

Juntao estas três idéias, temos:

$$F_g = \frac{c}{IA} = \frac{P_S R^2}{4\pi r^2 c} = \frac{4\pi^2 c}{P_S R^2} \quad (33-37)$$

**Força gravitacional: a idéia Fundamental** neste caso é a lei da gravitação de Newton (Eq. 13-1), segundo a qual o módulo da força gravitacional que age sobre a partícula é dado por

$$F_g = \frac{GM_S m}{r^2} \quad (33-38)$$

onde  $M_S$  é a massa do Sol e  $m$  é a massa da partícula. A massa da partícula está relacionada à densidade  $\rho$  e ao volume  $V$  ( $= 4\pi R^3/3$ , para uma esfera) através da equação

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{4}{3}\pi R^3$$

Explicitando  $m$  e substituindo na Eq. 33-38, temos:

$$F_g = \frac{GM_S \rho \left(\frac{4}{3}\pi R^3\right)}{r^2} \quad (33-39)$$

Substituindo as Eqs. 33-37 e 33-39 na Eq. 33-36 e explicitando  $R$ , obtemos:

$$R = \frac{16\pi c p G M_S}{3P_S}$$

### 33-7 Polarização

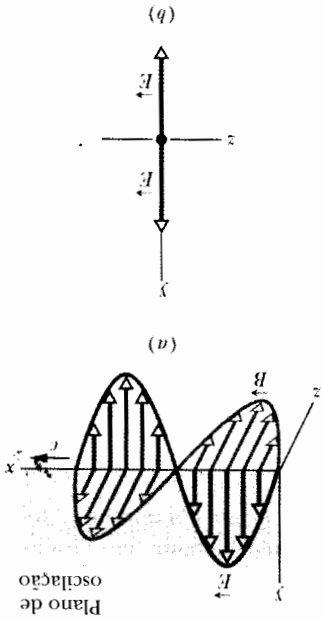
As antenas de televisão inglesas são orientadas na vertical, mas as americanas são orientadas na horizontal. A diferença se deve à direção de oscilação das ondas eletromagnéticas que transportam o sinal de televisão. Na Inglaterra, o equipamento de transmissão é projetado para gerar ondas polarizadas **verticalmente**, ou seja, cujo campo elétrico oscila na vertical. Assim, para que o campo elétrico das ondas de televisão produza uma corrente na antena (e portanto forneça um sinal ao receptor de televisão), é preciso que a antena esteja na vertical. Nos Estados Unidos, as ondas são polarizadas horizontalmente.\*

As ondas eletromagnéticas geradas por um canal de televisão têm sempre a mesma polarização, mas as ondas eletromagnéticas emitidas por uma fonte de luz comum (como o Sol ou uma lâmpada elétrica) são **polarizadas aleatoriamente** ou **não-polarizadas** (os dois termos têm o mesmo significado). Isto quer dizer que a direção do campo elétrico muda aleatoriamente com o tempo, embora se mantenha perpendicular à direção de propagação da onda. Assim, se representarmos a onda vista de frente durante um certo intervalo de tempo, não teremos um desenho sim-

### Luz Polarizada

vo do eixo  $y$ .

A Fig. 33-10a mostra uma onda eletromagnética com o campo elétrico oscilando paralelamente ao eixo vertical  $y$ . O plano que contém o vetor  $E$  é chamado de **plano de polarização da onda** (é por isso que dizemos que uma onda *luz* como a da Fig. 54-10 está polarizada na direção  $y$ ). Podemos representar a *luz* vista frontal da onda mostrando a direção das oscilações do campo elétrico em uma vista frontal do plano de oscilação, como na Fig. 33-10b. A seta de duas cabeças indica que, quando a onda passa por nós, o campo elétrico oscila verticalmente, isto é, alterna continuamente entre o sentido positivo e o sentido negativo do eixo  $y$ .



**Fig. 33-10** (a) O plano de oscilação de uma onda eletromagnética polarizada. Para representar a polarização, mostramos uma vista "frontal" da onda e indicamos a direção das oscilações do campo elétrico através de uma seta de duas cabeças. (b) Para representar a polarização, mostramos uma vista "frontal" da onda e indicamos a direção das oscilações do campo elétrico através de uma seta de duas cabeças.

Partículas de poeira de raio  $R \approx 1,7 \times 10^{-7}$  m possuem trajetórias aproximadamente retilíneas, como a trajetória *b* da Fig. 33-9. No caso de valores maiores de  $R$ , a comparação das Eqs. 33-37 e 33-39 mostra que, como  $F_g$  varia com  $R^3$  e  $F_r$  varia com  $R^2$ , a força gravitacional  $F_g$  é maior que a força de radiação  $F_r$ . Assim, estas partículas seguem uma trajetória que se curva em direção ao Sol, como a trajetória *c* da Fig. 33-9. Analogamente, no caso de valores menores de  $R$ , a força de radiação é maior que a força gravitacional e a partícula segue uma trajetória encurvada para longe do Sol, como a trajetória *a*. A cauda de poeira do cometa é formada pela combinação destas partículas.

Observe que este resultado não depende da distância  $r$  entre a partícula e o Sol.

$$R = \frac{(3)(3,9 \times 10^{26} \text{ W})}{7,0 \times 10^{33} \text{ N/s}} = 1,7 \times 10^{-7} \text{ m. (Resposta)}$$

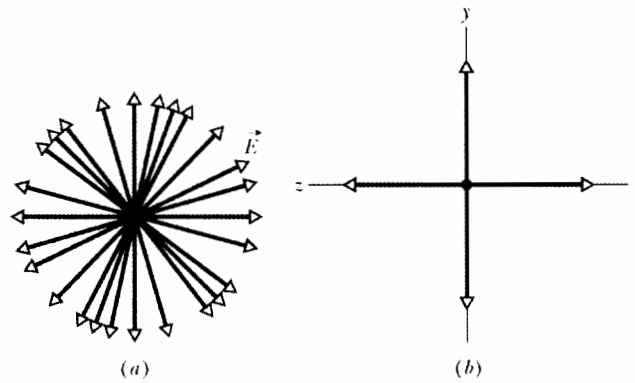
Usando o valor de  $P_S$  que aparece no Apêndice C, temos:

$$(16\pi)(3 \times 10^8 \text{ m/s})(3,5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3) \times (6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2)(1,99 \times 10^{30} \text{ kg}) = 7,0 \times 10^{33} \text{ N/s.}$$

Usando o valor dado de  $\rho$  e os valores conhecidos de  $G$  (Apêndice A) e  $M_S$  (Apêndice C), podemos calcular o denominador:

\* No Brasil, as ondas de televisão também são polarizadas horizontalmente. (N. do T.)

**Fig. 33-11** (a) A luz não-polarizada é formada por ondas com o campo elétrico em diferentes direções. Na ilustração, as ondas estão todas se propagando na mesma direção, perpendicularmente para fora do papel, e têm a mesma amplitude  $E$ . (b) Uma outra forma de representar a luz não-polarizada. A luz é a superposição de duas ondas polarizadas cujos planos de oscilação são mutuamente perpendiculares.



ples como o da Fig. 33-10b, mas uma série de setas, como na Fig. 33-11a, cada uma com uma orientação diferente.

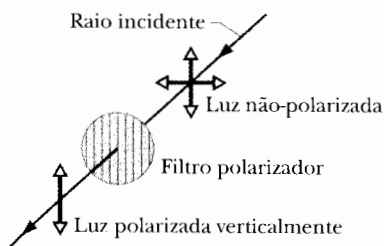
Em princípio, é possível simplificar o desenho representando os campos elétricos da Fig. 33-11a através das componentes  $y$  e  $z$ . Nesse caso, a luz não-polarizada pode ser representada por duas setas de duas cabeças, como na Fig. 33-11b. A seta paralela ao eixo  $y$  representa as oscilações da componente  $y$  do campo elétrico e a seta paralela ao eixo  $z$  representa as oscilações da componente  $z$  do campo elétrico. Ao adotarmos esta representação, estamos transformando a luz não-polarizada em uma combinação de duas ondas polarizadas cujos planos de oscilação são mutuamente perpendiculares: um destes planos contém o eixo  $y$  e o outro o eixo  $z$ . Uma das razões para fazer esta mudança é que é muito mais fácil desenhar a Fig. 33-11b que a Fig. 33-11a.

Podemos desenhar figuras semelhantes para representar uma onda **parcialmente polarizada**, isto é, uma onda cujo campo elétrico passa mais tempo em certas direções do que em outras. Neste caso, desenhamos uma das setas mais comprida que a outra.

É possível transformar a luz não-polarizada em polarizada fazendo-a passar por um *filtro polarizador*, como mostra a Fig. 33-12. Estes filtros, conhecidos comercialmente como filtros Polaroid, foram inventados em 1932 por Edwin Land quando era um estudante universitário. Um filtro polarizador é uma folha de plástico que contém moléculas longas. Durante o processo de fabricação, a folha é esticada, o que faz com que as moléculas se alinhem. Quando a luz passa pela folha, as componentes do campo elétrico paralelas às moléculas conseguem atravessá-la, mas as componentes perpendiculares às moléculas são absorvidas e desaparecem.

Em vez de examinar o comportamento individual das moléculas, é possível atribuir ao filtro como um todo uma *direção de polarização*, ao longo da qual as componentes do campo elétrico são transmitidas:

➡ As componentes do campo elétrico paralelas à direção de polarização são transmitidas por um filtro polarizador; as componentes perpendiculares são absorvidas.



**Fig. 33-12** A luz não-polarizada se torna polarizada depois de passar por um filtro polarizador; a direção de polarização é a mesma do filtro, representada na ilustração por retas verticais.

Assim, o campo elétrico da luz que emerge do filtro consiste apenas nas componentes paralelas à direção de polarização do filtro; isto significa que a luz está polarizada nesta direção. Na Fig. 33-12, as componentes verticais do campo elétrico são transmitidas pelo filtro e as componentes horizontais são absorvidas. Isto faz com que a onda transmitida seja polarizada verticalmente.

### Intensidade da Luz Polarizada Transmitida

Vamos considerar agora a intensidade da luz transmitida por um filtro polarizador. Começamos com luz não-polarizada, cujas oscilações do campo elétrico podemos separar em componentes  $y$  e  $z$ , como na Fig. 33-11b. Além disso, podemos supor que

o eixo  $y$  seja paralelo à direção de polarização do filtro. Neste caso, apenas as componentes  $y$  do campo elétrico da luz são transmitidas pelo filtro; as componentes  $z$  são absorvidas. Como mostra a Fig. 33-11b, se a orientação do campo elétrico na onda original é aleatória, a soma das componentes  $y$  tem o mesmo valor que a soma das componentes  $z$ . Quando as componentes  $z$  são absorvidas, metade da intensidade  $I_0$  da onda original é perdida. A intensidade  $I$  da luz que emerge do filtro é, portanto,

$$I = \frac{1}{2} I_0 \quad (33-40)$$

Esta é a chamada *regra da metade*, que só é válida se a luz que incide no filtro polarizador for não-polarizada.

Suponha agora que a luz que incide em um filtro polarizador já seja polarizada.

A Fig. 33-13 mostra um filtro polarizador no plano do papel e o campo elétrico  $E$  em uma onda polarizada antes de passar pelo filtro. Podemos separar o campo  $E$  em duas componentes em relação à direção de polarização do filtro: a componente paralela  $E_y$ , que é transmitida pelo filtro, e a componente perpendicular  $E_z$ , que é absorvida. Como  $\theta$  é o ângulo entre  $E$  e a direção de polarização do filtro, a componente paralela transmitida é dada por

$$E_y = E \cos \theta \quad (33-41)$$

A intensidade de uma onda eletromagnética (como a nossa onda luminosa) é proporcional ao quadrado do módulo do campo elétrico (Eq. 33-26,  $I = E_{\text{rms}}^2 / c\mu_0$ ). No caso que estamos examinando, portanto, a intensidade  $I$  da onda emergente é proporcional a  $E_y^2$  e a intensidade  $I_0$  da onda original é proporcional a  $E^2$ . Assim, de acordo com a Eq. 33-41,  $I/I_0 = \cos^2 \theta$  e portanto

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (33-42)$$

Esta é a chamada *regra do co-seno ao quadrado*, que só é válida se a luz que incide no filtro polarizador for polarizada. Neste caso, a intensidade  $I$  da luz transmitida é máxima e igual à intensidade inicial  $I_0$  quando a direção da polarização da luz é paralela à direção de polarização do filtro (ou seja, quando  $\theta$  na Eq. 33-42 é igual a  $0^\circ$ ).  $I$  é zero quando a direção de polarização da luz é perpendicular à direção de polarização do filtro (ou seja, quando  $\theta$  é igual a  $90^\circ$ ).

A Fig. 33-14 mostra um arranjo no qual uma luz inicialmente não-polarizada passa por dois filtros polarizadores,  $P_1$  e  $P_2$ . (O primeiro filtro é às vezes chamado de *polarizador* e o segundo de *analisador*.) Como a direção de polarização de  $P_1$  é a vertical, a luz que emerge de  $P_1$  está polarizada verticalmente. Se a direção de polarização de  $P_2$  também for a vertical, toda a luz que chega a  $P_2$  será transmitida. Se a direção de polarização de  $P_2$  for a horizontal, toda a luz que chega a  $P_2$  será absorvida. Chegamos à mesma conclusão considerando apenas as orientações *relativas* dos dois filtros: se as direções de polarização forem paralelas, toda a luz que passar pelo primeiro filtro passará também pelo segundo. Se as direções forem perpendiculares (caso em que dizemos que os filtros estão  *cruzados* ), não passará nenhuma luz pelo segundo filtro. Estes dois casos extremos são mostrados com óculos polarizados na Fig. 33-15.

Finalmente, se as duas direções de polarização da Fig. 33-14 fizerem um ângulo entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , parte da luz que passar por  $P_1$  também passará por  $P_2$ . A intensidade da luz transmitida por  $P_2$  será dada pela Eq. 33-42.

Existem outros meios de polarizar a luz além dos filtros polarizadores. A luz também pode ser polarizada por reflexão (como será discutido na Seção 33-10) ou por espalhamento. No *espalhamento*, a luz absorvida por um átomo ou molécula é emitida novamente em outra direção. Um exemplo é o espalhamento da luz solar pelas moléculas da atmosfera; se não fosse por este espalhamento, o céu seria escuro mesmo durante o dia.

Embora a luz solar direta seja não-polarizada, a luz proveniente do resto do céu é parcialmente polarizada. As abelhas usam esta polarização para se orientar. Os

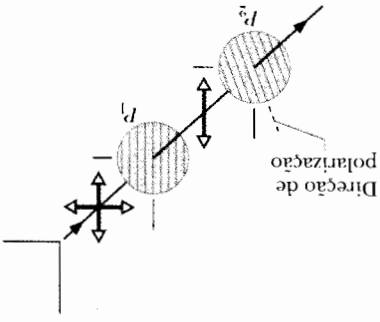


Fig. 33-14 A luz transmitida pelo filtro polarizador  $P_1$  está polarizada verticalmente, como indica a seta de duas cabeças. A quantidade de luz transmitida pelo filtro polarizador  $P_2$  depende do ângulo entre a direção de polarização de  $P_1$  e a direção de polarização de  $P_2$ , indicada pelas retas no interior do filtro e pela linha tracejada.

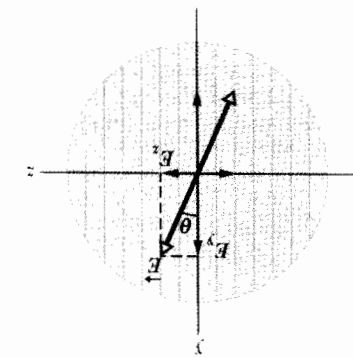
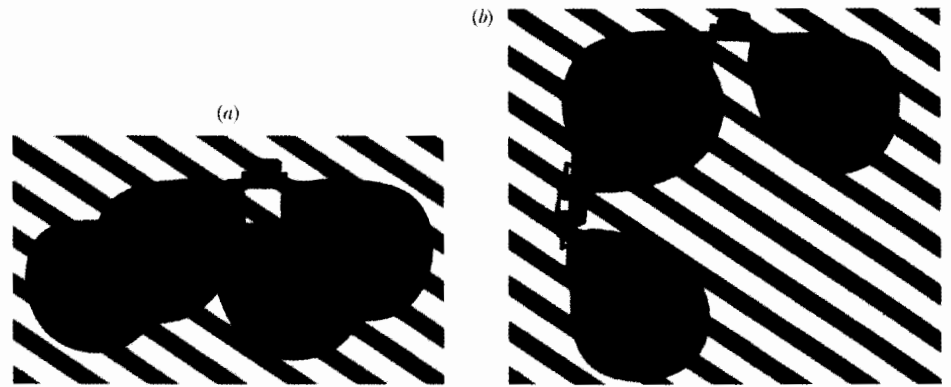


Fig. 33-13 Luz polarizada preses a atravessar um filtro polarizador. O campo elétrico  $E$  da luz pode ser separado nas componentes  $E_y$  (paralela à direção de polarização do filtro) e  $E_z$  (perpendicular à direção de polarização do filtro). A componente  $E_y$  atravessa o filtro, enquanto a componente  $E_z$  é absorvida.

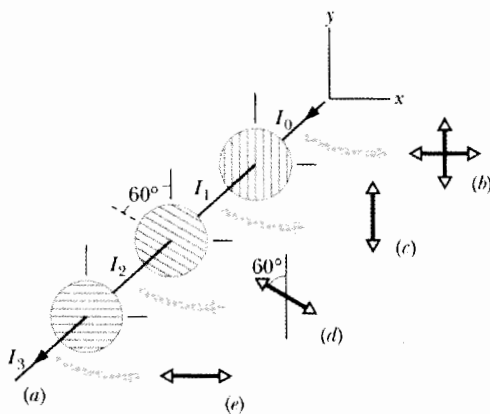


**Fig. 33-15** Muitos óculos de sol utilizam filtros polarizadores orientados na vertical, que absorvem a luz polarizada horizontalmente quando a pessoa está de pé ou sentada. (a) A maior parte da luz passa por dois óculos com filtros polarizadores quando a direção de polarização dos filtros coincide, mas (b) a maior parte da luz é absorvida quando as direções de polarização dos dois filtros são perpendiculares.

viquingues também usavam a polarização da luz do céu para navegar no mar do Norte quando o céu estava claro mas o Sol se encontrava abaixo do horizonte (por causa da alta latitude do mar do Norte). Estes navegantes antigos descobriram que as cores dos cristais de uma certa substância (hoje conhecida como cordierita) variava de acordo com o ângulo de incidência de uma luz polarizada. Olhando para o céu através de um desses cristais e fazendo-o girar, podiam determinar a posição do Sol e portanto as direções dos pontos cardeais.

**Problema Resolvido 33-3**

A Fig. 33-16a, desenhada em perspectiva, mostra um conjunto de três filtros polarizadores sobre o qual incide um feixe de luz inicialmente não-polarizada. A direção de polarização do primeiro filtro é paralela ao eixo y, a do segundo faz um ângulo de 60° com a primeira no sentido anti-horário e a do terceiro é paralela ao eixo x. Que fração da intensidade inicial  $I_0$  da luz sai do conjunto e em que direção esta luz está polarizada?



**Fig. 33-16** (a) Um raio de luz inicialmente não-polarizada, de intensidade  $I_0$ , atravessa um conjunto de três filtros polarizadores. As intensidades  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$  da luz em vários pontos do percurso estão indicadas na figura. Também estão indicadas as polarizações, em vistas frontais, (b) da luz inicial e da luz transmitida (c) pelo primeiro filtro; (d) pelo segundo filtro; (e) pelo terceiro filtro.

**Solução:** As **Idéias Fundamentais** são as seguintes:

1. O cálculo deve ser realizado filtro por filtro, começando pelo filtro no qual a luz incide inicialmente.
2. Para determinar a intensidade da luz transmitida por um dos filtros, basta aplicar a regra da metade (se a luz incidente no filtro não estiver polarizada) ou a regra do co-seno ao quadrado (se a luz incidente no filtro já estiver polarizada).
3. A direção de polarização da luz transmitida por um filtro polarizador é sempre igual à direção de polarização do filtro.

*Primeiro filtro:* a luz original está representada na Fig. 33.16b por duas setas de duas cabeças, como na Fig. 33-11b. Como a luz incidente no primeiro filtro é não-polarizada, a intensidade  $I_1$  da luz transmitida pelo primeiro filtro é dada pela regra da metade (Eq. 33-40):

$$I_1 = \frac{1}{2}I_0.$$

Como a direção de polarização do primeiro filtro é paralela ao eixo y, a polarização da luz transmitida pelo filtro também é paralela ao eixo y, como mostra a seta de duas cabeças da Fig. 33-16c.

*Segundo filtro:* como a luz que chega ao segundo filtro é polarizada, a intensidade  $I_2$  da luz transmitida por este filtro é dada pela regra do co-seno ao quadrado (Eq. 33-42). O ângulo  $\theta$  é o ângulo entre a direção de polarização da luz incidente (paralela ao eixo y) e a direção de polarização do segundo filtro (fazendo um ângulo de 60° com o eixo y no sentido anti-horário). Assim,  $\theta = 60^\circ$ . Nesse caso,

$$I_2 = I_1 \cos^2 60^\circ.$$

A direção de polarização da luz transmitida é paralela à direção de polarização do segundo filtro, ou seja, faz um ângulo de 60° com o

eixo  $y$  no sentido anti-horário, como mostra a seta de duas cabeças da Fig. 33-16d. *Terceiro filtro*: como a luz que chega ao terceiro filtro é polarizada, a intensidade  $I_3$  da luz transmitida por este filtro é dada pela regra do co-seno ao quadrado. O ângulo  $\theta$  agora é o ângulo entre a direção de polarização da luz incidente no terceiro filtro (Fig. 33-16d) e a direção de polarização do terceiro filtro (paralela ao eixo  $x$ ). Assim,  $\theta = 30^\circ$  e portanto

$$I_3 = I_2 \cos^2 30^\circ.$$

A luz que sai do terceiro filtro está polarizada paralelamente ao eixo  $x$  (Fig. 33-16e). Para determinar a intensidade desta luz, substituímos  $I_2$  por seu valor em função de  $I_1$  e  $I_1$  por seu valor em função de  $I_0$ .

$$I_3 = I_2 \cos^2 30^\circ = (I_1 \cos^2 60^\circ) \cos^2 30^\circ$$

$$= (\frac{1}{4} I_0) \cos^2 60^\circ \cos^2 30^\circ = 0,094 I_0.$$

Assim,  $\frac{I_3}{I_0} = 0,094$ . (Resposta)

Isto significa que a luz que sai do conjunto tem apenas 9,4% da intensidade da luz que incide no conjunto. (Se removermos o segundo filtro, que fração da luz incidente deixará o sistema?)

### 33-8 Reflexão e Refração

Embora as ondas luminosas se espalhem ao se afastarem de uma fonte, a hipótese de que a luz se propaga em linha reta, como na Fig. 33-5a, constitui frequentemente uma boa aproximação. O estudo das propriedades das ondas luminosas usando esta aproximação é chamado de *ótica geométrica*. No restante deste capítulo e em todo o Capítulo 34, vamos discutir a ótica geométrica da luz visível.

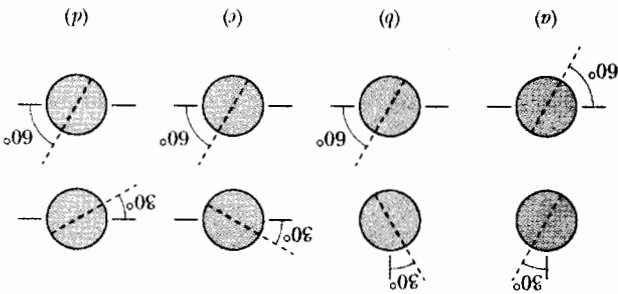
A fotografia da Fig. 33-17a mostra um exemplo de ondas luminosas que se propagam aproximadamente em linha reta. Um feixe luminoso estreito (o feixe incidente), proveniente da esquerda e se propagando no ar, encontra uma superfície plana de vidro. Parte da luz é **refletida** pela superfície, formando um feixe que se propaga para cima e para a direita, como se o feixe original tivesse ricocheteadado na superfície. O resto da luz penetra no vidro, formando um feixe que se propaga para baixo e para a direita. Como a luz pode se propagar no vidro, dizemos que o vidro é *transparente*. (Neste capítulo, vamos considerar apenas substâncias transparentes.) A passagem da luz por uma superfície (ou *interface*) que separa dois meios diferentes é chamada de **refração**. A menos que o raio incidente seja perpendicular à interface, a refração muda a direção de propagação da luz. Observe na Fig. 33-17a que a mudança de direção ocorre apenas na interface; dentro do vidro, a luz se propaga em linha reta, como no ar.

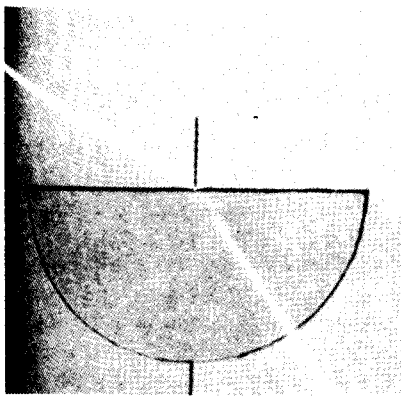
Na Fig. 33-17b, os feixes luminosos da fotografia estão representados por um raio incidente, um raio refletido e um raio refratado (e frentes de onda associadas). A orientação destes raios é medida em relação a uma direção, conhecida como *normal*, que é perpendicular à interface no ponto em que ocorrem a reflexão e a refração. Na Fig. 33-17b, o **ângulo de incidência** é  $\theta_i$ , o **ângulo de reflexão** é  $\theta_r$  e o **ângulo de refração** é  $\theta_t$ ; todos estes ângulos são medidos em relação à normal, como mostra a figura. O plano que contém o raio incidente e a normal é o plano de incidência, que é o plano do papel na Fig. 33-17b. Os resultados experimentais mostram que a reflexão e a refração obedecem às seguintes leis:

**Lei da reflexão**: o raio refletido está no plano de incidência e tem um ângulo de reflexão igual ao ângulo de incidência. Na Fig. 33-17b, isto significa que

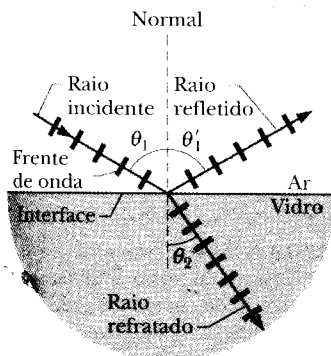
$$\theta_r = \theta_i \quad (\text{reflexão}). \quad (33-43)$$

**PONTO DE VERIFICAÇÃO 4** A figura mostra quatro pares de filtros polarizadores, vistos de frente. Cada par é montado no caminho de um feixe de luz inicialmente não-polarizada (como os três filtros da Fig. 33-16a). A direção de polarização de cada filtro (indicada pela linha tracejada) faz o ângulo indicado com o eixo  $x$  (horizontal) ou o eixo  $y$  (vertical). Coloque os pares na ordem da fração da luz incidente que atravessa os dois filtros, começando pela maior.





(a)



(b)

**Fig. 33-17** (a) Fotografia mostrando a reflexão e a refração de um feixe de luz incidente por uma superfície horizontal de vidro. (Uma parte do feixe refratado não é visível na fotografia.) Na superfície inferior, que é curva, o raio é perpendicular à superfície; assim, o feixe não se desvia ao ser refratado. (b) Uma representação de (a) usando raios. Os ângulos de incidência ( $\theta_1$ ), de reflexão ( $\theta'_1$ ) e de refração ( $\theta_2$ ) estão indicados.

(Frequentemente, a plica é omitida quando se representa o ângulo de reflexão).

**Lei da refração:** o raio refratado está no plano de incidência e tem um ângulo de refração  $\theta_2$  que está relacionado ao ângulo de incidência  $\theta_1$  através da equação

$$n_2 \sen \theta_2 = n_1 \sen \theta_1 \quad (\text{refração}). \quad (33-44)$$

onde  $n_1$  e  $n_2$  são constantes adimensionais, denominadas **índices de refração**, que dependem do meio onde a luz está se propagando. A Eq. 33-44, conhecida como **lei de Snell**, será demonstrada no Capítulo 35, onde veremos também que o índice de refração de um meio é igual a  $c/v$ , onde  $v$  é a velocidade da luz no meio e  $c$  é a velocidade da luz no vácuo.

A Tabela 33-1 mostra os índices de refração do vácuo e de algumas substâncias comuns. No caso do vácuo,  $n$  é definido como sendo exatamente 1; no caso do ar,  $n$  é ligeiramente maior que 1 (na prática, quase sempre se supõe que  $n$  para o ar também é igual a 1). Não existe nenhum meio com um índice de refração menor que 1.

Podemos escrever a Eq. 33-44 na forma

$$\sen \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sen \theta_1 \quad (33-45)$$

para comparar o ângulo de refração  $\theta_2$  com o ângulo de incidência  $\theta_1$ . De acordo com a Eq. 33-45, o valor relativo de  $\theta_2$  depende dos valores relativos de  $n_2$  e  $n_1$ . Na verdade, temos três resultados básicos:

1. Se  $n_2 = n_1$ ,  $\theta_2 = \theta_1$ . Neste caso, a refração não desvia o raio luminoso, que continua a sua *trajetória retilínea*, como na Fig. 33-18a.
2. Se  $n_2 > n_1$ ,  $\theta_2 < \theta_1$ . Neste caso, a refração faz o raio luminoso se aproximar da normal, como na Fig. 33-18b.
3. Se  $n_2 < n_1$ ,  $\theta_2 > \theta_1$ . Neste caso, a refração faz o raio luminoso se afastar da normal, como na Fig. 33-18c.

O ângulo de refração *jamais* é suficientemente grande para que o raio refratado se propague no mesmo meio que o raio incidente.

### Dispersão Cromática

O índice de refração  $n$  para a luz em qualquer meio, exceto o vácuo, depende do comprimento de onda. Isto significa que, quando um feixe luminoso é formado por raios de luz de diferentes comprimentos de onda, o ângulo de refração é diferente para cada raio; em outras palavras, a refração espalha o feixe incidente. Este espalhamento da luz é conhecido como **dispersão cromática**. A dispersão cromática não é observada nas Figs. 33-17 e 33-18 porque a luz incidente é *monocromática*, isto é, possui apenas um comprimento de onda.

**TABELA 33-1**  
**Índices de refração de alguns meios<sup>a</sup>**

Meio	$n$	Meio	$n$
Vácuo	1 (exatamente)	Vidro de baixa dispersão	1,52
Ar (CNTP) <sup>b</sup>	1,00029	Cloreto de sódio	1,54
Água (20°C)	1,33	Poliestireno	1,55
Acetona	1,36	Dissulfeto de carbono	1,63
Álcool etílico	1,36	Vidro de alta dispersão	1,65
Solução de açúcar (30%)	1,38	Safira	1,77
Quartzo fundido	1,46	Vidro de altíssima dispersão	1,89
Solução de açúcar (80%)	1,49	Diamante	2,42

<sup>a</sup>Para um comprimento de onda de 589 nm (luz amarela do sódio).

<sup>b</sup>CNTP significa "condições normais de temperatura (0°C) e pressão (1 atm)".

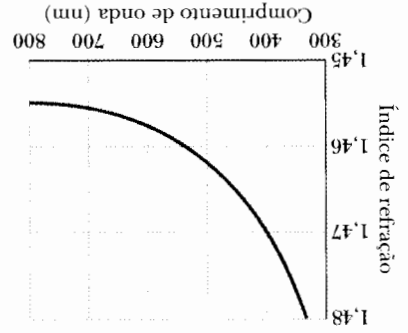
Em geral, o índice de refração de um meio é maior para pequenos comprimentos de onda (correspondentes, digamos, à cor azul) que para grandes comprimentos de onda (correspondentes, digamos, à cor vermelha). A Fig. 33-19, por exemplo, mostra a variação do índice de refração do quartzo fundido com o comprimento de onda. Esta variação significa que, quando um feixe luminoso que contém raios de luz azul e de luz vermelha é refratado por uma superfície de quartzo fundido, os raios de luz azul sofrem um desvio maior que os raios de luz vermelha.

Um feixe de luz branca possui raios de todas (ou quase todas) as cores do espectro visível, com intensidades aproximadamente iguais. Quando observamos um feixe deste tipo, não vemos as cores separadamente, mas temos a impressão que associamos à cor branca. A Fig. 33-20a mostra um feixe de luz branca incidindo em uma superfície de vidro. (Como o papel deste livro é branco, o feixe de luz branca foi representado por um raio cinzento.) Dos raios refratados, foram representados apenas o raio azul e o raio vermelho (o mais afastado da normal). Como o raio azul é o maior desvio, o ângulo de refração  $\theta_{za}$  para o raio azul é maior que o ângulo de refração  $\theta_{zv}$  para o raio vermelho. (Lembre-se de que os ângulos de refração são medidos em relação à normal.) Na Fig. 34-20b, um feixe de luz branca que estava se propagando no vidro incide em uma interface vidro-ar. O raio azul novamente sofre um desvio maior que o raio vermelho, mas desta vez  $\theta_{za}$  é maior que  $\theta_{zv}$ .

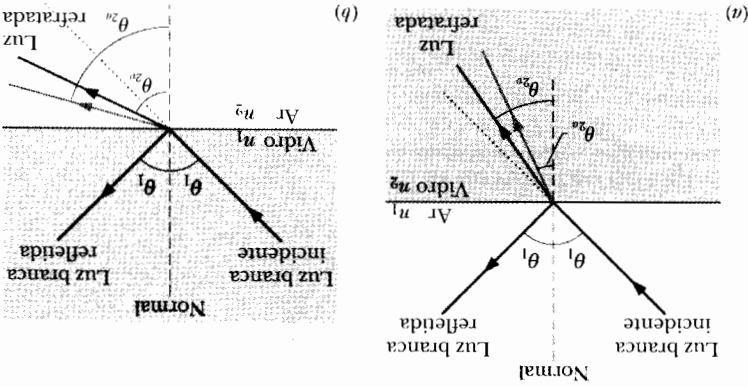
Para aumentar a separação das cores, pode-se usar um prisma de vidro de seção reta triangular como o da Fig. 33-21a. Com o uso de um prisma deste tipo, a dispersão que ocorre quando a luz penetra no vidro (lado esquerdo das Figs. 33-21a e 33-21b) é acenuada pela dispersão que ocorre quando a luz deixa o vidro.

### Arco-íris

A manifestação mais poética da dispersão cromática é o arco-íris. Quando a luz solar, que contém raios de muitos comprimentos de onda, é interceptada por uma gota de chuva, parte da luz é refratada para o interior da gota, refletida na superfície interna da gota e novamente refratada para o exterior da gota. A Fig. 33-22a mostra a situação quando o Sol está no horizonte à esquerda (e portanto os raios solares são horizontais). Como no caso do prisma triangular, a primeira refração separa a luz solar nas cores componentes e a segunda refração acentua o efeito. (Apenas os raios vermelho e azul são mostrados na figura.) Quando muitas gotas são iluminadas simultaneamente, o espectador pode observar um arco-íris quando a direção das gotas faz um ângulo de  $42^\circ$  com o ponto anti-solar A, o ponto diametralmente oposto ao Sol do ponto de vista do observador. Para localizar as gotas de chuva, coloque-se de costas para o Sol aponte com os dois braços na direção da sombra da sua cabeça. Em seguida, mova o braço direito até que

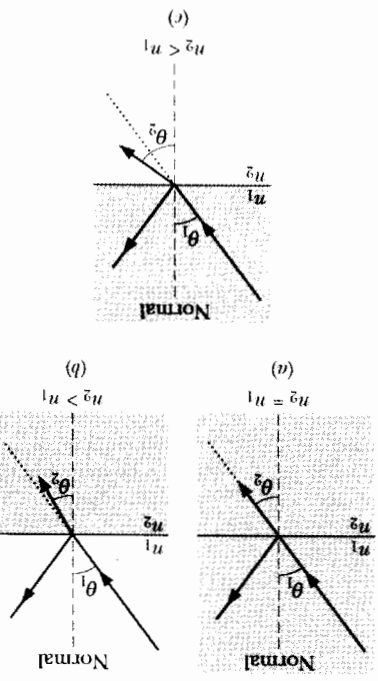


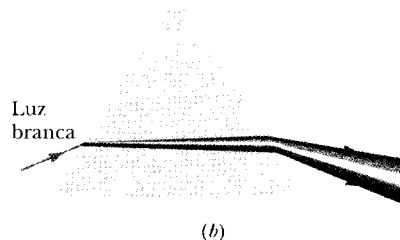
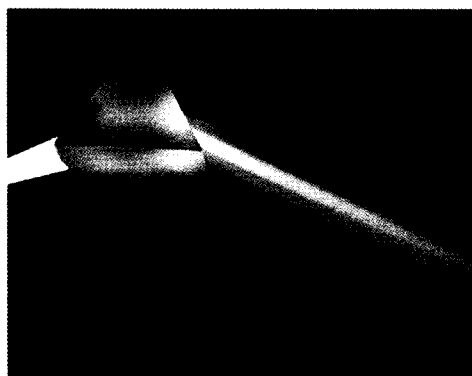
**Fig. 33-19** Índice de refração do quartzo fundido em função do comprimento de onda. De acordo com o gráfico, quanto menor o comprimento de onda, maior o desvio sofrido por um raio luminoso ao entrar ou sair do quartzo.



**Fig. 33-20** Dispersão cromática da luz branca. A componente azul é mais desviada na interface que a componente vermelha. (a) Ao passar do ar para o vidro, o ângulo de refração da componente azul é menor que o da componente vermelha. (b) Ao passar do vidro para o ar, o ângulo de refração da componente azul é maior que o da componente vermelha. As linhas pontilhadas mostram a direção a qual a luz continuaria a se propagar se não houvesse refração. (Veja o Encarte em cores.)

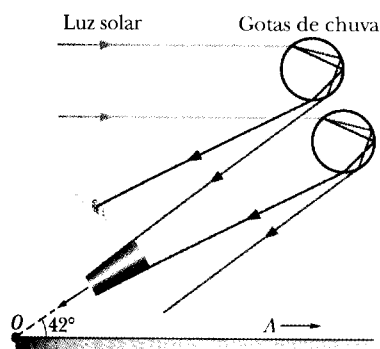
**Fig. 33-18** A luz que estava se propagando em um meio de índice de refração  $n_1$  incide em um meio de índice de refração  $n_2$ . (a) Se  $n_2 = n_1$ , o raio luminoso não sofre nenhum desvio. O raio luminoso é desviado em direção à normal (b) se  $n_2 > n_1$  e para longe da normal (c) se  $n_2 < n_1$ .



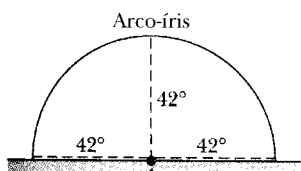


**Fig. 33-21** (a) Um prisma triangular separa a luz branca nas suas cores componentes. (b) A dispersão cromática ocorre na primeira interface e é acentuada na segunda. (Veja o Encarte em cores.)

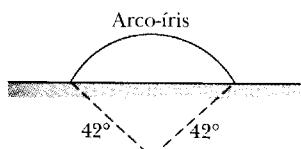
(a)



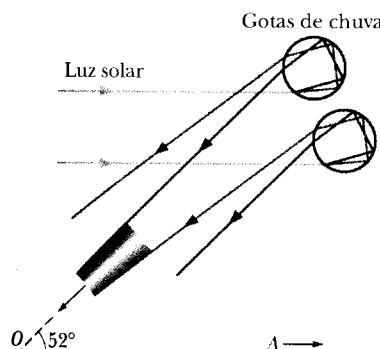
(a)



(b)



(c)



(d)

faça um ângulo de  $42^\circ$  com o braço esquerdo em qualquer direção. Se as gotas iluminadas estiverem na direção do seu braço direito, você verá um arco-íris nesta direção.

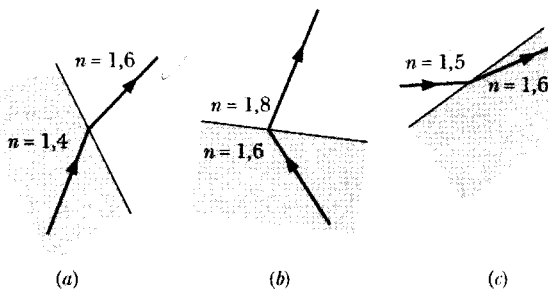
Como todas as gotas de chuva cuja direção faz um ângulo de  $42^\circ$  com a direção de A contribuem para o arco-íris, este é sempre um arco de círculo que tem como centro o ponto A (Fig. 33-22b) e o ponto mais alto do arco-íris nunca está mais de  $42^\circ$  acima do horizonte. Quando o Sol está acima do horizonte, a direção de A está abaixo do horizonte e o arco-íris é mais curto e mais próximo do horizonte (Fig. 33-22c).

Um arco-íris como o que acabamos de descrever, em que a luz é refletida apenas uma vez no interior de cada gota, é chamado de *arco-íris primário*. Em um *arco-íris secundário*, como o que aparece na Fig. 33-22d, a luz é refletida duas vezes no interior de cada gota. O arco-íris secundário é observado quando a direção das gotas faz um ângulo de  $52^\circ$  com a direção de A. O arco-íris secundário é mais largo e mais fraco que o arco-íris primário e por isso é mais difícil de ver. Além disso, as cores aparecem na ordem inversa, como se pode constatar comparando as Figs. 33-22a e 33-22d.

Arco-íris envolvendo três ou quatro reflexões ocorrem na direção do Sol e não podem ser vistos porque esta parte do céu é dominada pela luz solar direta. Arco-íris envolvendo um número ainda maior de reflexões podem ocorrer em outras regiões do céu, mas são fracos demais para serem observados.

A fotografia que abre este capítulo contém um indício de que esta explicação do arco-íris está incompleta. (O leitor sabe qual é?) Uma explicação mais completa será apresentada no Capítulo 35.

**PONTO DE VERIFICAÇÃO 5** Algum destes desenhos mostra uma situação fisicamente possível?



(a)

(b)

(c)

**Fig. 33-22** (a) A separação de cores que acontece quando a luz do Sol entra e sai das gotas de chuva produz o arco-íris primário. O ponto anti-solar A está no horizonte, à direita. Os raios de luz que vão das gotas responsáveis pelo arco-íris até o observador fazem um ângulo de  $42^\circ$  com a direção de A. (b) Todas as gotas de chuva cuja direção faz um ângulo de  $42^\circ$  com a direção de A contribuem para o arco-íris. (c) Situação quando o Sol está acima do horizonte (e portanto A está abaixo do horizonte). (d) Formação de um arco-íris secundário. (Veja o Encarte em cores.)



**Problema Resolvido 33-4**

(a) Na Fig. 33-23a, um feixe de luz monocromática é refletido e refratado no ponto A da interface entre a substância 1, cujo índice de refração é  $n_1 = 1,33$ , e a substância 2, cujo índice de refração é  $n_2 = 1,77$ . O feixe incidente faz um ângulo de  $50^\circ$  com a interface. Qual é o ângulo de reflexão no ponto A? Qual é o ângulo de refração?

**Solução:** A **Idéia Fundamental** de qualquer reflexão é que o ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência; os dois ângulos são medidos em relação à normal à interface no ponto de reflexão. Na Fig. 33-23a, a normal no ponto A é a reta tracejada. Observe que o ângulo de incidência  $\theta_i$  não é  $50^\circ$  e sim  $90^\circ - 50^\circ = 40^\circ$ . Assim, o ângulo de reflexão é

$$\theta_r = \theta_i = 40^\circ.$$

(Resposta)

A luz que passa da substância 1 para a substância 2 é refratada no ponto A da interface entre as duas substâncias. A **Idéia Fundamental** de qualquer refração é que o ângulo de incidência, o ângulo de refração e os índices de refração das duas substâncias estão relacionados através da lei de Snell, Eq. 33-44:

Os ângulos de incidência e de refração também são medidos em relação à normal, desta vez no ponto de refração. Assim, na Fig. 33-23a, o ângulo de refração é o ângulo  $\theta_2$ . Explicando  $\theta_2$  na Eq. 33-46, temos:

$$\theta_2 = \text{sen}^{-1} \left( n_1 \text{sen} \theta_1 \right) = \text{sen}^{-1} \left( 1,33 \text{sen} 40^\circ \right) = 28,88^\circ \approx 29^\circ.$$

(Resposta)

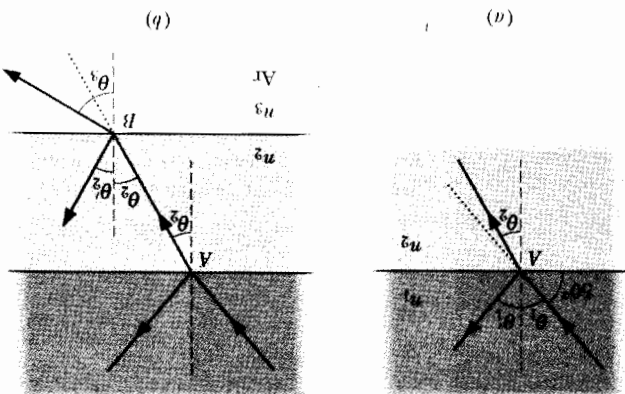
Este resultado mostra que o raio refratado se aproximou da normal (o ângulo com a normal diminuiu de  $40^\circ$  para  $29^\circ$ ). Isto já era de se esperar, pois o raio passou para um meio com um índice de refração maior. (b) A luz que penetrou na substância 2 no ponto A chega ao ponto B da interface entre a substância 2 e a substância 3, que é o ar, como mostra a Fig. 33-23b. A interface entre a substância 2 e a substância 3 é paralela à interface entre a substância 1 e a substância 2. No ponto B, parte da luz é refletida e parte é refratada. Qual é o ângulo de reflexão? Qual é o ângulo de refração?

**Solução:** Em primeiro lugar, precisamos relacionar um dos ângulos no ponto B a um ângulo conhecido no ponto A. Como a interface entre a substância 2 e a substância 3 é paralela à interface entre a substância 1 e a substância 2, o ângulo de incidência no ponto B é igual ao ângulo de refração no ponto A, o ângulo de incidência no ponto B é igual ao ângulo de refração no ponto A.

**33-9 Reflexão Interna Total**

A Fig. 33-24 mostra vários raios de luz monocromática sendo emitidos por uma fonte pontual S, propagando-se no vidro e incidindo na interface entre o vidro e o ar. No caso do raio a, que é perpendicular à interface, parte da luz é refletida na interface e parte penetra no ar sem mudar de direção. No caso dos raios b e c, que chegam à interface com ângulos de incidência cada vez maiores, também existem um raio refletido e um raio refratado. À medida que o ângulo de incidência aumenta, o ângulo de refração também aumenta; para o raio e, o ângulo de refração é  $90^\circ$ , o que significa que o raio refratado é paralelo à interface. O ângulo de incidência para o qual isto acontece é chamado de **ângulo crítico** e é representado pelo símbolo  $\theta_c$ . Para ângulos de incidência maiores que  $\theta_c$ , como

**Fig. 33-23 (a)** A luz é refletida e refratada no ponto A da interface entre as substâncias 1 e 2. (b) A luz que penetra na substância 2 é refletida e refratada no ponto B da interface entre as substâncias 2 e 3 (ar). As linhas pontilhadas mostram a direção do raio incidente.



A luz que passa da substância 2 para o ar é refratada no ponto B, com ângulo de refração  $\theta_3$ . A **Idéia Fundamental** neste caso é aplicar a lei da refração, mas desta vez escrevendo a Eq. 33-46 na forma

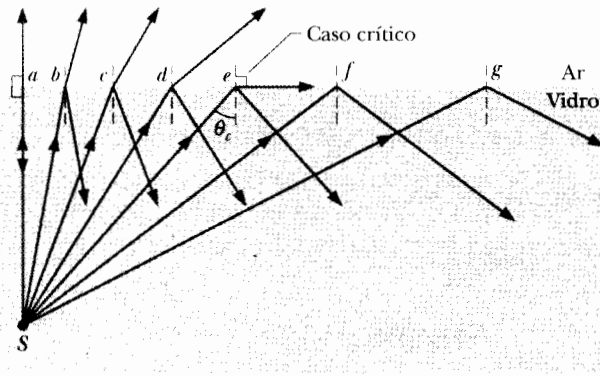
$$n_3 \text{sen} \theta_3 = n_2 \text{sen} \theta_2.$$

Explicando  $\theta_3$ , temos:

$$\theta_3 = \text{sen}^{-1} \left( \frac{n_2}{n_3} \text{sen} \theta_2 \right) = \text{sen}^{-1} \left( \frac{1,77}{1,00} \text{sen} 28,88^\circ \right) = 58,75^\circ \approx 59^\circ.$$

(Resposta)

Este resultado mostra que o raio refratado se afastou da normal (o ângulo com a normal aumentou de  $29^\circ$  para  $59^\circ$ ). Isto já era de se esperar, pois o raio passou para um meio com um índice de refração menor.



**Fig. 33-24** A reflexão interna total da luz emitida por uma fonte pontual *S* no vidro ocorre para ângulos de incidência maiores que o ângulo crítico  $\theta_c$ . Quando o ângulo de incidência é igual ao ângulo crítico, o raio refratado é paralelo à interface vidro-ar.

os dos raios *f* e *g*, não existe raio refratado e *toda* a luz é refletida; este fenômeno é conhecido como **reflexão interna total**.

Para determinar o valor de  $\theta_c$ , usamos a Eq. 33-44. Associando o índice 1 ao vidro e o índice 2 ao ar e fazendo  $\theta_{1r} = \theta_c$ ,  $\theta_2 = 90^\circ$ , obtemos:

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin 90^\circ,$$

o que nos dá

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{ângulo crítico}). \quad (33-47)$$

Como o seno de um ângulo não pode ser maior que a unidade,  $n_2$  não pode ser maior que  $n_1$  nesta equação. Isto significa que a reflexão interna total não pode ocorrer quando a luz passa para um meio com um índice de refração maior que o meio onde se encontra inicialmente. Se a fonte *S* estivesse no ar na Fig. 33-24, todos os raios incidentes na interface ar-vidro (incluindo *f* e *g*) seriam parcialmente refletidos e parcialmente refratados.

A reflexão interna total tem muitas aplicações tecnológicas. Por exemplo, os médicos podem examinar o estômago dos pacientes introduzindo dois feixes de *fibras ópticas* no sistema digestivo através do esôfago (Fig. 33-25). A luz aplicada à extremidade de um dos feixes sofre reflexões internas totais ao longo do percurso de modo que, apesar de as fibras seguirem um trajeto curvo, a maior parte da luz chega à outra extremidade e ilumina o interior do estômago. Parte da luz refletida pelas paredes do estômago penetra no outro feixe e segue o caminho inverso, sendo detectada e transformada em uma imagem em um monitor.

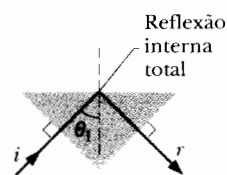


**Fig. 33-25** Um endoscópio é usado para realizar uma biópsia na mucosa do estômago.

### Problema Resolvido 33-5

A Fig. 33-26 mostra um prisma triangular de vidro imerso no ar; um raio luminoso penetra no prisma perpendicularmente a uma das faces e é totalmente refletido na interface vidro-ar. Se  $\theta_1 = 45^\circ$ , o que se pode dizer a respeito do índice de refração *n* do vidro?

**Solução:** Uma **Idéia Fundamental** é que, como o raio luminoso é totalmente refletido na interface, o ângulo crítico  $\theta_c$  para esta interface deve ser menor que o ângulo de incidência ( $45^\circ$ ). Uma segunda **Idéia Fundamental** é que é possível relacionar o índice de refração *n*



**Fig. 33-26** O raio incidente *i* sofre reflexão interna total na interface vidro-ar, tornando-se o raio refletido *r*.

do vidro a  $\theta_c$  através da lei da refração, o que nos leva à Eq. 33-47. Fazendo  $n_2 = 1$  (para o ar) e  $n_1 = n$  (para o vidro) na Eq. 33-47,

$$\theta_c = \text{sen}^{-1} \frac{n_2}{n_1} = \text{sen}^{-1} \frac{1}{n}.$$

Como  $\theta_c$  deve ser menor que  $45^\circ$ , temos:

$$\text{sen}^{-1} \frac{1}{n} < 45^\circ,$$

$$\frac{1}{n} < \text{sen } 45^\circ$$

### 33-10 Polarização por Reflexão

É possível evitar a ofuscção causada pela luz refletida na água usando óculos com filtros polarizadores. Isto acontece porque a luz refletida em uma superfície é total

ou parcialmente polarizada.

A Fig. 33-27 mostra um raio de luz não-polarizada incidindo em uma superfície

de vidro. Vamos separar os vetores campo elétrico da luz em duas componentes. A

*componente perpendicular* é perpendicular ao plano de incidência e portanto per-

pendicular ao plano de incidência e portanto *paralela* a *componente paralela* é

paralela ao plano de incidência e portanto *paralela* ao plano de incidência e não-

componente esta representada por setas de duas cabeças. Como a luz incidente é não-

polarizada, estas duas componentes têm a mesma amplitude no raio incidente.

Em geral, a luz refletida também possui as duas componentes, mas com diferen-

tes amplitudes. Isto significa que a luz refletida é parcialmente polarizada: o campo

elétrico tem maior amplitude em algumas direções do que em outras. Para um certo

ângulo de incidência, porém, conhecido como *ângulo de Brewster* e representado

pelo símbolo  $\theta_B$ , a luz refletida possui apenas a componente perpendicular, como

mostra a Fig. 33-27. Neste caso, a luz refletida é totalmente polarizada perpendicu-

larmente ao plano de incidência. A luz refratada, por outro lado, possui tanto a com-

ponente paralela como a componente perpendicular.

O vidro, a água e outras substâncias dielétricas discutidas na Seção 25-7 podem

polarizar a luz por reflexão. Quando você observa uma destas superfícies enquanto

esta sendo iluminada pelo Sol, pode ver um ponto brilhante no local onde a refle-

xão esta ocorrendo. Se a superfície for horizontal, como na Fig. 33-27, a polariza-

ção da luz refletida será horizontal. Para eliminar a ofuscção causada por uma su-

perfcie refletora horizontal, é preciso que os filtros polarizadores usados nos ocu-

los sejam montados de tal forma que a direção de polarização fique na vertical.

### A Lei de Brewster

Observa-se experimentalmente que o ângulo de Brewster  $\theta_B$  é aquele para o qual os

raios refletido e refratado são perpendiculares. Como o ângulo do raio refletido na

Fig. 33-27 é  $\theta_B$  e o ângulo do raio refratado é  $\theta_r$ , temos:

$$\theta_B + \theta_r = 90^\circ. \quad (33-48)$$

Estes dois ângulos podem ser relacionados através da Eq. 33-44. Atribuindo arbi-

trariamente o índice  $n_2$  à substância na qual se propagam os raios inci-

rente e refletido, temos:

$$n_1 \text{sen } \theta_B = n_2 \text{sen } \theta_r.$$

Combinando as duas equações, obtemos:

$$n_1 \text{sen } \theta_B = n_2 \text{sen}(90^\circ - \theta_B) = n_2 \cos \theta_B.$$

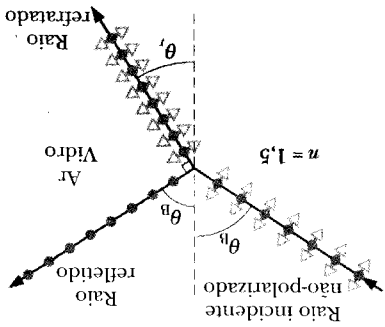


Fig. 33-27 Um raio de luz não-polarizada, que estava se propagando no ar, incide em uma superfície de vidro com um ângulo de incidência igual ao ângulo de Brewster  $\theta_B$ . O campo elétrico perpendicular ao papel

é representado por pontos e o campo elétrico paralelo ao papel por setas.

• O campo elétrico perpendicular ao plano de incidência é representado por pontos e o campo elétrico paralelo ao plano de incidência é representado por setas.

• O ângulo de Brewster  $\theta_B$  é aquele para o qual os raios refletido e refratado são perpendiculares.

• A luz refletida é totalmente polarizada perpendicularmente ao plano de incidência.

• A luz refratada é parcialmente polarizada com uma componente perpendicular ao plano de incidência.

• A luz incidente é não-polarizada.

• O ângulo de incidência  $\theta_i$  é igual ao ângulo de refração  $\theta_t$ .

• O ângulo de reflexão  $\theta_r$  é igual ao ângulo de refração  $\theta_t$ .

• O ângulo de incidência  $\theta_i$  é igual ao ângulo de reflexão  $\theta_r$ .

• O ângulo de incidência  $\theta_i$  é igual ao ângulo de refração  $\theta_t$ .

• O ângulo de incidência  $\theta_i$  é igual ao ângulo de reflexão  $\theta_r$ .

• O ângulo de incidência  $\theta_i$  é igual ao ângulo de refração  $\theta_t$ .

• O ângulo de incidência  $\theta_i$  é igual ao ângulo de reflexão  $\theta_r$ .

• O ângulo de incidência  $\theta_i$  é igual ao ângulo de refração  $\theta_t$ .

• O ângulo de incidência  $\theta_i$  é igual ao ângulo de reflexão  $\theta_r$ .

• O ângulo de incidência  $\theta_i$  é igual ao ângulo de refração  $\theta_t$ .

• O ângulo de incidência  $\theta_i$  é igual ao ângulo de reflexão  $\theta_r$ .

• O ângulo de incidência  $\theta_i$  é igual ao ângulo de refração  $\theta_t$ .

• O ângulo de incidência  $\theta_i$  é igual ao ângulo de reflexão  $\theta_r$ .

• O ângulo de incidência  $\theta_i$  é igual ao ângulo de refração  $\theta_t$ .

• O ângulo de incidência  $\theta_i$  é igual ao ângulo de reflexão  $\theta_r$ .

• O ângulo de incidência  $\theta_i$  é igual ao ângulo de refração  $\theta_t$ .

• O ângulo de incidência  $\theta_i$  é igual ao ângulo de reflexão  $\theta_r$ .

• O ângulo de incidência  $\theta_i$  é igual ao ângulo de refração  $\theta_t$ .

• O ângulo de incidência  $\theta_i$  é igual ao ângulo de reflexão  $\theta_r$ .

• O ângulo de incidência  $\theta_i$  é igual ao ângulo de refração  $\theta_t$ .

• O ângulo de incidência  $\theta_i$  é igual ao ângulo de reflexão  $\theta_r$ .

• O ângulo de incidência  $\theta_i$  é igual ao ângulo de refração  $\theta_t$ .

• O ângulo de incidência  $\theta_i$  é igual ao ângulo de reflexão  $\theta_r$ .

• O ângulo de incidência  $\theta_i$  é igual ao ângulo de refração  $\theta_t$ .

**PONTO DE VERIFICAÇÃO 6** Suponha que o prisma do Problema Resolvido 33-5 tenha um índice de refração  $n = 1,4$ . A luz ainda sofreria reflexão interna total se mantivéssemos o raio incidente com a mesma orientação da Fig. 33-26 mas girássemos o prisma (a)  $10^\circ$  no sentido horário e (b)  $10^\circ$  no sentido anti-horário?

O índice de refração do vidro deve ser maior que 1,4; se não fosse assim, o raio incidente não sofreria reflexão interna total.

(Resposta)  $n > \frac{\text{sen } 45^\circ}{1} = 1,4$

(Resposta)

(Resposta)

o que nos dá

$$\theta_B = \tan^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{ângulo de Brewster}). \quad (33-49)$$

(Observe que os índices da Eq. 33-49 *não são* arbitrários, já que os meios 1 e 2 foram definidos previamente.) Se os raios incidente e refletido se propagam *no ar*, podemos fazer  $n_1 = 1$  e representar  $n_2$  como  $n$ ; neste caso, a Eq. 33-49 assume a seguinte forma:

$$\theta_B = \tan^{-1} n \quad (\text{lei de Brewster}). \quad (33-50)$$

Esta versão simplificada da Eq. 33-49 é conhecida como **lei de Brewster**. Como o ângulo de Brewster, a lei de Brewster recebeu este nome em homenagem a Sir David Brewster (1781-1868), o cientista escocês que a descobriu experimentalmente em 1812.

## Revisão e Resumo

**Ondas Eletromagnéticas** Uma onda eletromagnética é formada por campos elétricos e magnéticos variáveis. As várias frequências possíveis de ondas eletromagnéticas formam um *espectro*, do qual uma pequena parte constitui a luz visível. Uma onda eletromagnética que se propaga na direção do eixo  $x$  possui um campo elétrico  $\vec{E}$  e um campo magnético  $\vec{B}$  cujos módulos dependem de  $x$  e  $t$ :

$$E = E_m \sin(kx - \omega t)$$

$$B = B_m \sin(kx - \omega t), \quad (33-1, 33-2)$$

onde  $E_m$  e  $B_m$  são as amplitudes de  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$ . O campo elétrico induz o campo magnético e vice-versa. A velocidade de qualquer onda eletromagnética no vácuo é  $c$ , que pode ser escrita como

$$c = \frac{E}{B} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}, \quad (33-5, 33-3)$$

onde  $E$  e  $B$  são os módulos dos campos em um instante qualquer.

**Fluxo de Energia** A taxa por unidade de área com a qual a energia é transportada por uma onda eletromagnética é dada pelo vetor de Poynting  $\vec{S}$ :

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}. \quad (33-19)$$

A direção de  $\vec{S}$  (que é também a direção de propagação da onda e a direção do fluxo de energia) é perpendicular às direções de  $\vec{E}$  e de  $\vec{B}$ . A taxa média por unidade de área com a qual a energia é transportada,  $S_{\text{méd}}$ , é chamada de *intensidade* da onda e representada pelo símbolo  $I$ :

$$I = \frac{1}{c\mu_0} E_{\text{rms}}^2, \quad (33-26)$$

onde  $E_{\text{rms}} = E_m / \sqrt{2}$ . Uma *fonte pontual* de ondas eletromagnéticas emite as ondas *isotropicamente*, isto é, com igual intensidade em todas as direções. A intensidade das ondas a uma distância  $r$  de uma fonte pontual de potência  $P_s$  é dada por

$$I = \frac{P_s}{4\pi r^2}. \quad (33-27)$$

**Pressão da Radiação** Quando uma superfície intercepta uma onda eletromagnética, a onda exerce uma força e uma pressão na

superfície. Quando a radiação é totalmente absorvida por uma superfície perpendicular à direção de propagação, a força é dada por

$$F = \frac{IA}{c} \quad (\text{absorção total}), \quad (33-32)$$

onde  $I$  é a intensidade da radiação e  $A$  é a área da superfície. Quando a radiação é totalmente refletida, a força é dada por

$$F = \frac{2IA}{c} \quad (\text{incidência perpendicular e reflexão total}). \quad (33-33)$$

A pressão da radiação  $p_r$  é a força por unidade de área:

$$p_r = \frac{I}{c} \quad (\text{absorção total}) \quad (33-34)$$

e

$$p_r = \frac{2I}{c} \quad (\text{incidência perpendicular e reflexão total}). \quad (33-35)$$

**Polarização** Dizemos que uma onda eletromagnética é **polarizada** quando o vetor campo elétrico se conserva sempre no mesmo plano, chamado de *plano de oscilação*. A luz produzida por uma lâmpada comum não é polarizada; dizemos que uma luz deste tipo é **não-polarizada** ou **polarizada aleatoriamente**.

**Filtros Polarizadores** Quando se faz a luz passar por um filtro polarizador, apenas a componente do campo elétrico paralela à **direção de polarização** do filtro é *transmitida*; a componente perpendicular à direção de polarização é absorvida pelo filtro. A luz que emerge de um filtro polarizador está polarizada paralelamente à direção de polarização do filtro.

Quando a luz que incide em um filtro polarizador é não-polarizada, a intensidade da luz transmitida,  $I$ , é metade da intensidade original  $I_0$ :

$$I = \frac{1}{2} I_0. \quad (33-40)$$

Quando a luz que incide no filtro polarizador já está polarizada, a intensidade da luz transmitida depende do ângulo  $\theta$  entre a direção de polarização da luz incidente e a direção de polarização do filtro:

$$I = I_0 \cos^2 \theta. \quad (33-42)$$

**Óptica Geométrica** *Óptica geométrica* é o tratamento aproximado da luz no qual as ondas luminosas são representadas como raios que se propagam em linha reta.

**Reflexão e Refração** Quando um raio luminoso encontra uma interface entre dois meios transparentes, em geral aparecem um raio **refletido** e um raio **refratado**. Os dois raios estão sempre no plano de incidência. O **ângulo de reflexão** é igual ao ângulo de incidência e o **ângulo de refração** está relacionado ao ângulo de incidência através da lei de Snell.

onde  $n_1$  e  $n_2$  são os índices de refração dos meios nos quais se propagam o raio incidente e o raio refratado.

**Reflexão Interna Total** Uma onda que incide em uma interface com um meio cujo índice de refração é menor que o do meio no

## Perguntas

1 A Fig. 33-28 mostra os campos elétrico e magnético de uma onda eletromagnética em um certo instante. O sentido de propagação da onda é para dentro ou para fora do papel?



Fig. 33-28 Pergunta 1.

2 Se o campo magnético de uma onda luminosa é paralelo ao eixo  $y$  e seu módulo é dado por  $B_y = B_m \sin(kz - \omega t)$ , determine (a) uma possível direção de propagação da onda; (b) uma direção do campo elétrico compatível com a escolha do item (a).

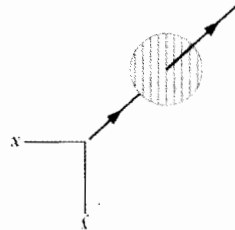


Fig. 33-29 Pergunta 3.

3 (a) A Fig. 33-29 mostra um feixe luminoso passando por um filtro polarizador cuja direção de polarização é paralela ao eixo  $y$ . Suponha que o filtro seja girado de  $40^\circ$  no sentido horário, mantendo-se paralelo ao plano  $xy$ . Com a rotação, a porcentagem da luz que atravessa o filtro aumenta, diminui ou permanece constante (a) se a luz incidente for não-polarizada; (b) se a luz incidente for polarizada paralelamente ao eixo  $x$ ; (c) se a luz incidente for polarizada paralelamente ao eixo  $y$ ?

4 Na Fig. 33-16a, começa com um feixe de luz polarizada paralelamente ao eixo  $x$  e escreva a razão entre a intensidade final  $I_f$  e a intensidade inicial  $I_0$  na forma  $I_f/I_0 = A \cos^2 \theta$ . Quais serão os valores de  $A$ ,  $n$  e  $\theta$  se girarmos a direção de polarização do primeiro filtro (a)  $60^\circ$  no sentido anti-horário; (b)  $90^\circ$  no sentido horário?

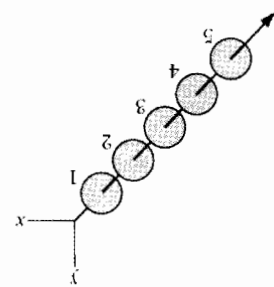


Fig. 33-30 Pergunta 5.

6 Suponha que o segundo filtro da Fig. 33-16a seja girado a partir de uma direção de polarização paralela ao eixo  $y$  ( $\theta = 0$ ), terminando com

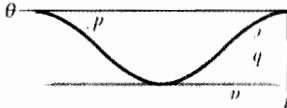


Fig. 33-31 Pergunta 6.

4 direção de polarização alinhada com o eixo  $x$  ( $\theta = 90^\circ$ ). Qual das quatro curvas da Fig. 33-31 representa melhor a intensidade da luz que atravessa o sistema de três filtros em função do ângulo  $\theta$  durante essa rotação?

7 A Fig. 33-32 mostra raios de luz monocromática passando por três materiais,  $a$ ,  $b$  e  $c$ . Coloque os materiais na ordem do índice de refração, começando pelo maior.

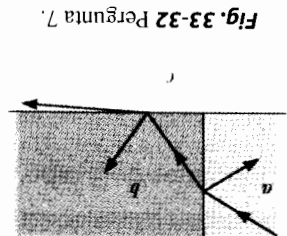


Fig. 33-32 Pergunta 7.

8 A Fig. 33-33 mostra as reflexões múltiplas de um raio luminoso em um corredor de vidro no qual as paredes são paralelas ou perpendiculares entre si. Se o ângulo de incidência no ponto  $a$  é  $30^\circ$ , quais são os ângulos de reflexão do raio luminoso nos pontos  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  e  $f$ ?

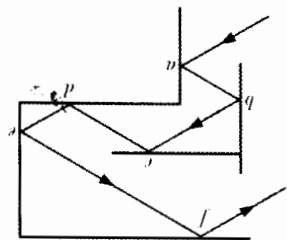


Fig. 33-33 Pergunta 8.

9 Na Fig. 33-34, a luz começa na substância  $a$ , passa por placas feitas de três outros materiais com as interfaces todas paralelas entre si e penetra em outra placa da substância  $a$ . A figura mostra o raio incidente e os raios refratados nas diferentes interfaces. Coloque os materiais na ordem dos índices de refração, começando pelo maior.

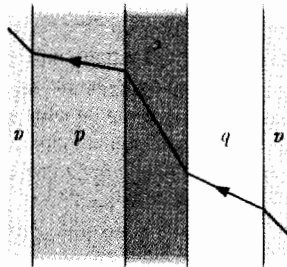


Fig. 33-34 Pergunta 9.

10 As três partes da Fig. 33-35 mostram a refração da luz nas interfaces entre diferentes substâncias. O raio incidente e uma mistura de luz vermelha e azul. O índice de refração aproximado para a luz visível está

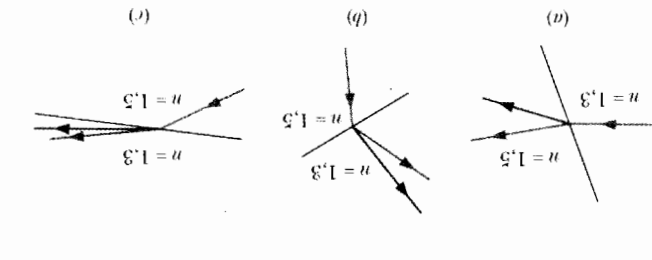


Fig. 33-35 Pergunta 10.

qual está se propagando experimenta **reflexão interna total** se o ângulo de incidência é maior que um **ângulo crítico**  $\theta_c$ , dado por

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{ângulo crítico}). \quad (33-47)$$

**Polarização por Reflexão** Uma onda refletida é totalmente polarizada, com o vetor  $E$  perpendicular ao plano de incidência, quando o ângulo de incidência é igual ao **ângulo de Brewster**  $\theta_B$ , dado por

$$\theta_B = \tan^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{ângulo de Brewster}). \quad (33-49)$$

indicado para cada substância. Qual das três partes mostra uma situação fisicamente possível?

11 O bloco da esquerda da Fig. 33-36 apresenta reflexão interna total para a luz no interior de um material com índice de refração  $n_1$ , quando existe ar do lado de fora do material. Um raio de luz que chegue ao ponto A vindo de qualquer ponto da região sombreada da esquerda (como o raio que aparece na figura) sofre reflexão total e termina na região sombreada da direita. Os outros blocos mostram situações se-

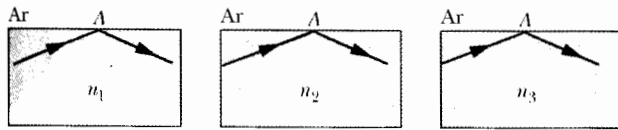


Fig. 33-36 Pergunta 11.

melhantes para outros materiais. Coloque os materiais na ordem dos índices de refração, começando pelo maior.

12 A Fig. 33-37 mostra quatro placas horizontais A, B, C e D feitas de substâncias diferentes, com ar acima da primeira placa e abaixo da última. O índice de refração das substâncias é dado. Raios de luz incidem na extremidade esquerda das quatro placas, da forma indicada na figura. Em que placa (identifique-a através do índice de refração) existe a possibilidade de que a luz fique confinada de tal forma que, após muitas reflexões, chegue à extremidade direita sem deixar a placa?

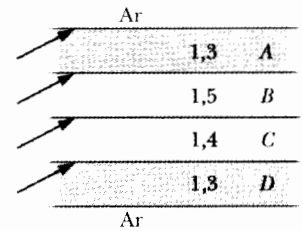


Fig. 33-37 Pergunta 12.

## Problemas

••••• O número de pontos indica a dificuldade do problema.

### Seção 33-2 O Arco-íris de Maxwell

- 1 A que distância devem estar as mãos de uma pessoas para que estejam separadas por 1,0 nanossegundo-luz (a distância que a luz percorre em 1,0 nanossegundo)?
- 2 A partir da Fig. 33-2, determine (a) o menor e (b) o maior comprimento de onda para o qual a sensibilidade do olho humano é igual à metade da sensibilidade máxima. Determine também (c) o comprimento de onda, (d) a frequência e (e) o período da luz à qual o olho humano é mais sensível.
- 3 O objetivo do Projeto Seafarer era construir uma gigantesca antena subterrânea, com uma área da ordem de 10.000 km<sup>2</sup>, para transmitir sinais de rádio que pudessem ser captados por submarinos a grandes profundidades. Se o comprimento de onda efetivo destes sinais de rádio fosse  $1,0 \times 10^4$  raios terrestres, qual seria (a) a frequência e (b) o período da radiação emitida? Normalmente, as ondas eletromagnéticas são fortemente atenuadas ao se propagarem em substâncias condutoras de eletricidade, como a água salgada.
- 4 Um certo laser de hélio-neônio emite luz vermelha em uma faixa estreita de comprimentos de onda em torno de 632,8 nm, com uma "largura" de 0,0100 nm. Qual é a "largura" da luz emitida em unidades de frequência?

### Seção 33-3 Descrição Qualitativa de uma Onda Eletromagnética

- 5 Qual o valor da indutância deve ser ligada a um capacitor de 17 pF em um oscilador capaz de gerar ondas eletromagnéticas de 550 nm (ou seja, dentro da faixa da luz visível)? Comente a resposta.
- 6 Qual é o comprimento de onda da onda eletromagnética emitida pelo sistema oscilador-antena da Fig. 33-3 se  $L = 0,253 \mu\text{H}$  e  $C = 25,0 \text{ pF}$ ?

### Seção 33-5 Transporte de Energia e o Vetor de Poynting

- 7 Uma onda eletromagnética plana tem um campo elétrico máximo de  $3,20 \times 10^{-4} \text{ V/m}$ . Determine a amplitude do campo magnético.
- 8 Uma onda eletromagnética plana que se propaga no vácuo no sentido positivo do eixo  $x$  tem componentes  $E_x = E_y = 0$  e  $E_z = (2,0 \text{ V/m}) \cos[(\pi \times 10^{15} \text{ s}^{-1})(t - x/c)]$ . (a) Qual é a amplitude do campo magnético associado à onda? (b) O campo magnético oscila paralelamente a que eixo? (c) No instante em que o campo elétrico associado

à onda aponta no sentido positivo do eixo  $z$  em um certo ponto  $P$  do espaço, em que direção aponta o campo magnético no mesmo ponto?

- 9 Alguns lasers de neodímio-vidro podem produzir 100 TW de potência em pulsos de 1,0 ns com um comprimento de onda de 0,26  $\mu\text{m}$ . Qual é a energia contida em um desses pulsos?
- 10 Suponha (de forma pouco realista) que uma estação de TV se comporte como uma fonte pontual, isotrópica, transmitindo com uma potência de 1,0 MW. Qual é a intensidade do sinal transmitido nas vizinhanças da estrela Próxima do Centauro, a estrela mais próxima do nosso planeta depois do Sol, que fica a 4,3 anos-luz de distância da Terra? (Uma civilização alienígena a essa distância poderia assistir a *Arquivo X*.) Um ano-luz é a distância que a luz percorre em um ano.
- 11 Qual é a intensidade de uma onda eletromagnética plana se o valor de  $B_m$  é  $1,0 \times 10^{-4} \text{ T}$ ?
- 12 Em uma onda de rádio plana, o valor máximo do campo elétrico é 5,00 V/m. Calcule (a) o valor máximo do campo magnético; (b) a intensidade da onda.
- 13 A luz do Sol no limite superior da atmosfera terrestre tem uma intensidade de 1,40 kW/m<sup>2</sup>. Calcule (a)  $E_m$  e (b)  $B_m$  para a luz solar nessa altitude, supondo tratar-se de uma onda plana.
- 14 Frank D. Drake, um investigador do programa SETI (Search for Extra-Terrestrial Intelligence, ou seja, Busca de Inteligência Extraterrestre), disse uma vez que o grande radiotelescópio de Arecibo, Porto Rico (Fig. 33-38), "é capaz de detectar um sinal que

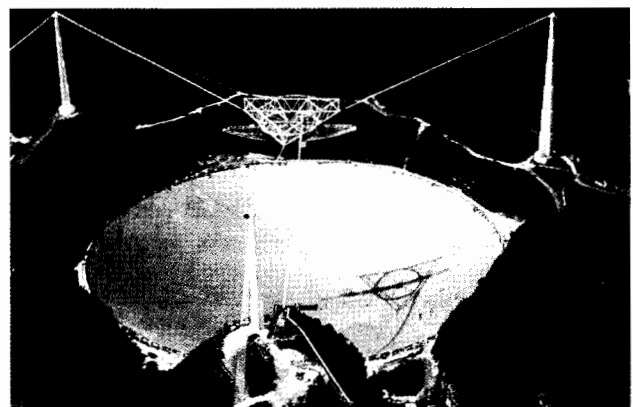


Fig. 33-38 Problema 14. Radiotelescópio de Arecibo.

- deposita em toda a superfície da Terra uma potência de apenas um picowatt. (a) Qual a potência que a antena do radiotelescópio de Arecibo receberia de um sinal como este? O diâmetro da antena é 300 m. (b) Qual terra que ser a potência de uma fonte isotrópica situada no centro de nossa galáxia fica a  $2,2 \times 10^4$  anos-luz de distância. Um ano-luz é a distância que a luz percorre em um ano.
- 15 O campo elétrico máximo a uma distância de 10 m de uma fonte pontual isotrópica é  $2,0 \text{ V/m}$ . Quais são (a) o valor máximo do campo magnético e (b) a intensidade média da luz a esta distância da fonte? (c) Qual é a potência da fonte?
- 16 Uma fonte pontual isotrópica emite luz com um comprimento de onda de  $500 \text{ nm}$  e uma potência de  $200 \text{ W}$ . Um detector de luz é posicionado a  $400 \text{ m}$  da fonte. Qual é a máxima taxa  $dB/dt$  com a qual a componente magnética da luz varia com o tempo na posição do detector?
- 17 Um avião que se encontra a uma distância de  $10 \text{ km}$  de um transmissor de rádio recebe um sinal com uma intensidade de  $10 \mu\text{W/m}^2$ . Determine a amplitude (a) do campo elétrico e (b) do campo magnético associado ao sinal na posição do avião. (c) Se o transmissor irradia uniformemente ao longo de um hemisfério, qual é a potência da transmissão?
- 18 Uma onda eletromagnética com uma frequência de  $4,00 \times 10^{14} \text{ Hz}$  está se propagando no vácuo no sentido positivo do eixo  $x$ . O campo elétrico da onda é paralelo ao eixo  $y$  e tem uma amplitude  $E_m$ . No instante  $t = 0$ , o campo elétrico no ponto  $P$ , situado sobre o eixo  $x$ , tem o valor de  $+E_m/4$  e está diminuindo com o tempo. Qual é a distância, ao longo do eixo  $x$ , entre o ponto  $P$  e o primeiro ponto com  $E = 0$  (a) no sentido negativo do eixo  $x$  e (b) no sentido positivo do eixo  $x$ ?
- 19 Lasers de alta potência são usados para comprimir plasmas (gasões de partículas carregadas). Um laser capaz de gerar pulsos de radiação com uma potência máxima de  $1,5 \times 10^7 \text{ MW}$  é focalizado em  $1,0 \text{ mm}^2$  de um plasma de elétrons de alta densidade. Determine a pressão exercida sobre o plasma se este se comportar como um meio perfeitamente refletor.
- 20 Um pedaço de cartolina pintado de preto, totalmente absorvente, de área  $A = 2,0 \text{ cm}^2$ , intercepta um pulso luminoso com uma intensidade de  $10 \text{ W/cm}^2$  produzido por uma lâmpada estroboscópica. Qual é a pressão exercida pela luz sobre a cartolina?
- 21 Qual é a pressão da radiação a  $1,5 \text{ m}$  de distância de uma lâmpada de  $500 \text{ W}$ ? Suponha que a superfície sobre a qual a pressão é exercida esteja voltada para a lâmpada e seja perfeitamente absorvente. Suponha também que a lâmpada irradie uniformemente em todas as direções.
- 22 A luz do Sol no limite superior da atmosfera terrestre tem uma intensidade de  $1,4 \text{ kW/m}^2$ . (a) Supondo que a Terra (e sua atmosfera) se comporte como um disco plano perpendicular aos raios solares e que toda a energia incidente seja absorvida, calcule a força exercida sobre a Terra pela radiação. (b) Compare esta força com a força exercida pela atração gravitacional do Sol.
- 23 Uma onda eletromagnética plana, com um comprimento de onda de  $3,0 \text{ m}$ , se propaga no vácuo, no sentido positivo do eixo  $x$ . O campo elétrico, cuja amplitude é  $300 \text{ V/m}$ , oscila paralelamente ao eixo  $y$ . Determine (a) a frequência; (b) a frequência angular e (c) o número de onda angular da onda. (d) Qual é a amplitude do campo magnético associado a onda? (e) O campo magnético oscila paralelamente a que eixo? (f) Qual é o fluxo médio de energia, em watts por metro quadrado, associado a onda? A onda ilumina uniformemente a Terra.
- 31 Na Fig. 33-41, um feixe luminoso com intensidade de  $43 \text{ W/m}^2$  e polarização paralela ao eixo  $y$  atravessa um sistema composto por dois filtros polarizadores cujas direções fazem ângulos  $\theta_1 = 70^\circ$  e

Seção 33-7 Polarização

com esta potência, por que o equilíbrio da esfera seria instável?

• 29 A intensidade  $I$  da luz emitida por uma fonte pontual e isotrópica é medida em função da distância  $r$  da fonte. A Fig. 33-40 mostra a intensidade  $I$  em função do inverso do quadrado da distância,  $r^{-2}$ . Qual é a potência da fonte?

• 30 Pretende-se levar uma pequena esfera, totalmente absorvente, a  $0,500 \text{ m}$  acima de uma fonte luminosa pontual e isotrópica, fazendo com que a força para cima exercida pela radiação seja igual ao peso da esfera. A esfera tem  $2,00 \text{ mm}$  de raio e uma densidade de  $19,0 \text{ g/cm}^3$ . (a) Qual deve ser a potência da fonte luminosa? (b) Mesmo que fosse possível construir uma fonte com esta potência, por que o equilíbrio da esfera seria instável?

• 28 Teoricamente, uma espaçonave poderia deslocar-se no sistema solar usando a pressão da radiação solar em uma grande vela feita de folha de alumínio. Qual deve ser o tamanho da vela para que a força exercida pela radiação seja igual em módulo à força de atração gravitacional do Sol? Suponha que a massa da espaçonave, incluindo a vela, seja  $1500 \text{ kg}$ , que a vela seja perfeitamente refletora e que a vela esteja orientada perpendicularmente aos raios solares. Os dados astronômicos necessários podem ser obtidos no Apêndice C. (Usando uma vela maior, a espaçonave se afastará do Sol.)

• 27 Uma pequena espaçonave cuja massa é  $1,5 \times 10^3 \text{ kg}$  (incluindo um astronauta) está à deriva no espaço, longe de qualquer campo gravitacional. Se o astronauta liga um laser de  $10 \text{ kW}$  de potência, que velocidade a nave atinge em  $1,0$  dia por causa do momento associado à luz do laser?

• 26 Na Fig. 33-39, o feixe de um laser com  $4,60 \text{ W}$  de potência e um diâmetro  $D = 2,60 \text{ mm}$  é apontado para cima, perpendicularmente a uma das faces circulares (com metros de  $2,60 \text{ mm}$  de diâmetro) de um cilindro perfeitamente refletor, que é mantido suspenso pela pressão da radiação do laser. A densidade do cilindro é  $1,20 \text{ g/cm}^3$ . Qual é a altura  $H$  do cilindro?

• 25 Prove, para uma onda eletromagnética plana que incide perpendicularmente em uma superfície plana, que a pressão exercida pela radiação sobre a superfície é igual à densidade de energia do feixe incidente. (Esta relação entre pressão e densidade de energia não depende da refletância da superfície.)

• 24 Um laser tem uma potência luminosa de  $5,00 \text{ mW}$  e um comprimento de onda de  $633 \text{ nm}$ . O feixe de luz emitido pelo laser é focalizado até que seu diâmetro seja igual ao diâmetro de  $1266 \text{ nm}$  de uma esfera colocada na trajetória do feixe. A esfera é perfeitamente absorvente e tem uma densidade de  $5,00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ . Determine (a) a intensidade do feixe na posição da esfera; (b) a pressão exercida pela radiação do laser sobre a esfera; (c) o módulo da força correspondente; (d) o módulo da aceleração que esta força impõe à esfera.

• 23 Prove, para uma onda eletromagnética plana, com um comprimento de onda de  $3,0 \text{ m}$ , se propaga no vácuo, no sentido positivo do eixo  $x$ . O campo elétrico, cuja amplitude é  $300 \text{ V/m}$ , oscila paralelamente ao eixo  $y$ . Determine (a) a frequência; (b) a frequência angular e (c) o número de onda angular da onda. (d) Qual é a amplitude do campo magnético associado a onda? (e) O campo magnético oscila paralelamente a que eixo? (f) Qual é o fluxo médio de energia, em watts por metro quadrado, associado a onda? A onda ilumina uniformemente a Terra.

• 22 A luz do Sol no limite superior da atmosfera terrestre tem uma intensidade de  $1,4 \text{ kW/m}^2$ . (a) Supondo que a Terra (e sua atmosfera) se comporte como um disco plano perpendicular aos raios solares e que toda a energia incidente seja absorvida, calcule a força exercida sobre a Terra pela radiação. (b) Compare esta força com a força exercida pela atração gravitacional do Sol.

• 21 Qual é a pressão da radiação a  $1,5 \text{ m}$  de distância de uma lâmpada de  $500 \text{ W}$ ? Suponha que a superfície sobre a qual a pressão é exercida esteja voltada para a lâmpada e seja perfeitamente absorvente. Suponha também que a lâmpada irradie uniformemente em todas as direções.

• 20 Um pedaço de cartolina pintado de preto, totalmente absorvente, de área  $A = 2,0 \text{ cm}^2$ , intercepta um pulso luminoso com uma intensidade de  $10 \text{ W/cm}^2$  produzido por uma lâmpada estroboscópica. Qual é a pressão exercida pela luz sobre a cartolina?

• 19 Lasers de alta potência são usados para comprimir plasmas (gasões de partículas carregadas). Um laser capaz de gerar pulsos de radiação com uma potência máxima de  $1,5 \times 10^7 \text{ MW}$  é focalizado em  $1,0 \text{ mm}^2$  de um plasma de elétrons de alta densidade. Determine a pressão exercida sobre o plasma se este se comportar como um meio perfeitamente refletor.

• 18 Uma onda eletromagnética com uma frequência de  $4,00 \times 10^{14} \text{ Hz}$  está se propagando no vácuo no sentido positivo do eixo  $x$ . O campo elétrico da onda é paralelo ao eixo  $y$  e tem uma amplitude  $E_m$ . No instante  $t = 0$ , o campo elétrico no ponto  $P$ , situado sobre o eixo  $x$ , tem o valor de  $+E_m/4$  e está diminuindo com o tempo. Qual é a distância, ao longo do eixo  $x$ , entre o ponto  $P$  e o primeiro ponto com  $E = 0$  (a) no sentido negativo do eixo  $x$  e (b) no sentido positivo do eixo  $x$ ?

• 17 Um avião que se encontra a uma distância de  $10 \text{ km}$  de um transmissor de rádio recebe um sinal com uma intensidade de  $10 \mu\text{W/m}^2$ . Determine a amplitude (a) do campo elétrico e (b) do campo magnético associado ao sinal na posição do avião. (c) Se o transmissor irradia uniformemente ao longo de um hemisfério, qual é a potência da transmissão?

• 16 Uma fonte pontual isotrópica emite luz com um comprimento de onda de  $500 \text{ nm}$  e uma potência de  $200 \text{ W}$ . Um detector de luz é posicionado a  $400 \text{ m}$  da fonte. Qual é a máxima taxa  $dB/dt$  com a qual a componente magnética da luz varia com o tempo na posição do detector?

• 15 O campo elétrico máximo a uma distância de  $10 \text{ m}$  de uma fonte pontual isotrópica é  $2,0 \text{ V/m}$ . Quais são (a) o valor máximo do campo magnético e (b) a intensidade média da luz a esta distância da fonte? (c) Qual é a potência da fonte?

• 14 Uma onda eletromagnética com uma frequência de  $4,00 \times 10^{14} \text{ Hz}$  está se propagando no vácuo no sentido positivo do eixo  $x$ . O campo elétrico da onda é paralelo ao eixo  $y$  e tem uma amplitude  $E_m$ . No instante  $t = 0$ , o campo elétrico no ponto  $P$ , situado sobre o eixo  $x$ , tem o valor de  $+E_m/4$  e está diminuindo com o tempo. Qual é a distância, ao longo do eixo  $x$ , entre o ponto  $P$  e o primeiro ponto com  $E = 0$  (a) no sentido negativo do eixo  $x$  e (b) no sentido positivo do eixo  $x$ ?

• 13 Um pedaço de cartolina pintado de preto, totalmente absorvente, de área  $A = 2,0 \text{ cm}^2$ , intercepta um pulso luminoso com uma intensidade de  $10 \text{ W/cm}^2$  produzido por uma lâmpada estroboscópica. Qual é a pressão exercida pela luz sobre a cartolina?

• 12 Uma onda eletromagnética com uma frequência de  $4,00 \times 10^{14} \text{ Hz}$  está se propagando no vácuo no sentido positivo do eixo  $x$ . O campo elétrico da onda é paralelo ao eixo  $y$  e tem uma amplitude  $E_m$ . No instante  $t = 0$ , o campo elétrico no ponto  $P$ , situado sobre o eixo  $x$ , tem o valor de  $+E_m/4$  e está diminuindo com o tempo. Qual é a distância, ao longo do eixo  $x$ , entre o ponto  $P$  e o primeiro ponto com  $E = 0$  (a) no sentido negativo do eixo  $x$  e (b) no sentido positivo do eixo  $x$ ?

• 11 Uma onda eletromagnética com uma frequência de  $4,00 \times 10^{14} \text{ Hz}$  está se propagando no vácuo no sentido positivo do eixo  $x$ . O campo elétrico da onda é paralelo ao eixo  $y$  e tem uma amplitude  $E_m$ . No instante  $t = 0$ , o campo elétrico no ponto  $P$ , situado sobre o eixo  $x$ , tem o valor de  $+E_m/4$  e está diminuindo com o tempo. Qual é a distância, ao longo do eixo  $x$ , entre o ponto  $P$  e o primeiro ponto com  $E = 0$  (a) no sentido negativo do eixo  $x$  e (b) no sentido positivo do eixo  $x$ ?

• 10 Uma onda eletromagnética com uma frequência de  $4,00 \times 10^{14} \text{ Hz}$  está se propagando no vácuo no sentido positivo do eixo  $x$ . O campo elétrico da onda é paralelo ao eixo  $y$  e tem uma amplitude  $E_m$ . No instante  $t = 0$ , o campo elétrico no ponto  $P$ , situado sobre o eixo  $x$ , tem o valor de  $+E_m/4$  e está diminuindo com o tempo. Qual é a distância, ao longo do eixo  $x$ , entre o ponto  $P$  e o primeiro ponto com  $E = 0$  (a) no sentido negativo do eixo  $x$  e (b) no sentido positivo do eixo  $x$ ?

• 9 Uma onda eletromagnética com uma frequência de  $4,00 \times 10^{14} \text{ Hz}$  está se propagando no vácuo no sentido positivo do eixo  $x$ . O campo elétrico da onda é paralelo ao eixo  $y$  e tem uma amplitude  $E_m$ . No instante  $t = 0$ , o campo elétrico no ponto  $P$ , situado sobre o eixo  $x$ , tem o valor de  $+E_m/4$  e está diminuindo com o tempo. Qual é a distância, ao longo do eixo  $x$ , entre o ponto  $P$  e o primeiro ponto com  $E = 0$  (a) no sentido negativo do eixo  $x$  e (b) no sentido positivo do eixo  $x$ ?

• 8 Uma onda eletromagnética com uma frequência de  $4,00 \times 10^{14} \text{ Hz}$  está se propagando no vácuo no sentido positivo do eixo  $x$ . O campo elétrico da onda é paralelo ao eixo  $y$  e tem uma amplitude  $E_m$ . No instante  $t = 0$ , o campo elétrico no ponto  $P$ , situado sobre o eixo  $x$ , tem o valor de  $+E_m/4$  e está diminuindo com o tempo. Qual é a distância, ao longo do eixo  $x$ , entre o ponto  $P$  e o primeiro ponto com  $E = 0$  (a) no sentido negativo do eixo  $x$  e (b) no sentido positivo do eixo  $x$ ?

• 7 Uma onda eletromagnética com uma frequência de  $4,00 \times 10^{14} \text{ Hz}$  está se propagando no vácuo no sentido positivo do eixo  $x$ . O campo elétrico da onda é paralelo ao eixo  $y$  e tem uma amplitude  $E_m$ . No instante  $t = 0$ , o campo elétrico no ponto  $P$ , situado sobre o eixo  $x$ , tem o valor de  $+E_m/4$  e está diminuindo com o tempo. Qual é a distância, ao longo do eixo  $x$ , entre o ponto  $P$  e o primeiro ponto com  $E = 0$  (a) no sentido negativo do eixo  $x$  e (b) no sentido positivo do eixo  $x$ ?

• 6 Uma onda eletromagnética com uma frequência de  $4,00 \times 10^{14} \text{ Hz}$  está se propagando no vácuo no sentido positivo do eixo  $x$ . O campo elétrico da onda é paralelo ao eixo  $y$  e tem uma amplitude  $E_m$ . No instante  $t = 0$ , o campo elétrico no ponto  $P$ , situado sobre o eixo  $x$ , tem o valor de  $+E_m/4$  e está diminuindo com o tempo. Qual é a distância, ao longo do eixo  $x$ , entre o ponto  $P$  e o primeiro ponto com  $E = 0$  (a) no sentido negativo do eixo  $x$  e (b) no sentido positivo do eixo  $x$ ?

• 5 Uma onda eletromagnética com uma frequência de  $4,00 \times 10^{14} \text{ Hz}$  está se propagando no vácuo no sentido positivo do eixo  $x$ . O campo elétrico da onda é paralelo ao eixo  $y$  e tem uma amplitude  $E_m$ . No instante  $t = 0$ , o campo elétrico no ponto  $P$ , situado sobre o eixo  $x$ , tem o valor de  $+E_m/4$  e está diminuindo com o tempo. Qual é a distância, ao longo do eixo  $x$ , entre o ponto  $P$  e o primeiro ponto com  $E = 0$  (a) no sentido negativo do eixo  $x$  e (b) no sentido positivo do eixo  $x$ ?

• 4 Uma onda eletromagnética com uma frequência de  $4,00 \times 10^{14} \text{ Hz}$  está se propagando no vácuo no sentido positivo do eixo  $x$ . O campo elétrico da onda é paralelo ao eixo  $y$  e tem uma amplitude  $E_m$ . No instante  $t = 0$ , o campo elétrico no ponto  $P$ , situado sobre o eixo  $x$ , tem o valor de  $+E_m/4$  e está diminuindo com o tempo. Qual é a distância, ao longo do eixo  $x$ , entre o ponto  $P$  e o primeiro ponto com  $E = 0$  (a) no sentido negativo do eixo  $x$  e (b) no sentido positivo do eixo  $x$ ?

• 3 Uma onda eletromagnética com uma frequência de  $4,00 \times 10^{14} \text{ Hz}$  está se propagando no vácuo no sentido positivo do eixo  $x$ . O campo elétrico da onda é paralelo ao eixo  $y$  e tem uma amplitude  $E_m$ . No instante  $t = 0$ , o campo elétrico no ponto  $P$ , situado sobre o eixo  $x$ , tem o valor de  $+E_m/4$  e está diminuindo com o tempo. Qual é a distância, ao longo do eixo  $x$ , entre o ponto  $P$  e o primeiro ponto com  $E = 0$  (a) no sentido negativo do eixo  $x$  e (b) no sentido positivo do eixo  $x$ ?

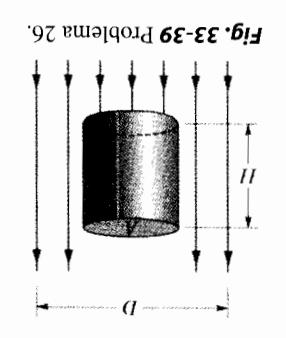
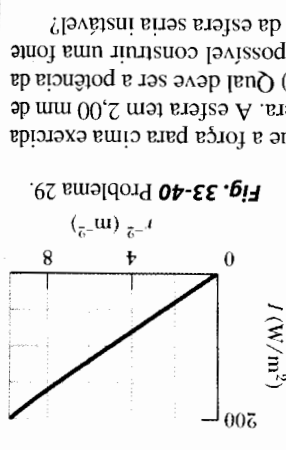


Fig. 33-40 Problema 29.

Fig. 33-39 Problema 26.

$\theta_2 = 90^\circ$  com o eixo  $y$ . Qual é a intensidade da luz transmitida pelo sistema?

••32 Na Fig. 33-41, um feixe de luz não-polarizada, com uma intensidade de  $43 \text{ W/m}^2$ , atravessa um sistema composto por dois filtros polarizadores cujas direções fazem ângulos  $\theta_1 = 70^\circ$  e  $\theta_2 = 90^\circ$  com o eixo  $y$ . Qual é a intensidade da luz transmitida pelo sistema?

••33 Na Fig. 34-42, um feixe de luz inicialmente não-polarizada atravessa três filtros polarizadores cujas direções de polarização fazem ângulos de  $\theta_1 = 40^\circ$ ,  $\theta_2 = 20^\circ$  e  $\theta_3 = 40^\circ$  com a direção do eixo  $y$ . Que porcentagem da intensidade inicial da luz é transmitida pelo conjunto? (Sugestão: preste atenção aos ângulos.)

••34 Na Fig. 33-42, um feixe de luz inicialmente não-polarizada atravessa três filtros polarizadores cujas direções de polarização fazem ângulos de  $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 50^\circ$  com a direção do eixo  $y$ . Que porcentagem da intensidade inicial da luz é transmitida pelo conjunto? (Sugestão: preste atenção aos ângulos.)

••35 Um feixe de luz não-polarizada com uma intensidade de  $10 \text{ mW/m}^2$  atravessa um filtro polarizador como na Fig. 33-12. Determine (a) a amplitude do campo elétrico da luz transmitida; (b) a pressão exercida pela radiação sobre o filtro polarizador.

••36 Na Fig. 33-41, um feixe de luz não-polarizada atravessa um conjunto de dois filtros polarizadores. Os ângulos  $\theta_1$  e  $\theta_2$  das direções de polarização dos filtros são medidos no sentido anti-horário no sentido positivo do eixo  $y$  (não estão desenhados em escala na figura). O ângulo  $\theta_1$  é fixo, mas o ângulo  $\theta_2$  pode ser ajustado. A Fig. 33-43 mostra a intensidade da luz que atravessa o sistema em função de  $\theta_2$ . (A escala do eixo de intensidades não é conhecida.) Que porcentagem da intensidade inicial da luz é transmitida pelo conjunto para  $\theta_2 = 90^\circ$ ?

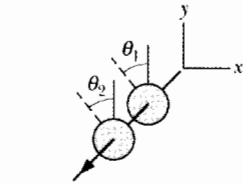


Fig. 33-41 Problemas 31, 32 e 36.

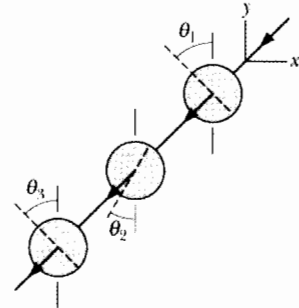


Fig. 33-42 Problemas 33 e 34.

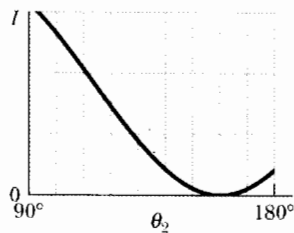


Fig. 33-43 Problema 36.

••37 Um feixe de luz polarizada passa por um conjunto de dois filtros polarizadores. Em relação à direção de polarização da luz incidente, as direções de polarização dos filtros são  $\theta$  para o primeiro filtro e  $90^\circ$  para o segundo. Se 10% da intensidade incidente é transmitido pelo conjunto, quanto vale  $\theta$ ?

••38 Na Fig. 33-44, um feixe de luz não-polarizada passa por um conjunto de três filtros polarizadores. Os ângulos  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  e  $\theta_3$  das direções de polarização são medidos no sentido anti-horário no sentido positivo do eixo  $y$  (não estão desenhados em escala). Os ângulos  $\theta_1$  e  $\theta_3$  são fixos, mas o ângulo  $\theta_2$  pode ser ajustado. A Fig. 33-45 mostra a in-

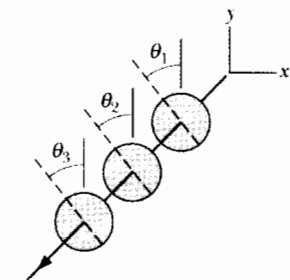


Fig. 33-44 Problemas 38, 40 e 42.

tensidade da luz que atravessa o conjunto em função de  $\theta_2$ . (A escala do eixo de intensidades não é conhecida.) Que porcentagem da intensidade inicial da luz é transmitida pelo conjunto para  $\theta_2 = 30^\circ$ ?

••39 Um feixe de luz parcialmente polarizada pode ser considerado como uma mistura de luz polarizada e não-polarizada. Suponha que um feixe deste tipo atravessa um filtro polarizador e que o filtro seja girado de  $360^\circ$  enquanto se mantém perpendicular ao feixe. Se a intensidade da luz transmitida varia por um fator de 5,0 durante a rotação do filtro, que fração da intensidade da luz incidente está associada à luz polarizada do feixe?

••40 Na Fig. 33-44, um feixe de luz não-polarizada atravessa um conjunto de três filtros polarizadores que transmite 0,0500 da intensidade luminosa inicial. As direções de polarização do primeiro e terceiro filtros são  $\theta_1 = 0^\circ$  e  $\theta_3 = 90^\circ$ . Determine (a) o menor e (b) o maior valor possível do ângulo  $\theta_2$  ( $< 90^\circ$ ) que define a direção de polarização do filtro 2.

••41 Na praia, a luz em geral é parcialmente polarizada devido às reflexões na areia e na água. Em uma certa praia, em um certo dia, no final da tarde, a componente horizontal do vetor campo elétrico é 2,3 vezes maior que a componente vertical. Um banhista fica de pé e coloca óculos polarizadores que eliminam totalmente a componente horizontal do campo elétrico. (a) Que fração da intensidade luminosa total chega aos olhos do banhista? (b) Ainda usando os óculos, o banhista se deita de lado na areia. Que fração da intensidade luminosa total chega agora aos olhos do banhista?

••42 Na Fig. 33-44, um feixe de luz não-polarizada atravessa um conjunto de três filtros polarizadores. Os ângulos  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  e  $\theta_3$  das direções de polarização são medidos no sentido anti-horário, no sentido positivo do eixo  $y$  (os ângulos não estão desenhados em escala). Os ângulos  $\theta_1$  e  $\theta_3$  são fixos, mas o ângulo  $\theta_2$  pode ser ajustado. A Fig. 33-46 mostra a intensidade da luz que atravessa o conjunto em função de  $\theta_2$ . (A escala do eixo de intensidades não é conhecida.) Que porcentagem da intensidade inicial da luz é transmitida pelo conjunto para  $\theta_2 = 90^\circ$ ?

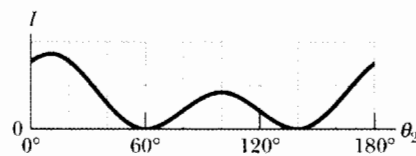


Fig. 33-46 Problema 42.

••43 Queremos fazer a direção de polarização de um feixe de luz polarizada girar de  $90^\circ$  fazendo o feixe passar por um ou mais filtros polarizadores. (a) Qual é o número mínimo de filtros necessário? (b) Qual é o número mínimo de filtros necessário se a intensidade da luz transmitida deve ser mais de 60% da intensidade original?

**Seção 33-8 Reflexão e Refração**

••44 A Fig. 33-47 mostra um raio luminoso sendo refletido em dois espelhos perpendiculares  $A$  e  $B$ . Determine o ângulo entre o raio incidente  $i$  e o raio  $r'$ .

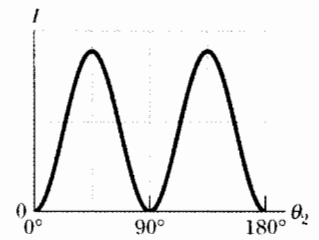


Fig. 33-45 Problema 38.

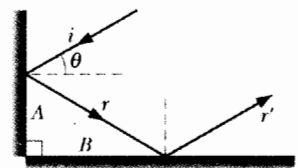


Fig. 33-47 Problema 44.



• 45 Um raio de luz que se propaga inicialmente no vácuo incide na superfície de uma placa de vidro. No vácuo, o raio faz um ângulo de  $32,0^\circ$  com a normal à superfície, enquanto no vidro faz um ângulo de  $21,0^\circ$  com a normal. Qual é o índice de refração do vidro?

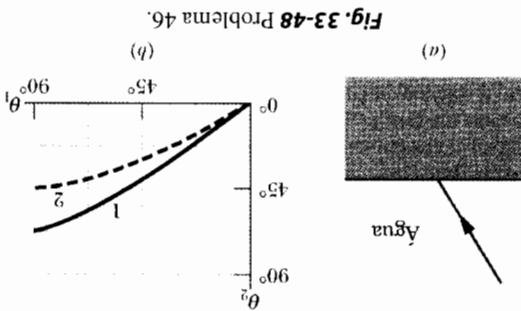


Fig. 33-48 Problema 46.

• 46 Na Fig. 33-48a, um raio luminoso que está se propagando inicialmente na água incide com um ângulo  $\theta_1$  em outro material, no qual parte da luz se refrata. O outro material pode ser do tipo 1 ou do tipo 2; a Fig. 33-48b mostra o ângulo de refração  $\theta_2$  em função do ângulo de incidência  $\theta_1$  para os dois tipos de material. Sem fazer nenhum cálculo, determine (a) se o índice de refração do material 1 é maior ou menor que o índice de refração da água ( $n = 1,33$ ) e (b) se o índice de refração do material 2 é maior ou menor que o índice de refração da água. Determine o índice de refração (c) do material 1 e (d) do material 2.

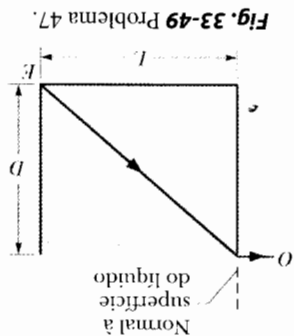


Fig. 33-49 Problema 47.

• 48 Na Fig. 33-50a, um raio luminoso que está se propagando inicialmente em um certo material incide com um ângulo  $\theta_1$  na água, onde parte da luz se refrata. O outro material pode ser do tipo 1 ou do tipo 2; a Fig. 33-50b mostra o ângulo de refração  $\theta_2$  em função do ângulo de incidência  $\theta_1$  para os dois tipos de material. Sem fazer nenhum cálculo, determine (a) se o índice de refração do material 1 é maior ou menor que o índice de refração da água ( $n = 1,33$ ) e (b) se o índice de refração do material 2 é maior ou menor que o índice de refração da água. Determine o índice de refração (c) do material 1 e (d) do material 2.

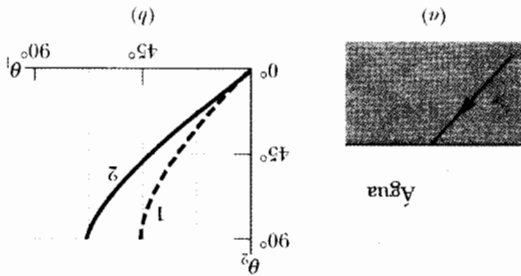


Fig. 33-50 Problema 48.

• 49 Na Fig. 33-51, uma estaca vertical com  $2,00$  m de comprimento se projeta do fundo de uma piscina até um ponto  $50,0$  cm acima da água. O Sol está  $55,0^\circ$  acima do horizonte. Qual é o comprimento da sombra da estaca no fundo da piscina?

• 50 Na Fig. 33-52a, um feixe luminoso que está se propagando inicialmente no material 1 incide no material 2 com um ângulo de  $30^\circ$ . A refração da luz no material 2 depende, entre outros fatores, do índice de refração  $n_2$  do material 2. A Fig. 33-52b mostra o ângulo de refração  $\theta_2$  em função de  $n_2$ . Qual é o índice de refração do material 1? (b) Se o ângulo de incidência aumenta para  $60^\circ$  e  $n_2 = 2,4$ , qual é o valor de  $\theta_2$ ?

• 51 Na Fig. 33-53, a luz incide, fazendo um ângulo  $\theta_1 = 40,1^\circ$  com a normal, na interface entre dois materiais transparentes. Parte da luz atravessa as outras três camadas transparentes e parte é refletida para cima e escapa para o ar. Determine os valores (a) de  $\theta_2$ ; (b) de  $\theta_3$ .

• 52 Arco-íris produzidos por gotas quadradas. Suponha que em um planeta exótico as gotas de chuva tenham uma seção reta quadrada e caiam sempre com uma face paralela ao solo. A Fig. 33-54 mostra uma destas gotas, na qual incide um feixe de luz branca com um ângulo de incidência  $\theta = 70,0^\circ$  no ponto P. A parte da luz que penetra na gota se propaga até o ponto A, onde parte é refratada de volta para o ar e a outra parte é refletida. Esta luz refletida chega ao ponto B.

• 53 Na Fig. 33-55, um raio incide de cima em uma das faces de um prisma triangular de vidro imerso no ar. O ângulo de incidência  $\theta$  é escolhido de tal forma que o raio de luz que sai do ponto A ou do ponto B.

Fig. 33-52 Problema 50.

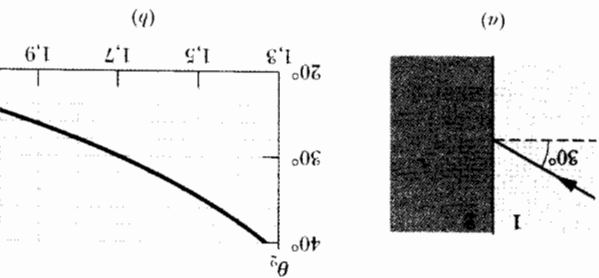


Fig. 33-53 Problema 51

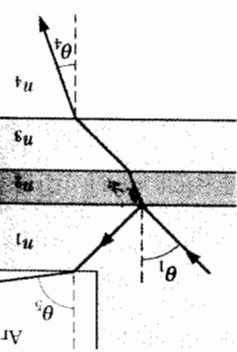
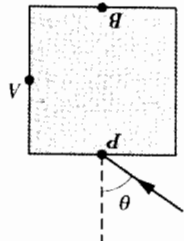


Fig. 33-54 Problema 52



emergente faz o mesmo ângulo  $\theta$  com a normal à outra face. Mostre que o índice de refração do vidro é dado por

$$n = \frac{\sin \frac{1}{2}(\psi + \phi)}{\sin \frac{1}{2}\phi}$$

onde  $\phi$  é o ângulo do vértice superior do prisma e  $\psi$  é o ângulo de desvio, definido como o ângulo entre o raio emergente e o raio incidente. (Nessas condições, o ângulo de desvio  $\psi$  tem o menor valor possível, que é denominado ângulo de desvio mínimo.)

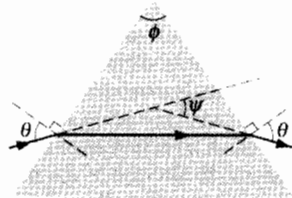


Fig. 33-55 Problemas 53 e 62.

**Seção 33-9 Reflexão Interna Total**

••54 O índice de refração do benzeno é 1,8. Qual é o ângulo crítico para um raio luminoso que se propaga no benzeno em direção a uma interface plana do benzeno com o ar?

••55 Uma fonte luminosa pontual está 80,0 cm abaixo da superfície de uma piscina. Calcule o diâmetro do círculo na superfície através do qual a luz emerge da água.

••56 Na Fig. 33-56, um feixe luminoso que se propaga inicialmente no material 1 é refratado para o material 2, atravessa este material e incide com o ângulo crítico na interface entre os meios 2 e 3. Os índices de refração são  $n_1 = 1,60$ ,  $n_2 = 1,40$  e  $n_3 = 1,20$ . (a) Qual é o valor do ângulo  $\theta$ ? (b) Se o valor de  $\theta$  aumentar, a luz conseguirá penetrar no meio 3?

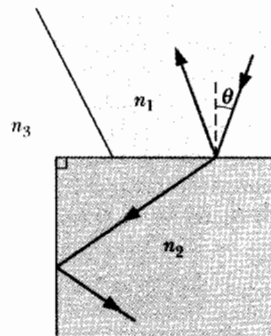


Fig. 33-56 Problema 56.

••57 No diagrama de raios da Fig. 33-57, onde os ângulos não estão desenhados em escala, o raio incidente com o ângulo crítico na interface entre os materiais 2 e 3. O ângulo  $\psi$  é  $60^\circ$  e dois dos índices de refração são  $n_1 = 1,70$  e  $n_2 = 1,60$ . Determine (a) o índice de refração  $n_3$  e (b) o valor do ângulo  $\theta$ . (c) Se o valor de  $\theta$  aumentar, a luz conseguirá penetrar no meio 3?

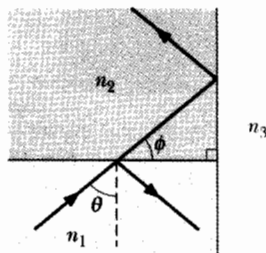


Fig. 33-57 Problema 57.

••58 Na Fig. 33-58, onde  $n_1 = 1,70$ ,  $n_2 = 1,50$  e  $n_3 = 1,30$ , a luz é refratada do material 1 para o material 2. Se a luz incide no ponto A com o ângulo crítico da interface entre os materiais 2 e 3, determine (a) o ângulo de refração no ponto B e (b) o ângulo inicial  $\theta$ . Se, em vez disso, a luz incide no ponto B com o ângulo crítico da interface entre os materiais 2 e 3, determine (c) o ângulo de refração no ponto A e (d) o ângulo inicial  $\theta$ . Se, em vez disso, a luz incide no ponto A com o ângulo de Brewster para a interface entre os materiais 2 e 3, determine (e) o ângulo de refração no ponto B e (f) o ângulo inicial  $\theta$ .

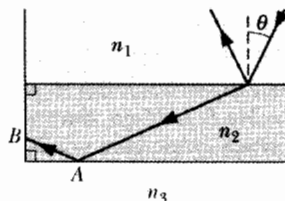


Fig. 33-58 Problema 58.

••59 A Fig. 33-59 mostra uma fibra óptica simplificada: um núcleo de plástico ( $n_1 = 1,58$ ) envolvido por um revestimento de plástico com um índice de refração menor ( $n_2 = 1,53$ ). Um raio luminoso incide em uma das extremidades da fibra com um ângulo  $\theta$ . O raio

deve sofrer reflexão interna total no ponto A, onde atinge a interface núcleo-revestimento. (Isto é necessário para que não haja perda de luz cada vez que o raio incide na interface.) Qual é o maior valor de  $\theta$  para o qual é possível que haja reflexão interna total no ponto A?

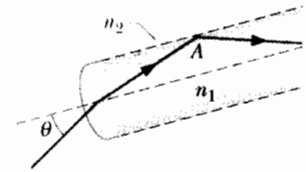


Fig. 33-59 Problema 59.

••60 Na Fig. 33-60, um raio luminoso incide com um ângulo  $\theta$  em uma face de um cubo de plástico transparente feito de uma material cujo índice de refração é 1,56. As dimensões indicadas na figura são  $H = 2,00$  cm e  $W = 3,00$  cm. A luz atravessa o cubo e chega a uma das faces, onde sofre reflexão (no interior do cubo) e possivelmente refração (escapando para o ar). Este é o ponto da primeira reflexão. A luz refletida volta a atravessar o cubo e chega à outra face, onde sofre uma segunda reflexão. Se  $\theta_1 = 40^\circ$ , determine em que face está (a) o ponto da primeira reflexão e (b) o ponto da segunda reflexão. Se existe refração (c) no ponto da primeira reflexão e/ou (d) no ponto da segunda reflexão, determine o ângulo de refração; se não existe, responda "não há refração". Se  $\theta_1 = 70^\circ$ , determine em que face está (e) o ponto da primeira reflexão e (f) o ponto da segunda reflexão. Se existe refração (g) no ponto da primeira reflexão e/ou (h) no ponto da segunda reflexão, determine o ângulo de refração; se não existe, responda "não há refração".

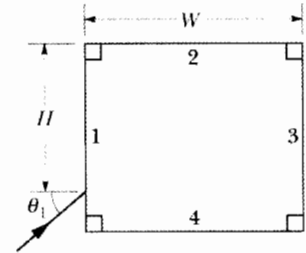


Fig. 33-60 Problema 60.

••61 Na Fig. 33-61, um raio luminoso incide perpendicularmente à face ab de um prisma de vidro ( $n = 1,52$ ). Determine o maior valor possível do ângulo  $\phi$  para que o raio seja totalmente refletido na face ac do prisma se este estiver imerso (a) no ar; (b) na água.



Fig. 33-61 Problema 61.

••62 Suponha que o ângulo do vértice superior do prisma de vidro da Fig. 33-55 seja  $\phi = 60,0^\circ$  e que o índice de refração do vidro seja  $n = 1,60$ . (a) Qual é o menor ângulo de incidência  $\theta$  para o qual um raio pode entrar na face esquerda do prisma e sair na face direita? (b) Qual deve ser o ângulo de incidência  $\theta$  para que o raio saia do prisma com um o mesmo ângulo  $\theta$  com que entrou, como na Fig. 33-55? (Veja o Problema 51.)

••63 Na Fig. 33-62, um raio luminoso penetra em um prisma triangular, cujo ângulo do vértice superior é  $90^\circ$  no ponto P, com um ângulo de incidência  $\theta$ . Parte da luz é refratada no ponto Q com um ângulo de refração de  $90^\circ$ . (a) Qual é o índice de refração do prisma em termos de  $\theta$ ? (b) Qual, numericamente, é o maior valor possível do índice de refração do prisma? Explique o que acontece ao raio luminoso no ponto Q quando o ângulo de incidência nesse ponto (c) aumenta ligeiramente; (d) diminui ligeiramente.

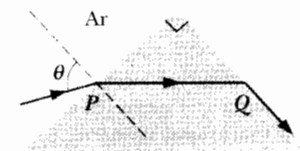


Fig. 33-62 Problema 63.

**Seção 33-10 Polarização por Reflexão**

••64 (a) Para que ângulo de incidência a luz refletida na água é totalmente polarizada? (b) Este ângulo depende do comprimento de onda da luz?

••65 Um raio de luz que está se propagando na água (índice de refração 1,33) incide em uma placa de vidro cujo índice de refração é

1,53. Para que ângulo de incidência a luz refletida é totalmente polarizada?

••66 Na Fig. 33-63, um raio luminoso que estava se propagando inicialmente no ar incide em um material 2 com um índice de refração  $n_2 = 1,5$ . Abaixo do material 2 esta o material 3, com um índice de refração  $n_3$ . O raio incide na interface ar-material 2 com o ângulo de Brewster para esta interface e incide na interface material 2-material 3 com o ângulo de Brewster para esta interface. Qual é o valor de  $n_3$ ?

**Problemas Adicionais**

67 Na Fig. 33-64, um feixe de luz não-polarizada, com uma intensidade de 25 W/m<sup>2</sup>, atravessa um sistema composto por quatro filtros polarizadores cujos ângulos de polarização são  $\theta_1 = 40^\circ$ ,  $\theta_2 = 20^\circ$ ,  $\theta_3 = 20^\circ$  e  $\theta_4 = 30^\circ$ . Qual é a intensidade da luz transmitida pelo sistema?

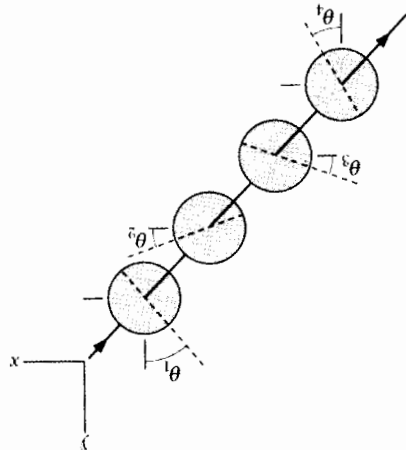


Fig. 33-64 Problema 67.

68 Na Fig. 33-65, dois raios luminosos que estavam se propagando inicialmente no ar passam por cinco placas de plástico transparente e voltam para o ar. As placas têm interfaces paralelas e espessura desconhecida; os índices de refração são  $n_1 = 1,6$ ,  $n_2 = 1,5$ ,  $n_3 = 1,4$  e  $n_4 = 1,6$ . O ângulo de incidência do raio b é  $\theta_b = 20^\circ$ . Em relação à normal à última interface, determine (a) o ângulo de saída do raio a; (b) o ângulo de saída do raio b. Se em vez de ar houver um vidro com um índice de refração 1,5 à esquerda e à direita das placas, determine o ângulo de saída (c) do raio a; (d) do raio b.

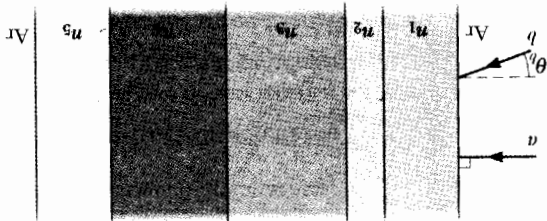


Fig. 33-65 Problema 68.

69 Na Fig. 33-66, um albatroz está planando horizontalmente com uma velocidade constante de 15 m/s acima de um terreno plano, movendo-se em um plano vertical que contém o Sol. A ave se aproxima de uma parede de altura  $h = 2,0$  m e se encontra à mesma altura do solo que a extremidade superior da parede.

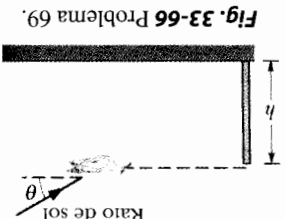


Fig. 33-66 Problema 69.

Nesta hora do dia, o ângulo do Sol em relação ao solo é  $\theta = 30^\circ$ . Com que velocidade a sombra do albatroz se move (a) horizontalmente, ao longo do solo; (b) verticalmente, ao longo da parede? Mas tarde, um gavião percorre o mesmo caminho, com a mesma velocidade. Você observa que no momento em que a sombra do gavião atinge a parede, a velocidade da sombra aumenta consideravelmente. (c) O Sol está mais alto ou mais baixo no céu neste momento do que durante o voo do albatroz? (d) Se a velocidade da sombra do gavião na parede é 45 m/s, qual é o ângulo  $\theta$  do Sol na mesma ocasião?

70 Na Fig. 33-67a, um feixe de luz que estava se propagando no material 1 incide com um ângulo  $\theta_1 = 40^\circ$  na interface com o material 2. Parte da luz penetra no material 2 e parte desta luz penetra no material 3; todas as interfaces são paralelas. A orientação do feixe no material 3 depende em parte do índice de refração  $n_3$  do terceiro material. A Fig. 33-67b mostra o ângulo  $\theta_3$  em função de  $n_3$ . (a) É possível calcular o índice de refração do material 1 com base nestas informações? Se a resposta for afirmativa, determine o valor de  $n_1$ . (b) É possível calcular o índice de refração do material 2 com base nestas informações? Se a resposta for afirmativa, determine o valor de  $n_2$ . (c) Se  $\theta_1 = 70^\circ$  e  $n_3 = 2,4$ , qual é o valor de  $\theta_3$ ?

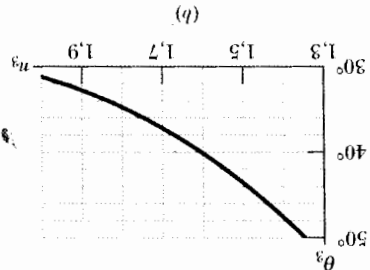
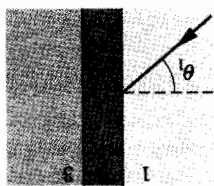


Fig. 33-67 Problema 70.

71 Um peixe-gato está 2,00 m abaixo da superfície de um lago. Qual é o diâmetro da circunferência na superfície que delimita a região na qual o peixe pode ver o que existe do lado de fora do lago? (b) Se o peixe desce para uma profundidade maior, o diâmetro da circunferência aumenta, diminui ou continua o mesmo?

72 Dispersão em um vidro de janela. Na Fig. 33-68, um feixe de luz branca incide com um ângulo  $\theta = 50^\circ$  em um vidro comum de janela (mostrado de perfil). Para esse tipo de vidro, o índice de refração da luz visível varia de 1,524 na extremidade de azul do espectro a 1,509 na extremidade vermelha. As duas superfícies do vidro são paralelas. Determine a dispersão angular das cores do feixe (a) quando a luz entra no vidro e (b) quando a luz sai do lado oposto. (Sugestão: quando você olha para um objeto através de um vidro de janela, as cores do objeto se dispersam como, por exemplo, na Fig. 33-21?)

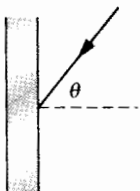


Fig. 33-68 Problema 72.

onde  $\theta_1$  e  $\theta_2$  são os ângulos de incidência e  $\theta_3$  é o ângulo de refração. (d) Para que ângulo de incidência a luz refletida é totalmente polarizada?

73 A componente horizontalmente polarizada de uma onda eletromagnética plana de frequência  $f = 4,00 \times 10^{14}$  Hz se propaga no vácuo na direção da origem dos eixos  $x$  e  $y$ . A amplitude da componente horizontalmente polarizada é  $E_0 = 4,00$  V/m. (a) Qual é a amplitude da componente verticalmente polarizada? (b) Qual é a amplitude da onda eletromagnética? (c) Qual é a amplitude da componente horizontalmente polarizada? (d) Qual é a amplitude da componente verticalmente polarizada? (e) Qual é a amplitude da onda eletromagnética? (f) Qual é a amplitude da componente horizontalmente polarizada? (g) Qual é a amplitude da componente verticalmente polarizada? (h) Qual é a amplitude da onda eletromagnética? (i) Qual é a amplitude da componente horizontalmente polarizada? (j) Qual é a amplitude da componente verticalmente polarizada? (k) Qual é a amplitude da onda eletromagnética? (l) Qual é a amplitude da componente horizontalmente polarizada? (m) Qual é a amplitude da componente verticalmente polarizada? (n) Qual é a amplitude da onda eletromagnética? (o) Qual é a amplitude da componente horizontalmente polarizada? (p) Qual é a amplitude da componente verticalmente polarizada? (q) Qual é a amplitude da onda eletromagnética? (r) Qual é a amplitude da componente horizontalmente polarizada? (s) Qual é a amplitude da componente verticalmente polarizada? (t) Qual é a amplitude da onda eletromagnética? (u) Qual é a amplitude da componente horizontalmente polarizada? (v) Qual é a amplitude da componente verticalmente polarizada? (w) Qual é a amplitude da onda eletromagnética? (x) Qual é a amplitude da componente horizontalmente polarizada? (y) Qual é a amplitude da componente verticalmente polarizada? (z) Qual é a amplitude da onda eletromagnética?

74 Na Fig. 33-69, um raio luminoso incide na interface entre o ar e um material 2 com um índice de refração  $n_2$ . O raio incide na interface ar-material 2 com o ângulo de Brewster para esta interface e incide na interface material 2-material 3 com o ângulo de Brewster para esta interface. Qual é o valor de  $n_3$ ?

75 Na Fig. 33-69, um raio luminoso incide na interface entre o ar e um material 2 com um índice de refração  $n_2$ . O raio incide na interface ar-material 2 com o ângulo de Brewster para esta interface e incide na interface material 2-material 3 com o ângulo de Brewster para esta interface. Qual é o valor de  $n_3$ ?

76 Em um sistema de espelhos, a luz incide no espelho 1 com um ângulo de incidência  $\theta_1$ . O raio refletido incide no espelho 2 com um ângulo de incidência  $\theta_2$ . O raio refletido do espelho 2 incide no espelho 3 com um ângulo de incidência  $\theta_3$ . O raio refletido do espelho 3 incide no espelho 4 com um ângulo de incidência  $\theta_4$ . O raio refletido do espelho 4 incide no espelho 5 com um ângulo de incidência  $\theta_5$ . O raio refletido do espelho 5 incide no espelho 6 com um ângulo de incidência  $\theta_6$ . O raio refletido do espelho 6 incide no espelho 7 com um ângulo de incidência  $\theta_7$ . O raio refletido do espelho 7 incide no espelho 8 com um ângulo de incidência  $\theta_8$ . O raio refletido do espelho 8 incide no espelho 9 com um ângulo de incidência  $\theta_9$ . O raio refletido do espelho 9 incide no espelho 10 com um ângulo de incidência  $\theta_{10}$ . O raio refletido do espelho 10 incide no espelho 11 com um ângulo de incidência  $\theta_{11}$ . O raio refletido do espelho 11 incide no espelho 12 com um ângulo de incidência  $\theta_{12}$ . O raio refletido do espelho 12 incide no espelho 13 com um ângulo de incidência  $\theta_{13}$ . O raio refletido do espelho 13 incide no espelho 14 com um ângulo de incidência  $\theta_{14}$ . O raio refletido do espelho 14 incide no espelho 15 com um ângulo de incidência  $\theta_{15}$ . O raio refletido do espelho 15 incide no espelho 16 com um ângulo de incidência  $\theta_{16}$ . O raio refletido do espelho 16 incide no espelho 17 com um ângulo de incidência  $\theta_{17}$ . O raio refletido do espelho 17 incide no espelho 18 com um ângulo de incidência  $\theta_{18}$ . O raio refletido do espelho 18 incide no espelho 19 com um ângulo de incidência  $\theta_{19}$ . O raio refletido do espelho 19 incide no espelho 20 com um ângulo de incidência  $\theta_{20}$ . O raio refletido do espelho 20 incide no espelho 21 com um ângulo de incidência  $\theta_{21}$ . O raio refletido do espelho 21 incide no espelho 22 com um ângulo de incidência  $\theta_{22}$ . O raio refletido do espelho 22 incide no espelho 23 com um ângulo de incidência  $\theta_{23}$ . O raio refletido do espelho 23 incide no espelho 24 com um ângulo de incidência  $\theta_{24}$ . O raio refletido do espelho 24 incide no espelho 25 com um ângulo de incidência  $\theta_{25}$ . O raio refletido do espelho 25 incide no espelho 26 com um ângulo de incidência  $\theta_{26}$ . O raio refletido do espelho 26 incide no espelho 27 com um ângulo de incidência  $\theta_{27}$ . O raio refletido do espelho 27 incide no espelho 28 com um ângulo de incidência  $\theta_{28}$ . O raio refletido do espelho 28 incide no espelho 29 com um ângulo de incidência  $\theta_{29}$ . O raio refletido do espelho 29 incide no espelho 30 com um ângulo de incidência  $\theta_{30}$ . O raio refletido do espelho 30 incide no espelho 31 com um ângulo de incidência  $\theta_{31}$ . O raio refletido do espelho 31 incide no espelho 32 com um ângulo de incidência  $\theta_{32}$ . O raio refletido do espelho 32 incide no espelho 33 com um ângulo de incidência  $\theta_{33}$ . O raio refletido do espelho 33 incide no espelho 34 com um ângulo de incidência  $\theta_{34}$ . O raio refletido do espelho 34 incide no espelho 35 com um ângulo de incidência  $\theta_{35}$ . O raio refletido do espelho 35 incide no espelho 36 com um ângulo de incidência  $\theta_{36}$ . O raio refletido do espelho 36 incide no espelho 37 com um ângulo de incidência  $\theta_{37}$ . O raio refletido do espelho 37 incide no espelho 38 com um ângulo de incidência  $\theta_{38}$ . O raio refletido do espelho 38 incide no espelho 39 com um ângulo de incidência  $\theta_{39}$ . O raio refletido do espelho 39 incide no espelho 40 com um ângulo de incidência  $\theta_{40}$ . O raio refletido do espelho 40 incide no espelho 41 com um ângulo de incidência  $\theta_{41}$ . O raio refletido do espelho 41 incide no espelho 42 com um ângulo de incidência  $\theta_{42}$ . O raio refletido do espelho 42 incide no espelho 43 com um ângulo de incidência  $\theta_{43}$ . O raio refletido do espelho 43 incide no espelho 44 com um ângulo de incidência  $\theta_{44}$ . O raio refletido do espelho 44 incide no espelho 45 com um ângulo de incidência  $\theta_{45}$ . O raio refletido do espelho 45 incide no espelho 46 com um ângulo de incidência  $\theta_{46}$ . O raio refletido do espelho 46 incide no espelho 47 com um ângulo de incidência  $\theta_{47}$ . O raio refletido do espelho 47 incide no espelho 48 com um ângulo de incidência  $\theta_{48}$ . O raio refletido do espelho 48 incide no espelho 49 com um ângulo de incidência  $\theta_{49}$ . O raio refletido do espelho 49 incide no espelho 50 com um ângulo de incidência  $\theta_{50}$ . O raio refletido do espelho 50 incide no espelho 51 com um ângulo de incidência  $\theta_{51}$ . O raio refletido do espelho 51 incide no espelho 52 com um ângulo de incidência  $\theta_{52}$ . O raio refletido do espelho 52 incide no espelho 53 com um ângulo de incidência  $\theta_{53}$ . O raio refletido do espelho 53 incide no espelho 54 com um ângulo de incidência  $\theta_{54}$ . O raio refletido do espelho 54 incide no espelho 55 com um ângulo de incidência  $\theta_{55}$ . O raio refletido do espelho 55 incide no espelho 56 com um ângulo de incidência  $\theta_{56}$ . O raio refletido do espelho 56 incide no espelho 57 com um ângulo de incidência  $\theta_{57}$ . O raio refletido do espelho 57 incide no espelho 58 com um ângulo de incidência  $\theta_{58}$ . O raio refletido do espelho 58 incide no espelho 59 com um ângulo de incidência  $\theta_{59}$ . O raio refletido do espelho 59 incide no espelho 60 com um ângulo de incidência  $\theta_{60}$ . O raio refletido do espelho 60 incide no espelho 61 com um ângulo de incidência  $\theta_{61}$ . O raio refletido do espelho 61 incide no espelho 62 com um ângulo de incidência  $\theta_{62}$ . O raio refletido do espelho 62 incide no espelho 63 com um ângulo de incidência  $\theta_{63}$ . O raio refletido do espelho 63 incide no espelho 64 com um ângulo de incidência  $\theta_{64}$ . O raio refletido do espelho 64 incide no espelho 65 com um ângulo de incidência  $\theta_{65}$ . O raio refletido do espelho 65 incide no espelho 66 com um ângulo de incidência  $\theta_{66}$ . O raio refletido do espelho 66 incide no espelho 67 com um ângulo de incidência  $\theta_{67}$ . O raio refletido do espelho 67 incide no espelho 68 com um ângulo de incidência  $\theta_{68}$ . O raio refletido do espelho 68 incide no espelho 69 com um ângulo de incidência  $\theta_{69}$ . O raio refletido do espelho 69 incide no espelho 70 com um ângulo de incidência  $\theta_{70}$ . O raio refletido do espelho 70 incide no espelho 71 com um ângulo de incidência  $\theta_{71}$ . O raio refletido do espelho 71 incide no espelho 72 com um ângulo de incidência  $\theta_{72}$ . O raio refletido do espelho 72 incide no espelho 73 com um ângulo de incidência  $\theta_{73}$ . O raio refletido do espelho 73 incide no espelho 74 com um ângulo de incidência  $\theta_{74}$ . O raio refletido do espelho 74 incide no espelho 75 com um ângulo de incidência  $\theta_{75}$ . O raio refletido do espelho 75 incide no espelho 76 com um ângulo de incidência  $\theta_{76}$ . O raio refletido do espelho 76 incide no espelho 77 com um ângulo de incidência  $\theta_{77}$ . O raio refletido do espelho 77 incide no espelho 78 com um ângulo de incidência  $\theta_{78}$ . O raio refletido do espelho 78 incide no espelho 79 com um ângulo de incidência  $\theta_{79}$ . O raio refletido do espelho 79 incide no espelho 80 com um ângulo de incidência  $\theta_{80}$ . O raio refletido do espelho 80 incide no espelho 81 com um ângulo de incidência  $\theta_{81}$ . O raio refletido do espelho 81 incide no espelho 82 com um ângulo de incidência  $\theta_{82}$ . O raio refletido do espelho 82 incide no espelho 83 com um ângulo de incidência  $\theta_{83}$ . O raio refletido do espelho 83 incide no espelho 84 com um ângulo de incidência  $\theta_{84}$ . O raio refletido do espelho 84 incide no espelho 85 com um ângulo de incidência  $\theta_{85}$ . O raio refletido do espelho 85 incide no espelho 86 com um ângulo de incidência  $\theta_{86}$ . O raio refletido do espelho 86 incide no espelho 87 com um ângulo de incidência  $\theta_{87}$ . O raio refletido do espelho 87 incide no espelho 88 com um ângulo de incidência  $\theta_{88}$ . O raio refletido do espelho 88 incide no espelho 89 com um ângulo de incidência  $\theta_{89}$ . O raio refletido do espelho 89 incide no espelho 90 com um ângulo de incidência  $\theta_{90}$ . O raio refletido do espelho 90 incide no espelho 91 com um ângulo de incidência  $\theta_{91}$ . O raio refletido do espelho 91 incide no espelho 92 com um ângulo de incidência  $\theta_{92}$ . O raio refletido do espelho 92 incide no espelho 93 com um ângulo de incidência  $\theta_{93}$ . O raio refletido do espelho 93 incide no espelho 94 com um ângulo de incidência  $\theta_{94}$ . O raio refletido do espelho 94 incide no espelho 95 com um ângulo de incidência  $\theta_{95}$ . O raio refletido do espelho 95 incide no espelho 96 com um ângulo de incidência  $\theta_{96}$ . O raio refletido do espelho 96 incide no espelho 97 com um ângulo de incidência  $\theta_{97}$ . O raio refletido do espelho 97 incide no espelho 98 com um ângulo de incidência  $\theta_{98}$ . O raio refletido do espelho 98 incide no espelho 99 com um ângulo de incidência  $\theta_{99}$ . O raio refletido do espelho 99 incide no espelho 100 com um ângulo de incidência  $\theta_{100}$ .

73 A componente magnética de uma onda polarizada é dada por  $B_y = (4,00 \mu\text{T}) \sin[ky + (2,00 \times 10^{15} \text{ s}^{-1})t]$ . Determine (a) a direção de propagação da onda; (b) a direção de polarização da luz; (c) a intensidade da onda. (d) Escreva uma expressão para o campo elétrico da onda, incluindo o valor do número de onda. (e) Determine o comprimento de onda. (f) Em que região do espectro eletromagnético está esta onda?

74 Na Fig. 33-69, a luz do raio A é refratada pelo material 1 ( $n_1 = 1,60$ ), atravessa uma fina camada do material 2 ( $n_2 = 1,80$ ) e incide com o ângulo crítico na interface entre os materiais 2 e 3 ( $n_3 = 1,30$ ). (a) Qual é o valor do ângulo de incidência  $\theta_A$ ? (b) Se  $\theta_A$  diminui, parte da luz consegue passar para o material 3?

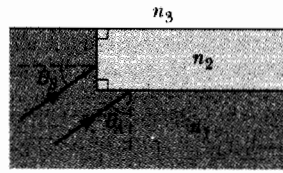


Fig. 33-69 Problema 74.

A luz do raio B é refratada pelo material 1, atravessa o material 2 e incide com o ângulo crítico na interface entre os materiais 2 e 3. (c) Qual é o valor do ângulo de incidência  $\theta_B$ ? (b) Se  $\theta_B$  diminui, parte da luz consegue passar para o material 3?

75 Na Fig. 33-70, um raio luminoso entra em uma placa de vidro no ponto A, com um ângulo de incidência  $\theta_i = 45,0^\circ$ , e sofre reflexão interna total no ponto B. De acordo com estas informações, qual é o valor mínimo do índice de refração do vidro?

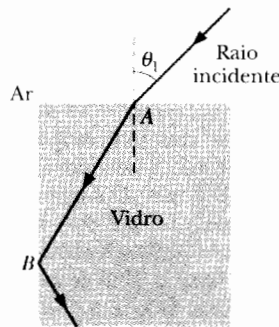


Fig. 33-70 Problema 75.

76 Em uma região do espaço onde as forças gravitacionais podem ser desprezadas, uma esfera é acelerada por um feixe luminoso uniforme de intensidade  $6,0 \text{ mW/m}^2$ . A esfera, totalmente absorvente, tem um raio de  $2,0 \mu\text{m}$  e uma massa específica uniforme de  $5,0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ . Determine o módulo da aceleração da esfera.

77 Arco-íris. A Fig. 33-71 mostra um raio luminoso entrando e saindo de uma gota d'água esférica depois de sofrer uma reflexão interna (veja a Fig. 33-22a). A diferença entre a direção final do raio e a direção inicial é o ângulo de desvio  $\theta_{\text{desv}}$ . (a) Mostre que  $\theta_{\text{desv}}$  é dado por

$$\theta_{\text{desv}} = 180^\circ + 2\theta_i - 4\theta_r,$$

onde  $\theta_i$  é o ângulo de incidência do raio na gota e  $\theta_r$  é o ângulo do raio refratado. (b) Use a lei de Snell para expressar  $\theta_r$  em termos de  $\theta_i$  e do índice de refração  $n$  da água. Em seguida, use uma calculadora gráfica ou um computador para plotar  $\theta_{\text{desv}}$  em função de  $\theta_i$  para  $n = 1,331$  (luz vermelha) e para  $n = 1,333$  (luz azul).

A curva para a luz vermelha e a curva para a luz azul passam por um mínimo para valores diferentes de  $\theta_{\text{desv}}$ , o que significa que existe um ângulo de desvio mínimo diferente para cada cor. A luz de uma dada cor que sai da gota com o ângulo de desvio mínimo é especialmente intensa porque os raios se acumulam nas vizinhanças deste ângulo. Assim, a luz vermelha mais intensa sai da gota com um certo ângulo e a luz azul mais intensa sai da gota com outro ângulo.

Determine o ângulo de desvio mínimo (c) para a luz vermelha e (d) para a luz azul. (e) Se estas cores estão nas extremidades de um arco-íris (Fig. 33-22a), qual é a largura angular do arco-íris?

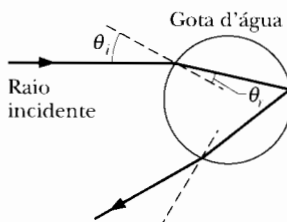


Fig. 33-71 Problema 77.

78 O arco-íris primário descrito no Problema 77 é o tipo mais comum, produzido pela luz refletida apenas uma vez no interior das gotas de chuva. Um tipo mais raro é o arco-íris secundário descrito na Seção 33-8, produzido pela luz refletida duas vezes no interior das gotas (Fig. 33-72a). (a) Mostre que o desvio angular produzido por uma gota de chuva em um raio luminoso é dado por

$$\theta_{\text{desv}} = (180^\circ)k + 2\theta_i - 2(k + 1)\theta_r,$$

onde  $k$  é o número de reflexões internas. Use o método do Problema 77 para determinar o ângulo de desvio mínimo (b) para a luz vermelha e (c) para a luz azul de um arco-íris secundário. (d) Determine a largura angular deste tipo de arco-íris (Fig. 33-22d).

O arco-íris terciário estaria associado a três reflexões internas (Fig. 33-72b). É provável que este tipo de arco-íris realmente aconteça, mas, como foi comentado na Seção 33-8, não é possível observá-lo porque é muito fraco e ocorre na direção do Sol. Determine o ângulo de desvio mínimo (e) para a luz vermelha e (f) para a luz azul de um arco-íris terciário. (g) Determine a largura angular desse tipo de arco-íris.

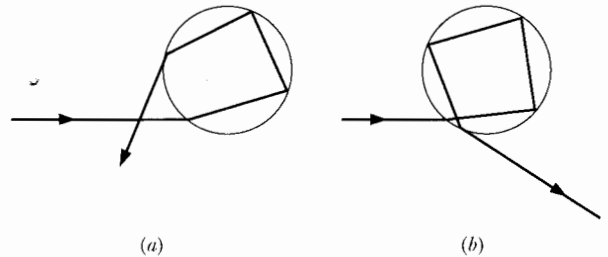


Fig. 33-72 Problema 78.

79 Quando uma luz vermelha que está se propagando no vácuo incide em uma certa placa de vidro com o ângulo de Brewster, o ângulo de refração é  $32,0^\circ$ . Determine (a) o índice de refração do vidro e (b) o ângulo de Brewster.

80 Mostre, a partir das Eqs. 33-11 e 33-17, que  $E(x, t)$  e  $B(x, t)$ , o campo elétrico e o campo magnético associados a uma onda eletromagnética, devem satisfazer às "equações de onda"

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} \quad \text{e} \quad \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 B}{\partial x^2}.$$

81 Na Fig. 33-73, um feixe de luz não-polarizada atravessa um conjunto de três filtros polarizadores no qual as direções de polarização do primeiro e do terceiro filtro são  $\theta_1 = 30^\circ$  (no sentido anti-horário) e  $\theta_3 = 30^\circ$  (no sentido horário). Que fração da luz incidente é transmitida pelo conjunto?

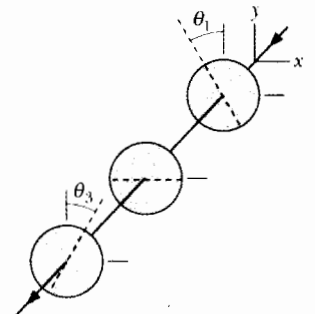


Fig. 33-73 Problema 81.

82 Na Fig. 33-74, dois espelhos mutuamente perpendiculares formam os lados de um recipiente com água. (a) Um raio luminoso incide verticalmente na superfície da água, vindo de cima. Mostre que o raio emergente é paralelo ao raio incidente. Suponha que o raio é refletido duas vezes nos espelhos. (b) Repita a análise para o caso de incidência oblíqua, com o raio incidente no plano da figura.



Fig. 33-74 Problema 82.

$\theta_2 = 90^\circ$  com o eixo  $y$ . Qual é a intensidade da luz transmitida pelo sistema?

•32 Na Fig. 33-41, um feixe de luz não-polarizada, com uma intensidade de  $43 \text{ W/m}^2$ , atravessa um sistema composto por dois filtros polarizadores cujas direções fazem ângulos  $\theta_1 = 70^\circ$  e  $\theta_2 = 90^\circ$  com o eixo  $y$ . Qual é a intensidade da luz transmitida pelo sistema?

•33 Na Fig. 34-42, um feixe de luz inicialmente não-polarizada atravessa três filtros polarizadores cujas direções de polarização fazem ângulos de  $\theta_1 = 40^\circ$ ,  $\theta_2 = 20^\circ$  e  $\theta_3 = 40^\circ$  com a direção do eixo  $y$ . Que porcentagem da intensidade inicial da luz é transmitida pelo conjunto? (Sugestão: preste atenção aos ângulos.)

•34 Na Fig. 33-42, um feixe de luz inicialmente não-polarizada atravessa três filtros polarizadores cujas direções de polarização fazem ângulos de  $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 50^\circ$  com a direção do eixo  $y$ . Que porcentagem da intensidade inicial da luz é transmitida pelo conjunto? (Sugestão: preste atenção aos ângulos.)

•35 Um feixe de luz não-polarizada com uma intensidade de  $10 \text{ mW/m}^2$  atravessa um filtro polarizador como na Fig. 33-12. Determine (a) a amplitude do campo elétrico da luz transmitida; (b) a pressão exercida pela radiação sobre o filtro polarizador.

•36 Na Fig. 33-41, um feixe de luz não-polarizada atravessa um conjunto de dois filtros polarizadores. Os ângulos  $\theta_1$  e  $\theta_2$  das direções de polarização dos filtros são medidos no sentido anti-horário no sentido positivo do eixo  $y$  (não estão desenhados em escala na figura). O ângulo  $\theta_1$  é fixo, mas o ângulo  $\theta_2$  pode ser ajustado. A Fig. 33-43 mostra a intensidade da luz que atravessa o sistema em função de  $\theta_2$ . (A escala do eixo de intensidades não é conhecida.) Que porcentagem da intensidade inicial da luz é transmitida pelo conjunto para  $\theta_2 = 90^\circ$ ?

•37 Um feixe de luz polarizada passa por um conjunto de dois filtros polarizadores. Em relação à direção de polarização da luz incidente, as direções de polarização dos filtros são  $\theta$  para o primeiro filtro e  $90^\circ$  para o segundo. Se 10% da intensidade incidente é transmitido pelo conjunto, quanto vale  $\theta$ ?

•38 Na Fig. 33-44, um feixe de luz não-polarizada passa por um conjunto de três filtros polarizadores. Os ângulos  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  e  $\theta_3$  das direções de polarização são medidos no sentido anti-horário no sentido positivo do eixo  $y$  (não estão desenhados em escala). Os ângulos  $\theta_1$  e  $\theta_3$  são fixos, mas o ângulo  $\theta_2$  pode ser ajustado. A Fig. 33-45 mostra a in-

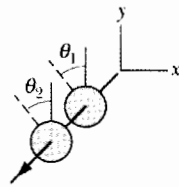


Fig. 33-41 Problemas 31, 32 e 36.

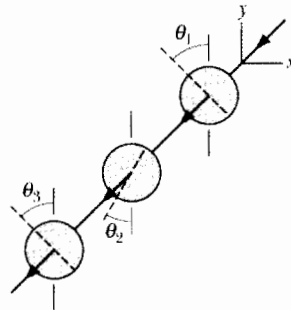


Fig. 33-42 Problemas 33 e 34.

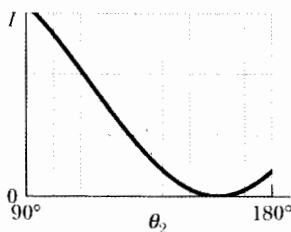


Fig. 33-43 Problema 36.

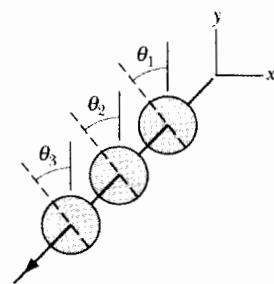


Fig. 33-44 Problemas 38, 40 e 42.

tensidade da luz que atravessa o conjunto em função de  $\theta_2$ . (A escala do eixo de intensidades não é conhecida.) Que porcentagem da intensidade inicial da luz é transmitida pelo conjunto para  $\theta_2 = 30^\circ$ ?

•39 Um feixe de luz parcialmente polarizada pode ser considerado como uma mistura de luz polarizada e não-polarizada. Suponha que um feixe deste tipo atravesse um filtro polarizador e que o filtro seja girado de  $360^\circ$  enquanto se mantém perpendicular ao feixe. Se a intensidade da luz transmitida varia por um fator de 5,0 durante a rotação do filtro, que fração da intensidade da luz incidente está associada à luz polarizada do feixe?

•40 Na Fig. 33-44, um feixe de luz não-polarizada atravessa um conjunto de três filtros polarizadores que transmite 0,0500 da intensidade luminosa inicial. As direções de polarização do primeiro e terceiro filtros são  $\theta_1 = 0^\circ$  e  $\theta_3 = 90^\circ$ . Determine (a) o menor e (b) o maior valor possível do ângulo  $\theta_2$  ( $< 90^\circ$ ) que define a direção de polarização do filtro 2.

•41 Na praia, a luz em geral é parcialmente polarizada devido às reflexões na areia e na água. Em uma certa praia, em um certo dia, no final da tarde, a componente horizontal do vetor campo elétrico é 2,3 vezes maior que a componente vertical. Um banhista fica de pé e coloca óculos polarizadores que eliminam totalmente a componente horizontal do campo elétrico. (a) Que fração da intensidade luminosa total chega aos olhos do banhista? (b) Ainda usando os óculos, o banhista se deita de lado na areia. Que fração da intensidade luminosa total chega agora aos olhos do banhista?

•42 Na Fig. 33-44, um feixe de luz não-polarizada atravessa um conjunto de três filtros polarizadores. Os ângulos  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  e  $\theta_3$  das direções de polarização são medidos no sentido anti-horário, no sentido positivo do eixo  $y$  (os ângulos não estão desenhados em escala). Os ângulos  $\theta_1$  e  $\theta_3$  são fixos, mas o ângulo  $\theta_2$  pode ser ajustado. A Fig. 33-46 mostra a intensidade da luz que atravessa o conjunto em função de  $\theta_2$ . (A escala do eixo de intensidades não é conhecida.) Que porcentagem da intensidade inicial da luz é transmitida pelo conjunto para  $\theta_2 = 90^\circ$ ?

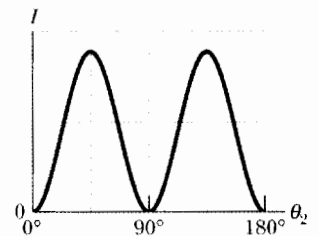


Fig. 33-45 Problema 38.

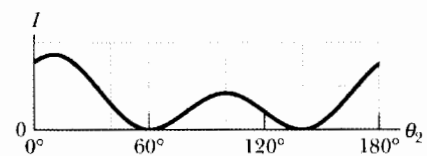


Fig. 33-46 Problema 42.

•43 Queremos fazer a direção de polarização de um feixe de luz polarizada girar de  $90^\circ$  fazendo o feixe passar por um ou mais filtros polarizadores. (a) Qual é o número mínimo de filtros necessário? (b) Qual é o número mínimo de filtros necessário se a intensidade da luz transmitida deve ser mais de 60% da intensidade original?

**Seção 33-8 Reflexão e Refração**

•44 A Fig. 33-47 mostra um raio luminoso sendo refletido em dois espelhos perpendiculares A e B. Determine o ângulo entre o raio incidente  $i$  e o raio  $r'$ .

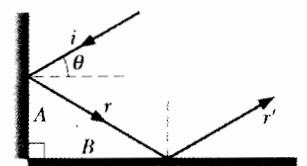


Fig. 33-47 Problema 44.

• 45 Um raio de luz que se propaga inicialmente no vácuo incide na superfície de uma placa de vidro. No vácuo, o raio faz um ângulo de  $32,0^\circ$  com a normal à superfície, enquanto no vidro faz um ângulo de  $21,0^\circ$  com a normal. Qual é o índice de refração do vidro?

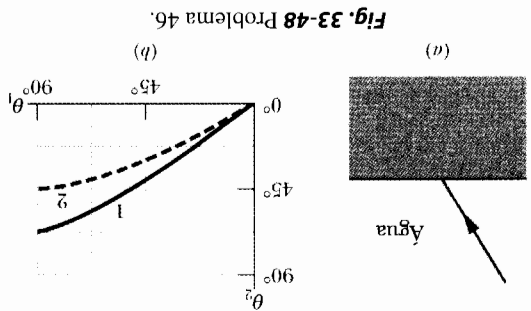


Fig. 33-48 Problema 46.

• 46 Na Fig. 33-48a, um raio luminoso que está se propagando inicialmente na água incide com um ângulo  $\theta_1$  em outro material, no qual parte da luz se refrata. Outro material pode ser do tipo 1 ou do tipo 2; a Fig. 33-48b mostra o ângulo de refração  $\theta_2$  em função do ângulo de incidência  $\theta_1$  para os dois tipos de material. Sem fazer nenhum cálculo, determine (a) se o índice de refração do material 1 é maior ou menor que o índice de refração da água ( $n = 1,33$ ) e (b) se o índice de refração do material 2 é maior ou menor que o índice de refração da água. Determine o índice de refração (c) do material 1 e (d) do material 2.

• 47 Quando o tanque retangular de metal da Fig. 33-49 está cheio até a borda de um líquido desconhecido, um observador  $O$ , com os olhos ao nível do alto do tanque, pode ver o vértice  $E$ . A figura mostra um raio que se refrata na superfície do líquido e toma a direção do observador  $O$ . Determine o índice de refração do líquido.

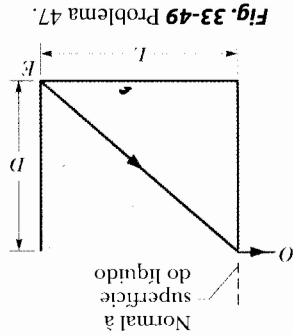


Fig. 33-49 Problema 47.

• 48 Na Fig. 33-50a, um raio luminoso que está se propagando inicialmente em um certo material incide com um ângulo  $\theta_1$  na água, onde parte da luz se refrata. Outro material pode ser do tipo 1 ou do tipo 2; a Fig. 33-50b mostra o ângulo de refração  $\theta_2$  em função do ângulo de incidência  $\theta_1$  para os dois tipos de material. Sem fazer nenhum cálculo, determine (a) se o índice de refração do material 1 é maior ou menor que o índice de refração da água ( $n = 1,33$ ) e (b) se o índice de refração do material 2 é maior ou menor que o índice de refração da água. Determine o índice de refração (c) do material 1 e (d) do material 2.

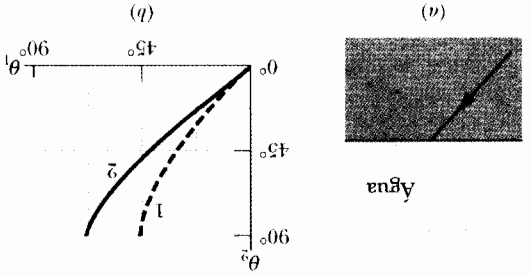


Fig. 33-50 Problema 48.

• 49 Na Fig. 33-51, uma estaca vertical se projeta do fundo de uma piscina até um ponto  $50,0$  cm acima da água. O Sol está  $55,0^\circ$  acima do horizonte. Qual é o comprimento da sombra da estaca no fundo da piscina?

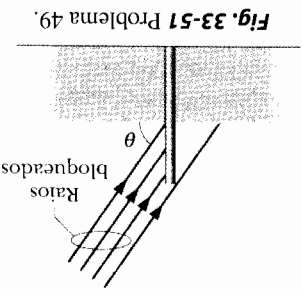


Fig. 33-51 Problema 49.

• 50 Na Fig. 33-52a, um feixe luminoso que está se propagando inicialmente no material 1 incide no material 2 com um ângulo de  $30^\circ$ . A refração da luz no material 2 depende, entre outros fatores, do índice de refração  $n_2$  do material 2. A Fig. 33-52b mostra o ângulo de refração  $\theta_2$  em função de  $n_2$ . (a) Qual é o índice de refração do material 1? (b) Se o ângulo de incidência aumenta para  $60^\circ$  e  $n_2 = 2,4$ , qual é o valor de  $\theta_2$ ?

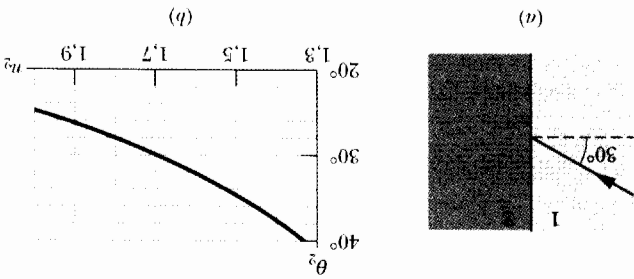


Fig. 33-52 Problema 50.

• 51 Na Fig. 33-53, a luz incide, fazendo um ângulo  $\theta_1 = 40,1^\circ$  com a normal, na interface entre dois materiais transparentes. Parte da luz atravessa as outras três camadas transparentes e parte é refletida para cima e escapa para o ar. Determine os valores (a) de  $\theta_2$ ; (b) de  $\theta_3$ .

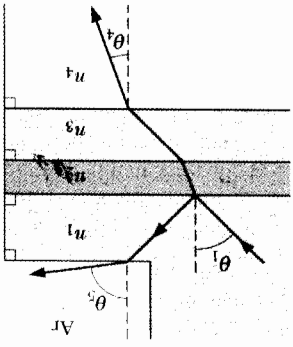


Fig. 33-53 Problema 51.

• 52 Arco-íris produzidos por gotas quadradas. Suponha que em um planeta exótico as gotas de chuva tenham uma seção reta quadrada e caiam sempre com uma face paralela ao solo. A Fig. 33-54 mostra uma das gotas, na qual incide um feixe de luz branca com um ângulo de incidência  $\theta = 70,0^\circ$  no ponto  $P$ . A parte da luz que penetra na gota se propaga até o ponto  $A$ , onde parte é refratada de volta para o ar e a outra parte é refletida. Esta luz refletida chega ao ponto  $B$ , onde novamente parte da luz é refratada de volta para o ar e parte é refletida. Qual é a diferença entre os ângulos dos raios de luz vermelha ( $n = 1,331$ ) e de luz azul ( $n = 1,343$ ) que deixam a gota (a) no ponto  $A$  e (b) no ponto  $B$ ? (Estas diferenças angulares fazem com que um observador externo veja um arco-íris ao observar a luz que sai do ponto  $A$  ou do ponto  $B$ ).

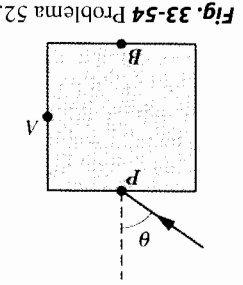


Fig. 33-54 Problema 52.

• 53 Na Fig. 33-55, um raio incide em uma das faces de um prisma triangular de vidro imerso no ar. O ângulo de incidência  $\theta$  é escolhido de tal forma que o raio

emergente faz o mesmo ângulo  $\theta$  com a normal à outra face. Mostre que o índice de refração do vidro é dado por

$$n = \frac{\sin \frac{1}{2}(\psi + \phi)}{\sin \frac{1}{2}\phi}$$

onde  $\phi$  é o ângulo do vértice superior do prisma e  $\psi$  é o ângulo de desvio, definido como o ângulo entre o raio emergente e o raio incidente. (Nessas condições, o ângulo de desvio  $\psi$  tem o menor valor possível, que é denominado ângulo de desvio mínimo.)

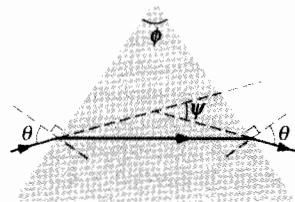


Fig. 33-55 Problemas 53 e 62.

**Seção 33-9 Reflexão Interna Total**

•54 O índice de refração do benzeno é 1,8. Qual é o ângulo crítico para um raio luminoso que se propaga no benzeno em direção a uma interface plana do benzeno com o ar?

•55 Uma fonte luminosa pontual está 80,0 cm abaixo da superfície de uma piscina. Calcule o diâmetro do círculo na superfície através do qual a luz emerge da água.

•56 Na Fig. 33-56, um feixe luminoso que se propaga inicialmente no material 1 é refratado para o material 2, atravessa este material e incide com o ângulo crítico na interface entre os meios 2 e 3. Os índices de refração são  $n_1 = 1,60$ ,  $n_2 = 1,40$  e  $n_3 = 1,20$ . (a) Qual é o valor do ângulo  $\theta$ ? (b) Se o valor de  $\theta$  aumentar, a luz conseguirá penetrar no meio 3?

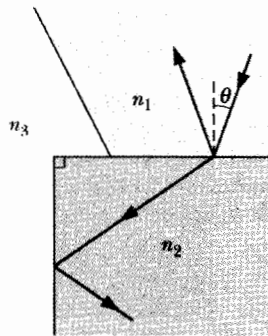


Fig. 33-56 Problema 56.

•57 No diagrama de raios da Fig. 33-57, onde os ângulos não estão desenhados em escala, o raio incide com o ângulo crítico na interface entre os materiais 2 e 3. O ângulo  $\psi$  é  $60^\circ$  e dois dos índices de refração são  $n_1 = 1,70$  e  $n_2 = 1,60$ . Determine (a) o índice de refração  $n_3$  e (b) o valor do ângulo  $\theta$ . (c) Se o valor de  $\theta$  aumentar, a luz conseguirá penetrar no meio 3?

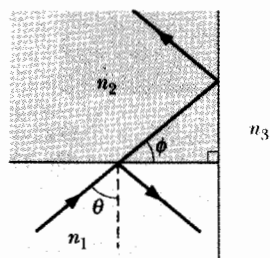


Fig. 33-57 Problema 57.

•58 Na Fig. 33-58, onde  $n_1 = 1,70$ ,  $n_2 = 1,50$  e  $n_3 = 1,30$ , a luz é refratada do material 1 para o material 2. Se a luz incide no ponto A com o ângulo crítico da interface entre os materiais 2 e 3, determine (a) o ângulo de refração no ponto B e (b) o ângulo inicial  $\theta$ . Se, em vez disso, a luz incide no ponto B com o ângulo crítico da interface entre os materiais 2 e 3, determine (c) o ângulo de refração no ponto A e (d) o ângulo inicial  $\theta$ . Se, em vez disso, a luz incide no ponto A com o ângulo de Brewster para a interface entre os materiais 2 e 3, determine (e) o ângulo de refração no ponto B e (f) o ângulo inicial  $\theta$ .

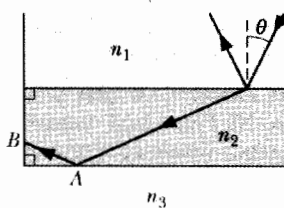


Fig. 33-58 Problema 58.

•59 A Fig. 33-59 mostra uma fibra óptica simplificada: um núcleo de plástico ( $n_1 = 1,58$ ) envolvido por um revestimento de plástico com um índice de refração menor ( $n_2 = 1,53$ ). Um raio luminoso incide em uma das extremidades da fibra com um ângulo  $\theta$ . O raio

deve sofrer reflexão interna total no ponto A, onde atinge a interface núcleo-revestimento. (Isto é necessário para que não haja perda de luz cada vez que o raio incide na interface.) Qual é o maior valor de  $\theta$  para o qual é possível que haja reflexão interna total no ponto A?

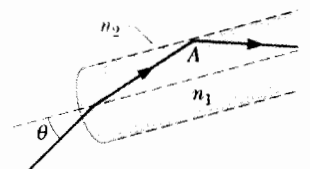


Fig. 33-59 Problema 59.

•60 Na Fig. 33-60, um raio luminoso incide com um ângulo  $\theta$  em uma face de um cubo de plástico transparente feito de uma material cujo índice de refração é 1,56. As dimensões indicadas na figura são  $H = 2,00$  cm e  $W = 3,00$  cm. A luz atravessa o cubo e chega a uma das faces, onde sofre reflexão (no interior do cubo) e possivelmente refração (escapando para o ar). Este é o ponto da primeira reflexão. A luz refletida volta a atravessar o cubo e chega à outra face, onde sofre uma segunda reflexão. Se  $\theta_1 = 40^\circ$ , determine em que face está (a) o ponto da primeira reflexão e (b) o ponto da segunda reflexão. Se existe refração (c) no ponto da primeira reflexão e/ou (d) no ponto da segunda reflexão, determine o ângulo de refração; se não existe, responda "não há refração". Se  $\theta_1 = 70^\circ$ , determine em que face está (e) o ponto da primeira reflexão e (f) o ponto da segunda reflexão. Se existe refração (g) no ponto da primeira reflexão e/ou (h) no ponto da segunda reflexão, determine o ângulo de refração; se não existe, responda "não há refração".

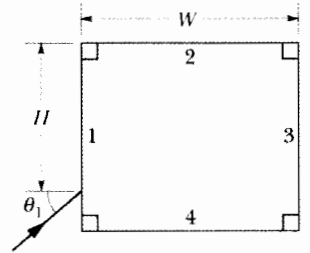


Fig. 33-60 Problema 60.

•61 Na Fig. 33-61, um raio luminoso incide perpendicularmente à face ab de um prisma de vidro ( $n = 1,52$ ). Determine o maior valor possível do ângulo  $\phi$  para que o raio seja totalmente refletido na face ac do prisma se este estiver imerso (a) no ar; (b) na água.



Fig. 33-61 Problema 61.

•62 Suponha que o ângulo do vértice superior do prisma de vidro da Fig. 33-55 seja  $\phi = 60,0^\circ$  e que o índice de refração do vidro seja  $n = 1,60$ . (a) Qual é o menor ângulo de incidência  $\theta$  para o qual um raio pode entrar na face esquerda do prisma e sair na face direita? (b) Qual deve ser o ângulo de incidência  $\theta$  para que o raio saia do prisma com um o mesmo ângulo  $\theta$  com que entrou, como na Fig. 33-55? (Veja o Problema 51.)

•63 Na Fig. 33-62, um raio luminoso penetra em um prisma triangular, cujo ângulo do vértice superior é  $90^\circ$  no ponto P, com um ângulo de incidência  $\theta$ . Parte da luz é refratada no ponto Q com um ângulo de refração de  $90^\circ$ . (a) Qual é o índice de refração do prisma em termos de  $\theta$ ? (b) Qual, numericamente, é o maior valor possível do índice de refração do prisma? Explique o que acontece ao raio luminoso no ponto Q quando o ângulo de incidência nesse ponto (c) aumenta ligeiramente; (d) diminui ligeiramente.

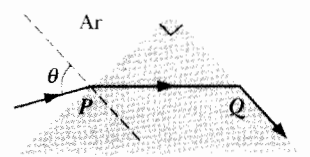


Fig. 33-62 Problema 63.

**Seção 33-10 Polarização por Reflexão**

•64 (a) Para que ângulo de incidência a luz refletida na água é totalmente polarizada? (b) Este ângulo depende do comprimento de onda da luz?

•65 Um raio de luz que está se propagando na água (índice de refração 1,33) incide em uma placa de vidro cujo índice de refração é