ao atravessar os meios mencionados, considerados homogêneos.



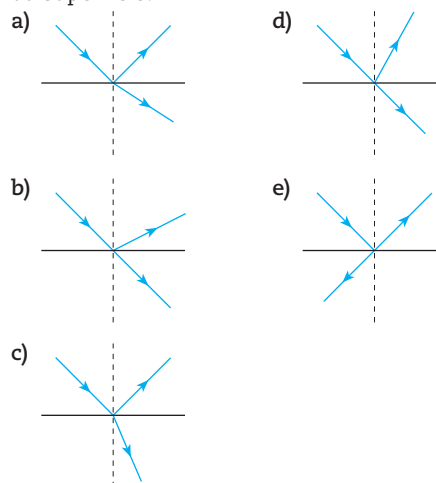
Sabendo-se que os índices de refração do diamante, do vidro e do ar obedecem à desigualdade $n_{\text{diamante}} > n_{\text{vidro}} > n_{\text{ar}}$, podemos afirmar que os meios ①, ② e ③ são, respectivamente:

- a) diamante, vidro, ar.
- b) diamante, ar, vidro.
- c) ar, diamante, vidro.
- d) ar, vidro, diamante.
- e) vidro, diamante, ar.

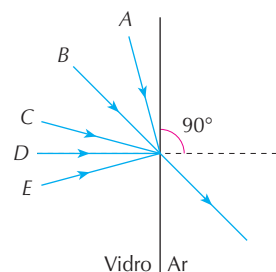
T. 281 (Cesgranrio-RJ) Um raio luminoso incide sobre a superfície da água.



Qual das figuras propostas a seguir representa corretamente o que acontece ao raio na vizinhança da superfície?



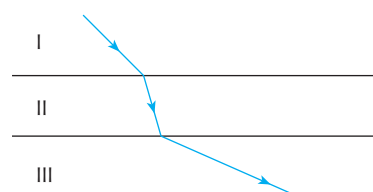
T. 282 (Vunesp) Um pincel de luz emerge de um bloco de vidro comum para o ar, na direção e no sentido indicados na figura.



Assinale a alternativa que melhor representa o percurso da luz no interior do vidro.

- a) A b) B c) C d) D e) E

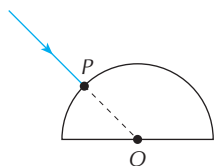
T. 283 (Covest-PE) A figura mostra o caminho de um raio de luz atravessando três líquidos não miscíveis, transparentes e superpostos.



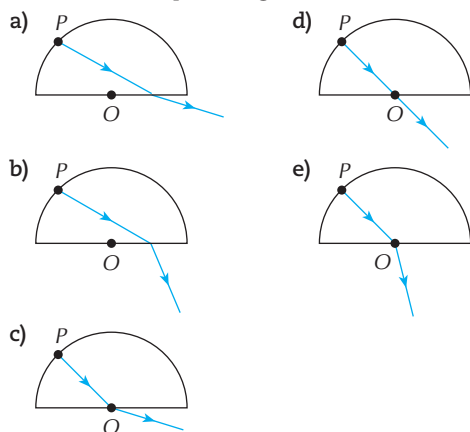
Examinando a trajetória da luz nos três líquidos, podemos afirmar que sua velocidade:

- a) é a mesma nos três líquidos.
- b) é maior no líquido I do que no líquido II.
- c) é menor no líquido I do que no líquido II.
- d) é a mesma nos líquidos I e III.
- e) é maior no líquido II do que no líquido III.

T. 284 (Mackenzie-SP) Na ilustração, o corpo de pequena espessura, constituído de acrílico transparente (índice de refração = 1,4), tem a forma de um semicírculo de centro O . Quando imerso no ar (índice de refração = 1,0), é atingido por um raio luminoso monocromático no ponto P .

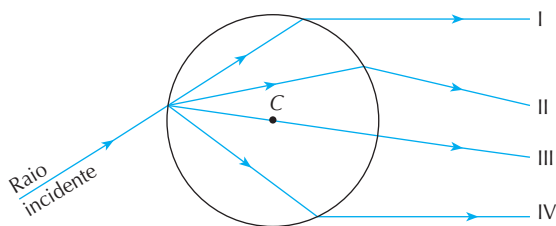


A alternativa que melhor representa a trajetória do raio luminoso após atingir P é:



T. 285 (UFG-GO) Dê como resposta a soma dos números que precedem as proposições corretas.

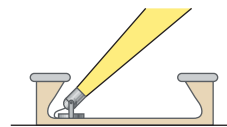
- (01) Da segunda lei da refração (lei de Snell-Descartes) concluímos que um raio de luz se afasta da normal ao passar de um meio menos refringente para um meio mais refringente.
- (02) Nos espelhos esféricos, todo raio que incide segundo um eixo secundário reflete sobre si mesmo.
- (04) Um raio de luz monocromática incide sobre a superfície lateral de um disco de vidro, imerso no ar. Sendo C o ponto por onde passa o eixo do disco, o caminho mais provável percorrido pelo raio é o de número II.



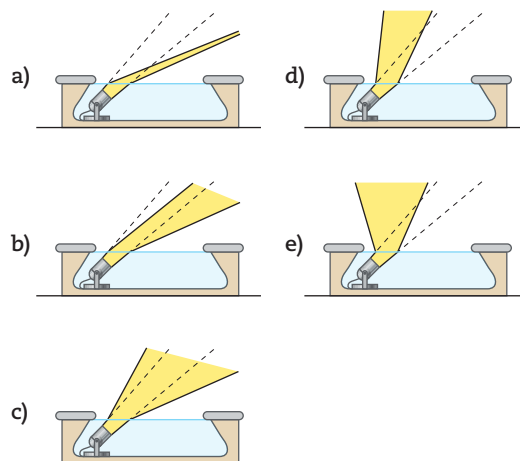
- (08) Um lápis parcialmente imerso num copo com água tem a aparência de estar “dobrado para baixo” na superfície da água. Esse fenômeno é devido à refração da luz.



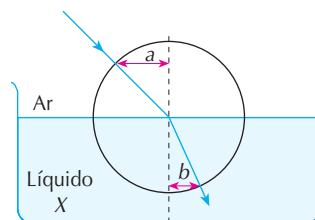
T. 286 (UFSCar-SP) Um canhão de luz foi montado no fundo de um lago artificial. Quando o lago se encontra vazio, o feixe produzido corresponde ao representado na figura.



Quando cheio de água, uma vez que o índice de refração da luz na água é maior que no ar, o esquema que melhor representa o caminho a ser seguido pelo feixe de luz é:



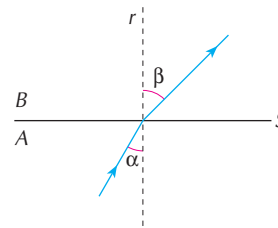
T. 287 (FEQ-CE) Em uma experiência faz-se um feixe luminoso passar do ar para um líquido transparente X . Através de um disco vertical (figura), foram medidas as distâncias: $a = 30$ cm; $b = 20$ cm.



O índice de refração do líquido X é:

- a) 0,6 b) 1,5 c) 2,0 d) 2,5

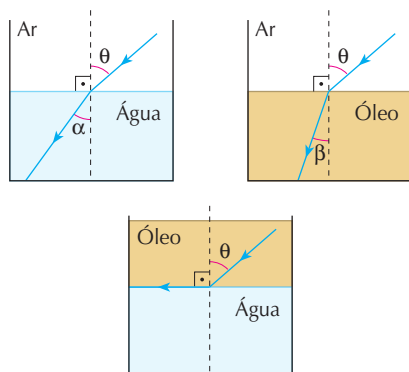
T. 288 (Fuvest-SP) Um raio de luz monocromática propaga-se em um meio A , incide na superfície S formando um ângulo α com a reta normal r e emerge no meio B formando um ângulo β com r .



Quando α vale 30° , β vale 45° . Qual o valor de β quando $\alpha = 45^\circ$?

- a) 15° b) 30° c) 60° d) 75° e) 90°

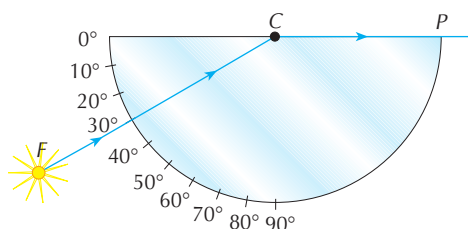
- T. 289** (FGV-SP) Em três experimentos distintos, um feixe de luz monocromática atinge a superfície de separação entre dois meios, segundo o mesmo ângulo θ .



Sabendo que o índice de refração da luz desse feixe para o ar tem valor 1 e considerando que a reta tracejada é a normal à superfície de separação dos meios no ponto de incidência, pode-se concluir que:

- $\sin \alpha = \sin^2 \beta$
- $\sin \beta = \sin^2 \alpha$
- $\sin \alpha = \sin \beta \cdot \sin \theta$
- $\sin \beta = \sin \alpha \cdot \sin \theta$
- $\sin \theta = \sin \alpha \cdot \sin \beta$

- T. 290** (UFMG) Observe a figura. Desejando determinar a velocidade da luz em um material transparente, uma pessoa construiu, com esse material, um meio disco de centro em C. Usando uma fonte de luz F, que emite um estreito feixe luminoso no ar, ela deslocou F em torno de C, verificando que se obtinha, na posição mostrada na figura, um raio CP tangente à face plana do disco.

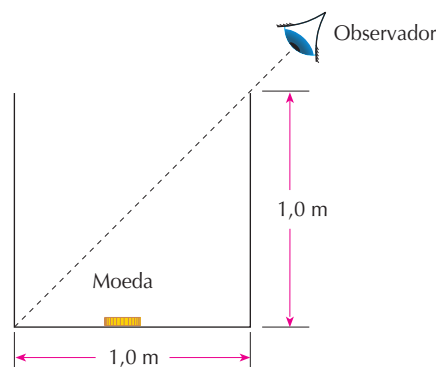


Considerando-se a velocidade de luz no ar igual a $3,0 \cdot 10^8$ m/s, e sabendo-se que $\sin 30^\circ = \cos 60^\circ = 0,50$ e que $\cos 30^\circ = \sin 60^\circ = 0,86$, o valor da velocidade da luz no meio transparente é:

- $3,5 \cdot 10^8$ m/s
- $3,0 \cdot 10^8$ m/s
- $2,6 \cdot 10^8$ m/s
- $2,0 \cdot 10^8$ m/s
- $1,5 \cdot 10^8$ m/s

- T. 291** (Mackenzie-SP) Um raio luminoso se propaga no vidro (índice de refração $= \sqrt{2}$) e atinge a superfície que separa esse meio do ar (índice de refração $= 1$), segundo um ângulo i com a normal no ponto de incidência. Com relação a esse fato, podemos afirmar que haverá:
- refração somente para $i \geq 45^\circ$.
 - refração somente para $i \leq 45^\circ$.
 - reflexão total somente para $i < 45^\circ$.
 - refração para qualquer valor de i .
 - reflexão total para qualquer valor de i .

- T. 292** (UFRN) Um observador, quando colocado numa posição adequada, pode no máximo ver o canto de um recipiente, como representado na figura abaixo.



Enchendo o recipiente com um líquido, o observador passa a ver a moeda que está colocada no centro. Qual é o índice de refração do líquido?

(Dados: $\sin 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2}$; índice de refração do ar $= 1,0$)

- 1,0
- $\sqrt{1,5}$
- $\sqrt{2,0}$
- $\sqrt{2,5}$
- $\sqrt{3,0}$

- T. 293** (PUC-MG) O fato de um brilhante (diamante lapidado) apresentar maior brilho do que sua imitação, feita de vidro, é devido:

- ao ângulo limite do diamante ser maior que o do vidro.
- ao comprimento de onda da luz no vidro ser menor que no diamante.
- ao índice de refração do diamante ser maior do que o do vidro.
- ao vidro não oferecer bom polimento.
- a não se poder lapidar um vidro com a mesma geometria permitida pelo diamante.

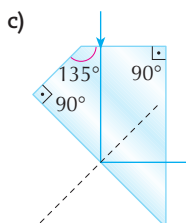
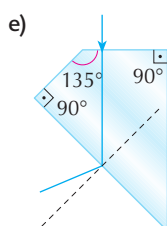
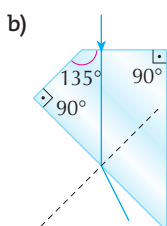
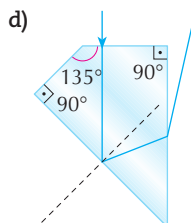
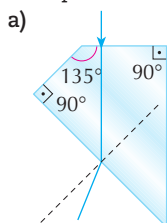
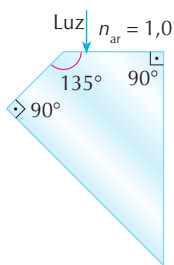
- T. 294** (UnB-DF) Um ladrão escondeu seu roubo numa caixa pendurada por uma corda de 2,4 m de comprimento e amarrada no centro de uma boia de base circular. A boia estava em águas de índice de refração $\frac{5}{4}$. De qualquer ponto da superfície era impossível a caixa ser vista devido à base da boia, cujo raio (mínimo) era de:

- 3,20 m
- 1,40 m
- 3,90 m
- 2,60 m
- nenhuma das anteriores

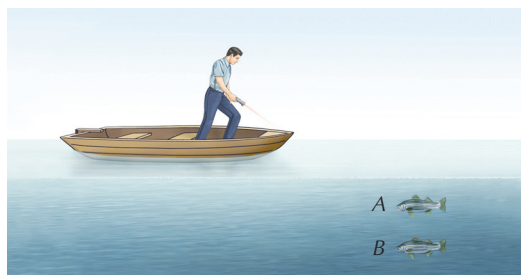
- T. 295** (Fuvest-SP) Um pássaro sobrevoa em linha reta e a baixa altitude uma piscina em cujo fundo se encontra uma pedra. Podemos afirmar que:

- com a piscina cheia, o pássaro poderá ver a pedra durante um intervalo de tempo maior do que se a piscina estivesse vazia.
- com a piscina cheia ou vazia, o pássaro poderá ver a pedra durante o mesmo intervalo de tempo.
- o pássaro somente poderá ver a pedra enquanto estiver voando sobre a superfície da água.
- o pássaro, ao passar sobre a piscina, verá a pedra numa posição mais profunda do que aquela em que ela realmente se encontra.
- o pássaro nunca poderá ver a pedra.

T. 296 (Olimpíada Brasileira de Física) A figura ao lado ilustra a seção longitudinal de um objeto transparente, cujo índice de refração vale $n = 2,4$. Um feixe luminoso propagando-se no ar incide perpendicularmente à face superior. Indique qual é a trajetória possível para o raio de luz.

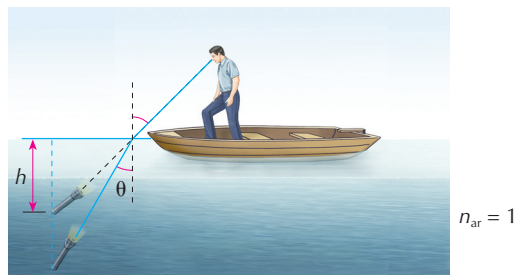


T. 297 (UFC-CE) Marcos está em seu barco, pescando em um lago, e deseja atingir um peixinho com um feixe de raios laser. Na figura, estão representados o peixe e sua imagem vista por Marcos. Pescador e peixe estão parados.



- Sobre a situação podemos afirmar corretamente:
- independentemente de qual seja a posição real do peixe, Marcos deverá orientar o laser para uma posição intermediária entre A e B.
 - o peixe está na posição A e, para atingi-lo, Marcos deverá apontar o laser para essa posição.
 - o peixe está na posição A, mas, para atingi-lo, Marcos deverá apontar o laser para a posição B.
 - o peixe está na posição B e, para atingi-lo, Marcos deverá apontar o laser para essa posição.
 - o peixe está na posição B, mas, para atingi-lo, Marcos deverá apontar o laser para a posição A.

T. 298 (ITA-SP) Um pescador deixa cair uma lanterna acesa em um lago a 10,0 m de profundidade. No fundo do lago, a lanterna emite um feixe luminoso formando um pequeno ângulo θ com a vertical (veja a figura).



Considere $\tan \theta \approx \sin \theta \approx \theta$ e o índice de refração da água $n = 1,33$. Então, a profundidade aparente h vista pelo pescador é igual a:

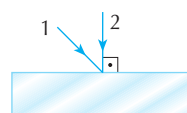
- 2,5 m
- 5,0 m
- 7,5 m
- 8,0 m
- 9,0 m

T. 299 (UFU-MG) A profundidade de uma piscina vazia é tal que sua parede, revestida com azulejos quadrados de 12 cm de lado, contém 12 azulejos justapostos verticalmente.

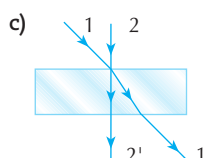
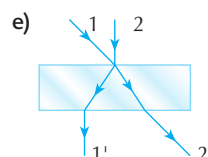
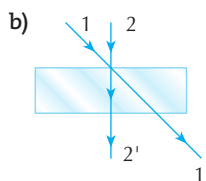
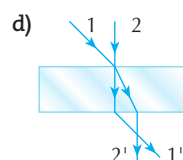
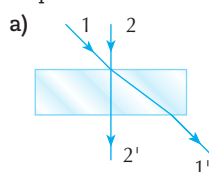
Um banhista, na borda da piscina cheia de água (índice de refração da água igual a $\frac{4}{3}$), olhando quase perpendicularmente, verá a parede da piscina formada por:

- 12 azulejos de 9 cm de lado vertical.
- 9 azulejos de 16 cm de lado vertical.
- 16 azulejos de 9 cm de lado vertical.
- 12 azulejos de 12 cm de lado vertical.
- 9 azulejos de 12 cm de lado vertical.

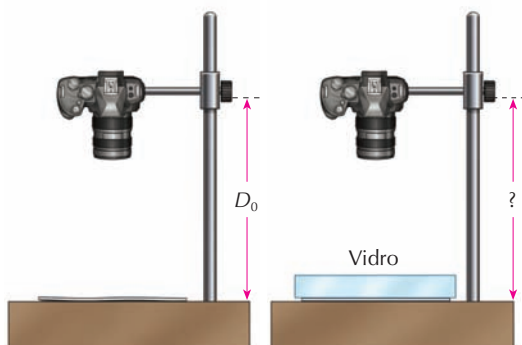
T. 300 (PUC-Campinas-SP) Uma lâmina de vidro, de faces paralelas, está imersa no ar. Dois raios luminosos monocromáticos 1 e 2 incidem sobre uma das faces da lâmina, conforme o esquema ao lado.



Os percursos desses raios luminosos, ao atravessarem a lâmina, estão mais bem representados no esquema:



- T. 301** (Fuvest-SP) Certa máquina fotográfica é fixada a uma distância D_0 da superfície de uma mesa, montada de tal forma a fotografar, com nitidez, um desenho em uma folha de papel que está sobre a mesa.



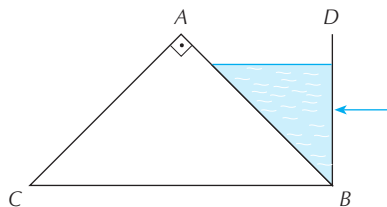
Desejando manter a folha esticada, é colocada sobre ela uma placa de vidro, com 5 cm de espessura. Nessa nova situação, pode-se fazer com que a fotografia continue igualmente nítida:

- aumentando D_0 de menos de 5 cm.
- aumentando D_0 de mais de 5 cm.
- reduzindo D_0 de menos de 5 cm.
- reduzindo D_0 de 5 cm.
- reduzindo D_0 de mais de 5 cm.

- T. 302** (Mackenzie-SP) Qualquer que seja a forma e a posição de um objeto, visto por um observador através de uma lâmina de vidro de faces paralelas, no ar, sua imagem é:

- virtual e mais próxima da lâmina.
- virtual e mais afastada da lâmina.
- real e mais próxima da lâmina.
- real e mais afastada da lâmina.
- nenhuma das anteriores.

- T. 303** (ITA-SP) Um prisma de vidro, de índice de refração $n = \sqrt{2}$, tem por seção normal um triângulo retângulo isósceles ABC no plano vertical. O volume de seção transversal ABD é mantido cheio de um líquido de índice de refração $n' = \sqrt{3}$. Um raio incide normalmente à face transparente da parede vertical BD e atravessa o líquido.



Considere as seguintes afirmações:

- O raio luminoso não penetrará no prisma.
- O ângulo de refração na face AB é de 45° .
- O raio emerge do prisma pela face AC com ângulo de refração de 45° .
- O raio emergente definitivo é paralelo ao raio incidente em BD .

Das afirmativas mencionadas, é (são) correta(s):

- apenas I.
- apenas I e IV.
- apenas II e III.
- apenas III e IV.
- II, III e IV.

- T. 304** (Fuvest-SP) Um raio monocromático de luz incide no ponto A de uma das faces de um prisma feito de vidro e imerso no ar. A figura I representa apenas o raio incidente I e o raio refratado R num plano normal às faces do prisma, cujas arestas são representadas pelos pontos P, S e T , formando um triângulo equilátero. Os pontos A, B e C também formam um triângulo equilátero e são, respectivamente, equidistantes de P e S , S e T , e T e P . Considere os raios E_1, E_2, E_3, E_4 e E_5 , que se afastam do prisma, representados na figura II.

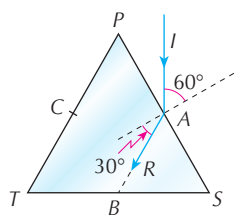


Figura I.

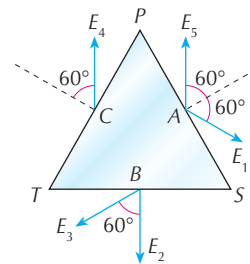


Figura II.

Podemos afirmar que os raios compatíveis com as reflexões e refrações sofridas pelo raio incidente I , no prisma, são:

- somente E_3 .
- somente E_1 e E_3 .
- somente E_2 e E_5 .
- somente E_1, E_3 e E_4 .
- todos (E_1, E_2, E_3, E_4 e E_5).

- T. 305** (Mackenzie-SP) Para que haja desvio mínimo em um prisma é necessário que:

- o ângulo de refração, no interior do prisma, seja igual à metade do ângulo de refringência.
- o ângulo de refração, no interior do prisma, seja igual ao ângulo de refringência.
- o ângulo de incidência seja igual à metade do ângulo de emergência.
- o ângulo de refringência seja igual ao dobro do ângulo limite.
- nenhuma das anteriores.

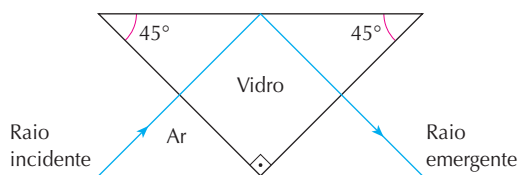
- T. 306** (Uerj) Quando o raio incidente sobre uma das faces de um prisma toma, no interior deste, uma direção perpendicular ao plano bisetor do ângulo de refringência do prisma, podemos concluir que:

- o desvio produzido pelo prisma é mínimo.
- o desvio produzido pelo prisma é máximo.
- o ângulo de incidência é maior que o de emergência.
- o ângulo de incidência é menor que o de emergência.
- todas as respostas acima estão erradas.

- T. 307** (Uerj) Um prisma óptico de abertura 90° não permite que se obtenham desvios menores do que 30° sobre os raios luminosos que o atravessam no ar. O índice de refração desse prisma em relação ao ar vale:

- $\frac{\sqrt{6}}{2}$
- $\frac{4}{3}$
- $\frac{\sqrt{3}}{2}$
- $\frac{\sqrt{3}}{3}$
- nenhuma das anteriores

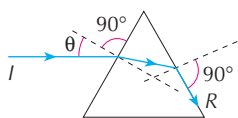
T. 308 (Fuvest-SP) Alguns instrumentos de óptica utilizam “prismas de reflexão total” como espelhos, como no caso da figura.



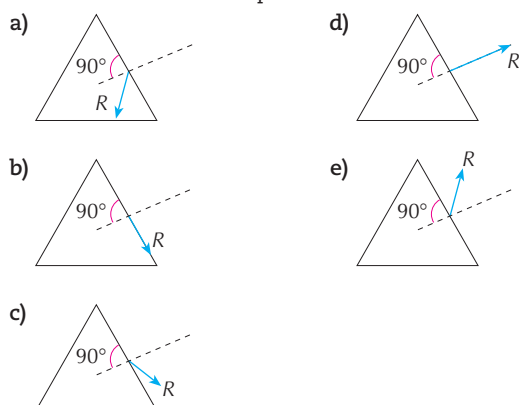
O valor do índice de refração do vidro desse prisma deve ser maior que:

- a) 2,00 c) 1,41 e) 0,707
b) 1,73 d) 1,00

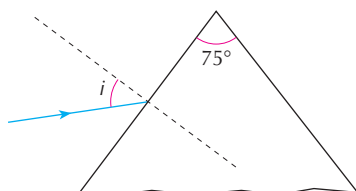
T. 309 (Vunesp) Um raio de luz I , de uma única cor, incide num prisma e descreve o caminho mostrado na figura.



Se o ângulo θ for diminuído, a trajetória do raio R será mais bem descrita por:



T. 310 (Unitau-SP) O ângulo de refringência de um prisma óptico é 75° .



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

Um raio luminoso incide na face desse prisma, cujo índice de refração é $\sqrt{2}$. Então, podemos afirmar que:

- a) todos os raios incidentes serão emergentes.
b) não haverá raio emergente.
c) se o raio incidente tiver ângulo de incidência menor do que 30° , será emergente.
d) só emergem os raios cujo $i \geq 45^\circ$.
e) nenhuma das anteriores.

T. 311 (UFG-GO) Considere um estreito feixe de luz branca incidindo sobre um bloco de vidro. A refração desse feixe no vidro dá origem a um espectro colorido, no qual se observam as seguintes cores, na ordem decrescente de suas velocidades de propagação: vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, anil e violeta. O feixe violeta refratado é, então, direcionado a um prisma. Nesse fenômeno:

1. () a dispersão da luz branca ocorre porque o índice de refração do bloco de vidro é diferente para cada uma das cores.
2. () o desvio da luz violeta é menor do que o desvio da luz vermelha, quando ambas emergem do bloco de vidro.
3. () o feixe violeta, ao passar pelo prisma, dará origem a um novo espectro colorido.
4. () se a secção principal do prisma for um triângulo retângulo isósceles, e o feixe violeta incidir perpendicularmente sobre uma das faces, será observada a reflexão interna total. Nesse caso, considere que o ângulo limite é igual a 48° .

T. 312 (PUC-SP) O índice de refração de um certo meio é $\sqrt{2}$ para a luz vermelha e $\sqrt{3}$ para a violeta. Dois raios luminosos monocromáticos, um vermelho e outro violeta, após propagarem-se no meio considerado, passam para o ar. O ângulo de incidência de ambos é de 30° .

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

O ângulo formado pelos dois raios refratados entre si vale:

- a) 0° b) 15° c) 30° d) 45° e) 60°

T. 313 (PUC-Campinas-SP) Os raios de luz provenientes de uma estrela (E), ao atravessar a atmosfera, sofrem desvios, dando-nos a impressão de que a estrela está mais alta (E') do que realmente está (figura 1). Também, por isso, pode-se observar a imagem do Sol (S') mesmo depois que ele (S) se pôs no horizonte ou antes de nascer (figura 2).

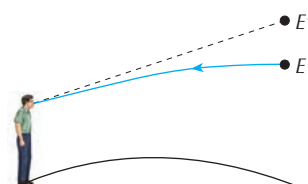


Figura 1.

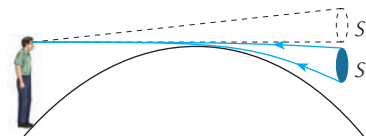


Figura 2.

Esses fatos ocorrem, principalmente, devido à:

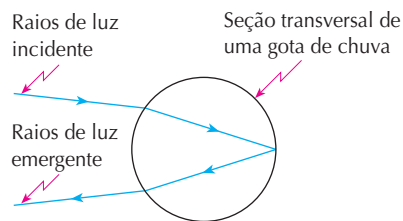
- a) variação de índice de refração do ar com a altitude.
b) variação de índice de refração do ar com a longitude.
c) variação de índice de refração do ar com a latitude.
d) dispersão da luz ao atravessar a atmosfera.
e) forma esférica da Terra e à atração gravitacional sofrida pela Lua.



T. 314 (UFBA) Dê como resposta a soma dos números que precedem as proposições corretas. É comum, em estradas retas e longas, ter-se a impressão de ver o asfalto molhado à nossa frente em dias quentes de verão. Diante desse fenômeno, pode-se argumentar que:

- (01) como a densidade absoluta do ar diminui com o aumento da temperatura, os raios luminosos que atingem os olhos do observador curvam-se para cima.
- (02) sendo a atmosfera constituída de inúmeras camadas horizontais superpostas, a refringência diminui de cima para baixo, nas camadas próximas ao solo.
- (04) as camadas de ar podem ser consideradas um conjunto de dioptrios planos através dos quais a luz que chega aos olhos do observador sofre múltiplas refrações.
- (08) à medida que um raio luminoso proveniente das camadas mais elevadas se aproxima do solo, vai-se avizinando da normal até um valor limite, saindo rasante à última camada.
- (16) após a reflexão total, os raios luminosos passam a propagar-se em direção às camadas superiores, diminuindo progressivamente de velocidade.
- (32) a ilusão de óptica caracterizada pela impressão de ver o asfalto molhado resulta da luminosidade refletida especularmente pelas camadas quentes de ar, próximas do solo.

T. 315 (UnB-DF) A figura abaixo mostra uma seção transversal de uma gota de chuva considerada esférica sendo atingida por um raio de luz monocromática.



Ele incide e refrata-se na superfície da gota; em seguida, reflete-se na superfície interior; e, finalmente, refrata-se, produzindo o raio emergente. Esse é o princípio da formação do arco-íris, em dias chuvosos. Com o auxílio das informações apresentadas, julgue os itens a seguir.

- (1) Considerando a luz solar como um feixe de raios paralelos, então os seus ângulos de incidência sobre a superfície da gota de chuva variam de 0° a 90° .
- (2) Se o índice de refração da gota de chuva fosse independente da cor da luz incidente, não haveria dispersão da luz solar.
- (3) Uma gota-d'água é capaz de refratar apenas sete das cores provenientes da luz solar.
- (4) Na situação apresentada, a lei de Snell não pode ser usada para explicar a formação do arco-íris, pois ela não se aplica a superfícies esféricas.