Capítulo 34

1. Se o passarinho está a uma distância d_2 do espelho, o plano da imagem está a uma distância d_2 do outro lado do espelho. A distância lateral entre a câmara e o beija-flor é $d_3 = 5{,}00$ m. Vamos chamar de d_1 a distância entre a câmara e o espelho e construir um triângulo retângulo formado por d_3 e pela distância $d = d_1 + d_2$ entre a câmara e o plano da imagem. De acordo com o teorema de Pitágoras, esta distância é

$$d = \sqrt{(d_1 + d_2)^2 + d_3^2} = \sqrt{(4{,}30\,\text{m} + 3{,}30\,\text{m})^2 + (5{,}00\,\text{m})^2} = 9{,}10\,\text{m}.$$

2. Como a imagem está 10 cm atrás do espelho e você está 30 cm à frente do espelho, a distância entre seus olhos e a posição aparente da imagem da mariposa no espelho é 10 cm + 30 cm = 40 cm.

3. A intensidade da luz produzida por uma fonte pontual varia com o quadrado da distância da fonte. Antes da introdução do espelho, a intensidade da luz no centro da tela é dada por $I_P = A/d^2$, em que A é uma constante. Depois que o espelho é introduzido, a intensidade da luz é a soma da luz que chega diretamente à tela, com a mesma intensidade I_P de antes, com a luz refletida. Como a luz refletida parece ter sido produzida por uma fonte pontual situada a uma distância d atrás do espelho, a distância entre a imagem da fonte e a tela é $3d$ e sua contribuição para a intensidade da luz no centro da tela é

$$I_r = \frac{A}{(3d)^2} = \frac{A}{9d^2} = \frac{I_P}{9}.$$

A intensidade total da luz no centro da tela é, portanto,

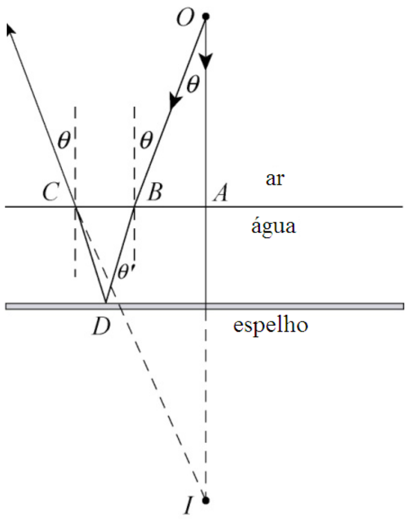
$$I = I_P + I_r = I_P + \frac{I_P}{9} = \frac{10}{9} I_P$$

e a razão entre a nova intensidade e a intensidade antiga é $I/I_P = 10/9 = 1{,}11$.

4. No momento em que S consegue ver B, os raios luminosos provenientes de B estão sendo refletidos pela borda do espelho em direção a S. Nesse caso, o ângulo de reflexão é 45°, já que uma reta traçada de S até a borda do espelho faz um ângulo de 45° com a parede. De acordo com a lei de reflexão de espelhos planos,

$$\frac{x}{d/2} = \tan 45° = 1 \;\Rightarrow\; x = \frac{d}{2} = \frac{3{,}0\,\text{m}}{2} = 1{,}5\,\text{m}.$$

5. PENSE Este problema envolve a refração em uma interface ar-água e a reflexão por um espelho plano.



FORMULE De acordo com a lei de Snell,

$$\frac{\operatorname{sen}\theta}{\operatorname{sen}\theta'} = \frac{n_{ag}}{n_{\text{ar}}},$$

que, em nosso caso, se reduz a $\theta' \approx \theta/n_{ag}$ (já que θ e θ' são pequenos e $n_{\text{ar}} \approx 1$). Examine a figura ao lado.

O objeto O está a uma distância vertical d_1 da superfície da água, e a água está a uma distância vertical d_2 do espelho. Estamos interessados em determinar a distância vertical d (tratada como um número positivo) abaixo do espelho na qual é formada a imagem I do objeto. No triângulo OAB,

$$|AB| = d_1 \tan\theta \approx d_1\theta,$$

e no triângulo CBD,

$$|BC| = 2d_2 \tan\theta' \approx 2d_2\theta' \approx \frac{2d_2\theta}{n_{ag}}.$$

Finalmente, no triângulo ACI, temos $|AI| = d + d_2$.

ANALISE Assim,

$$d = |AI| - d_2 = \frac{|AC|}{\tan\theta} - d_2 \approx \frac{|AB|+|BC|}{\theta} - d_2 = \left(d_1\theta + \frac{2d_2\theta}{n_{ag}}\right)\frac{1}{\theta} - d_2 = d_1 + \frac{2d_2}{n_{ag}} - d_2$$

$$= 250\,\text{cm} + \frac{2(200\,\text{cm})}{1{,}33} - 200\,\text{cm} = 351\,\text{cm}.$$

APRENDA Se a piscina estivesse vazia, $\theta = \theta'$ e a distância seria $d = d_1 + 2d_2 - d_2 = d_1 = d_2$. Isso é exatamente o que esperamos de um espelho plano.

6. Observe, na Fig. 34-34, que $m = 1/2$ para $p = 5$ cm. De acordo com a Eq. 34-7, isso significa que $i = -10$ cm. Nesse caso, de acordo com a Eq. 34-4, $f = pi/(p + i) = (50\text{ cm})/(5\text{ cm}) = 10$ cm. Para $p = 14$ cm, a Eq. 34-4 nos dá $i = fp/(p - f) = (10\text{ cm})(14\text{ cm})/(4\text{ cm}) = 35$ cm. Assim, de acordo com a Eq. 34-7, $m = -i/p = -2{,}5$.

7. De acordo com as Eqs. 34-3, 34-4 e 34-7, temos

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{pm} = \frac{1}{f} = \frac{2}{r} \quad\Rightarrow\quad p = \frac{r}{2}\left(1 - \frac{1}{m}\right) = \frac{35{,}0\,\text{cm}}{2}\left(1 - \frac{1}{2{,}50}\right) = 10{,}5\text{ cm}.$$

8. De acordo com o gráfico da Fig. 34-35, $f = 20$ cm. Nesse caso, de acordo com a Eq. 34-4,

$$\frac{1}{i} = \frac{1}{f} - \frac{1}{p} \quad\Rightarrow\quad i = \frac{fp}{p - f} = \frac{(20\text{ cm})(70\text{ cm})}{(70\text{ cm} - 20\text{ cm})} = +28\text{ cm}.$$

9. PENSE A distância focal de um espelho côncavo é positiva.

FORMULE No caso de espelhos esféricos, a distância focal f está relacionada ao raio de curvatura r pela equação $f = r/2$. A distância do objeto p, a distância da imagem i e a distância focal f estão relacionadas pela Eq. 34-4:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f}.$$

O valor de i é positivo para imagens reais e negativo para imagens virtuais.

A ampliação lateral correspondente é $m = -i/p$. O valor de m é positivo, se a imagem tem a mesma orientação que o objeto, e negativo, se a imagem e o objeto têm orientações opostas. Imagens reais são formadas do mesmo lado que o objeto, e imagens virtuais são formadas do outro lado do espelho.

ANALISE (a) Para $f = +12$ cm e $p = +18$ cm, o raio de curvatura é $r = 2f = 2(12\text{ cm}) = +24$ cm.

(b) A distância da imagem é

$$i = \frac{pf}{p - f} = \frac{(18\text{ cm})(12\text{ cm})}{18\text{ cm} - 12\text{ cm}} = 36\text{ cm}.$$

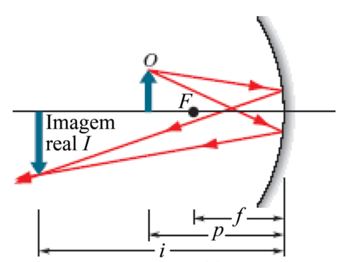
(c) A ampliação lateral é $m = -i/p = -(36\text{ cm})/(18\text{ cm}) = -2{,}0$.

(d) Como a distância da imagem i é positiva, a imagem é real (R).

(e) Como a ampliação lateral m é negativa, a imagem é invertida (I).

(f) A imagem real é formada do *mesmo* lado que o objeto (M).

APRENDA A situação deste problema é a mesma da Fig. 34-10*c*. A distância entre o objeto e o espelho é maior que a distância focal, e a imagem é real e invertida.



10. A distância focal dos espelhos côncavos é positiva.

(a) O raio de curvatura é $r = 2f = 20$ cm.

(b) A distância da imagem é $i = pf/(p - f) = +30$ cm.

(c) A ampliação lateral é $m = -\,i/p = -2{,}0$.

(d) Como a distância da imagem i é positiva, a imagem é real (R).

(e) Como a ampliação lateral m é negativa, a imagem é invertida (I).

(f) Como a imagem é real, é formada do *mesmo* lado do espelho (M).

11. PENSE A distância focal de um espelho convexo é negativa.

FORMULE No caso de espelhos esféricos, a distância focal f está relacionada ao raio de curvatura r pela equação $f = r/2$. A distância do objeto p, a distância da imagem i e a distância focal f estão relacionadas pela Eq. 34-4:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f}.$$

O valor de i é positivo para imagens reais e negativo para imagens virtuais.

A ampliação lateral correspondente é

$$m = -\frac{i}{p}.$$

O valor de m é positivo para imagens não invertidas e negativo para imagens invertidas. Imagens reais são formadas do mesmo lado que o objeto, e imagens virtuais são formadas do outro lado do espelho.

ANALISE (a) Para $f = -10$ cm e $p = +8$ cm, o raio de curvatura é $r = 2f = -20$ cm.

(b) A distância da imagem é

$$i = \frac{pf}{p - f} = \frac{(8\text{ cm})(-10\text{ cm})}{8\text{ cm} - 10\text{ cm}} = -4{,}44\text{ cm}.$$

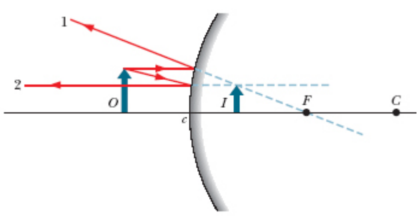
(c) A ampliação lateral é $m = -i/p = -(-4{,}44\text{ cm})/(8{,}0\text{ cm}) = +0{,}56$.

(d) Como a distância da imagem é negativa, a imagem é virtual (V).

(e) Como a ampliação lateral m é positiva, a imagem é não invertida (NI).

(f) A imagem virtual é formada do *outro* lado do espelho (O).

APRENDA A situação deste problema é a mesma da Fig. 34-11*c*. O espelho é convexo e a imagem é virtual e não invertida.



12. A distância focal dos espelhos côncavos é positiva.

(a) Para $f = 36$ cm, o raio de curvatura é $r = 2f = +\,72$ cm.

(b) A distância da imagem é $i = pf/(p - f) = -72$ cm.

(c) A ampliação lateral é $m = -\,i/p = +3{,}0$.

(d) Como a distância da imagem é negativa, a imagem é virtual (V).

(e) Como a ampliação lateral é positiva, a imagem é não invertida (NI).

(f) Como a imagem é virtual, é formada do lado *oposto* do espelho (O).

13. PENSE A distância focal de um espelho côncavo é positiva.

FORMULE No caso de espelhos esféricos, a distância focal f está relacionada ao raio de curvatura r pela equação $f = r/2$. A distância do objeto p, a distância da imagem i e a distância focal f estão relacionadas pela Eq. 34-4:

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{i}=\frac{1}{f}.$$

O valor de i é positivo para imagens reais e negativo para imagens virtuais.

A ampliação lateral correspondente é $m = -i/p$. O valor de m é positivo para imagens não invertidas e negativo para imagens invertidas. Imagens reais são formadas do mesmo lado que o objeto, e imagens virtuais são formadas do outro lado do espelho.

ANALISE (a) Para $f = +18$ cm e $p = +12$ cm, o raio de curvatura é $r = 2f = +36$ cm.

(b) De acordo com a Eq. 34-9, $i = pf/(p - f) = -36$ cm.

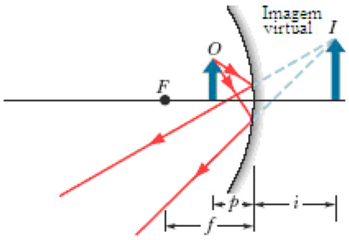
(c) De acordo com a Eq. 34-7, $m = -i/p = +3{,}0$.

(d) Como a distância da imagem é negativa, a imagem é virtual (V).

(e) Como a ampliação lateral é positiva, a imagem é não invertida (NI).

(f) A imagem virtual é formada do *outro* lado do espelho (O).

APRENDA A situação deste problema é a mesma da Fig. 34-11*a*. O espelho é côncavo e a imagem é virtual, ampliada e não invertida.



14. A distância focal dos espelhos convexos é negativa.

(a) Para $f = -35$ cm, o raio de curvatura é $r = 2f = -70$ cm.

(b) A distância da imagem é $i = pf/(p - f) = -14$ cm.

(c) A ampliação lateral é $m = -i/p = +0{,}61$.

(d) Como a distância da imagem é negativa, a imagem é virtual (V).

(e) Como a ampliação lateral é positiva, a imagem é não invertida (NI).

(f) Como a imagem é virtual, é formada do lado *oposto* do espelho (O).

15. PENSE A distância focal de um espelho convexo é negativa.

FORMULE No caso de espelhos esféricos, a distância focal f está relacionada ao raio de curvatura r pela equação $f = r/2$. A distância do objeto p, a distância da imagem i e a distância focal f estão relacionadas pela Eq. 34-4:

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{i}=\frac{1}{f}.$$

O valor de i é positivo para imagens reais e negativo para imagens virtuais.

A ampliação lateral correspondente é $m = -i/p$. O valor de m é positivo para imagens não invertidas e negativo para imagens invertidas. Imagens reais são formadas do mesmo lado que o objeto, e imagens virtuais são formadas do outro lado do espelho.

ANALISE (a) Para $f = -8$ cm e $p = +10$ cm, o raio de curvatura é $r = 2f = 2(-8 \text{ cm}) = -16$ cm.

(b) A distância da imagem é $i = pf/(p - f) = -4{,}44$ cm.

(c) A ampliação lateral é m = $-i/p = +0{,}44$.

(d) Como a distância da imagem é negativa, a imagem é virtual (V).

(e) Com a ampliação lateral m é positiva, a imagem é não invertida (NI).

(f) A imagem virtual é formada do *outro* lado do espelho (O).

APRENDA A situação deste problema é a mesma da Fig. 34-11*c*. O espelho é convexo e a imagem é virtual e não invertida.

16. A distância focal dos espelhos convexos é negativa.

(a) O raio de curvatura é $r = 2f = -28$ cm.

(b) A distância do objeto é $i = pf/(p - f) = -7{,}7$ cm.

(c) A ampliação lateral é $m = -i/p = +0{,}45$.

(d) Como a distância da imagem é negativa, a imagem é virtual (V).

(e) Como a ampliação lateral é positiva, a imagem é não invertida (NI).

(f) Como a imagem é virtual, é formada do lado *oposto* do espelho (O).

17. (a) Por ser côncavo, o espelho é informado na tabela.

(b) $f = +20$ cm (positiva, porque o espelho é côncavo).

(c) $r = 2f = 2(+20 \text{ cm}) = +40$ cm.

(d) A distância do objeto $p = +10$ cm é dada na tabela.

(e) A distância da imagem é $i = (1/f - 1/p)^{-1} = (1/20 \text{ cm} - 1/10 \text{ cm})^{-1} = -20$ cm.

(f) A ampliação lateral é $m = -i/p = -(-20 \text{ cm}/10 \text{ cm}) = +2{,}0$.

(g) A imagem é virtual (V).

(h) A imagem é não invertida (NI).

(i) A imagem é formada do lado *oposto* do espelho (O).

18. (a) Como a imagem é invertida, o espelho é côncavo.

(b) Como a imagem é invertida, a ampliação lateral m é negativa: $m = -0{,}50$. Como $p = +24$ cm, a Eq. 34-6 nos dá $i = -pm = -(24 \text{ cm})(-0{,}5) = +12$ cm e a Eq. 34-4 nos dá $f = pi/(p + 1) = (24 \text{ cm})(12 \text{ cm})/(24 \text{ cm} + 12 \text{ cm}) = +8$ cm.

(c) De acordo com a Eq. 34-3, $r = 2f = +16$ cm.

(d) A distância $p = +24$ cm é dada na tabela.

(e) Como foi mostrado no item (b), $i = +12$ cm.

(f) Como foi visto no item (b), $m = -0{,}50$.

(g) Como $i > 0$, a imagem é real (R).

(h) A tabela informa que a imagem é invertida (I).

(i) Como a imagem é real, é formada do *mesmo* lado do espelho (M).

19. (a) De acordo com a Eq. 34-3, como $r < 0$, então $f < 0$ e o espelho é convexo.

(b) De acordo com a Eq. 34-3, $f = r/2 = -20$ cm.

(c) Como informa a tabela, $r = -40$ cm.

(d) De acordo com a Eq. 34-4, $p = +20$ cm.

(e) A distância $i = -10$ cm é dada na tabela.

(f) De acordo com a Eq. 34-6, $m = +0{,}50$.

(g) Como $i < 0$, a imagem é virtual (V).

(h) Como m é positivo, a imagem é não invertida (NI).

(i) Como a imagem é virtual, é formada do *outro* lado do espelho (O).

20. (a) De acordo com a Eq. 34-7, $i = -mp = -(-0{,}70)(+40 \text{ cm}) = +28$ cm, o que significa que a imagem é real (R) e está do mesmo lado do espelho (M). Como $m < 0$, a imagem é invertida (I). De acordo com a Eq. 34-4, $f = ip/(i + p) = (28 \text{ cm})(40 \text{ cm})/(28 \text{ cm} + 40 \text{ cm}) = +16 \text{ cm} > 0$, o que significa que o espelho é côncavo.

(b) $f = ip/(i + p) = +16$ cm.

(c) $r = 2f = +32$ cm.

(d) Como informa a tabela, $p = +40$ cm.

(e) $i = -mp = +28$ cm.

(f) Como informa a tabela, $m = -0{,}70$.

(g) A imagem é real (R).

(h) A imagem é invertida (I).

(i) A imagem é formada do *mesmo* lado do espelho (M).

21. (a) Como $f > 0$, o espelho é côncavo.

(b) Como informa a tabela, $f = +20$ cm.

(c) De acordo com a Eq. 34-3, $r = 2f = +40$ cm.

(d) Como informa a tabela, $p = +10$ cm.

(e) De acordo com a Eq. 34-4, $i = pf/(p - f) = +60$ cm.

(f) De acordo com a Eq. 34-6, $m = -i/p = -2{,}0$.

(g) Como $i > 0$, a imagem é real (R).

(h) Como $m < 0$, a imagem é invertida (I).

(i) Como a imagem é real, é formada do *mesmo* lado do espelho (M).

22. (a) Como $0 < m < 1$, a imagem é não invertida e menor que o objeto, o que significa que o espelho é convexo.

(b) Como o espelho é convexo, $f = -20$ cm.

(c) De acordo com a 34-3, $r = 2f = -40$ cm.

(d) Para obter os valores de i e p, utilizamos as Eqs. 34-4 e 34-6 para formar um sistema de duas equações com duas incógnitas, cuja solução é $p = +180$ cm $= +1{,}8$ m e $i = -18$ cm.

(e) Como foi visto no item (d), $i = -18$ cm.

(f) $m = +0{,}10$, como informa a tabela.

(g) Como $i < 0$, a imagem é virtual (V).

(h) Como foi visto no item (a), a imagem é não invertida (NI).

(i) Como a imagem é virtual, é formada do lado *oposto* do espelho (O).

23. PENSE Se a ampliação lateral é positiva, a imagem é não invertida.

FORMULE No caso de espelhos esféricos, a distância focal f está relacionada ao raio de curvatura r pela equação $f = r/2$. A distância do objeto p, a distância da imagem i e a distância focal f estão relacionadas pela Eq. 34-4:

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{i}=\frac{1}{f}.$$

O valor de i é positivo para imagens reais e negativo para imagens virtuais. A ampliação lateral correspondente é $m = -i/p$. O valor de m é positivo para imagens não invertidas e negativo para imagens invertidas. Imagens reais são formadas do mesmo lado que o objeto, e imagens virtuais são formadas do outro lado do espelho.

ANALISE (a) A ampliação lateral é dada por $m = -i/p$. Como $p > 0$, um valor positivo de m significa que a distância da imagem i é negativa e que, portanto, a imagem é virtual. Uma ampliação lateral positiva menor que a unidade só é possível no caso de espelhos *convexos*.

(b) Como $i = -mp$, podemos escrever $p = f(1 - 1/m)$. Para $0 < m < 1$, p só pode ser positivo se $f < 0$. Assim, $f = -30$ cm.

(c) O raio de curvatura é $r = 2f = -60$ cm.

(d) A distância do objeto é $p = f(1 - 1/m) = (-30 \text{ cm})(1 - 1/0{,}20) = +120$ cm $= 1{,}2$ m.

(e) A distância da imagem é $i = -mp = -(0{,}20)(120 \text{ cm}) = -24$ cm.

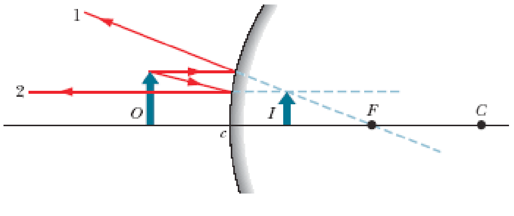
(f) A ampliação lateral é $m = +0{,}20$, como está indicado na Tabela 34-4.

(g) Como foi dito no item (a), a imagem é virtual (V).

(h) Como a ampliação lateral é positiva, a imagem é não invertida (NI).

(i) A imagem virtual é formada do *outro* lado do espelho (O).

APRENDA A situação deste problema é a mesma da Fig. 34-11*c*. O espelho é convexo e a imagem é virtual e não invertida.



24. (a) Como $m < 0$, a imagem é invertida. Isso significa que o espelho é côncavo.

(b) De acordo com a Eq. 34-6, $i = -mp = -(-0{,}50)(+60 \text{ cm}) = +30$ cm e, portanto, $f = ip/(i + p) = +20$ cm.

(c) $r = 2f = +40$ cm.

(d) Como informa a tabela, $p = 60$ cm.

(e) Como foi visto no item (b), $i = +30$ cm.

(f) Como informa a tabela, $m = -1/2$.

(g) Como $i > 0$, a imagem é real (R).

(h) Como foi visto no item (a), a imagem é invertida (I).

(i) Como a imagem é real, é formada do *mesmo* lado do espelho (M).

25. (a) Como informa a tabela, a imagem é invertida (I), o que significa que o espelho é côncavo, a imagem é real (R) e a ampliação lateral é negativa. De acordo com a Eq. 34-6, $i = -mp = -(-0{,}40)(+30\text{ cm}) = +12$ cm.

(b) $f = ip/(i + p) = +8{,}6$ cm.

(c) $r = 2f = +17{,}2\text{ cm} \approx +17$ cm.

(d) Como informa a tabela, $p = +30$ cm.

(e) Como foi visto no item (a), $i = +12$ cm.

(f) Como foi visto no item (a), $m = -0{,}40$.

(g) Como foi visto no item (a), a imagem é real (R).

(h) Como informa a tabela, a imagem é invertida (I).

(i) Como a imagem é real, é formada do *mesmo* lado do espelho (M).

26. (a) Como informa a tabela, a imagem é formada do mesmo lado do espelho, o que significa que a imagem é real (R), o espelho é côncavo e a distância focal é positiva.

(b) A distância focal é $f = +20$ cm.

(c) O raio de curvatura é $r = 2f = +40$ cm.

(d) Como informa a tabela, $p = +60$ cm.

(e) De acordo com a Eq. 34-4, $i = pf/(p - f) = +30$ cm.

(f) De acordo com a Eq. 34-6, $m = -i/p = -0{,}50$.

(g) Como foi visto no item (a), a imagem é real (R).

(h) Como $m < 0$, a imagem é invertida (I).

(i) Como a imagem é real, é formada do *mesmo* lado do espelho.

27. (a) O fato de que a distância focal é negativa significa que o espelho é convexo.

(b) Como informa a tabela, $f = -30$ cm.

(c) $r = 2f = -60$ cm.

(d) $p = if/(i - f) = +30$ cm.

(e) Como informa a tabela, $i = -15$.

(f) $m = -i/p = +0{,}50$.

(g) Como $i < 0$, a imagem é virtual (V).

(h) Como $m > 0$, a imagem é não invertida (NI).

(i) Como a imagem é virtual, é formada do *outro* lado do espelho.

28. (a) O fato de que a ampliação lateral é +1,0 significa que o espelho é plano.

(b) Como o espelho é plano, $f = \infty$ (ou $f = -\infty$, já que o sinal não importa neste caso extremo).

(c) $r = 2f = \infty$ (ou $r = -\infty$).

(d) Como informa a tabela, $p = +10$ cm.

(e) $i = pf/(p - f) = -10$ cm.

(f) $m = -i/p = +1{,}0$.

(g) Como $i < 0$, a imagem é virtual (V).

(h) Como $m > 0$, a imagem é não invertida (NI).

(i) Como a imagem é virtual, é formada do *outro* lado do espelho (O).

29. PENSE A distância focal de um espelho convexo é negativa.

FORMULE No caso de espelhos esféricos, a distância focal f está relacionada ao raio de curvatura r pela equação $f = r/2$. A distância do objeto p, a distância da imagem i e a distância focal f estão relacionadas pela Eq. 34-4:

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{i}=\frac{1}{f}.$$

O valor de i é positivo para imagens reais e negativo para imagens virtuais. A ampliação lateral correspondente é $m = -i/p$. O valor de m é positivo para imagens não invertidas e negativo para imagens invertidas. Imagens reais são formadas do mesmo lado que o objeto, e imagens virtuais são formadas do outro lado do espelho.

ANALISE (a) O espelho é convexo, como está indicado na Tabela 34-4.

(b) Como o espelho é convexo, o raio de curvatura é negativo e, portanto, $r = -40$ cm. Assim, a distância focal é $f = r/2 = (-40$ cm$)/2 = -20$ cm.

(c) O raio de curvatura é $r = -40$ cm.

(d) O fato de que o espelho é convexo também significa que devemos atribuir um sinal negativo ao valor 4,0 fornecido para i na Tabela 34-4, já que a imagem neste caso deve ser virtual. De acordo com a Eq. 34-4, temos

$$p=\frac{if}{i-f}=\frac{(-4{,}0\text{ cm})(-20\text{ cm})}{-4{,}0\text{ cm}-(-20\text{ cm})}=5{,}0\text{ cm}.$$

(e) Como foi dito antes, $i = -4{,}0$ cm.

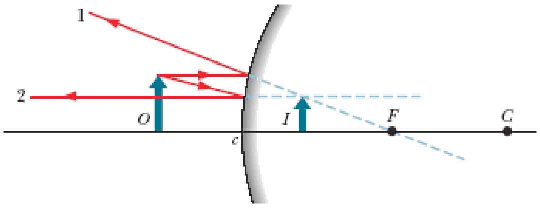
(f) A ampliação lateral é $m = -i/p = -(-4{,}0\text{ cm})/(5{,}0\text{ cm}) = +0{,}80$.

(g) Como $i < 0$, a imagem é virtual (V).

(h) Como a ampliação lateral é positiva, a imagem é não invertida (NI).

(i) A imagem virtual é formada do *outro* lado do espelho (O).

APRENDA A situação deste problema é a mesma da Fig. 34-11*c*. O espelho é convexo e a imagem é virtual e não invertida.



30. Note que, no gráfico da Fig. 34-36, não existe uma descontinuidade como a do gráfico da Fig. 34-35. Isso significa que não existe um ponto no qual $p = f$ (que torna infinito o valor de i). Como $p > 0$, como de costume, isto significa que a distância focal *não* é positiva. Sabemos que não se trata de um espelho plano, já que a ampliação lateral varia com p. Assim, concluímos que se trata de um espelho convexo. Vamos nos concentrar no ponto em que $p = 10$ cm e $m = 0{,}50$. Combinando as Eqs. 34-4 e 34-7, obtemos

$$m = -\frac{i}{p} = -\frac{f}{p-f},$$

o que nos dá $f = -10$ cm (confirmando nossa conclusão de que o espelho é convexo). Para $p = 21$ cm, obtemos $m = -f/(p-f) = +0{,}32$.

31. (a) De acordo com as Eqs. 34-3 e 34-4,

$$i = \frac{pf}{p-f} = \frac{pr}{2p-r}.$$

Derivando ambos os membros em relação ao tempo e usando a relação $v_O = dp/dt$, obtemos

$$v_I = \frac{di}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{pr}{2p-r}\right) = \frac{-rv_O(2p-r)+2v_O pr}{(2p-r)^2} = \left(\frac{r}{2p-r}\right)^2 v_O.$$

(b) Para $p = 30$ cm, temos

$$v_I = \left[\frac{15\ \text{cm}}{2(30\ \text{cm})-15\ \text{cm}}\right]^2 (5{,}0\ \text{cm/s}) = 0{,}56\ \text{cm/s}.$$

(c) Para $p = 8{,}0$ cm, temos

$$v_I = \left[\frac{15\ \text{cm}}{2(8{,}0\ \text{cm})-15\ \text{cm}}\right]^2 (5{,}0\ \text{cm/s}) = 1{,}1\times 10^3\ \text{cm/s} = 11\ \text{m/s}.$$

(d) Para $p = 1{,}0$ cm, temos

$$v_I = \left[\frac{15\ \text{cm}}{2(1{,}0\ \text{cm})-15\ \text{cm}}\right]^2 (5{,}0\ \text{cm/s}) = 6{,}7\ \text{cm/s}.$$

32. Além de $n_1 = 1{,}0$, sabemos que (a) $n_2 = 1{,}5$, (b) $p = +10$ cm e (c) $r = +30$ cm.

(d) De acordo com Eq. 34-8,

$$i = n_2\left(\frac{n_2-n_1}{r} - \frac{n_1}{p}\right)^{-1} = 1{,}5\left(\frac{1{,}5-1{,}0}{30\ \text{cm}} - \frac{1{,}0}{10\ \text{cm}}\right) = -18\ \text{cm}.$$

(e) Como $i < 0$, a imagem é virtual (V).

(f) Como a imagem é virtual, é formada do mesmo lado da superfície esférica (M).

O diagrama de raios é semelhante ao da Fig. 34-12*c* do livro.

33. PENSE No caso de uma imagem formada por refração, se a distância da imagem é negativa, isso indica que a imagem é virtual.

FORMULE Sejam n_1 o índice de refração do meio em que está o objeto, n_2 o índice de refração do meio que está do outro lado da superfície refratora, e r o raio de curvatura da superfície refratora. A distância da imagem i está relacionada à distância do objeto p pela Eq. 34-8:

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{i} = \frac{n_2-n_1}{r}.$$

O valor de i é positivo para imagens reais e negativo para imagens virtuais.

ANALISE Sabemos que $n_1 = 1{,}0$ e que (a) $n_2 = 1{,}5$, (b) $p = +10$ cm e (d) $i = -13$ cm.

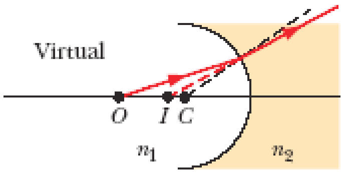
(c) A Eq. 34-8 nos dá

$$r=(n_2-n_1)\left(\frac{n_1}{p}+\frac{n_2}{i}\right)^{-1}=(1{,}5-1{,}0)\left(\frac{1{,}0}{10\text{ cm}}+\frac{1{,}5}{-13\text{ cm}}\right)^{-1}=-32{,}5\,\text{cm}\approx-33\text{ cm}.$$

(e) A imagem é virtual (V) e não invertida (NI).

(f) O objeto e a imagem estão do mesmo lado (M).

APRENDA A situação deste problema é a mesma da Fig. 34-12*e*. A refração sempre afasta o raio luminoso do eixo central; a imagem é virtual para qualquer distância do objeto.



34. Além de n_1 = 1,5, sabemos que (b) p = +100, (c) r = –30 cm e (d) i = +600 cm.

(a) De acordo com a Eq. 34-8, temos

$$n_2\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{i}\right)=\left(\frac{n_1}{p}+\frac{n_1}{r}\right)\;\Rightarrow\; n_2\left(\frac{1}{-30}-\frac{1}{600}\right)=\left(\frac{1{,}5}{100}+\frac{1{,}5}{-30}\right)\;\Rightarrow\; n_2(-0{,}035)=-0{,}035,$$

o que nos dá n_2 = 1,0.

(e) Como $i > 0$, a imagem é real (R).

(f) Como a imagem é real, é formada do outro lado da superfície esférica (O).

O diagrama de raios é semelhante ao da Fig. 34-12*b* do livro.

35. PENSE Uma imagem é formada por refração. A imagem pode ser real ou virtual, dependendo da geometria e dos valores relativos de n_1 e n_2.

FORMULE Sejam n_1 o índice de refração do meio em que está o objeto, n_2 o índice de refração do meio que está do outro lado da superfície refratora, e r o raio de curvatura da superfície refratora. A distância da imagem i está relacionada à distância do objeto p pela Eq. 34-8:

$$\frac{n_1}{p}+\frac{n_2}{i}=\frac{n_2-n_1}{r}.$$

O valor de i é positivo para imagens reais e negativo para imagens virtuais.

ANALISE Sabemos que n_1 = 1,5, e que (a) n_2 = 1,0, (b) p = +70 cm e (c) r = +30 cm. Note que $n_2 < n_1$.

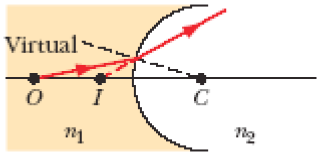
(d) Podemos calcular a distância da imagem com o auxílio da Eq. 34-8:

$$i=n_2\left(\frac{n_2-n_1}{r}-\frac{n_1}{p}\right)^{-1}=1{,}0\left(\frac{1{,}0-1.5}{30\text{ cm}}-\frac{1{,}5}{70\text{ cm}}\right)^{-1}=-26\text{ cm}.$$

(e) A imagem é virtual (V) e não invertida (NI).

(f) O objeto e a imagem estão do mesmo lado (M).

APRENDA A situação deste problema é a mesma da Fig. 34-12*f*. A refração sempre afasta o raio luminoso do eixo central; a imagem é virtual para qualquer distância do objeto.



36. Além de n_1 = 1,5, sabemos que (a) n_2 = 1,0, (c) r = –30 cm e (d) i = –7,5 cm.

(b) De acordo com a Eq. 34-8, temos

$$p=\frac{n_1}{\frac{n_2-n_1}{r}-\frac{n_2}{i}}=\frac{1,5}{\frac{1,0-1,5}{-30\text{ cm}}-\frac{1,0}{-7,5\text{ cm}}}=10\text{ cm}.$$

(e) Como $i < 0$, a imagem é virtual (V).

(f) Como a imagem é virtual, é formada do mesmo lado da superfície esférica (M).

O diagrama de raios é semelhante ao da Fig. 34-12*d* do livro.

37. Além de n_1 = 1,5, sabemos que (a) n_2 = 1,0, (b) p = +10 cm e (d) i = –6,0 cm.

(c) De acordo com a Eq. 34-8, temos

$$r=(n_2-n_1)\left(\frac{n_1}{p}+\frac{n_2}{i}\right)^{-1}=(1,0-1,5)\left(\frac{1,5}{10\text{ cm}}+\frac{1,0}{-6,0\text{ cm}}\right)^{-1}=30\text{ cm}.$$

(e) Como $i < 0$, a imagem é virtual (V).

(f) Como a imagem é virtual, é formada do mesmo lado da superfície esférica (M).

O diagrama de raios é semelhante ao da Fig. 34-12*f* do livro, mas com o objeto e a imagem mais próximos da superfície esférica.

38. Além de n_1 = 1,0, sabemos que (a) n_2 = 1,5, (c) r = +30 cm e (d) i = +600.

(b) De acordo com a Eq. 34-8,

$$p=\frac{n_1}{\frac{n_2-n_1}{r}-\frac{n_2}{i}}=\frac{1,0}{\frac{1,5-1,0}{30\text{ cm}}-\frac{1,5}{600\text{ cm}}}=71\text{ cm}.$$

(e) Como $i > 0$, a imagem é real (R) e invertida.

(f) Como a imagem é real, é formada do outro lado da superfície esférica (O).

O diagrama de raios é semelhante ao da Fig. 34-12*a* do livro.

39. (a) De acordo com a Eq. 34-8, fazendo $n_1 = n_{ar}$ = 1,00, $n_2 = n$, $p = \infty$ e $i = 2r$,

$$\frac{1,00}{\infty}+\frac{n}{2r}=\frac{n-1}{r}\quad\Rightarrow\quad n=2,00.$$

(b) Para $i = r$, a Eq. 34-8 se torna

$$\frac{n}{r}=\frac{n-1}{r},$$

que não tem solução, a não ser para $n\to\infty$ ou $r\to\infty$. Isto significa que não é possível focalizar os raios luminosos no centro da esfera.

40. De acordo com a Eq. 34-8, com n_1 = 1,6, $n_2 = n_{ar}$ = 1, p = 3,0 cm e r = –5,0 cm, obtemos

$$\frac{1,6}{3,0\text{ cm}}+\frac{1}{i}=\frac{1-1,6}{-5,0\text{ cm}}\quad\Rightarrow\quad i=-2,4\text{ cm}.$$

A distância aparente da superfície da mesa é, portanto,

$$d-h+i=8,0\text{ cm}-3,0\text{ cm}+2,4\text{ cm}=7,4\text{ cm}.$$

41. (a) De acordo com a Eq. 34-10,

$$f = \left[(n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)\right]^{-1} = \left[(1{,}5-1)\left(\frac{1}{\infty} - \frac{1}{-20\text{ cm}}\right)\right]^{-1} = +40\text{ cm}.$$

(b) De acordo com a Eq. 34-9,

$$i = \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{p}\right)^{-1} = \left(\frac{1}{40\text{ cm}} - \frac{1}{40\text{ cm}}\right)^{-1} = \infty.$$

42. Combinando as Eqs. 34-7 e 34-9, obtemos $m(p - f) = -f$. De acordo com o gráfico da Fig. 34-39, $m = 0{,}5$ para $p = 15$ cm, o que nos dá $f = -15$ cm. Substituindo f por seu valor na expressão e fazendo $p = 35$ cm, obtemos $m = +0{,}30$.

43. De acordo com a Eq. 34-9, temos

$$i = \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{p}\right)^{-1} = \frac{fp}{p-f}.$$

A altura da imagem é, portanto,

$$h_i = mh_p = \left(\frac{i}{p}\right)h_p = \frac{fh_p}{p-f} = \frac{(75\text{ mm})(1{,}80\text{ m})}{27\text{ m} - 0{,}075\text{ m}} = 5{,}0\text{ mm}.$$

44. A descontinuidade do gráfico da Fig. 34-40 no ponto $p = 30$ cm significa que $f = 30$ cm. Para $p = 100$ cm, a Eq. 34-9 nos dá

$$i = \frac{pf}{p-f} = \frac{(100\text{ cm})(30\text{ cm})}{100\text{ cm} - 30\text{ cm}} = +43\text{ cm}.$$

45. Se d_S é o diâmetro do Sol e d_i é o diâmetro da imagem, a Eq. 34-5 nos dá

$$\begin{aligned} d_i &= |m|d_S = \left(\frac{i}{p}\right)d_S \approx \left(\frac{f}{p}\right)d_S = \frac{(20{,}0\times10^{-2}\text{m})(2)(6{,}96\times10^{8}\text{m})}{1{,}50\times10^{11}\text{m}} \\ &= 1{,}86\times10^{-3}\text{m} = 1{,}86\text{ mm}. \end{aligned}$$

46. Como a distância focal da lente não muda, todos os pontos do gráfico da Fig. 34-41 obedecem à relação $1/p + 1/i = c$, em que c é uma constante. De acordo com o gráfico, para $p = p_1 = 20$ cm, temos $i = i_1 = -10$ cm. Assim, chamando de i_2 o valor de i para $p = p_2 = 70$ cm, temos

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{i_2} = c = \frac{1}{p_2} + \frac{1}{i_2} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{20\text{ cm}} - \frac{1}{10\text{ cm}} = \frac{1}{70\text{ cm}} + \frac{1}{i_2},$$

o que nos dá $i_2 = -16$ cm.

47. PENSE Este problema envolve uma lente biconvexa e pode ser resolvido com o auxílio da equação do fabricante de lentes.

FORMULE A equação do fabricante de lentes (Eq. 34-10) é a seguinte:

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

em que f é a distância focal, n é o índice de refração, r_1 é o raio de curvatura da primeira superfície encontrada pelos raios luminosos, e r_2 é o raio de curvatura da segunda superfície. Como uma das superfícies tem o raio de curvatura duas vezes maior que a outra, e uma das superfícies é convexa em relação aos raios luminosos enquanto a outra é côncava, fazemos $r_2 = -2r_1$, o que nos dá

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{2r_1}\right) = \frac{3(n-1)}{2r_1}.$$

ANALISE (a) Explicitando o raio menor, r_1, e substituindo os valores conhecidos, obtemos

$$r_1 = \frac{3(n-1)f}{2} = \frac{3(1{,}5-1)(60\text{ mm})}{2} = 45\text{ mm}.$$

(b) O valor absoluto do raio maior é $|r_2| = 2r_1 = 90$ mm.

APRENDA Uma lente pode formar a imagem de um objeto porque é capaz de mudar a direção dos raios luminosos, mas essa mudança de direção só acontece se o índice de refração do material da lente for diferente do índice de refração do meio em que a lente se encontra.

48. Combinando a Eq. 34-7 com a Eq. 34-9, obtemos $m(p - f) = -f$. De acordo com o gráfico da Fig. 34-42, $m = 2$ para $p = 5$ cm, o que nos dá $f = mp/(m - 1) = 10$ cm. Substituindo f por seu valor na expressão e fazendo $p = 14$ cm, obtemos $m = -2{,}5$.

49. PENSE Como a imagem é formada na tela, a soma da distância do objeto com a distância da imagem deve ser igual à distância entre a transparência e a tela.

FORMULE Combinando a Eq. 34-9,

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{i}$$

com a relação $p + i = d = 44$ cm, obtemos a equação $p^2 - dp + df = 0$.

ANALISE Resolvendo a equação do segundo grau e substituindo os valores conhecidos, obtemos

$$p = \frac{1}{2}\left(d \pm \sqrt{d^2 - 4df}\right) = 22\text{ cm} \pm \frac{1}{2}\sqrt{(44\text{ cm})^2 - 4(44\text{ cm})(11\text{ cm})} = 22\text{ cm}.$$

APRENDA Como $p > f$, o ponto focal está entre a lente e o objeto. A distância da imagem é $i = d - p = 44 - 22 = 22$ cm.

50. Como a lente é convergente (C), a distância focal é positiva: $f = +4$ cm.

(a) De acordo com a Eq. 34-9, $i = pf/(p - f) = +5{,}3$ cm.

(b) De acordo com a Eq. 34-7, $m = -i/p = -0{,}33$.

(c) Como $i > 0$, a imagem é real (R).

(d) Como $m < 0$, a imagem é invertida (I).

(e) Como a imagem é real, é formada do outro lado da lente (O). (Veja a Fig. 34-16*a*.)

51. Como a lente é convergente (C), a distância focal é positiva: $f = +16$ cm.

(a) De acordo com a Eq. 34-9, $i = pf/(p - f) = -48$ cm.

(b) De acordo com a Eq. 34-7, $m = -i/p = +4{,}0$.

(c) Como $i < 0$, a imagem é virtual (V).

(d) Como $m > 0$, a imagem é não invertida (NI).

(e) Como a imagem é virtual, é formada do mesmo lado da lente (M). (Veja a Fig. 34-16*b*.)

52. Como a lente é convergente (C), a distância focal é positiva: $f = +35$ cm.

(a) De acordo com a Eq. 34-9, $i = pf/(p - f) = -88$ cm.

(b) De acordo com a Eq. 34-7, $m = -i/p = +3{,}5$.

(c) Como $i < 0$, a imagem é virtual (V).

(d) Como $m > 0$, a imagem é não invertida (NI).

(e) Como a imagem é virtual, é formada do mesmo lado da lente (M). (Veja a Fig. 34-16*b*.)

53. PENSE No caso de uma lente divergente (D), a distância focal é negativa.

FORMULE A distância do objeto p, a distância da imagem i e a distância focal f estão relacionadas pela Eq. 34-9:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{i}.$$

O valor de i é positivo para imagens reais e negativo para imagens virtuais. A ampliação lateral correspondente é $m = -i/p$. O valor de m é positivo para imagens não invertidas e negativo para imagens invertidas.

ANALISE Neste problema, $f = -12$ cm e $p = +8{,}0$ cm.

(a) A distância da imagem é $i = \dfrac{pf}{p-f} = \dfrac{(8{,}0\text{ cm})(-12\text{ cm})}{8{,}0\text{ cm} - (-12\text{ cm})} = -4{,}8\text{ cm}.$

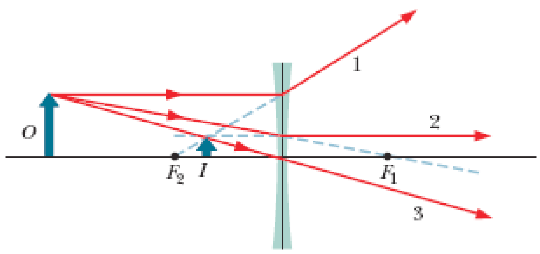
(b) A ampliação lateral é $m = -i/p = -(-4{,}8\text{ cm})/(8{,}0\text{ cm}) = +0{,}60$.

(c) O fato de a distância da imagem ser negativa significa que a imagem é virtual (V).

(d) O fato de que a ampliação lateral é positiva significa que a imagem é não invertida (NI).

(e) O objeto e a imagem estão do mesmo lado (M).

APRENDA A situação deste problema é a mesma da Fig. 34-16*c*. A lente é divergente e forma uma imagem virtual, não invertida, do mesmo lado da lente que o objeto.



54. Como a lente é divergente (D), a distância focal é negativa: $f = -6$ cm.

(a) De acordo com a Eq. 34-9, $i = pf/(p - f) = -3{,}8$ cm.

(b) De acordo com a Eq. 34-7, $m = -i/p = +0{,}38$.

(c) Como $i < 0$, a imagem é virtual (V).

(d) Como $m > 0$, a imagem é não invertida (NI).

(e) Como a imagem é virtual, é formada do mesmo lado da lente (M).

55. PENSE No caso de uma lente divergente (D), a distância focal é negativa.

FORMULE A distância do objeto p, a distância da imagem i e a distância focal f estão relacionadas pela Eq. 34-9:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{i}.$$

O valor de i é positivo para imagens reais e negativo para imagens virtuais. A ampliação lateral correspondente é $m = -i/p$. O valor de m é positivo para imagens não invertidas e negativo para imagens invertidas.

ANALISE Neste caso, $f = -14$ cm e $p = +22{,}0$ cm.

(a) A distância da imagem é $i = \dfrac{pf}{p-f} = \dfrac{(22\text{ cm})(-14\text{ cm})}{22\text{ cm} - (-14\text{ cm})} = -8{,}6\text{ cm}.$

(b) A ampliação lateral é $m = -i/p = -(8{,}6\text{ cm})/(22\text{ cm}) = +0{,}39$.

(c) O fato de a distância da imagem ser negativa significa que a imagem é virtual (V).

(d) O fato de que a ampliação lateral é positiva significa que a imagem é não invertida (NI).

(e) O objeto e a imagem estão do mesmo lado (M).

APRENDA A situação deste problema é a mesma da Fig. 34-16*c*. A lente é divergente e forma uma imagem virtual, não invertida, do mesmo lado da lente que o objeto.

56. Como a lente é divergente (D), a distância focal é negativa: $f = -31$ cm.

(a) De acordo com a Eq. 34-9, $i = pf/(p - f) = -8{,}7$ cm.

(b) De acordo com a Eq. 34-7, $m = -i/p = +0{,}72$.

(c) Como $i < 0$, a imagem é virtual (V).

(d) Como $m > 0$, a imagem é não invertida (NI).

(e) Como a imagem é virtual, é formada do mesmo lado da lente (M).

57. PENSE No caso de uma lente convergente (C), a distância focal é positiva.

FORMULE A distância do objeto p, a distância da imagem i e a distância focal f estão relacionadas pela Eq. 34-9:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{i}.$$

O valor de i é positivo para imagens reais e negativo para imagens virtuais. A ampliação lateral correspondente é $m = -i/p$. O valor de m é positivo para imagens não invertidas e negativo para imagens invertidas.

ANALISE Neste caso, $f = +20$ cm e $p = +45{,}0$ cm.

(a) A distância da imagem é $i = \dfrac{pf}{p-f} = \dfrac{(45\text{ cm})(20\text{ cm})}{45\text{ cm} - 20\text{ cm}} = +36\text{ cm}.$

(b) A ampliação lateral é $m = -i/p = -(36\text{ cm})/(45\text{ cm}) = -0{,}80$.

(c) O fato de que a distância da imagem é positiva significa que a imagem é real (R).

(d) O valor negativo da ampliação lateral significa que a imagem é invertida (I).

(e) A imagem está do outro lado da lente (O).

APRENDA A situação deste problema é a mesma da Fig. 34-16*a*. A lente é convergente e forma uma imagem real e invertida do outro lado da lente.

58. (a) Combinando as Eqs. 34-9 e 34-10, obtemos $i = -63$ cm.

(b) De acordo com a Eq. 34-7, $m = -i/p = +2{,}2$.

(c) Como $i < 0$, a imagem é virtual (V).

(d) Como $m > 0$, a imagem é não invertida (NI).

(e) Como a imagem é virtual, é formada do mesmo lado da lente (M).

59. PENSE Como r_1 é positivo e r_2 é negativo, a lente é do tipo biconvexo. Vamos usar a equação do fabricante de lentes para analisar o problema.

FORMULE A equação do fabricante de lentes (Eq. 34-10) é a seguinte:

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

em que f é a distância focal, n é o índice de refração, r_1 é o raio de curvatura da primeira superfície encontrada pelos raios luminosos, e r_2 é o raio de curvatura da segunda superfície. A distância do objeto p, a distância da imagem i e a distância focal f estão relacionadas pela Eq. 34-9:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{i}.$$

ANALISE Neste caso, $r_1 = +30$ cm, $r_2 = -42$ cm, $n = 1{,}55$ e $p = +75$ cm.

(a) A distância focal é

$$f = \frac{r_1 r_2}{(n-1)(r_2 - r_1)} = \frac{(+30\text{ cm})(-42\text{ cm})}{(1{,}55-1)(-42\text{ cm} - 30\text{ cm})} = +31{,}8\text{ cm}.$$

e, portanto, a distância da imagem é

$$i = \frac{pf}{p-f} = \frac{(75\text{ cm})(31{,}8\text{ cm})}{75\text{ cm} - 31{,}8\text{ cm}} = +55\text{ cm}.$$

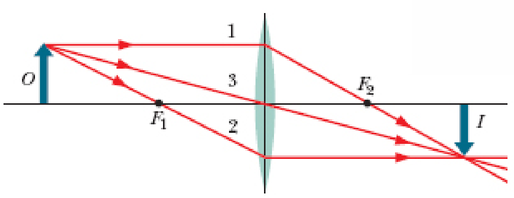
(b) De acordo com a Eq. 34-7, $m = -i/p = -(55\text{ cm})/(75\text{ cm}) = -0{,}74$.

(c) O fato de que a distância da imagem é positiva significa que a imagem é real (R).

(d) O fato de a ampliação lateral ser negativa significa que a imagem é invertida (I).

(e) A imagem está do outro lado da lente (O).

APRENDA A situação deste problema é a mesma da Fig. 34-16*a*. A lente é convergente e forma uma imagem real e invertida do outro lado da lente.



60. (a) Combinando as Eqs. 34-9 e 34-10, obtemos $i = -26$ cm.

(b) De acordo com a Eq. 34-7, $m = -i/p = +4{,}3$.

(c) O fato de que $i < 0$ significa que a imagem é virtual (V).

(d) O fato de que $m > 0$ significa que a imagem é não invertida (NI).

(e) Como a imagem é virtual, é formada do mesmo lado da lente (M).

61. (a) Combinando a Eq. 34-9 com a Eq. 34-10, obtemos $i = -18$ cm.

(b) De acordo com a Eq. 34-7, $m = -i/p = +0{,}76$.

(c) O fato de que $i < 0$ significa que a imagem é virtual (V).

(d) O fato de que $m > 0$ significa que a imagem é não invertida (NI).

(e) Como a imagem é virtual, é formada do mesmo lado da lente (M).

62. (a) De acordo com a Eq. 34-10,

$$f=\frac{r_1 r_2}{(n-1)(r_2-r_1)}=+30\text{ cm}.$$

Como $f > 0$, a lente é convergente (C). De acordo com a Eq. 34-9,

$$i=\frac{1}{\frac{1}{f}-\frac{1}{p}}=\frac{1}{\frac{1}{30\text{ cm}}-\frac{1}{10\text{ cm}}}=-15\text{ cm}.$$

(b) De acordo com a Eq. 34-6, $m = -i/p = -(-15\text{ cm})/(10\text{ cm}) = +1{,}5$.

(c) Como $i < 0$, a imagem é virtual (V).

(d) Como $m > 0$, a imagem é não invertida (NI).

(e) Como a imagem é virtual, é formada do mesmo lado da lente (M).

O diagrama de raios é semelhante ao da Fig. 34-16*b* do livro.

63. (a) Combinando as Eqs. 34-9 e 34-10, obtemos $i = -30$ cm.

(b) De acordo com a Eq. 34-7, $m = -i/p = +0{,}86$.

(c) Como $i < 0$, a imagem é virtual (V).

(d) Como $m > 0$, a imagem é não invertida (NI).

(e) Como a imagem é virtual, é formada do mesmo lado da lente (M).

64. (a) De acordo com a Eq. 34-10,

$$f=\frac{1}{n-1}\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}\right)^{-1}=-120\text{ cm}.$$

Como $f < 0$, a lente é divergente (D). De acordo com a Eq. 34-9,

$$i=\frac{1}{\frac{1}{f}-\frac{1}{p}}=\frac{1}{\frac{1}{-120\text{ cm}}-\frac{1}{10\text{ cm}}}=-9{,}2\text{ cm}.$$

(b) De acordo com a Eq. 34-6, $m = -i/p = -(-9{,}2\text{ cm})/(10\text{ cm}) = +0{,}92$.

(c) Como $i < 0$, a imagem é virtual (V).

(d) Como $m > 0$, a imagem é não invertida (NI).

(e) Como a imagem é virtual, é formada do mesmo lado da lente (M).

O diagrama de raios é semelhante ao da Fig. 34-16*c* do livro.

65. (a) De acordo com a Eq. 34-10,

$$f=\frac{1}{n-1}\left(\frac{1}{r_2}-\frac{1}{r_2}\right)^{-1}=-30\text{ cm}.$$

Como $f < 0$, a lente é divergente (D). De acordo com a Eq. 34-9, temos

$$i=\frac{1}{\frac{1}{f}-\frac{1}{p}}=\frac{1}{\frac{1}{-30\text{ cm}}-\frac{1}{10\text{ cm}}}=-7{,}5\text{ cm}.$$

(b) De acordo com a Eq. 34-6, $m = -i/p = -(-7{,}5\text{ cm})/(10\text{ cm}) = +0{,}75$.

(c) Como $i < 0$, a imagem é virtual (V).

(d) Como $m > 0$, a imagem é não invertida (NI).

(e) Como a imagem é virtual, é formada do mesmo lado da lente (M).

O diagrama de raios é semelhante ao da Fig. 34-16*c* do livro.

66. (a) Combinando a Eq. 34-9 com a Eq. 34-10, obtemos $i = -9{,}7$ cm.

(b) De acordo com a Eq. 34-7, $m = -i/p = +0{,}54$.

(c) Como $i < 0$, a imagem é virtual (V).

(d) Como $m > 0$, a imagem é não invertida (NI).

(e) Como a imagem é virtual, é formada do mesmo lado da lente (M).

67. (a) Combinando a Eq. 34-9 com a Eq. 34-10, obtemos $i = +84$ cm.

(b) De acordo com a Eq. 34-7, $m = -i/p = -1{,}4$.

(c) Como $i > 0$, a imagem é real (R).

(d) Como $m < 0$, a imagem é invertida (I).

(e) Como a imagem é real, é formada do lado oposto da lente (O).

68. (a) Como a imagem é real, a lente é convergente (C).

(b) Como $i = d - p$ e $i/p = 1/2$,

$$p = \frac{2d}{3} = \frac{2(40{,}0\text{ cm})}{3} = 26{,}7\text{ cm}.$$

(c) A distância focal é

$$f = \left(\frac{1}{i} + \frac{1}{p}\right)^{-1} = \left(\frac{1}{d/3} + \frac{1}{2d/3}\right)^{-1} = \frac{2d}{9} = \frac{2(40{,}0\text{ cm})}{9} = 8{,}89\text{ cm}.$$

69. (a) Como $f > 0$, a lente é convergente (C).

(d) De acordo com a Eq. 34-9,

$$i = \frac{1}{\frac{1}{f} - \frac{1}{p}} = \frac{1}{\frac{1}{10\text{ cm}} - \frac{1}{5{,}0\text{ cm}}} = -10\text{ cm}.$$

(e) De acordo com a Eq. 34-6, $m = -(-10\text{ cm})/(5{,}0\text{ cm}) = +2{,}0$.

(f) Como $i < 0$, a imagem é virtual (V).

(g) Como $m > 0$, a imagem é não invertida (NI).

(h) Como a imagem é virtual, é formada do mesmo lado da lente (M).

70. (a) O fato de que $m < 1$ e a imagem é não invertida significa que a lente é divergente (D) (veja a Fig. 34-16).

(b) Como a lente é divergente, $f = -20$ cm.

(d) De acordo com a Eq. 34-9, $i = -5{,}7$ cm.

(e) De acordo com a Eq. 34-7, $m = -i/p = +0{,}71$.

(f) O fato de que $i < 0$ significa que a imagem é virtual (V).

(h) Como a imagem é virtual significa que é formada do mesmo lado da lente (M).

71. (a) De acordo com a Eq. 34-7, $i = -mp = -(0{,}25)(16\text{ cm}) = -4{,}0$ cm. De acordo com a Eq. 34-9, $f = -5{,}3$ cm, o que significa que a lente é divergente (D).

(b) Como foi visto no item (a), $f = -5{,}3$ cm.

(d) Como foi visto no item (a), $i = -4{,}0$ cm.

(f) Como $i < 0$, a imagem é virtual (V).

(g) Como $m > 0$, a imagem é não invertida (NI).

(h) Como a imagem é virtual, é formada do mesmo lado da lente.

72. (a) De acordo com a Eq. 34-7, $i = +4{,}0$ cm. Nesse caso, de acordo com a Eq. 34-9, $f = +3{,}2$ cm, o que significa que a lente é convergente (C).

(b) Como foi visto no item (a), $f = +3{,}2$ cm.

(d) Como foi visto no item (a), $i = +4{,}0$ cm.

(f) Como $i > 0$, a imagem é real (R).

(g) Como $m < 0$, a imagem é invertida (I).

(h) Como a imagem é real, é formada do lado oposto da lente (O).

73. (a) De acordo com a Eq. 34-6, $i = -mp = +5{,}0$ cm; de acordo com a 34-9, $f = +3{,}3$ cm, o que significa que a lente é convergente (C).

(b) Como foi visto no item (a), $f = +3{,}3$ cm.

(d) Como foi visto no item (a), $i = +5{,}0$ cm.

(f) Como $i > 0$, a imagem é real (R).

(g) Como $m < 0$, a imagem é invertida (I).

(h) Como a imagem é real, é formada do lado oposto da lente (O).

O diagrama de raios é semelhante ao da Fig. 34-16*a* do livro.

74. (b) Como a lente é convergente, $f = +10$ cm.

(d) De acordo com a Eq. 34-9,

$$i = \frac{1}{\frac{1}{f} - \frac{1}{p}} = \frac{1}{\frac{1}{10\text{ cm}} - \frac{1}{20\text{ cm}}} = +20\text{ cm}.$$

(e) De acordo com a Eq. 34-6, $m = -20/20 = -1{,}0$.

(f) Como $i > 0$, a imagem é real (R).

(g) Como $m < 0$, a imagem é invertida (I).

(h) Como a imagem é real, é formada do outro lado da lente (O).

75. PENSE Como a imagem está do mesmo lado da lente, deve ser uma imagem virtual.

FORMULE A distância do objeto p, a distância da imagem i e a distância focal f estão relacionadas pela Eq. 34-9:

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{p}+\frac{1}{i}.$$

O valor de i é positivo para imagens reais e negativo para imagens virtuais. A ampliação lateral correspondente é $m = -i/p$. O valor de m é positivo para imagens não invertidas e negativo para imagens invertidas.

ANALISE (a) Como a imagem é virtual, a distância da imagem i é negativa. Substituindo $i = fp/(p - f)$ em $m = -i/p$, obtemos

$$m=-\frac{i}{p}=-\frac{f}{p-f}.$$

O fato de que a ampliação é menor que 1,0 indica que f é negativa. Isso significa que a lente é divergente (D).

(b) A distância focal é $f = -10$ cm.

(d) A distância da imagem é $i=\dfrac{pf}{p-f}=\dfrac{(5{,}0\text{ cm})(-10\text{ cm})}{5{,}0\text{ cm}-(-10\text{ cm})}=-3{,}3\text{ cm}.$

(e) A ampliação lateral é $m = -i/p = -(-3{,}3\text{ cm})/(5{,}0\text{ cm}) = +0{,}67$.

(f) O fato de que a distância da imagem i é um número negativo significa que a imagem é virtual (V).

(g) O fato de que a ampliação lateral é positiva significa que a imagem é não invertida (NI).

APRENDA A situação deste problema é a mesma da Fig. 34-16*c*. A lente é divergente e forma uma imagem virtual e não invertida, do mesmo lado da lente que o objeto.

76. (a) De acordo com a Tabela 34-8, a ampliação é positiva e maior que 1. Examinando as Figs. 34-15 e 34-16 do livro, vemos que isso só será possível se a lente for convergente (C) e se $p < f$.

(b) Como a lente é convergente, $f = 10$ cm.

(d) De acordo com a Eq. 34-9,

$$i=\frac{1}{\frac{1}{f}-\frac{1}{p}}=\frac{1}{\frac{1}{10\text{ cm}}-\frac{1}{5{,}0\text{ cm}}}=-10\text{ cm}.$$

(e) A ampliação é $m = -i/p = +2{,}0$.

(f) Como $i < 0$, a imagem é virtual (V).

(g) Como $m > 0$, a imagem é não invertida (NI).

(h) Como a imagem é virtual, é formada do mesmo lado da lente (M).

77. PENSE O fato de que a ampliação lateral m é positiva significa que a imagem é não invertida. Além disso, como $m > 1$, a imagem é maior que o objeto.

FORMULE A distância do objeto p, a distância da imagem i e a distância focal f estão relacionadas pela Eq. 34-9:

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{p}+\frac{1}{i}.$$

O valor de i é positivo para imagens reais e negativo para imagens virtuais. A ampliação lateral correspondente é $m = -i/p$. O valor de m é positivo para imagens não invertidas e negativo para imagens invertidas.

ANALISE (a) Combinando as Eqs. 34-7 e 34-9, obtemos

$$f=\frac{p}{1-1/m}=\frac{16\text{ cm}}{1-1/1{,}25}=80\text{ cm}.$$

Como o valor de f é positivo, a lente é convergente (C).

(b) Como foi visto em (a), $f = +80$ cm.

(d) A distância da imagem é $i = -mp = -(1{,}25)(16 \text{ cm}) = -20$ cm.

(e) A ampliação lateral é $m = +\,1{,}25$.

(f) O fato de que a distância de imagem i é um número negativo significa que a imagem é virtual (V).

(g) O fato de que a ampliação lateral é positiva significa que a imagem é não invertida (NI).

(h) A imagem está do mesmo lado que o objeto (M).

APRENDA A situação deste problema é a mesma da Fig. 34-16*b*. A lente é convergente. Quando o objeto está mais próximo da lente que o ponto focal ($p < f$), a imagem é virtual, não invertida, e está do mesmo lado da lente que o objeto.

78. (a) De acordo com a Tabela 34-8, o valor absoluto da ampliação é 0,5 e a imagem é não invertida (NI). Isso significa que $m = +0{,}5$. Usando a Eq. 34-6 e o valor conhecido de p, obtemos $i = -5{,}0$ cm, que mostra que se trata de uma imagem virtual. A Eq. 34-9 nos dá a distância focal: $f = -10$ cm. Como a distância focal é negativa, trata-se de uma lente divergente (D).

(b) Como foi visto no item (a), $f = -10$ cm.

(d) Como foi visto no item (a), $i = -5{,}0$ cm.

(e) Como foi visto no item (a), $m = +0{,}5$.

(f) Como $i < 0$, a imagem é virtual (V).

(h) Como a imagem é virtual, é formada do mesmo lado da lente (M).

79. (a) Como $m > 1$, a lente é convergente (C). (Veja a Fig. 34-15.)

(b) Como a lente é convergente, $f = +20$ cm.

(d) De acordo com a Eq. 34-9, $i = -13$ cm.

(e) De acordo com a Eq. 34-7, $m = -i/p = +1{,}7$.

(f) Como $i < 0$, a imagem é virtual (V).

(g) Como $m > 0$, a imagem é não invertida (NI).

(h) Como a imagem é virtual, é formada do mesmo lado da lente (M).

80. (a) De acordo com a Eq. 34-9, a posição da imagem da lente 1 (cuja distância focal, já que se trata de uma lente convergente, é $f_1 = +15$ cm) é $i_1 = -30$ cm. Esta imagem serve de objeto para a lente 2 (cuja distância focal é $f_2 = +8$ cm), com $p_2 = d - i_1 = 10$ cm $- (-30$ cm$) = 40$ cm. Assim, de acordo com a Eq. 34-9 (aplicada à lente 2), $i_2 = +10$ cm.

(b) De acordo com a Eq. 34-11, $M = m_1 m_2 = (-i_1/p_1)(-i_2/p_2) = i_1 i_2/p_1 p_2 = -0{,}75$.

(c) Como $i_2 > 0$, a imagem é real (R).

(d) Como $M < 0$, a imagem é invertida (I).

(e) Como a imagem é real, é formada do lado oposto da lente 2 (O).

81. (a) De acordo com a Eq. 34-9, a posição da imagem da lente 1 (cuja distância focal, já que se trata de uma lente convergente, é $f_1 = +8$ cm) é $i_1 = 24$ cm. Esta imagem serve de objeto para a lente 2 (cuja distância focal é $f_2 = +6$ cm), com $p_2 = d - i_1 = 32$ cm $- 24$ cm $= 8$ cm. Assim, de acordo com a Eq. 34-9 (aplicada à lente 2), $i_2 = +24$ cm.

(b) De acordo com a Eq. 34-11, $M = m_1 m_2 = (-i_1/p_1)(-i_2/p_2) = i_1 i_2/p_1 p_2 = +6{,}0$.

(c) Como $i_2 > 0$, a imagem é real (R).

(d) Como $M > 0$, a imagem é não invertida (NI).

(e) Como a imagem é real, é formada do lado oposto da lente 2 (O).

82. (a) De acordo com a Eq. 34-9, a posição da imagem da lente 1 (cuja distância focal, já que se trata de uma lente divergente, é $f_1 = -6$ cm) é $i_1 = -3{,}4$ cm. Esta imagem serve de objeto para a lente 2 (cuja distância focal é $f_2 = +6$ cm), com $p_2 = d - i_1 =$ 12 cm − (−3,4 cm) = 15,4 cm. Assim, de acordo com a Eq. 34-9 (aplicada à lente 2), $i_2 = +9{,}8$ cm.

(b) De acordo com a 34-11, $M = -0{,}27$.

(c) Como $i_2 > 0$, a imagem é real (R).

(d) Como $M < 0$, a imagem é invertida (I).

(e) Como a imagem é real, é formada do lado oposto da lente 2 (O).

83. PENSE Em um sistema de duas lentes, a imagem formada pela lente 1 se comporta como objeto para a lente 2.

FORMULE Para analisar um sistema de duas lentes, ignoramos inicialmente a lente 2 e usamos os métodos tradicionais para determinar a imagem produzida pela lente 1. A distância do objeto p_1, a distância da imagem i_1 e a distância focal f_1 estão relacionadas pela equação

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{p_1} + \frac{1}{i_1}.$$

Em seguida, ignoramos a lente 1 e tratamos a imagem formada pela lente 1 como objeto para a lente 2. A distância do objeto p_2 é a distância entre a lente 2 e a posição da imagem produzida pela lente 1. A posição da imagem final, i_2, é obtida resolvendo a equação

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{p_2} + \frac{1}{i_2}$$

em que f_2 é a distância focal da lente 2.

ANALISE (a) Como a lente 1 é convergente, $f_1 = +9$ cm e a distância da imagem é

$$i_1 = \frac{p_1 f_1}{p_1 - f_1} = \frac{(20 \text{ cm})(9 \text{ cm})}{20 \text{ cm} - 9 \text{ cm}} = 16{,}4 \text{ cm}.$$

Essa imagem serve de objeto para a lente 2 (cuja distância focal é $f_2 = +5$ cm) com uma distância do objeto dada por $p_2 = d - i_1 =$ −8,4 cm. O sinal negativo significa que o "objeto" está atrás da lente 2. Resolvendo a equação das lentes delgadas, obtemos

$$i_2 = \frac{p_2 f_2}{p_2 - f_2} = \frac{(-8{,}4 \text{ cm})(5{,}0 \text{ cm})}{-8{,}4 \text{ cm} - 5{,}0 \text{ cm}} = 3{,}13 \text{ cm}.$$

(b) A ampliação lateral total é $M = m_1 m_2 = (-i_1/p_1)(-i_2/p_2) = i_1 i_2/p_1 p_2 = -0{,}31$.

(c) O fato de que a distância da imagem (final) é positiva significa que a imagem é real (R).

(d) O fato de a ampliação lateral ser negativa significa que a imagem é invertida (I).

(e) A imagem está do outro lado da lente 2 (O).

APRENDA Como este cálculo envolve um valor negativo para p_2 (e talvez outras considerações "pouco intuitivas"), vale a pena explicar com mais detalhes a linha de raciocínio usada para chegar à solução: a lente 1 faz os raios convergirem para uma imagem (que não chega a se formar, por causa da presença da lente 2) que seria real, invertida, e estaria 8,4 cm atrás da lente 2. O que a lente 2 faz, em essência, é acentuar a convergência dos raios, fazendo com que a imagem se forme mais perto da lente 1 que se a lente 2 não estivesse presente.

84. (a) De acordo com a Eq. 34-9, a posição da imagem da lente 1 (cuja distância focal, já que se trata de uma lente convergente, é $f_1 = +12{,}0$ cm) é $i_1 = +60$ cm. Esta imagem serve de objeto para a lente 2 (cuja distância focal é $f_2 = +10$ cm), com $p_2 = d - i_1 = 67$ cm − 60 cm = 7 cm. Assim, de acordo com a Eq. 34-9 (aplicada à lente 2), $i_2 = -23$ cm.

(b) De acordo com a Eq. 34-11, $M = -13$.

(c) Como $i_2 < 0$, a imagem é virtual (V).

(d) Como $M < 0$, a imagem é invertida (I).

(e) Como a imagem é virtual, é formada do mesmo lado da lente 2 (M).

85. (a) De acordo com a Eq. 34-9, a posição da imagem da lente 1 (cuja distância focal, já que se trata de uma lente convergente, é $f_1 = +6$ cm) é $i_1 = -12$ cm. Esta imagem serve de objeto para a lente 2 (cuja distância focal é $f_2 = -6$ cm), com $p_2 = d - i_1 = 8{,}0$ cm $- (-12$ cm$) = 20$ cm. Assim, de acordo com a Eq. 34-9 (aplicada à lente 2), $i_2 = -4{,}6$ cm.

(b) De acordo com a Eq. 34-11, $M = +0{,}69$.

(c) Como $i_2 < 0$, a imagem é virtual (V).

(d) Como $M > 0$, a imagem é não invertida (NI).

(e) Como a imagem é virtual, é formada do mesmo lado da lente 2 (M).

86. (a) De acordo com a Eq. 34-9, a posição da imagem da lente 1 (cuja distância focal, já que se trata de uma lente convergente, é $f_1 = +8{,}0$ cm) é $i_1 = +24$ cm. Esta imagem serve de objeto para a lente 2 (cuja distância focal é $f_2 = -8$ cm), com $p_2 = d - i_1 = 30$ cm $- 24$ cm $= 6$ cm. Assim, de acordo com a Eq. 34-9 (aplicada à lente 2), $i_2 = -3{,}4$ cm.

(b) De acordo com a Eq. 34-11, $M = -1{,}1$.

(c) Como $i_2 < 0$, a imagem é virtual (V).

(d) Como $M < 0$, a imagem é invertida (I).

(e) Como a imagem é virtual, é formada do mesmo lado a lente 2 (M).

87. (a) De acordo com a Eq. 34-9, a posição da imagem da lente 1 (cuja distância focal, já que se trata de uma lente divergente, é $f_1 = -12{,}0$ cm) é $i_1 = -7{,}5$ cm. Esta imagem serve de objeto para a lente 2 (cuja distância focal é $f_2 = -10$ cm), com $p_2 = d - i_1 = 10$ cm $- (-7{,}5$ cm$) = 17{,}5$ cm. Assim, de acordo com a Eq. 34-9 (aplicada à lente 2), $i_2 = -5{,}5$ cm.

(b) De acordo com a Eq. 34-11, $M = +0{,}12$.

(c) Como $i_2 < 0$, a imagem é virtual (V).

(d) Como $M > 0$, a imagem é não invertida (NI).

(e) Como a imagem é virtual, é formada do mesmo lado da lente 2 (M).

88. De acordo com a Eq. 34-15, o diâmetro mínimo da ocular é

$$d_{oc} = \frac{d_{ob}}{m_\theta} = \frac{75\text{ mm}}{36} = 2{,}1\text{ mm}.$$

89. PENSE O microscópio composto que aparece na Fig. 34-20 é formado por uma objetiva e uma ocular; é usado para observar pequenos objetos que estão muito próximos da objetiva.

FORMULE Sejam f_{ob} a distância focal da objetiva e f_{oc} a distância focal da ocular. A distância entre as duas lentes é

$$L = s + f_{ob} + f_{oc},$$

em que s é o comprimento do tubo. A ampliação lateral da objetiva é

$$m = -\frac{i}{p} = -\frac{s}{f_{ob}}$$

e a ampliação angular da ocular é $m_\theta = (25\text{ cm})/f_{oc}$.

ANALISE (a) O comprimento do tubo é

$$s = L - f_{ob} - f_{oc} = 25{,}0 \text{ cm} - 4{,}00 \text{ cm} - 8{,}00 \text{ cm} = 13{,}0 \text{ cm}.$$

(b) Vamos determinar o valor de p usando a equação $(1/p) + (1/i) = (1/f_{ob})$. A distância da imagem é

$$i = f_{ob} + s = 4{,}00 \text{ cm} + 13{,}0 \text{ cm} = 17{,}0 \text{ cm},$$

e, portanto,

$$p = \frac{if_{ob}}{i - f_{ob}} = \frac{(17{,}0 \text{ cm})(4{,}00 \text{ cm})}{17{,}0 \text{ cm} - 4{,}00 \text{ cm}} = 5{,}23 \text{ cm}.$$

(c) A ampliação lateral da objetiva é

$$m = -\frac{i}{p} = -\frac{17{,}0 \text{ cm}}{5{,}23 \text{ cm}} = -3{,}25.$$

(d) A ampliação angular da ocular é

$$m_\theta = \frac{25 \text{ cm}}{f_{oc}} = \frac{25 \text{ cm}}{8{,}00 \text{ cm}} = 3{,}13.$$

(e) A ampliação total do microscópio é

$$M = mm_\theta = (-3{,}25)(3{,}13) = -10{,}2.$$

APRENDA A objetiva produz uma imagem real I do objeto em um ponto mais próximo da ocular do que o ponto focal ($i > f_{oc}$). A imagem I serve de objeto para a ocular, que produz uma imagem virtual I' vista pelo observador.

90. (a) A nova distância entre a lente e o filme é

$$i = \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{p}\right)^{-1} = \left(\frac{1}{5{,}0 \text{ cm}} - \frac{1}{100 \text{ cm}}\right)^{-1} = 5{,}3 \text{ cm}.$$

(b) A variação da distância entre a lente e o filme é 5,3 cm − 5,0 cm = 0,30 cm = 3,0 mm.

91. PENSE Este problema envolve a visão humana. A córnea e o cristalino são modelados como uma única lente, que forma uma imagem na retina.

FORMULE Quando o olho está relaxado, a lente focaliza objetos distantes na retina, que está a uma distância i da lente. Fazendo $p = \infty$ na equação das lentes delgadas, obtemos $1/i = 1/f$, em que f é a distância focal da lente efetiva do olho no estado relaxado. Isso nos dá $i = f = 2{,}50$ cm. Quando o olho focaliza objetos mais próximos, a distância da imagem i permanece a mesma, mas a distância do objeto e a distância focal mudam.

ANALISE (a) Se p é a nova distância do objeto e f' é a nova distância focal,

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f'}.$$

Fazendo $i = f$ e explicitando f', obtemos

$$f' = \frac{pf}{f + p} = \frac{(40{,}0 \text{ cm})(2{,}50 \text{ cm})}{40{,}0 \text{ cm} + 2{,}50 \text{ cm}} = 2{,}35 \text{ cm}.$$

(b) Considere a equação do fabricante de lentes

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

em que r_1 e r_2 são os raios de curvatura das duas superfícies da lente, e n é o índice de refração do material da lente. No caso da lente da Fig. 34-46, r_1 e r_2 têm aproximadamente o mesmo valor absoluto, mas r_1 é positivo e r_2 é negativo. Como a distância focal diminui, a combinação $(1/r_1) - (1/r_2)$ deve aumentar. Para isso, basta diminuir o valor absoluto dos dois raios.

APRENDA Quando observamos um objeto próximo do olho, a lente fica mais espessa (o raio de curvatura diminui) e a distância focal diminui.

92. De acordo com a Fig. 34-20, no caso da imagem intermediária, p = 10 mm e

$$i = (f_{ob} + s + f_{oc}) - f_{oc} = 300 \text{ m} - 50 \text{ mm} = 250 \text{ mm};$$

logo,

$$\frac{1}{f_{ob}} = \frac{1}{i} + \frac{1}{p} = \frac{1}{250 \text{ mm}} + \frac{1}{10 \text{ mm}} \Rightarrow f_{ob} = 9{,}62 \text{ mm}$$

e

$$s = (f_{ob} + s + f_{oc}) - f_{ob} - f_{oc} = 300 \text{ mm} - 9{,}62 \text{ mm} - 50 \text{ mm} = 240 \text{ mm}.$$

Nesse caso, de acordo com a Eq. 34-14,

$$M = -\frac{s}{f_{ob}} \frac{25 \text{ cm}}{f_{oc}} = -\left(\frac{240 \text{ mm}}{9{,}62 \text{ mm}}\right)\left(\frac{150 \text{ mm}}{50 \text{ mm}}\right) = -125.$$

93. (a) Sem a lente de aumento, $\theta = h/P_p$ (veja a Fig. 34-19). Com a lente de aumento, fazendo

$$i = -|i| = -P_p,$$

obtemos

$$\frac{1}{p} = \frac{1}{f} - \frac{1}{i} = \frac{1}{f} + \frac{1}{|i|} = \frac{1}{f} + \frac{1}{P_p}.$$

Assim,

$$m_\theta = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{h/p}{h/P_p} = \frac{1/f + 1/P_p}{1/P_p} = 1 + \frac{P_p}{f} = 1 + \frac{25 \text{ cm}}{f}.$$

Para f = 10 cm, temos

$$m_\theta = 1 + \frac{25 \text{ cm}}{10 \text{ cm}} = 3{,}5.$$

(b) Para analisar o caso em que a imagem aparece no infinito, fazemos $i = -|i| \to -\infty$, o que nos dá $1/p + 1/i = 1/p = 1/f$ e

$$m_\theta = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{h/p}{h/P_p} = \frac{1/f}{1/P_p} = \frac{P_p}{f} = \frac{25 \text{ cm}}{f}.$$

Para f = 10 cm,

$$m_\theta = \frac{25 \text{ cm}}{10 \text{ cm}} = 2{,}5.$$

94. De acordo com a Eq. 34-9, $1/p + 1/i = c$, em que c é uma constante ($1/f$). De acordo com o gráfico da Fig. 34-47, para $p = p_1 =$ 15 cm, $i = i_1 = -10$ cm. Assim, para $p = p_2 = 70$ cm, temos

$$1/(15\text{ cm}) + 1/(-10\text{ cm}) = 1/(70\text{ cm}) + 1/i_2,$$

o que nos dá $i_2 = -21$ cm.

95. Como a distância focal de uma lente convergente é positiva, $f_1 = +8{,}0$ cm, $f_2 = +6{,}0$ cm e $f_3 = +6{,}0$ cm. Aplicamos a Eq. 34-9 separadamente a cada lente, "transportando" os resultados de um cálculo para o outro com o auxílio das relações $p_2 = d_{12} - i_1$ e $p_3 = d_{23} - i_2$. Usamos a Eq. 34-7 para calcular as ampliações laterais das lentes e a relação $M = m_1m_2m_3$ (uma generalização da Eq. 34-11) para calcular a ampliação lateral do sistema. Os resultados para as distâncias das imagens intermediárias são $i_1 = 24$ cm e $i_2 = -12$ cm. Os resultados finais são os seguintes:

(a) $i_3 = +8{,}6$ cm.

(b) $m = +2{,}6$.

(c) A imagem é real (R).

(d) A imagem é não invertida (NI).

(e) A imagem é formada do lado oposto da lente 3 (O).

96. Como a distância focal de uma lente convergente é positiva e a distância focal de uma lente divergente é negativa, $f_1 = -6$ cm, $f_2 = +6$ cm e $f_3 = +4$ cm. Aplicamos a Eq. 34-9 separadamente a cada lente, "transportando" os resultados de um cálculo para o outro com o auxílio das relações $p_2 = d_{12} - i_1$ e $p_3 = d_{23} - i_2$. Usamos a Eq. 34-7 para calcular as ampliações laterais das lentes e a relação $M = m_1m_2m_3$ (uma generalização da Eq. 34-11) para calcular a ampliação lateral do sistema. Os resultados para as distâncias das imagens intermediárias são $i_1 = -2{,}4$ cm e $i_2 = 12$ cm. Os resultados finais são os seguintes:

(a) $i_3 = -4{,}0$ cm.

(b) $m = -1{,}2$.

(c) A imagem é virtual (V).

(d) A imagem é invertida (I).

(e) A imagem é formada do mesmo lado da lente (M).

97. Como a distância focal de uma lente convergente é positiva, $f_1 = +6{,}0$ cm, $f_2 = +3{,}0$ cm e $f_3 = +3{,}0$ cm. Aplicamos a Eq. 34-9 separadamente a cada lente, "transportando" os resultados de um cálculo para o outro com o auxílio das relações $p_2 = d_{12} - i_1$ e $p_3 = d_{23} - i_2$. Usamos a Eq. 34-7 para calcular as ampliações laterais das lentes e a relação $M = m_1m_2m_3$ (uma generalização da Eq. 34-11) para calcular a ampliação lateral do sistema. Os resultados para as distâncias das imagens intermediárias são $i_1 = 9$ cm e $i_2 = 6$ cm. Os resultados finais são os seguintes:

(a) $i_3 = +7{,}5$ cm.

(b) $m = -0{,}75$.

(c) A imagem é real (R).

(d) A imagem é invertida (I).

(e) A imagem é formada do lado oposto da lente 3 (O).

98. Como a distância focal de uma lente convergente é positiva, $f_1 = +6{,}0$ cm, $f_2 = +6{,}0$ cm e $f_3 = +5{,}0$ cm. Aplicamos a Eq. 34-9 separadamente a cada lente, "transportando" os resultados de um cálculo para o outro com o auxílio das relações $p_2 = d_{12} - i_1$ e $p_3 = d_{23} - i_2$. Usamos a Eq. 34-7 para calcular as ampliações laterais das lentes e a relação $M = m_1m_2m_3$ (uma generalização da Eq. 34-11) para calcular a ampliação lateral do sistema. Os resultados para as distâncias das imagens intermediárias são $i_1 = -3{,}0$ cm e $i_2 = 9{,}0$ cm. Os resultados finais são os seguintes:

(a) $i_3 = +10$ cm.

(b) $m = +0{,}75$.

(c) A imagem é real (R).

(d) A imagem é não invertida (NI).

(e) A imagem é formada do lado oposto da lente 3 (O).

99. Uma vez que a distância focal de uma lente convergente é positiva e a distância focal de uma lente divergente é negativa, $f_1 = -6{,}0$ cm, $f_2 = -16$ cm e $f_3 = +8{,}0$ cm. Aplicamos a Eq. 34-9 de forma separada a cada lente, "transportando" os resultados de um cálculo para o outro, com o auxílio das relações $p_2 = d_{12} - i_1$ e $p_3 = d_{23} - i_2$. Utilizamos a Eq. 34-7 para calcular as ampliações laterais das lentes, e a relação $M = m_1m_2m_3$ (uma generalização da Eq. 34-11) para calcular a ampliação lateral do sistema. Os resultados para as distâncias das imagens intermediárias são $i_1 = -4{,}0$ cm e $i_2 = -6{,}86$ cm. Os resultados finais são os seguintes:

(a) $i_3 = +24{,}2$ cm.

(b) $m = -0{,}58$.

(c) A imagem é real (R).

(d) A imagem é invertida (I).

(e) A imagem é formada do lado oposto da lente 3 (O).

100. Como a distância focal de uma lente convergente é positiva e a distância focal de uma lente divergente é negativa, $f_1 = +6{,}0$ cm, $f_2 = -4{,}0$ cm e $f_3 = -12$ cm. Aplicamos a Eq. 34-9 separadamente a cada lente, "transportando" os resultados de um cálculo para o outro com o auxílio das relações $p_2 = d_{12} - i_1$ e $p_3 = d_{23} - i_2$. Usamos a Eq. 34-7 para calcular as ampliações laterais das lentes, e a relação $M = m_1m_2m_3$ (uma generalização da Eq. 34-11) para calcular a ampliação lateral do sistema. Os resultados para as distâncias das imagens intermediárias são $i_1 = -12$ cm e $i_2 = -3{,}33$ cm. Os resultados finais são os seguintes:

(a) $i_3 = -5{,}15 \text{ cm} \approx -5{,}2$ cm.

(b) $m = +0{,}285 \approx +0{,}29$.

(c) A imagem é virtual (V).

(d) A imagem é não invertida (NI).

(e) A imagem é formada do mesmo lado da lente 3 (M).

101. PENSE Este problema envolve a conversão da equação das lentes delgadas da forma gaussiana para a forma newtoniana.

FORMULE A forma gaussiana da equação das lentes delgadas é $(1/p) + (1/i) = (1/f)$, em que p é a distância do objeto, i é a distância da imagem e f é a distância focal. Para converter a equação para a forma newtoniana, vamos fazer $p = f + x$, em que x tem um valor positivo, se o objeto está mais distante da lente que o ponto focal, e negativo, se o objeto está mais próximo da lente que o ponto focal. Além disso, vamos fazer $i = f + x'$, em que x' tem um valor positivo, se a imagem está mais distante da lente que o ponto focal, e negativo, se a imagem está mais próxima da lente que o ponto focal.

ANALISE Explicitando i na forma gaussiana da equação, obtemos

$$i = \frac{fp}{p - f}.$$

Fazendo $p = f + x$, temos

$$i = \frac{f(f + x)}{x}.$$

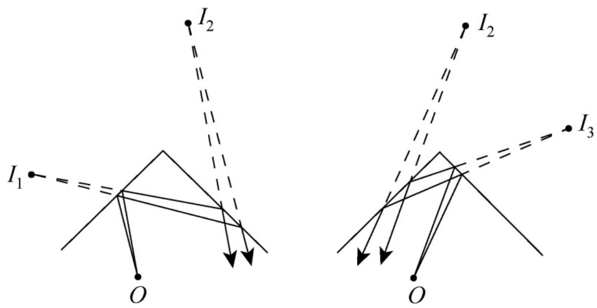
Fazendo $i = f + x'$, obtemos

$$x' = i - f = \frac{f(f + x)}{x} - f = \frac{f^2}{x}$$

o que nos dá $xx' = f^2$.

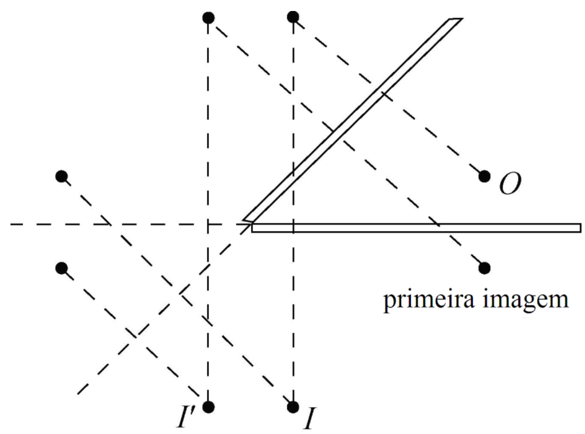
APRENDA A forma newtoniana é equivalente à forma gaussiana e pode ser mais conveniente para resolver alguns tipos de problemas que envolvem lentes delgadas.

102. (a) Para $\theta = 90^o$, existem três imagens: duas são formadas por reflexões em apenas um dos espelhos, e a terceira é formada por reflexões sucessivas nos dois espelhos. As posições das imagens são mostradas nos dois diagramas adiante. O diagrama da esquerda mostra a imagem I_1 formada por reflexões no espelho da esquerda. Está à mesma distância do espelho que o objeto O, em uma reta perpendicular ao espelho passando pelo objeto. A imagem I_2 é formada pela luz refletida nos dois espelhos.



Podemos considerar I_2 como a imagem do prolongamento de I_1 formada pelo espelho da direita. I_2 está à mesma distância do prolongamento do espelho da direita que I_1, em uma reta perpendicular ao prolongamento do espelho passando por I_1. O diagrama da direita mostra a imagem I_3, formada por reflexões no espelho da direita. Está à mesma distância do espelho que o objeto O, em uma reta perpendicular ao espelho passando pelo objeto. Como mostra o digrama, a luz que é refletida primeiro no espelho da direita e depois no espelho da esquerda forma uma imagem em I_2, o mesmo ponto onde é formada uma imagem pela luz que é refletida primeiro no espelho da esquerda e depois no espelho da direita.

(b) Para $\theta = 45°$, temos duas imagens no segundo espelho: uma causada pelo próprio objeto e outra pela imagem do objeto no primeiro espelho. A partir dessas duas imagens, podemos construir duas novas imagens, I e I', atrás do primeiro espelho. Prolongando o plano do segundo espelho, podemos encontrar outras duas imagens de I e I' simetricamente dispostas em relação ao prolongamento do plano do primeiro espelho. Este fato mostra que não existem outras imagens, já que essas imagens finais são "reflexos mútuos". A construção das imagens é mostrada no diagrama a seguir. Resumindo, o número de imagens neste caso é $1 + 2 + 2 + 2 = 7$.



(c) Para $\theta = 60°$, temos duas imagens no segundo espelho causadas pelo objeto e sua primeira imagem; a partir dessas imagens, podemos construir duas novas imagens, I e I', atrás do primeiro espelho. As imagens I e I' são "reflexos mútuos" no sentido de que são simétricas em relação ao prolongamento do plano do segundo espelho; isso mostra que não existem novas imagens. Resumindo, o número de imagens neste caso é $1 + 2 + 2 = 5$.

Para $\theta = 120°$, temos duas imagens, I_1' e I_2, atrás do segundo espelho e seu prolongamento, causadas pelo objeto e sua primeira imagem (que vamos chamar de I_1). Nenhuma outra imagem pode ser construída a partir de I_1' e I_2, já que as imagens I_1' e I_2 são "reflexos mútuos". Esta construção tem a desvantagem de não levar em conta a posição do observador em relação aos espelhos. Neste caso em particular, o número de imagens que podem ser vistas varia de 1 a 3, dependendo das posições do objeto e do observador.

(d) O menor número de imagens que podem ser vistas para $\theta = 120°$ é 1. Se, por exemplo, o observador está alinhado com o objeto e I_2, pode ver apenas uma imagem (I_1). Um observador próximo de um dos espelhos em geral consegue ver duas imagens, I_1 e I_2.

(e) O maior número de imagens que podem ser vistas para $\theta = 120°$ é 3. Isso acontece quando o observador está razoavelmente afastado dos dois espelhos e aproximadamente equidistante dos espelhos.

103. PENSE Duas lentes em contato podem ser tratadas como uma única lente com uma distância focal efetiva.

FORMULE Vamos supor que um objeto está a uma grande distância da lente composta e calcular a distância da imagem i. Como a imagem está no ponto focal, $i = f$, em que f é a distância focal efetiva da lente composta. A imagem final é produzida pelas duas lentes, com a imagem da primeira lente servindo de objeto para a segunda. No caso da primeira lente, $(1/p_1) + (1/i_1) = (1/f_1)$, em que f_1 é a distância focal da primeira lente e i_1 é a distância da imagem formada pela primeira lente. Como $p_1 = \infty$, $i_1 = f_1$. No caso da segunda lente, $(1/p_2) + (1/i_2) = (1/f_2)$, em que p_2 é a distância do objeto, i_2 é a distância da imagem e f_2 é a distância focal. Se a espessura das lentes pode ser desprezada, a distância do objeto da segunda lente é $p_2 = -i_1$. O sinal negativo deve ser usado porque a imagem formada pela primeira lente está do outro lado da segunda lente se i_1 for positivo. Isso significa que o objeto da segunda lente é virtual e a distância do objeto é negativa. Se i_1 for negativo, a imagem formada pela primeira lente está do mesmo lado da segunda lente que o objeto da primeira lente, e p_2 é positiva.

ANALISE Na equação das lentes delgadas, substituímos p_2 por $-f_1$ e i_2 por f para obter

$$-\frac{1}{f_1}+\frac{1}{f}=\frac{1}{f_2}$$

o que nos dá

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{f_1}+\frac{1}{f_2}=\frac{f_1+f_2}{f_1 f_2}.$$

Assim, a distância focal efetiva do sistema é

$$f=\frac{f_1 f_2}{f_1+f_2}.$$

APRENDA O recíproco da distância focal, $1/f$, é conhecido como potência da lente, uma grandeza usada pelos oculistas para especificar o poder de aumento dos óculos. De acordo com essa demonstração, quando duas lentes estão em contato, a potência efetiva do conjunto é a soma das potências das duas lentes.

104. (a) No espelho mais próximo do objeto, que vamos chamar de M_1, a primeira imagem I_1 está 10 cm atrás de M_1 e, portanto, a 20 cm de distância do objeto, que vamos chamar de O. Esta é a menor distância entre o objeto e uma imagem.

(b) Existem imagens de O e I_1 no espelho mais distante, que vamos chamar de M_2. A imagem de O é uma imagem I_2 situada 30 cm atrás de M_2. Como O está a 30 cm de distância de M_2, I_2 está a uma distância de 60 cm de O. Esta é a segunda menor distância entre o objeto e uma imagem.

(c) Existe também uma imagem I_3 que é a imagem de I_1 e está situada 50 cm atrás de M_2, já que I_1 está a uma distância 30 cm + 20 cm = 50 cm de M_2. Assim, I_3 está a uma distância de 80 cm de O. Além disso, temos uma imagem I_4, que é uma imagem de I_2 e está situada 70 cm atrás de M_1, já que I_2 está a uma distância 30 cm + 40 cm = 70 cm de M_1. A distância entre O e I_4 também é 80 cm. Esta é a terceira maior distância entre o objeto e uma imagem.

(d) Voltando ao espelho mais próximo M_1, existe uma imagem I_5 que é a imagem de I_3 e está situada 90 cm atrás de M_1, já que I_3 está a uma distância 50 cm + 40 cm = 90 cm de M_1. A distância entre O e I_5 é 100 cm = 1,0 m. Esta é a quarta maior distância entre o objeto e uma imagem.

105. (a) O "objeto" do espelho que produz a imagem da caixa está à mesma distância do espelho que a imagem (4 cm). Como este "objeto" é a imagem formada pela lente, podemos dizer que, na equação da lente, $i_1 = 10 - 4 = 6$ cm. Assim, para $f_1 = 2$ cm, a Eq. 34-9 nos dá

$$\frac{1}{p_1}+\frac{1}{i_1}=\frac{1}{f_1} \quad\Rightarrow\quad p_1 = 3{,}00 \text{ cm}.$$

(b) A imagem da caixa, 4 cm atrás do espelho, serve de "objeto" (com $p_3 = 14$ cm) para a lente no percurso de volta da luz, depois de ser refletida pelo espelho. Desta vez, a Eq. 34-9 nos dá, para $f_3 = f_1 = 2$ cm,

$$\frac{1}{p_3}+\frac{1}{i_3}=\frac{1}{f_3} \quad\Rightarrow\quad i_3 = 2{,}33\ \text{cm}.$$

106. (a) Primeiro, a lente forma uma imagem real do objeto, situada a uma distância

$$i_1 = \left(\frac{1}{f_1}-\frac{1}{p_1}\right)^{-1} = \left(\frac{1}{f_1}-\frac{1}{2f_1}\right)^{-1} = 2f_1$$

à direita da lente, ou a uma distância

$$p_2 = 2(f_1+f_2) - 2f_1 = 2f_2$$

do espelho. A imagem formada pelo espelho está situada a uma distância

$$i_2 = \left(\frac{1}{f_2}-\frac{1}{p_2}\right)^{-1} = \left(\frac{1}{f_2}-\frac{1}{2f_2}\right)^{-1} = 2f_2$$

à esquerda do espelho, ou a uma distância

$$p_1' = 2(f_1+f_2) - 2f_2 = 2f_1$$

à direita da lente. A imagem final formada pela lente está a uma distância i_1' à esquerda da lente, em que

$$i_1' = \left(\frac{1}{f_1}-\frac{1}{p_1'}\right)^{-1} = \left(\frac{1}{f_1}-\frac{1}{2f_1}\right)^{-1} = 2f_1.$$

Esta é exatamente a posição do objeto.

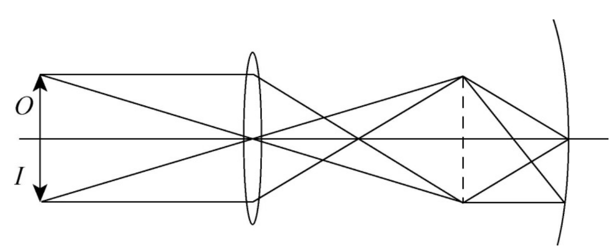
(b) A ampliação lateral é

$$m = \left(-\frac{i_1}{p_1}\right)\left(-\frac{i_2}{p_2}\right)\left(-\frac{i_1'}{p_1'}\right) = \left(-\frac{2f_1}{2f_1}\right)\left(-\frac{2f_2}{2f_2}\right)\left(-\frac{2f_1}{2f_1}\right) = -1{,}0.$$

(c) A imagem final é real (R).

(d) A imagem está à esquerda da lente.

(e) A imagem é invertida, como mostra a figura a seguir.



107. PENSE Podemos determinar se uma lente é convergente ou divergente, com base na ampliação e orientação das imagens produzidas pela lente.

FORMULE Examinando os diagramas de raios da Fig. 34-16*a-c*, vemos que apenas uma lente convergente pode produzir uma imagem ampliada; a imagem produzida por uma lente divergente é sempre reduzida.

ANALISE (a) O fato de que $m > +1$ significa que a lente 1 é convergente (portanto, f_1 é positiva) e que a imagem é virtual (portanto, i_1 é negativa). Como $|p_1 + i_1| = 20$ cm e $i_1 = -2p_1$, a única solução possível é $p_1 = 20$ cm e $i_1 = -40$ cm. Substituindo na Eq. 34-9,

$$\frac{1}{p_1}+\frac{1}{i_1}=\frac{1}{f_1}$$

obtemos

$$f_1=\frac{p_1 i_1}{p_1+i_1}=\frac{(20\text{ cm})(-40\text{ cm})}{20\text{ cm}+(-40\text{ cm})}=+40\text{ cm},$$

que é positiva, como era previsto.

(b) A distância do objeto é $p_1 = 20$ cm, como foi visto no item (a).

(c) Nesse caso, $0 < m < 1$, e sabemos que a lente 2 é divergente (portanto, f_2 é negativa) e que a imagem é virtual (portanto, i_2 é negativa). Como $|p_2 + i_2| = 20$ cm e $i_2 = -p_2/2$, a única solução possível é $p_2 = 40$ cm e $i_2 = -20$ cm. Substituindo na Eq. 34-9, obtemos

$$f_2=\frac{p_2 i_2}{p_2+i_2}=\frac{(40\text{ cm})(-20\text{ cm})}{40\text{ cm}+(-20\text{ cm})}=-40\text{ cm},$$

que é negativa, como era previsto.

(d) A distância do objeto é $p_2 = 40$ cm, como foi visto no item (c).

APRENDA O diagrama de raios da lente 1 é semelhante ao que é mostrado na Fig. 34-16*b*. A lente é convergente. Com a mosca mais próxima da lente que o ponto focal ($p_1 < f_1$), temos uma imagem virtual não invertida, ampliada, do mesmo lado que o objeto. Por outro lado, o diagrama de raios da lente 2 é semelhante ao que aparece na Fig. 34-16*c*. A lente é divergente e forma uma imagem virtual não invertida, reduzida, do mesmo lado que o objeto.

108. Vamos usar a Eq. 34-10, com as convenções de sinais discutidas nos Módulos 34-6 e 34-7.

(a) No caso da lente 1, uma lente biconvexa, temos

$$f=\left[(n-1)\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}\right)\right]^{-1}=\left[(1{,}5-1)\left(\frac{1}{40\text{ cm}}-\frac{1}{-40\text{ cm}}\right)\right]^{-1}=40\text{ cm}.$$

(b) Como $f > 0$, a lente forma uma imagem real do Sol.

(c) No caso da lente 2, uma lente plano-convexa, temos

$$f=\left[(1{,}5-1)\left(\frac{1}{\infty}-\frac{1}{-40\text{ cm}}\right)\right]^{-1}=80\text{ cm}.$$

(d) Como $f > 0$, a lente forma uma imagem real do Sol.

(e) No caso da lente 3, uma lente côncavo-convexa, temos

$$f=\left[(1{,}5-1)\left(\frac{1}{40\text{ cm}}-\frac{1}{60\text{cm}}\right)\right]^{-1}=240\text{ cm}=2{,}4\text{ m}.$$

(f) Como $f > 0$, a lente forma uma imagem real do Sol.

(g) No caso da lente 4, uma lente bicôncava, temos

$$f=\left[(1{,}5-1)\left(\frac{1}{-40\text{ cm}}-\frac{1}{40\text{ cm}}\right)\right]^{-1}=-40\text{ cm}.$$

(h) Como $f < 0$, a imagem é virtual.

(i) No caso da lente 5, uma lente plano-côncava, temos

$$f = \left[(1,5-1)\left(\frac{1}{\infty} - \frac{1}{40\text{ cm}}\right)\right]^{-1} = -80\text{ cm}.$$

(j) Como $f < 0$, a imagem é virtual.

(k) No caso da lente 6, uma lente côncavo-convexa, temos

$$f = \left[(1,5-1)\left(\frac{1}{60\text{ cm}} - \frac{1}{40\text{ cm}}\right)\right]^{-1} = -240\text{ cm} = -2,4\text{ m}.$$

(l) Como $f < 0$, a imagem é virtual.

109. (a) A primeira imagem pode ser obtida usando a Eq. 34-8, com $n_1 = 1$ (um valor aproximado para o índice de refração do ar), $n_2 = 8/5$ e $p = 8$ cm.

$$\frac{1}{p} + \frac{8}{5i} = \frac{1,6-1}{r}.$$

Como, para uma "lente plana", $r = \infty$, temos

$$i = -64/5\text{ cm}.$$

Em relação à segunda superfície, a imagem está a uma distância de 3 + 64/5 = 79/5 cm. Esta imagem pode ser tomada como objeto para determinarmos a imagem final, usando novamente a Eq. 34-8, com $r = \infty$, mas agora com $n_1 = 8/5$, $n_2 = 4/3$ e $p' = 79/5$. Temos

$$\frac{8}{79} + \frac{4}{3i'} = 0,$$

o que nos dá

$$i' = -79/6\text{ m} \approx -13,2\text{ cm}.$$

Isso significa que o observador parece estar a uma distância de 13,2 + 6,8 = 20 cm do peixe.

(b) Neste caso, a primeira imagem é obtida usando a Eq. 34-8, com $n_1 = 4/3$, $n_2 = 8/5$, $p_1 = 6,8$ cm e $r = \infty$, o que nos dá

$$\frac{4}{3(6,8)} + \frac{8}{5i} = 0 \quad \Rightarrow \quad i = -8,16\text{ cm}.$$

Em relação à segunda superfície, esta imagem está a uma distância de 3 + 8,16 = 11,16 cm. Tomando esta imagem como objeto para determinar a imagem final, usamos novamente a Eq. 34-8, desta vez com $n_1 = 8/5$, $n_2 = 1$ e $p = 3,12$ cm e $r = \infty$, o que nos dá

$$\frac{8}{5(11,16)} + \frac{1}{i} = 0 \quad \Rightarrow \quad i = 7,0\text{ cm}.$$

Isso significa que o peixe parece estar a uma distância de 8 + 7 = 15 cm do observador.

110. Fazendo $n_{ar} = 1$, $n_{água} = n$ e $p = |R|/2$ na Eq. 34-8 (e tomando cuidado para usar o sinal correto de r na equação), obtemos $i = -R/(1+n)$, o que nos dá $|i| = R/(1+n)$. Chamando de h o tamanho do peixe e de h' o tamanho da imagem do peixe, e usando a semelhança de triângulos, temos

$$\frac{h'}{R-|i|} = \frac{h}{R/2} \quad \Rightarrow \quad \frac{h'}{h} = 2\left(1-\frac{1}{1+n}\right) = 2\left(1-\frac{1}{2,33}\right) = 1,14.$$

111. (a) As lentes convergentes fazem raios luminosos paralelos convergirem para o ponto focal, e raios provenientes do ponto focal se tornarem paralelos. Para que um sistema de duas lentes se comporte como um expansor de feixe, portanto, basta que o ponto focal posterior F_1 da primeira lente coincida com o ponto focal anterior F_2 da segunda lente. Como os triângulos unidos pelo vértice no ponto focal são semelhantes, as larguras dos dois feixes obedecem à relação $W_f/f_2 = W_i/f_1$. Substituindo os valores dados, obtemos

$$W_f = \frac{f_2}{f_1} W_i = \frac{30{,}0 \text{ cm}}{12{,}5 \text{ cm}} (2{,}5 \text{ mm}) = 6{,}0 \text{ mm}.$$

(b) A área da seção reta dos feixes é proporcional a W^2. Como a intensidade é definida como a potência P dividida pela área, temos

$$\frac{I_f}{I_i} = \frac{P/W_f^2}{P/W_i^2} = \frac{W_i^2}{W_f^2} = \frac{f_1^2}{f_2^2} \Rightarrow I_f = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2 I_i = \left(\frac{12{,}5 \text{ cm}}{30{,}0 \text{ cm}}\right)(9{,}0 \text{ kW/m}^2) = 1{,}6 \text{ kW/m}^2.$$

(c) O método do item (a) pode ser adaptado para o caso em que a primeira lente do expansor de feixe é uma lente divergente; para isso, basta fazer com que o ponto focal anterior da primeira lente coincida com o ponto focal anterior da segunda lente. Neste caso, a distância entre as lentes deve ser

$$d = f_2 - |f_1| = 30{,}0 \text{ cm} - 26{,}0 \text{ cm} = 4{,}0 \text{ cm}.$$

112. Na Fig. 34-56, vamos chamar de A o ponto em que o raio em direção ao olho esquerdo sai da água, e de B o ponto em que o raio em direção ao olho direito sai da água. O ponto da superfície equidistante de A e B será chamado de C. A moeda está no ponto P, verticalmente abaixo de C, a uma distância d, e a imagem da moeda está no ponto V, também verticalmente abaixo de C, mas a uma distância menor d_a. Vamos chamar de θ_1 o ângulo $\angle CPA$ e de θ_2 o ângulo $\angle CVA$. Como os triângulos CPA e CVA são triângulos retângulos, temos

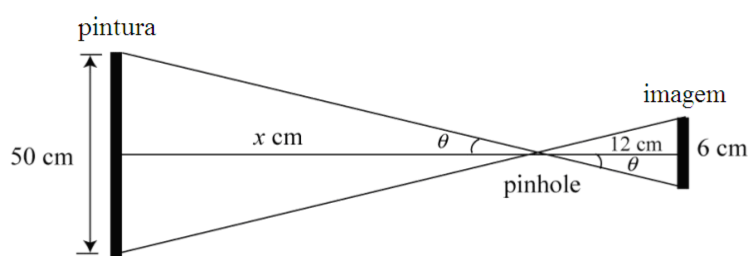
$$\tan\theta_1 = \frac{\overline{CA}}{d} \quad \text{e} \quad \tan\theta_2 = \frac{\overline{CA}}{d_a}.$$

Usando a Eq. 33-40 e a aproximação, válida para pequenos ângulos, de que a razão das tangentes é igual à razão dos senos, obtemos

$$\frac{\tan\theta_2}{\tan\theta_1} \approx \frac{\operatorname{sen}\theta_2}{\operatorname{sen}\theta_1} \Rightarrow \frac{\frac{\overline{CA}}{d_a}}{\frac{\overline{CA}}{d}} \approx \frac{n_1}{n_2} \Rightarrow d_a \approx \frac{n_2}{n_1} d.$$

Como $n_1 = n_{\text{água}} = n$ e $n_2 = n_{\text{ar}} \approx 1$, obtemos a relação desejada, $d_a = d/n$.

113. A figura mostra o arranjo visto de cima.

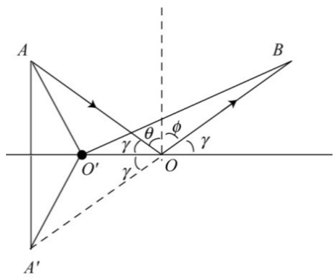


Aplicando as equações da trigonometria ao triângulo maior, obtemos

$$\tan\theta = \frac{25}{x} = \frac{3}{12}$$

o que nos dá $x = 100$ cm.

114. Considere o diagrama de raios que se segue.



Como $\theta + \gamma = \phi + \gamma = \pi/2$, vemos que $\theta = \phi$, ou seja, que o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão. Para mostrar que AOB é a distância mínima, considere um raio incidente AO' com um raio refletido $O'B$, tais que o ângulo de incidência não é igual ao ângulo de reflexão. De acordo com a figura,

$$AO'B = AO' + O'B = A'O' + O'B > A'B = A'O + OB = AO + OB = AOB.$$

A desigualdade vem do fato de que a soma dos comprimentos de dois lados de um triângulo é sempre maior que o comprimento do terceiro lado.

115. Observe a Fig. 34-2 do livro. Considere dois raios de luz, r e r', que estão acima e abaixo do raio normal (o raio que refaz o percurso ao ser refletido). Os dois raios têm um ângulo de incidência igual a θ. Suponha que os dois raios atingem a extremidade superior e a extremidade inferior da pupila depois de serem refletidos. Se o raio r atinge o espelho no ponto A e o raio r' atinge o espelho no ponto B, a distância x entre A e B é dada por

$$x = 2d_o \tan\theta$$

em que d_o é a distância do espelho ao objeto. Podemos construir um triângulo retângulo tomando como um dos vértices a imagem do objeto (o ponto I da Fig. 34-2, situado a uma distância d_o atrás do espelho). Um cateto do triângulo coincide com o raio normal (que liga o ponto I ao centro da pupila), e a hipotenusa coincide com o raio r (depois de refletido). A distância entre a pupila e o ponto I é $d_{\text{olho}} + d_o$, e o menor ângulo do triângulo é θ. Assim,

$$\tan\theta = \frac{R}{d_{\text{olho}} + d_o}$$

em que R é o raio da pupila (2,5 mm). Combinando essas relações, obtemos

$$x = 2d_o \frac{R}{d_{\text{olho}} + d_o} = 2(100\text{ mm})\frac{2{,}5\text{ mm}}{300\text{ mm} + 100\text{ mm}} = 1{,}67\text{ mm}.$$

Podemos dizer que x é o diâmetro de uma área circular A do espelho tal que todos os raios refletidos em pontos dessa área chegam ao olho. Assim,

$$A = \pi\left(\frac{x}{2}\right)^2 = \frac{\pi}{4}(1{,}67\text{ mm})^2 = 2{,}2\text{ mm}^2.$$

116. No caso de um objeto diante de uma lente delgada, a distância do objeto p, a distância da imagem i e a distância focal f estão relacionadas pela equação $(1/p) + (1/i) = (1/f)$. Na situação descrita no enunciado do problema, as três grandezas são positivas, de modo que a distância x entre o objeto e a imagem é $x = p + i$. Fazendo $i = x - p$ na equação das lentes delgadas e explicitando x, obtemos

$$x = \frac{p^2}{p - f}.$$

Para determinar o valor mínimo de x, derivamos x em relação a p e igualamos o resultado a zero. Como

$$\frac{dx}{dp}=\frac{p(p-2f)}{(p-f)^2},$$

o resultado é $p = 2f$. A distância mínima é

$$x_{\text{mín}}=\frac{p^2}{p-f}=\frac{(2f)^2}{2f-f}=4f.$$

Sabemos que se trata de um mínimo, e não de um máximo, porque a distância da imagem i aumenta sem limite quando o objeto se aproxima do ponto focal.

117. (a) Se a distância do objeto é x, a distância da imagem é $D - x$, e a equação das lentes delgadas se torna

$$\frac{1}{x}+\frac{1}{D-x}=\frac{1}{f}.$$

Multiplicando todos os termos da equação por $fx(D - x)$, obtemos a equação $x^2 - Dx + Df = 0$, cujas raízes são

$$x_1=\frac{D-\sqrt{D(D-4f)}}{2} \quad \text{e} \quad x_2=\frac{D+\sqrt{D(D-4f)}}{2}.$$

A distância entre as duas posições do objeto é

$$d=x_2-x_1=\sqrt{D(D-4f)}.$$

(b) A razão dos tamanhos das imagens é igual à razão das ampliações laterais. Quando o objeto está no ponto $p = x_1$, o valor absoluto da ampliação lateral é

$$|m_1|=\frac{i_1}{p_1}=\frac{D-x_1}{x_1}.$$

Como $x_1 = (D - d)/2$, em que $d-\sqrt{D(D-f)}$, temos

$$|m_1|=\frac{D-(D-d)/2}{(D-d)/2}=\frac{D+d}{D-d}.$$

Quando o objeto está no ponto $p = x_2$, o valor absoluto da ampliação lateral é

$$|m_2|=\frac{I_2}{p_2}=\frac{D-x_2}{x_2}=\frac{D-(D+d)/2}{(D+d)/2}=\frac{D-d}{D+d}.$$

A razão dos tamanhos das imagens é, portanto,

$$\frac{m_2}{m_1}=\frac{(D-d)/(D+d)}{(D+d)/(D-d)}=\left(\frac{D-d}{D+d}\right)^2.$$

118. (a) O primeiro passo para resolver o problema é determinar a posição da imagem formada pela primeira lente. Para $p_1 = 10$ cm e $f_1 = -15$ cm, a Eq. 34-9 nos dá

$$\frac{1}{p_1}+\frac{1}{i_1}=\frac{1}{f_1} \quad \Rightarrow \quad i_1=-6{,}0\,\text{cm}.$$

A ampliação lateral correspondente é $m_1 = -i_1/p_1 = 0{,}60$. Essa imagem se comporta como objeto para a segunda lente, com $p_2 = 12 + 6{,}0 = 18$ cm, e $f_2 = 12$ cm. Usando novamente a Eq. 34-9, obtemos

$$\frac{1}{p_2}+\frac{1}{i_2}=\frac{1}{f_2} \quad \Rightarrow \quad i_2=36\ \text{cm}.$$

(b) A ampliação lateral correspondente é $m_2 = -i_2/p_2 = -2{,}0$, o que nos dá uma ampliação lateral total $m = m_1m_2 = -1{,}2$. A altura da imagem final é, portanto, em valor absoluto, (1,2)(1,0 cm) = 1,2 cm.

(c) O fato de que i_2 é positiva significa que a imagem final é real.

(d) O fato de que m é negativa significa que a imagem final é invertida.

119. (a) Na ausência da lente divergente (lente 2), a imagem real formada pela lente convergente (lente 1) estaria a uma distância

$$i_1 = \left(\frac{1}{f_1} - \frac{1}{p_1}\right)^{-1} = \left(\frac{1}{20\text{ cm}} - \frac{1}{40\text{ cm}}\right)^{-1} = 40\text{ cm}$$

à direita da lente 1. Essa imagem se comporta como um objeto para a lente 2, com $p_2 = -(40\text{ cm} - 10\text{ cm}) = -30$ cm. Assim,

$$i_2 = \left(\frac{1}{f_2} - \frac{1}{p_2}\right)^{-1} = \left(\frac{1}{-15\text{ cm}} - \frac{1}{-30\text{ cm}}\right)^{-1} = -30\text{ cm}.$$

Isso significa que a imagem formada pela lente 2 está 30 cm à esquerda da lente 2.

(b) A ampliação lateral é $m = (-i_1/p_1)(-i_2/p_2) = +1{,}0 > 0$. Como m é positiva, a imagem é não invertida.

(c) Como i_2 é negativa, a imagem é virtual.

(d) Como foi visto no item (b), a ampliação lateral é +1,0, o que significa que a imagem é do mesmo tamanho que o objeto.

120. (a) A distância da imagem formada pela primeira lente é

$$i_1 = \left(\frac{1}{f_1} - \frac{1}{p_1}\right)^{-1} = \left(\frac{1}{10\text{ cm}} - \frac{1}{20\text{ cm}}\right)^{-1} = 20\text{ cm}.$$

Essa imagem se comporta como um objeto para a lente 2, com p_2 = 30 cm – 20 cm = 10 cm. Assim,

$$i_2 = \left(\frac{1}{f_2} - \frac{1}{p_2}\right)^{-1} = \left(\frac{1}{12{,}5\text{ cm}} - \frac{1}{10\text{ cm}}\right)^{-1} = -50\text{ cm}.$$

Assim, a imagem final está 50 cm à esquerda da segunda lente, o que significa que está na mesma posição que o objeto.

(b) A ampliação lateral é

$$m = \left(\frac{i_1}{p_1}\right)\left(\frac{i_2}{p_2}\right) = \left(\frac{20\text{ cm}}{20\text{ cm}}\right)\left(\frac{-50\text{ cm}}{10\text{ cm}}\right) = -5{,}0,$$

o que significa que a imagem final é cinco vezes maior que o objeto.

(c) Como i_2 é negativa, a imagem é virtual.

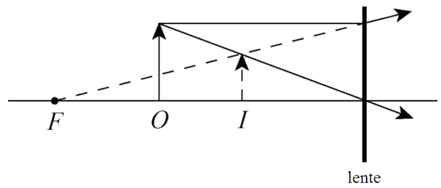
(d) Como m é negativa, a imagem é invertida.

121. (a) A distância da imagem i pode ser calculada usando a Eq. 34-9: $i = pf/(p - f)$. A distância do objeto é p = 20 cm. Como a lente é divergente, a distância focal é negativa: f = –30 cm. Assim,

$$i = \frac{(20\text{ cm})(-30\text{ cm})}{(20\text{ cm}) - (-30\text{ cm})} = -12\text{ cm}.$$

O sinal negativo indica que a imagem é virtual e está do mesmo lado da lente que o objeto.

(b) A figura a seguir mostra o diagrama de raios, desenhado em escala.



122. (a) A imagem formada pela lente convergente está a uma distância

$$i = \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{p}\right)^{-1} = \left(\frac{1}{0{,}50\,\text{m}} - \frac{1}{1.0\,\text{m}}\right)^{-1} = 1{,}0\,\text{m}$$

à direita da lente, ou seja, a uma distância de 2,0 m – 1,0 m = 1,0 m à esquerda do espelho. A imagem formada pelo espelho dessa imagem real está 1,0 m à direita do espelho, ou seja, a uma distância de 2,0 m + 1,0 m = 3,0 m à direita da lente. Essa imagem se comporta como um objeto para a lente, que forma outra imagem a uma distância

$$i' = \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{p'}\right)^{-1} = \left(\frac{1}{0{,}50\text{m}} - \frac{1}{3{,}0\text{m}}\right)^{-1} = 0{,}60\text{m}$$

à esquerda da lente (ou seja, a 0,40 m do cone e a 2,60 cm do espelho).

(b) A ampliação lateral é

$$m = \left(-\frac{i}{p}\right)\left(-\frac{i'}{p'}\right) = \left(-\frac{1{,}0\,\text{m}}{1{,}0\,\text{m}}\right)\left(-\frac{0{,}60\,\text{m}}{3{,}0\,\text{m}}\right) = +0{,}20.$$

(c) Como i' é positiva, a imagem final é real.

(d) A imagem está à esquerda da lente.

(e) Como m é positiva, a imagem é não invertida.

123. A situação descrita no enunciado do problema é semelhante à situação das Figs. 34-12*b* e 34-12*d*.

(a) De acordo com a Eq. 34-8, com $n_1 = 1$ para o ar e $n_2 = 1{,}5$ para o vidro, temos

$$\frac{1}{p} + \frac{1{,}5}{i} = \frac{1{,}5-1}{r}.$$

Utilizando a convenção para o sinal de r discutida no texto que se segue à Eq. 34-8, $r = +6{,}0$ cm, o que nos dá $i = -90$ cm para $p =$ 10 cm. Assim, a distância entre o objeto e a imagem é 80 cm.

(b) A distância da imagem i é negativa e aumenta em valor absoluto quando p aumenta a partir de valores muito pequenos. Quando p se aproxima de um valor crítico p_0, $i \to -\infty$. Como, quando $i \to -\infty$, $1{,}5/i \to 0$, a equação anterior se torna

$$\frac{1}{p_0} = \frac{1{,}5-1}{r} \quad \Rightarrow \quad p_0 = 2r.$$

Assim, o intervalo de distâncias do objeto no qual são produzidas imagens virtuais é $0 < p \le 12$ cm.

124. (a) Suponha que uma extremidade do objeto está a uma distância p do espelho e a outra extremidade está a uma distância $p + L$. A distância da imagem i_1 da primeira extremidade é dada por

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{i_1} = \frac{1}{f}$$

em que f é a distância focal do espelho. Assim, $i_1 = fp/(p - f)$.

A distância da imagem i_2 da outra extremidade é dada por

$$i_2 = \frac{f(p+L)}{p+L-f},$$

e, portanto, o comprimento da imagem é

$$L' = i_1 - i_2 = \frac{fp}{p-f} - \frac{f(p+L)}{p+L-f} = \frac{f^2 L}{(p-f)(p+L-f)}.$$

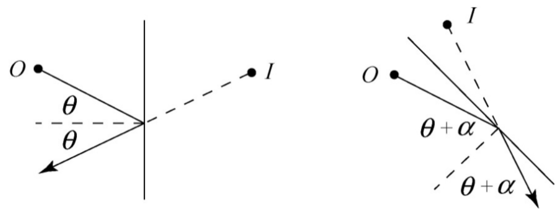
Como o objeto é curto em comparação com $p - f$, podemos desprezar L no denominador, o que nos dá

$$L' = L\left(\frac{f}{p-f}\right)^2.$$

(b) A ampliação lateral é dada por $m = -i/p$; entretanto, como $i = fp/(p - f)$, ela também pode ser escrita na forma $m = -f/(p - f)$. A ampliação longitudinal é

$$m' = \frac{L'}{L} = \left(\frac{f}{p-f}\right)^2 = m^2.$$

125. Na figura da esquerda, um raio de luz incide no espelho fazendo um ângulo θ com a normal. Como o ângulo de reflexão também é θ, o raio refletido faz um ângulo 2θ com o raio incidente.



Na figura da direita, o espelho sofreu uma rotação de um ângulo α, que fez com que o ângulo de incidência aumentasse para $\theta + \alpha$; o raio refletido passou a fazer um ângulo $2(\theta + \alpha)$ com o raio incidente, o que significa que o raio refletido sofreu uma rotação de 2α. Se o espelho sofrer uma rotação de um ângulo α no sentido oposto, o ângulo de incidência passará a ser $\theta - \alpha$, e o raio refletido passará a fazer um ângulo $2(\theta - \alpha)$ com o raio incidente. Isso significa que, mais uma vez, o raio refletido sofreu uma rotação de 2α, só que no sentido oposto. No caso de $\alpha = 45^o$, se o raio do objeto ao espelho é o mesmo nos dois casos, a diferença entre os raios refletidos é de 90^o.

126. O fato de que a imagem é invertida significa que $m < 0$. Assim, $m = -1/2$, o que, de acordo com a Eq. 34-6, nos dá $i = p/2$, que podemos combinar com a Eq. 34-4:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{p} + \frac{2}{p} = \frac{1}{f}$$

o que nos dá

$$\frac{3}{30{,}0 \text{ cm}} = \frac{1}{f}.$$

Assim, $f = (30{,}0 \text{ cm})/3 = 10{,}0$ cm. O fato de que $f > 0$ significa que o espelho é côncavo.

127. De acordo com a Eq. 34-3, a distância focal do espelho é $f = r/2 = 12{,}0$ cm.

(a) Se $m = +3$, a Eq. 34-6 nos dá $i = -3p$. Substituindo na Eq. 34-4, obtemos

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{-3p} = \frac{1}{12 \text{ cm}}$$

e, portanto,

$$\frac{2}{3p} = \frac{1}{12\text{ cm}}.$$

Assim, $p = 2(12\text{ cm})/3 = 8{,}0\text{ cm}$.

(b) Se $m = -3$, $i = +3p$. Substituindo na Eq. 34-4, obtemos

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{3p} = \frac{1}{12}$$

e, portanto,

$$\frac{4}{3p} = \frac{1}{12\text{ cm}}.$$

Assim, $p = 4(12\text{ cm})/3 = 16\text{ cm}$.

(c) Se $m = -1/3$, $i = +p/3$. Substituindo na Eq. 34-4, obtemos

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{p} + \frac{3}{p} = \frac{1}{12\text{ cm}}$$

e, portanto,

$$\frac{4}{p} = \frac{1}{12\text{ cm}}.$$

Assim, $p = 4(12\text{ cm}) = 48\text{ cm}$.

128. Como a ampliação lateral é positiva e menor que 1, concluímos que se trata de uma lente divergente; portanto, $f = -40$ cm. Considerando a Eq. 46-8, $i = -pm = -0{,}3p = -3p/10$. Substituindo na Eq. 34-9, obtemos

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{p} - \frac{10}{3p} = -\frac{1}{40\text{ cm}},$$

o que nos dá $p = 93{,}3$ cm, $i = -28{,}0$ cm e $|\,i\,| = 28{,}0$ cm.

129. (a) Vamos mostrar com detalhes o cálculo para $\alpha = 0{,}500$ rad, $r = 12$ cm e $p = 20$ cm. A unidade de comprimento adotada implicitamente é o centímetro.

Distância do objeto ao ponto x:

$$d = p - r + x = 8 + x$$
$$y = d\tan\alpha = 4{,}3704 + 0{,}54630x.$$

Resolvendo a equação $x^2 + y^2 = r^2$, obtemos $x = 8{,}1398$.

$$\beta = \tan^{-1}(y/x) = 0{,}8253\text{ rad}$$

$$\gamma = 2\beta - \alpha = 1{,}151\text{ rad.}$$

Resolvendo a equação $\tan(\gamma) = y/(x + i - r)$, obtemos $i = 7{,}799$.

Os outros resultados são mostrados sem os passos intermediários:

Para $\alpha = 0{,}100$ rad, obtemos $i = 8{,}544$ cm; para $\alpha = 0{,}0100$ rad, obtemos $i = 8{,}571$ cm. De acordo com as Eqs. 34-3 e 34-4, $i = 8{,}571$ cm.

(b) Nesse caso, os resultados são os seguintes: ($\alpha = 0{,}500$ rad, $i = -13{,}56$ cm), ($\alpha = 0{,}100$ rad, $i = -12{,}05$ cm), ($\alpha = 0{,}0100$ rad, $i = -12{,}00$ cm). De acordo com as Eqs. 34-3 e 34-4, $i = -12{,}00$ cm.

130. (a) Como $m = +0{,}250$, $i = -0{,}25p$, o que indica que a imagem é virtual (além de ser reduzida). Concluímos que o espelho é convexo e que f é negativo; consequentemente, $f = -2{,}00$ cm. Fazendo $i = -0{,}25p = -p/4$ na Eq. 34-4, obtemos

$$\frac{1}{p}-\frac{4}{p}=-\frac{3}{p}=\frac{1}{f}.$$

Assim, $p = 6{,}00$ cm, $i = -1{,}50$ cm e $|i| = 1{,}50$ cm.

(b) A distância focal é negativa.

(c) Como foi visto no item (a), a imagem é virtual.

131. Em primeiro lugar, podemos notar que o índice de refração é $n = 1{,}46/1{,}33 = 1{,}1$ *em relação à água* (escolhemos essa abordagem para podermos usar diretamente os resultados do Problema 34-112). Para um observador na água, diretamente acima da camada de tetracloreto de carbono, a profundidade aparente da moeda a partir da superfície da camada de tetracloreto de carbono é 40 mm/1,1 = 36,4 mm. Essa "moeda aparente" se comporta como um "objeto" para os raios que se propagam para cima atravessando a camada de 20 mm de água, de modo que a distância aparente entre a superfície da água e a moeda é 20 mm + 36,4 mm = 56,4 mm. Usando novamente o resultado do Problema 34-112, concluímos que, para um observador do lado de fora do tanque, olhando verticalmente para baixo, a profundidade aparente da moeda é 56,4 mm/1,33 = 42 mm abaixo da superfície da água.

132. Como a esfera se comporta como um espelho convexo, a distância focal é negativa. De acordo com a Eq. 34-3, a distância focal é $f = -r/2 = -d/4$, em que d é o diâmetro da esfera. Vamos supor que os raios luminosos estão suficientemente próximos do eixo central para que a Eq. 34-4 possa ser aplicada.

(a) Para $p = 1{,}0$ m, a equação $1/p + 1/i = 1/f$ nos dá $i = -0{,}15$ m, o que significa que a imagem parece estar *no interior* da esfera, a 0,15 m de distância da superfície.

(b) A ampliação lateral é $m = -i/p$, o que nos dá $m = 0{,}15$. Assim, a altura da imagem é (0,15)(2,0 m) = 0,30 m.

(c) O fato de que m é positivo significa que a imagem é não invertida (NI).

133. (a) Como, nesse caso, $i < 0$, então $i = -|i|$ e a Eq. 34-9 se torna $1/f = 1/p - 1/|i|$. Derivando essa expressão em relação ao tempo, obtemos

$$\frac{1}{p^2}\frac{dp}{dt}=\frac{1}{|i|^2}\frac{d|i|}{dt}.$$

Quando o objeto se aproxima da lente, p diminui, de modo que $dp/dt < 0$. De acordo com a expressão anterior, isso significa que $d|i|/dt < 0$, ou seja, a imagem também se aproxima da lente. Com isso, naturalmente, o ângulo θ' ocupado pela imagem aumenta e, portanto, a ampliação angular $m_\theta = \theta'/\theta$ também aumenta.

(b) Quando m_θ atingir o maior valor que permite observar uma imagem nítida, a imagem estará no ponto próximo ($|i| = P_p$). O valor de referência para o ponto próximo é $P_p = 25$ cm.

(c) Para $|i| = P_p$, temos

$$p=\frac{if}{i-f}=\frac{|i|\,f}{|i|+f}=\frac{P_n f}{P_n+f}.$$

Para pequenos ângulos, $\theta' \approx h'/|i|$ e $\theta \approx h/P_p$, o que nos dá

$$m_\theta \approx \frac{h'}{h}\cdot\frac{P_p}{|i|}$$

e, portanto,

$$m_\theta \approx \frac{h'}{h}\cdot\frac{P_p}{|i|}=\frac{|i|}{p}\cdot\frac{P_p}{|i|}=\frac{P_p}{p}=\frac{P_p}{fP_p/(f+P_p)}=\frac{f+P_p}{f}=1+\frac{P_p}{f}=1+\frac{25\,\text{cm}}{f}.$$

(d) Com base no item anterior, $m_\theta \approx (h'/h)(|i|/P_p)$. Como $h'/h = m$ e $|i| = P_p$, $m_\theta \approx m$.

134. (a) A discussão do telescópio refrator apresentada no livro pode ser aplicada ao telescópio refletor proposto por Newton (veja a Fig. 34-59) se substituirmos a lente objetiva da Fig. 34-21 por um espelho objetivo, com a luz incidindo da direita. Newton também incluiu no projeto o espelho M', que coloca o observador e a lente objetiva fora do caminho da luz incidente. A beleza da ideia de definir lentes e espelhos em termos da distância focal é que, com isso, fica fácil, em casos como esse, aplicar os resultados obtidos para um telescópio refrator à análise de um telescópio refletor simplesmente substituindo uma lente por um espelho com a mesma distância focal. Assim, a lente convergente que serve de objetiva na Fig. 34-21 deve ser substituída (como fez Newton no telescópio mostrado na Fig. 34-59) por um espelho côncavo. Com isso, a discussão no livro que leva à Eq. 34-15 leva a uma conclusão idêntica para o telescópio de Newton: $m_\theta = -f_{ob}/f_{oc}$.

(b) Uma régua de um metro (perpendicular à linha de visada) a uma distância de 2000 m subtende um ângulo de

$$\theta_{\text{régua}} \approx \frac{1\text{ m}}{2000\text{ m}} = 0{,}0005\text{ rad}.$$

Multiplicando esse valor pela distância focal do espelho, vamos obter um valor de (16,8 m) (0,0005) = 8,4 mm para o tamanho da imagem.

(c) Para $r = 10$ m, a Eq. 34-3 nos dá $f_{ob} = 5$ m. Substituindo esse resultado no valor absoluto da Eq. 34-15, obtemos $f_{oc} = 5/200 = 2{,}5$ cm.

135. (a) Fazendo $p \to \infty$ na Eq. 34-8, obtemos $i = n_2 r/(n_2 - n_1)$. Fazendo $n_1 = 1$ (para o ar) e supondo que $1 < n_2 < 2$, chegamos à conclusão de que $i > 2r$ (a imagem se forma antes que os raios cheguem ao lado oposto da esfera). Podemos considerar essa imagem como um objeto virtual para uma segunda refração, na qual a distância do objeto é

$$2r - i = (n-2)\,r/(n-1),$$

em que simplificamos a notação fazendo $n_2 = n$. Substituindo p por esse valor na Eq. 34-8 e tomando cuidado com a convenção de sinal para r na equação, chegamos à distância da imagem final: $i' = (0{,}5)(2-n)r/(n-1)$.

(b) A imagem está à direita do lado direito da esfera.

136. Vamos definir um sistema de coordenadas xyz no qual os planos xy, yz e xz coincidem com três espelhos. Suponha que um raio luminoso A incida no espelho do plano xy. Se o vetor unitário que define a orientação de A é fornecido por $\cos(\alpha)\hat{\text{i}} + \cos(\beta)\hat{\text{j}} + \cos(\gamma)\hat{\text{k}}$, em que α, β e γ são os ângulos que o raio A faz com os eixos coordenados, depois que o raio A for refletido no espelho do plano xy, o vetor unitário se tornará $\cos(\alpha)\hat{\text{i}} + \cos(\beta)\hat{\text{j}} - \cos(\gamma)\hat{\text{k}}$ (uma forma de explicar essa mudança é pensar que a reflexão fez o ângulo γ mudar para $\pi - \gamma$). Suponha que, em seguida, o raio incida no espelho do plano xz. Nesse caso, o vetor unitário do raio refletido será $\cos(\alpha)\hat{\text{i}} - \cos(\beta)\hat{\text{j}} - \cos(\gamma)\hat{\text{k}}$. Finalmente, se o raio incidir no espelho do plano yz, o vetor unitário do raio refletido será $-\cos(\alpha)\hat{\text{i}} - \cos(\beta)\hat{\text{j}} - \cos(\gamma)\hat{\text{k}}$, ou seja, um vetor com a mesma direção que o raio A original e o sentido oposto.

137. Como $m = -2$ e $p = 4{,}00$ cm, $i = 8{,}00$ cm. Substituindo p e i por seus valores na Eq. 34-9, $1/p + 1/i = 1/f$, obtemos $f = 2{,}67$ cm.

138. (a) Como $m = +0{,}200$, temos $i = -0{,}2p$, o que mostra que a imagem é virtual e menor que o objeto. Concluímos que o espelho é convexo e que $f = -40{,}0$ cm.

(b) Fazendo $i = -0{,}2p = -p/5$ na Eq. 34-4, obtemos

$$\frac{1}{p} - \frac{5}{p} = -\frac{4}{p} = \frac{1}{f},$$

o que nos dá $p = -4f = -4(-40{,}0\text{ cm}) = 160$ cm.

139. (a) O primeiro passo é determinar a posição da imagem produzida pela primeira lente. Para $p_1 = 3{,}00$ cm e $f_1 = +4{,}00$ cm, a Eq. 34-9 nos dá

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{i_1} = \frac{1}{f_1} \quad \Rightarrow \quad i_1 = \frac{f_1 p_1}{p_1 - f_1} = \frac{(4{,}00\text{ cm})(3{,}00\text{ cm})}{3{,}00\text{ cm} - 4{,}00\text{ cm}} = -12{,}0\text{ cm}.$$

A ampliação lateral correspondente é $m_1 = -i_1/p_1 = 4$. Essa imagem se comporta como um objeto para a segunda lente, com $p_2 = 8{,}00 + 12{,}0 = 20{,}0$ cm, e $f_2 = -4{,}00$ cm. Usando novamente a Eq. 34-9, obtemos

$$\frac{1}{p_2} + \frac{1}{i_2} = \frac{1}{f_2} \quad \Rightarrow \quad i_2 = \frac{f_2 p_2}{p_2 - f_2} = \frac{(-4{,}00\text{ cm})(20{,}0\text{ cm})}{20{,}0\text{ cm} - (-4{,}00\text{ cm})} = -3{,}33\text{ cm},$$

ou $|i_2| = 3{,}33$ cm.

(b) O fato de que i_2 é negativa significa que a imagem final é virtual (e, portanto, está à esquerda da segunda lente).

(c) Como foi visto no item anterior, a imagem é virtual.

(d) Como $m_2 = -i_2/p_2 = 1/6$, a ampliação lateral total é $m = m_1 m_2 = 2/3 > 0$. O fato de que m é positiva significa que a imagem é não invertida.

140. O ponto distante da pessoa é 50 cm = 0,50 m. Vamos supor que a lente corretora permita que a imagem de um objeto no infinito se forme no ponto distante. Para isso, devemos ter

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{p}+\frac{1}{i}=\frac{1}{\infty}+\frac{1}{-0{,}50\text{ m}}=\frac{1}{-0{,}50\text{ m}}$$

e, portanto, a distância focal da lente deve ser $f = -0{,}50$ m.

(b) Como $f < 0$, a lente deve ser divergente.

(c) O poder da lente é $P=\dfrac{1}{f}=\dfrac{1}{-0{,}50\text{ m}}=-2{,}0$ dioptrias.

141. (a) Sem a lente de aumento, $\theta = h/P_p$. Com a lente de aumento, fazendo $i = -P_p$, obtemos

$$\frac{1}{p}=\frac{1}{f}-\frac{1}{i}=\frac{1}{f}+\frac{1}{|i|}=\frac{1}{f}+\frac{1}{P_p}.$$

Assim,

$$m_\theta=\frac{\theta'}{\theta}=\frac{h/p}{h/P_p}=\frac{1/f+1/P_p}{1/P_p}=1+\frac{P_p}{f}=1+\frac{25\text{ cm}}{f}.$$

(b) Nesse caso, $i = -\infty$ e, portanto, $1/p = 1/f - 1/i = 1/f$, e

$$m_\theta=\frac{\theta'}{\theta}=\frac{h/p}{h/P_p}=\frac{1/f}{1/P_p}=\frac{P_p}{f}=\frac{25\text{ cm}}{f}.$$

(c) Para $f = 10$ cm, $m_\theta = 1 + (25\text{ cm})/(10\text{ cm}) = 3{,}5$.

(d) Para $f = 10$ cm, $m_\theta = (25\text{ cm})/(10\text{ cm}) = 2{,}5$.