

Modelos de componentes óticos em resina

(Resin models for optical components)

J. H. Vuolo e C. H. Furukawa

Instituto de Física, Universidade de São Paulo

Caixa Postal 66 318, CEP 05315-970, São Paulo, SP Brasil

Recebido em 2 de Junho, 1998

Neste artigo, descrevemos métodos simples para elaborar modelos de resina para componentes óticos, tais como prismas, lentes, cilindros, cubos, placas, cones e outros sólidos. Os modelos são feitos de resina de poliéster transparente ou colorida, que permitem visualizar as trajetórias internas de um feixe de diodo-laser. Os modelos permitem diversas demonstrações tais como refração, reflexão interna, reflexão total, frustração da reflexão total, dispersão da luz, espalhamento de Rayleigh e outras.

We describe simple methods for manufacturing models of optical components, such as prisms, lens, cylinders, cubes, cones, plates and other solids. The models are constructed with transparent or dyed polyester resin and it is possible to visualize the internal optical paths of a laser diode beam. The models can be used to perform several demonstrations such as refraction, internal reflection, total reflection, frustration of the internal reflection, dispersion, Rayleigh scattering and other experiments.

I Introdução

Dispositivos óticos estão cada dia mais presentes na vida moderna. Muitos dispositivos óticos vêm sendo desenvolvidos para novas aplicações ou para substituir dispositivos tradicionais mecânicos, elétricos ou eletromecânicos. Por isso, o ensino de ótica tende a ocupar uma posição de maior destaque na formação de estudantes.

Modelos de componentes óticos são bastante úteis para demonstrações didáticas, tais como as mostradas em fotografias nas Referências 1 e 2, por exemplo. Entretanto, tais demonstrações exigiam fonte de luz com feixe muito bem colimado ou laser de He-Ne, ambos de custo relativamente alto e manuseio difícil porque não são muito portáteis. Atualmente, na medida em que os diodos-laser (“laser pointers”) se tornam bastante acessíveis, tais modelos adquirem um novo interesse.

Neste artigo, descrevemos métodos simples e de baixo custo para a construir modelos de componentes óticos, tais como prismas, lentes, cilindros, cubos, placas de faces paralelas, cones e outros. Os modelos são feitos de resina de poliéster, transparente ou colorida, e permitem visualizar as trajetórias luminosas dentro dos modelos. Com diodo-laser e modelos de baixo cus-

to, várias demonstrações e experiências podem ser realizadas facilmente em salas de aula e se tornam acessíveis para escolas de poucos recursos e também para professores e estudantes, individualmente.

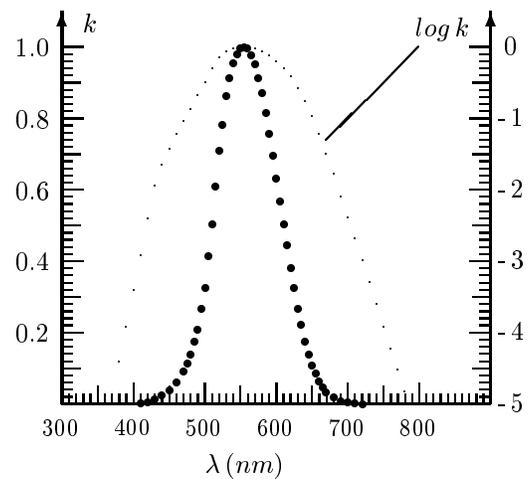


Figura 1. Eficiência do olho humano (CIE).

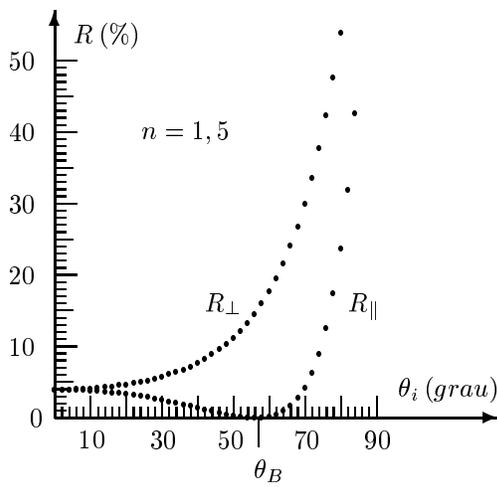


Figura 2. Coeficientes de reflexão.

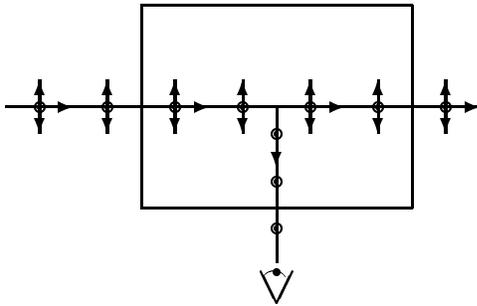


Figura 3. Espalhamento de Rayleigh a 90°.

II Diodo-laser

Os diodo-lasers para infravermelho [1] são conhecidos e utilizados a mais de 30 anos. O diodo-laser visível [3] é mais recente e se tornou acessível apenas nos últimos 10 anos. Existem diodos-laser com diferentes cores e potências, com custos também muito diferentes. No que segue, consideramos apenas o diodo-laser vermelho comum, com potência ótica de feixe até cerca de 5 mW, vendido comercialmente como “laser pointer”. Nesta Seção, apresentamos duas observações sobre o diodo-laser, relevantes para demonstrações didáticas.

II.1 Luminosidade do laser

O comprimento de onda (λ) do diodo-laser comum se situa entre 640 e 670 nm, na extremidade da curva de sensibilidade do olho humano. Nesta região espectral, a sensibilidade é baixa e diminui dramaticamente de 640 para 670 nm.

A Figura 1 mostra a curva padrão do CIE (Commission Internationale d’Éclairage) para a eficiência luminosa do olho [3,4,5]. Para 670 e 640 nm, os valores da eficiência luminosa são 0,032 e 0,175, respectivamente. Multiplicando por 683 lúmen/watt

(fator convencional da definição do lúmen), obtém-se a eficácia luminosa dos feixes de 670 e 640 nm: $\approx 22 \text{ lm/W}$ e $\approx 120 \text{ lm/W}$, respectivamente. Estes resultados mostram que uma pequena diminuição de 30 nm no comprimento de onda resulta em aumento de um fator 6 na sensação visual de “intensidade da luz”. Portanto, ao adquirir um diodo-laser para demonstrações, deve-se preferir o de comprimento de onda mais curto possível. Se não existir especificação, deve-se escolher o laser que pareça mais “forte” e mais alaranjado. Atualmente, alguns fabricantes especificam o comprimento de onda, mesmo para diodo-laser comum.

II.2 Polarização do laser

Um outro aspecto relevante é que a luz do diodo-laser é essencialmente polarizada numa dada direção. A intensidade na polarização ortogonal da ordem de grandeza de 1%, em geral.

A Figura 2 mostra os coeficientes de reflexão da luz para as polarizações paralela e perpendicular ao plano de incidência (R_{\parallel} e R_{\perp} , respectivamente), para índice de refração $n = 1,5$. O coeficiente R_{\parallel} é baixo, no geral, e se anula para incidência em ângulo de Brewster [1,2], como mostrado na Figura 8. Assim, o feixe refletido tem intensidade baixa para ângulos de incidência próximos do ângulo de Brewster ($\theta_B \sim 56^\circ$), se a polarização do laser é paralela ao plano de incidência. Portanto, para observar feixes refletidos, deve-se girar o laser em torno de seu próprio eixo para encontrar a direção mais favorável.

Para visualização do feixe transmitido num meio, uma fração da luz deve ser espalhada transversalmente. No caso de resina sem bolhas e sem pigmentos grandes, o espalhamento é do tipo Rayleigh [1,6], que é o espalhamento que ocorre nas moléculas da atmosfera terrestre e torna o céu azul. Este espalhamento ocorre quando os centros espalhadores são da ordem de grandeza de λ ou menores. No espalhamento de Rayleigh, não existe luz espalhada a 90° , se a polarização é paralela ao plano de observação (Figura 3). Entretanto, se a polarização é perpendicular a este plano, existe luz espalhada e o feixe se torna bem visível.

No caso da resina, o espalhamento que ocorre em bolhas de ar e eventuais partículas grandes não é de tipo Rayleigh. Entretanto, se o número de bolhas é pequeno e não existem partículas grandes, o espalhamento de Rayleigh é a contribuição mais importante. Neste caso, a intensidade da luz espalhada transversalmente é bem maior para a polarização perpendicular ao plano definido pelo feixe e o observador. Na Figura 3, deve-se escolher a polarização perpendicular ao plano da figu-

ra, para melhor visualização do feixe. Isto, além de tornar máximo o espalhamento na direção do observador, minimiza o feixe refletido para incidência não normal, quando o plano de incidência é perpendicular ao plano de observação. Na prática, basta girar o laser para encontrar a condição mais favorável.

Para demonstração do ângulo de Brewster ou do espalhamento de Rayleigh, é conveniente ter um feixe de laser totalmente polarizado, adaptando um bom filtro polarizador na saída do laser. Na região do vermelho, os filtros polarizadores comuns não funcionam perfeitamente, mas permitem melhorar o grau de polarização. Um disco de polarizador pode ser colado num tubinho de plástico ou metal, cortado longitudinalmente, para ser encaixado sob pressão no tubo do laser. O polarizador deve ser orientado de forma a se obter feixe com máxima intensidade. É mais fácil determinar a direção para intensidade mínima, girando o polarizador de 90° , em seguida.

Pedaços de filtros polarizadores podem ser obtidos de um “display” de cristal líquido [5] inutilizado. Num display TN comum (twisted nematic), os filtros polarizadores são colados nas lâminas de vidro, na frente e atrás. Em geral, podem descolados e limpos com álcool.

III Construção dos modelos

A construção dos modelos é feita moldando a resina transparente de poliéster, em formas de vidro ou plásticos tais como polietileno ou PVC, que não são atacados pela resina ou solvente. As formas podem ser montadas com tiras de plástico ou vidro coladas numa base (placa de vidro ou plástico) com algum adesivo, vedando cuidadosamente todas as frestas. Para fazer muitas peças iguais, é preferível fazer uma forma desmontável com placas de polietileno ou PVC ou, ainda, fazer uma forma de borracha polimerizável, moldada a partir de um modelo.

A resina transparente de poliéster, solventes (monomero de estireno ou metacrilato de metila), catalisador e corante (em pó) podem ser adquiridos em lojas que vendem material para confecção de artefatos de fibra de vidro. O tempo de polimerização, além de depender do tipo de resina, do solvente e do catalisador disponíveis, depende também da quantidade de catalisador, da temperatura, da quantidade de solvente e de outros fatores. Uma vez que a reação de polimerização é exotérmica e depende da temperatura, o tempo de polimerização depende indiretamente do tamanho da peça, uma vez que peças grandes proporcionalmente perdem menos calor e podem atingir temperaturas bastante altas. Por esses motivos, seria complicado e inútil

descrever procedimentos detalhados. Entretanto, os detalhes dos métodos de polimerização descritos a seguir, podem servir como orientação geral.

Resultados razoáveis podem ser obtidos com 85% de resina para 15% de solvente, sendo o corante previamente diluído no solvente. O corante deve ser muito bem dissolvido para evitar qualquer aglomeração do pó. A mistura de resina com solvente deve ser mexida exaustivamente para homogeneizar bem a mistura. O catalisador *nunca deve ser misturado com o solvente* e só deve ser adicionado à mistura no final, mexendo bastante a cada gota adicionada. A polimerização da mistura ocorre em algumas horas com cerca de 10 gotas de catalisador por 100 g de resina.

Antes de adicionar o catalisador, é conveniente deixar a mistura descansar um pouco para reduzir bolhas. Ao adicionar o catalisador, deve-se mexer a mistura lenta e delicadamente para evitar turbulências e a consequente formação de bolhas de ar. Finalmente, entornar com cuidado a mistura na forma, evitando turbulências.

É conveniente usar materiais descartáveis para as misturas, uma vez que é difícil limpar os recipientes usados. Por exemplo, pode-se usar varetas de madeira e recipientes de plástico PET, polietileno ou polipropileno. Recipientes descartáveis mais comuns são de poliestireno e não podem ser utilizados. Entretanto, alguns recipientes descartáveis são de polipropileno.

Devido aos fortes odores, deve-se trabalhar em local aberto e bastante ventilado, evitando contacto com a pele e com os olhos. Em caso de aquecer a mistura, para reduzir bolhas ou acelerar a polimerização, *fogo não deve ser usado, em hipótese nenhuma*.

III.1 Bolhas e homogeneidade

Um dos problemas é que as pequenas bolhas de ar demoram muito para escapar da resina líquida, mas bastante viscosa. Conforme diminui o tamanho das bolhas, o tempo para escapar da resina líquida pode aumentar de segundos para semanas ou meses. O aumento da temperatura ou a diluição diminui a viscosidade da resina e reduz o tempo de escape da bolha. Para reduzir o número e tamanho das bolhas, as regras gerais são aumentar um pouco a diluição da resina, aumentar a temperatura, aumentar o tempo de polimerização e evitar ao máximo as turbulências ao fazer as misturas. Deve ser observado que, se a temperatura da resina com catalisador é aumentada, a polimerização pode ser extremamente rápida. Portanto, aumentar a temperatura só funciona quando a quantidade de catalisador é muito pequena.

As misturas devem ser bem feitas para se obter boa

homogeneidade. Caso contrário, a resina polimerizada poderá ter aparência muito granulosa ou defeitos grandes ou, até mesmo, permanecer líquida em alguns lugares. Assim, uma solução simples para ter boa homogeneidade e reduzir bolhas é mexer bastante cada mistura (10 minutos ou mais), mas lentamente.

Um método mais demorado e complicado, para melhorar a homogeneidade e reduzir bolhas é usar apenas 4 gotas de catalisador por 100 g de resina com solvente. A mistura, depois de colocada na forma, fica descansando por uma hora ou mais para diminuição das bolhas. A seguir, a mistura deve ser aquecida a cerca de 60°C por muitas horas. Uma solução simples é deixar a mistura sob uma lâmpada de 100 W com refletor, dentro de uma caixa. Entretanto, a caixa deve ser suficientemente grande para não ocorra aquecimento excessivo e risco de incêndio. Com pouco catalisador, a polimerização da resina é muito lenta à temperatura ambiente e pode demorar vários dias.

III.2 Transparência da resina

O espalhamento de luz está diretamente relacionado com a não homogeneidade da resina polimerizada. Quando se utiliza monomero de estireno como solvente, o resultado é uma resina transparente, mas não muito homogênea (granulosa), que permite maior espalhamento da luz. Quando se utiliza metacrilato de metila como solvente, o resultado é uma resina bem transparente é homogênea. Entretanto, o espalhamento de luz é menor, mas ainda ocorre. Em geral, para boa visibilidade das trajetórias luminosas internas, deve ser usado monomero de estireno. O metacrilato de metila deve ser usado quando se deseja que os modelos sejam bem transparentes para funcionar razoavelmente bem como componentes óticos.

III.3 Corante

Além do espalhamento da luz nas bolhas, o espalhamento ocorre essencialmente na própria resina. O corante pode também espalhar um pouco de luz, mas a principal função do corante é absorver a luz indesejável. Isto é, a principal função do corante é proporcionar contraste entre um “fundo escuro” e a luz espalhada na trajetória luminosa. No caso do diodo-laser vermelho o melhor corante é o vermelho, que absorve outras cores e permite boa transmissão do feixe principal e da luz vermelha espalhada. Entretanto, a quantidade de corante deve ser pequena, apenas a suficiente para proporcionar bom contraste. A mistura inicial de solvente com corante, deve ser levemente colorida. Diversos fatores contribuem para acentuar o efeito do corante no

modelo acabado, especialmente em modelos grandes.

Corantes amarelo ou púrpura (magenta) também podem dar bons resultados. Um bom corante amarelo, em geral transmite bem o verde e o vermelho [4]. Portanto, o corante proporciona contraste entre o “feixe vermelho” e o “fundo amarelo”. Considerações análogas valem para um bom corante púrpura, que deve transmitir bem o vermelho e o azul. Na prática, o problema é a qualidade ou o custo destes corantes.

III.4 Lixamento e polimento

Em geral, a peça de resina polimerizada fica com irregularidades e bolhas nas superfícies. Além disso, a resina se contrai e as faces planas ficam côncavas. Por isso, em geral, deve-se fazer acabamento com lixa.

Para superfícies planas, o lixamento pode ser feito usando sucessivamente as lixas números 60, 120, 220, 400, 600 e 1000. A lixa deve ficar sobre uma superfície plana e dura. Por exemplo, pode-se usar um vidro grosso sobre madeira plana. Com as lixas mais grossas (60 a 220), deve-se eliminar todos os defeitos da peça, deixando as superfícies planas e nas dimensões corretas. A peça deve ser lixada com movimentos firmes, sempre num mesmo sentido, modificando a orientação da peça depois de alguns movimentos. As dimensões da peça devem ser sempre verificadas usando um paquímetro e um esquadro. As dimensões podem ser corrigidas por forças e movimentos adequados.

A resina, mesmo depois de polimerizada, continua a se deformar um pouco. Se possível, é conveniente aguardar alguns dias antes de se aplicar lixas mais finas.

No caso de lixas finas, uma pequena pressão aplicada é suficiente. Por exemplo, para uma peça de cerca de 100 g, o próprio peso é suficiente. As lixas 600 e 1000 permitem algum polimento, que pode ser verificado observado a imagem de uma lâmpada. A lixa 1000 é difícil de ser encontrada. Entretanto, a lixa 600 também permite obter acabamento razoável.

O polimento final pode ser feito usando apenas um polidor No 2 para pintura de automóveis. Uma flanela sobre uma madeira com pequena quantidade de polidor, permite obter bom polimento.

No caso de superfícies curvas, existem técnicas para lixar e polir as superfícies, semelhantes às usadas na fabricação de lentes e espelhos. Entretanto, para modelos simples, sem muita precisão, pode-se lixar e polir as superfícies, usando as lixas ou flanela com as mãos. Neste caso, deve-se evitar as lixas mais grossas e evitar arredondar as bordas da peça.

Uma observação geral é que o tempo para lixamento é, a grosso modo, proporcional à área a ser lixada.

Por isso, o lixamento manual de peças grandes pode ser muito demorado. Por exemplo, lixar e polir um cubo de 8 cm de lado pode custar muitas horas, se feito exclusivamente com as mãos. Se disponível, pode-se usar uma lixadeira mecânica para lixamento preliminar. Evidentemente, se disponíveis, pode-se usar torno mecânico, plaina ou fresa, para ajuste preliminar da peça. Neste

caso, pode-se iniciar o polimento com lixa 220 ou 400, conforme o acabamento obtido na usinagem.

IV Demonstrações

IV.1 Prisma de $90 \times 45^\circ$

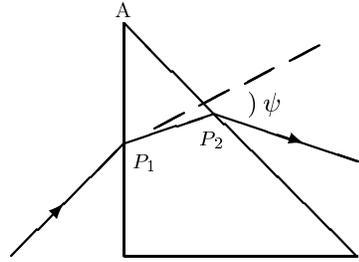


Figura 4. Refração num prisma.

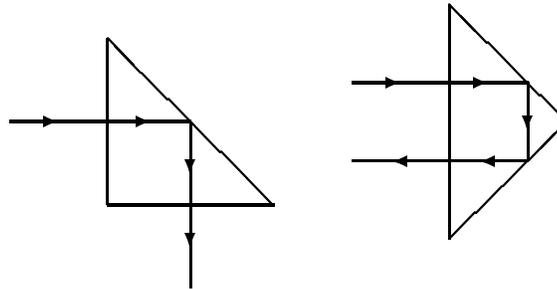


Figura 5. Reflexão total em prisma de $90 \times 45^\circ$.

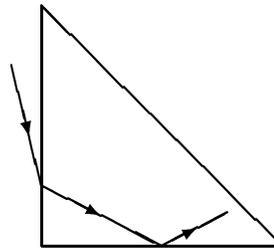


Figura 6. Reflexão total na base do prisma.

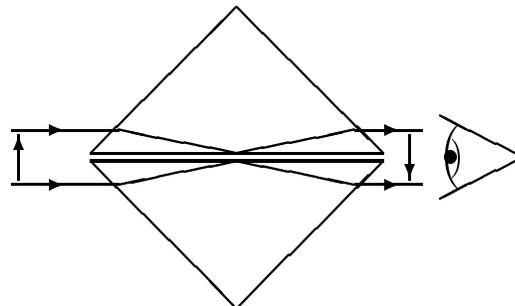


Figura 7. Inversor de imagem.

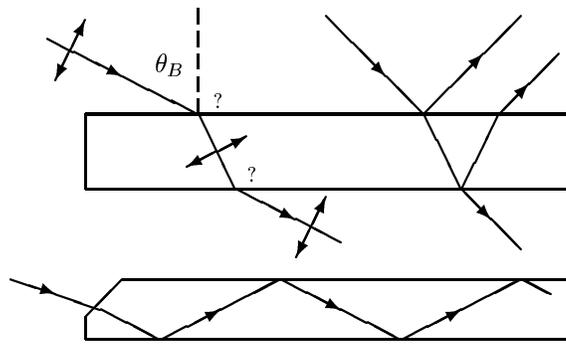


Figura 8. Efeitos óticos numa placa.

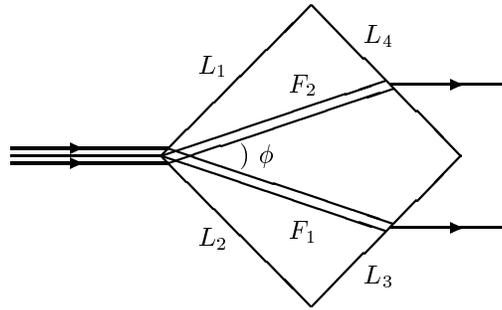


Figura 9. Divisor de feixe.

Prismas de $90 \times 45^\circ$ são bastante convenientes para diversas demonstrações, tais como as mostradas nas Figuras de 4 a 7.

Na Figura 4, é mostrada a refração da luz num prisma. O ângulo de desvio do prisma (ψ) tem um valor mínimo, conforme se varia o ângulo de incidência. Isto ocorre quando o triângulo AP_1P_2 é isósceles. Para se observar o ângulo de desvio mínimo [1,2], o procedimento mais conveniente consiste em *fixar o laser e girar o prisma*. Além dessa experiência com laser, podem ser feitas as experiências usuais de dispersão da luz branca, olhando diretamente a fonte luminosa ou projetando a imagem de uma fenda.

A Figura 5 mostram a reflexão interna total num prisma, para duas geometrias diferentes.

A Figura 6 mostra a reflexão total na base do prisma, para incidência na face adjacente. Para índice de refração $n \cong 1,5$ (resina), o ângulo crítico para reflexão total é $\cong 42^\circ$. Assim, sempre ocorre reflexão total na face adjacente, por maior que seja o ângulo de incidência na face externa. Esta experiência também mostra que, numa fibra ótica, a reflexão total interna sempre ocorre, independentemente do ângulo de entrada da luz, desde que o índice de refração seja suficientemente alto ($n \geq \sqrt{2}$).

Um interessante inversor de imagem pode ser obtido

com 2 prismas transparentes justapostos, como mostrado na Figura 7. Um raio luminoso que incide paralelamente à base do prisma sofre reflexão total e sai do prisma na mesma direção. Entretanto, a base do prisma funciona como um espelho e a imagem é invertida (inversão especular).

Para demonstração de trajetórias internas, é conveniente construir um prisma usando monomero de estireno como solvente. Entretanto, para outras demonstrações tais como dispersão da luz ou utilização de prisma como espelho, é conveniente dispensar o corante e usar metacrilato de metila como solvente.

IV.2 Frustração da reflexão total

Se um feixe incide num prisma tal como na Figura 6, ocorre reflexão total na base, se o meio exterior é ar. Entretanto, pode ocorrer *frustração* da reflexão total [1,7] se esta base é colocada sobre um cubo de resina, por exemplo. Conforme as peças são pressionadas, diminui a espessura da camada de ar entre as faces planas e começa a aparecer um feixe transmitido que pode ser observado facilmente na resina colorida. O efeito também pode ser observado colocando uma gota de água entre as peças. Neste caso, o feixe refletido praticamente desaparece, demonstrando assim o efeito

do acoplamento ótico entre as superfícies.

Para estas experiências é conveniente usar peças de resina colorida e com monomero de estireno, uma vez que é importante ter muito boa visibilidade das trajetórias internas.

IV.3 Placa de faces paralelas

Placas de faces paralelas são bastante úteis para várias demonstrações, tais como mostradas na Figura 8.

Uma placa de cerca de $1,5 \times 3 \times 20 \text{ cm}^3$, permite mostrar a múltipla reflexão total interna, demonstrando o princípio da fibra ótica. A reflexão total sempre ocorre se o feixe de luz entra numa face em 90° (Figura 6). Por isso, chanfros em 45° para entrada do feixe permitem demonstrar a interessante transição entre a reflexão simples e a total.

Se a placa de resina é bem homogênea e de faces bem paralelas, dois outros efeitos interessantes podem ser demonstrados (Figura 8). Um deles é que o feixe mantém a direção original, mas sofre apenas um deslocamento ao passar por uma placa inclinada. Outro efeito é a formação de dois feixes refletidos razoavelmente intensos. Se o coeficiente de reflexão para uma dada direção e polarização é de 5%, por exemplo, as intensidades do primeiro, segundo e terceiros feixes refletidos são 5%, $\approx 4,5\%$ e $\approx 0,01\%$, respectivamente, em relação ao feixe original. Para estas demonstrações, é conveniente usar metacrilato de metila como solvente, pois permite maior homogeneidade e transparência.

IV.4 Placa quadrada

Um cubo ou placa quadrada, de cerca de 7 cm de lado, levemente colorido, é conveniente para várias demonstrações, tais como refração, reflexão total e espalhamento Rayleigh.

Um interessante divisor de feixe pode ser obtido fazendo o feixe incidir entre duas faces, em ângulo de 45° , como mostrado na Figura 9. Parte do feixe é refratado na face L_1 formando o feixe F_1 e outra parte forma o feixe F_2 . Estes feixes são novamente refratados nas faces L_3 e L_4 e saem paralelos.

A medição do ângulo ϕ entre F_1 e F_2 permite determinar o índice de refração da resina ($n^{-1} = \sqrt{2} \text{sen}[(90^\circ - \phi)/2]$).

Para bom resultado nesta experiência, o ângulo entre as faces deve ser 90° e as bordas não devem estar arredondadas. Isto exige um lixamento muito cuidadoso da peça.

IV.5 Lentes

Modelos *planos* podem ser construídos para os diversos tipos de lentes (plano-convexa, plano-côncava, biconvexa, bicôncava e outras). Modelos de cerca de 10 cm de altura e $1,5 \text{ cm}$ de espessura são convenientes para demonstrações. A distância focal pode ser estimada pela *fórmula do fabricante de lentes* [1,2]. A resina colorida pode ser moldada em formas feitas de tiras de plástico, usando o artifício de montar dois encostos firmes, separados de uma distância menor que o comprimento da tira. Quando forçada entre os encostos, a tira assume forma aproximadamente circular.

IV.6 Cilindros

Um disco de resina, com cerca de 5 cm de diâmetro por $1,5 \text{ cm}$ de espessura ou mais, permite simular aproximadamente a reflexão interna e as refrações que ocorrem numa gota de água para formação de arco-íris [2]. Entretanto, deve ser lembrado que o índice de refração da resina ($n \cong 1,5$) é maior que o da água ($n \cong 1,33$).

Um cilindro de cerca de 8 cm de comprimento também pode ser usado para observar *profundidade aparente* e para visualização da ação de focalização de uma lente convergente.

Um modelo de fibra ótica simples pode ser um cilindro de resina de cerca de 2 cm de diâmetro e 20 cm de comprimento. Este modelo também funciona como lente cilíndrica e inverte imagens de objetos próximos, com relação a um eixo paralelo ao cilindro. Por exemplo, quando se observa a frase ODEIO RALAR COCO através do cilindro, “parece existir” inversão de imagem apenas na palavra RALAR, devido a simetria das outras duas.

Um cilindro pode ser feito moldando a resina em tubo de vidro bem liso e perfeitamente cilíndrico. Após a cura, resina se destaca facilmente do vidro por meio de resfriamento num congelador. Em geral, a superfície lateral do cilindro de resina moldado em vidro fica bem regular e polida, não exigindo acabamento posterior.

No caso do disco para simular a gota de água é melhor usar monomero de estireno como solvente. Nos demais casos é preferível usar metacrilato de metila e fazer cura bem lenta da resina, como sugerido na Seção 3.1, para evitar bolhas. Deve ser observado que em tubo comprido, o tempo de escape das bolhas é bem maior.

IV.7 Cone

Um cone, próximo a sua base, atua como um prisma para dispersão da luz. Este efeito, combinado com um efeito de lente cilíndrica, permite simular um “arco-íris”, quando se observa uma fonte de luz branca dis-

tante, através da base do cone. O cone pode ser feito usando um funil comum de polietileno ou de vidro como forma, usando resina e metacrilato de metila. Entretanto, um funil comum tem abertura total de cerca de 60° e um cone de abertura um pouco maior ($\sim 75^\circ$) permite obter melhores resultados.

IV.8 Ângulo de Brewster

A intensidade da luz refletida, para polarização paralela ao plano de incidência, se anula para incidência em ângulo de Brewster $\theta_B = \arctg n$, como mostrado nas Figuras 2 e 8. Para incidência em ângulo de Brewster, o ângulo entre os feixes refletido e o refratado é 90° . Assim, observando o feixe refletido num anteparo e o feixe transmitido na resina, é bastante fácil encontrar a condição de Brewster em demonstrações, uma vez que o laser é bem polarizado.

IV.9 Espalhamento Rayleigh

Um cubo de resina é mais conveniente para demonstrar o efeito de polarização da luz no espalhamento Rayleigh. Girando o laser, o feixe pode ser bem visível ou praticamente invisível, conforme discutido na Seção 2.2 (ver Figura 3). O feixe deve se tornar quase invisível quando observado pelas faces transversais à polarização e bem visível nas demais faces. Para melhor resultado, é conveniente ter um laser bem polarizado, como explicado na Seção 2.2.

Se existirem bolhas, partículas suspensas (sujeira) ou grãos não dissolvidos de corante, o espalhamento não é do tipo Rayleigh e o efeito fica mascarado, embora perceptível.

Um outro efeito que compromete a demonstração do espalhamento Rayleigh é a existência de tensões internas na resina polimerizada. Isto torna a resina birrefringente em algumas partes (fotoelasticidade [1,7]) e a polarização do feixe de laser é um pouco modificada localmente, dando origem a regiões claras e escuras no feixe.

Para demonstração do espalhamento de Rayleigh, o mais conveniente é usar resina, levemente colorida, com cerca de 5% de metacrilato e fazer polimerização muito lenta da resina (Seção 3.1). Dessa maneira, as tensões internas e o número de bolhas são minimizados.

V Observações gerais

Apresentamos um método simples e de baixo custo para construir modelos de componentes óticos, que permitem visualizar as trajetórias luminosas. Atualmente, tais modelos se tornam interessantes, uma vez que os

diodos-laser se tornaram extremamente acessíveis com custo da ordem de US\$ 15 (no mercado externo). O custo da resina de poliéster é menor que US\$ 10/kg. Infelizmente, alguns materiais tais como solvente, corante ou polidor só podem ser adquiridos em quantidades muito maiores que as necessárias. De qualquer modo, por cerca de US\$ 50 é possível adquirir 2 kg de resina e todos os materiais necessários para construir vários modelos de tamanho razoável. Assim, com um pouco de trabalho manual, pode-se construir um conjunto muito interessante para demonstração de diversos efeitos óticos, com um custo bastante razoável. Em aulas, essas demonstrações são simples, rápidas e servem como motivação para os alunos, uma vez que os efeitos do laser sobre as peças de resina colorida são muito bonitos. Além disso, os modelos também podem ser usados em medições simples de índice de refração (Seção 3.4), ângulo de desvio mínimo do prisma (Seção 3.1), ângulo de Brewster (Seção 3.8), ângulo mínimo para reflexão total (Seção 3.1) e outras. As medições ficam simplificadas pelo fato que o feixe é visível dentro dos modelos.

Evidentemente, resultados melhores poderiam ser obtidos usando resinas mais convenientes, usando estufa de temperatura controlada para fazer a polimerização ou até usando vácuo para eliminar bolhas. Mesmo sem esses cuidados, resultados melhores podem ser obtidos apenas usinando as peças em plaina, fresa ou torno mecânicos. Entretanto, o objetivo aqui proposto foi o de construir os modelos com materiais acessíveis e de baixo custo, por métodos simples e caseiros. Isto não significa necessariamente modelos ruins. Exce-lentes espelhos de telescópio, por exemplo, podem ser construídos por métodos inteiramente manuais.

Além dos modelos mencionados, várias outras peças interessantes podem ser elaboradas, tais como os diversos tipos de prismas usados em ótica [1], pirâmides ou poliedros mais complicados, dependendo da paciência e habilidade na elaboração das formas.

As grandes vantagens de construir modelos a partir de polimerização da resina são a possibilidade de construir modelos de tamanhos razoavelmente grandes sem desperdício de material e a possibilidade de controlar a cor e transparência, conforme o objetivo da experiência ou demonstração. Tanto do ponto de vista de custo, quanto de trabalho envolvido, é praticamente inviável construir, em pequena escala, modelos com cores, transparências e tamanhos diversificados a partir de usinagem de materiais prontos.

Agradecimentos aos professores Fuad D. Saad e Paulo Yamamura, pelo apoio e incentivo, e ao Sr. Manoel M. Silva pela ajuda na elaboração dos mod-

Referências

1. E. Hecht and A. Zajac, *Optics*, 2nd Edition, Addison-Wesley Publishing Company (1987).
2. P. Tipler, *Física - Volume 4, Ótica e Física Moderna*, 3^a Ed., Guanabara-Koogan (1995).
3. *The Photonics Handbook - Book 3 - Design and Applications*, 40th Edition, Laurin Publishing, Pittfield-MA (1994).
4. D. S. Falk, D. R. Brill and D. G. Stork, *Seeing the Light*, J. Wiley & Sons, New York, 1986.
5. B. Bahadur, *Display Parameters and Requirements*, in *Liquid Crystals, Applications and Uses, Vol. 2*, B. Bahadur (Editor), World Scientific, (1993).
6. H. C. Van Hulst, *Light Scattering by Small Particles*, Dover Publications, New York (1981).
7. R. Guenther, *Modern Optics*, John Wiley, New York (1990).