

Reflexão e Refração da luz em superfícies planas

Nesta prática serão estudados os fenômenos de reflexão e refração da luz em superfícies planas utilizando as leis da óptica geométrica. Serão abordados os princípios fundamentais (de Huygens e de Fermat), as leis de Reflexão e Refração (lei de Snell), reflexão interna total, e a ótica de um prisma.

Sempre que surgir uma dúvida quanto à utilização de um instrumento, o aluno deverá consultar o professor, o monitor ou o técnico do laboratório para esclarecimentos.

Importante: O conteúdo da introdução teórica desta apostila é apenas um guia para os conceitos necessários para a realização dos experimentos. Você deve aprofundar os conceitos consultando os livros citados na bibliografia no final da apostila ou outros de sua preferência.

I. Leis da Refração e Reflexão

Quando um feixe de luz passa de um meio material transparente para outro, parte da luz é refletida na interface entre os meios e parte entra no segundo meio. A figura 1 mostra dois meios transparentes e sua interface. Cada um dos meios é caracterizado por um parâmetro adimensional denominado índice de refração. Os ângulos de reflexão α e refração β são obtidos a partir de leis que garantem que:

- a) O raio refletido e o refratado estão no mesmo plano definido pelo raio incidente e a normal à interface no ponto de incidência, que é chamado de plano de incidência.
- b) O ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão.
- c) Os ângulos de incidência e refração estão relacionados pela lei de Snell:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta \quad (1)$$

- d) A intensidade da luz refletida ou refratada depende da diferença de índices de refração entre os meios e do ângulo de incidência (os coeficientes de transmissão e reflexão

são dados pelas equações de Fresnel). Um caso particular simples é o de incidência normal em um meio não absorvedor; a fração de luz refletida na interface é dada por:

$$R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (2)$$

A fração de luz transmitida é obviamente $T = 1 - R$, uma vez que não há absorção. Para o caso do vidro ($n \approx 1,5$), a intensidade refletida é cerca de 4 % do total.

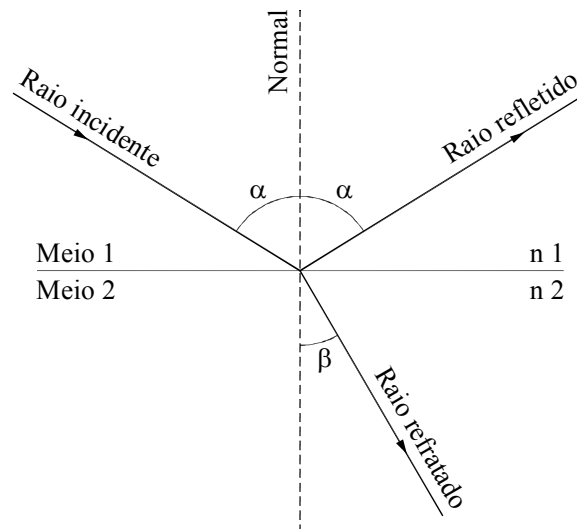


Figura 1 – Reflexão e refração de um feixe de luz na interface de dois meios transparentes.

As leis de reflexão e refração, do modo como foram expostas são aqui, foram baseadas em resultados experimentais. Entretanto, elas podem ser deduzidas a partir de princípios mais fundamentais da óptica, que são o princípio de Huygens e o princípio de Fermat. Veremos a seguir esses princípios (que são equivalentes) e mostraremos como as leis de reflexão e refração podem ser deduzidas a partir deles.

II. Princípio de Huygens

Ainda no século XVII, o holandês Christian Huygens formulou uma teoria ondulatória para explicar os fenômenos envolvendo a luz. Sua hipótese fundamental é conhecida como princípio de Huygens, e diz como a frente de onda pode ser calculada em cada instante no futuro conhecendo a sua posição atual:

“Cada ponto de uma frente de onda atua como uma fonte de ondas secundárias que se propagam com a mesma velocidade e frequência. A envoltória das frentes de onda secundárias é a nova frente de onda, num instante posterior.”

Com esse princípio, é possível demonstrar as leis de reflexão e refração.

Vamos considerar inicialmente a reflexão. Na figura 2, a frente de onda AA' se aproxima do espelho com ângulo de incidência θ_i (entre a normal da frente de onda e a normal ao espelho), que é igual ao ângulo Φ_i entre a frente de onda e o espelho. Pelo princípio de Huygens, os pontos da frente de onda AA' geram ondas secundárias cuja envoltória forma a frente de onda $B'BB''$, que por sua vez leva a nova frente de onda $C'CC''$.

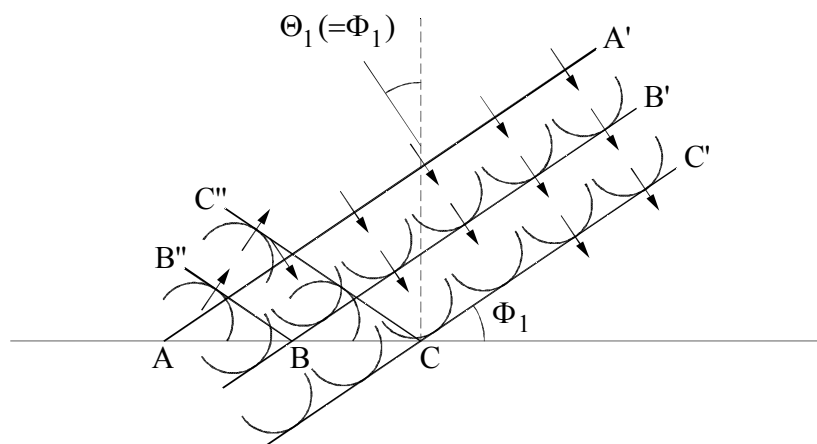


Figura 2 – Esquema de reflexão de frentes de onda segundo o princípio de Huygens.

No esquema da figura 3, AP representa uma parte da frente de onda AA' . Em um tempo t , a onda secundária centrada em A chega ao ponto B'' , e a frente de onda centrada em P chega a B . A nova frente de onda é BB'' . Os ângulos entre a frente de onda e o espelho são Φ_1 e Φ_2 para as frentes de onda AA' e BB'' respectivamente. Os triângulos

$\triangle ABB''$ e $\triangle ABP$ são retângulos com hipotenusa comum e um cateto igual ($AB'' = BP$), logo são congruentes, portanto Φ_1 e Φ_2 são iguais. Os ângulos de incidência são iguais aos ângulos Φ_1 e Φ_2 , e são também iguais para as ondas incidente e refletida, provando a lei de reflexão.

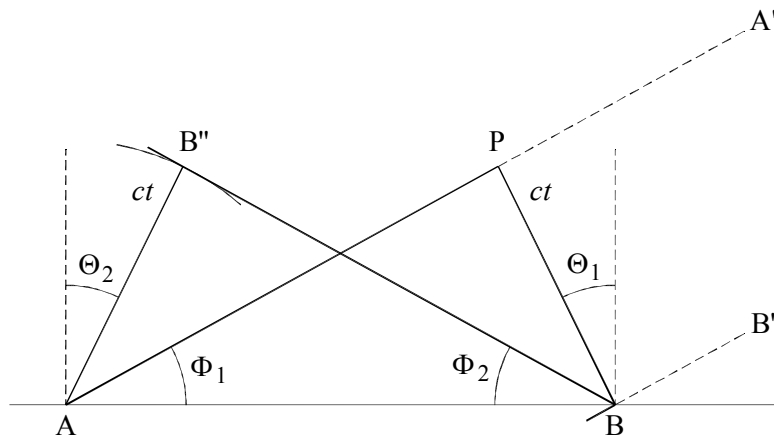


Figura 3 – Diagrama geométrico mostrando o uso do princípio de Huygens para deduzir a lei de reflexão.

Para provar a lei de Snell, vamos usar a figura 4. A frente de onda incidente é AP. A onda secundária gerada em A percorre uma distância v_2t no meio 2, e aquela gerada em P percorre a distância v_1t no meio 1. Isso faz com que a nova frente de onda B'B não seja paralela a frente AP. O ângulo de incidência é θ_1 , igual a φ_1 ; o ângulo de refração é θ_2 , igual a φ_2 .

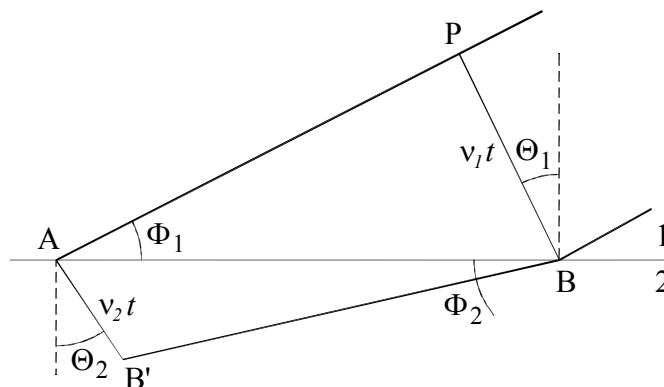


Figura 4 – Diagrama geométrico mostrando o uso do princípio de Huygens para deduzir a lei de refração (lei de Snell).

Duas relações podem ser percebidas pela figura:

$$\sin \Phi_1 = \frac{v_1 t}{AB} \quad (3a)$$

$$\sin \Phi_2 = \frac{v_2 t}{AB} \quad (3b)$$

As duas equações apresentam o fator t / AB . Igualando a expressão para t / AB em cada equação, chegamos a:

$$\frac{1}{v_1} \sin \Phi_1 = \frac{1}{v_2} \sin \Phi_2 \quad (4)$$

Lembrando que $v = c / n$, e cancelando o fator comum c , chega-se a lei de Snell.

III. Princípio de Fermat

O princípio de Fermat também é conhecido como “princípio do menor tempo”. O conteúdo do princípio é:

“A luz, para caminhar de um ponto A até um ponto B, o faz por um caminho tal que o tempo gasto é um extremo (mínimo, máximo ou um ponto de inflexão)”.

Esse princípio está intimamente ligado à técnica matemática do cálculo variacional: o caminho percorrido pela luz é aquele cujo tempo gasto não se altera (em primeira ordem) se o caminho for levemente alterado. Nas situações usuais de reflexão e refração, o extremo será um mínimo, o que justifica o termo “princípio do menor tempo”. É útil introduzir aqui o conceito de caminho óptico, que é igual ao produto entre a distância percorrida pela luz e o índice de refração local. Minimizar (ou de forma geral, extremar) o tempo equivale a minimizar (ou extremar) o caminho óptico.

O princípio de Fermat pode ser relacionado ao princípio de Huygens. Quando o tempo não é afetado por pequenas mudanças, as ondas secundárias geradas em pontos próximos interferem construtivamente, pois chegam com a mesma fase. Se o tempo não é um extremo, ocorre interferência destrutiva e não se forma uma nova frente de onda.

Para ver como esse princípio leva às leis de reflexão, vamos considerar a figura 5 e calcular o caminho óptico para ir do ponto A ao observador B em função da variável x (o ponto onde há a reflexão), e achar o valor x_o que o minimiza.

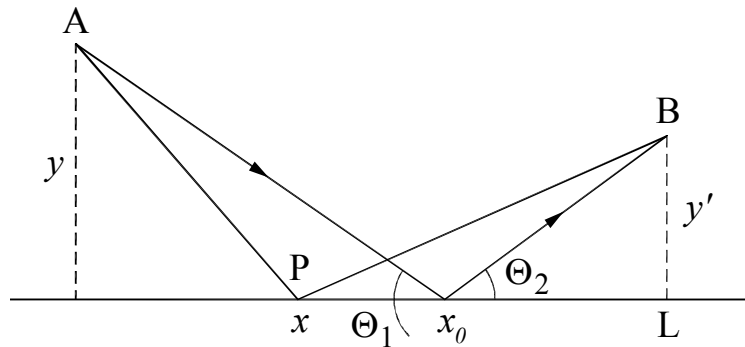


Figura 5 – Diagrama geométrico mostrando o uso do princípio de Fermat para deduzir a lei de reflexão.

O caminho óptico de A a B, passando por P (ou seja, sofrendo uma reflexão) é:

$$[APB] = n \left(\sqrt{x^2 + y^2} + \sqrt{(L-x)^2 + y'^2} \right) \quad (5)$$

O princípio de Fermat diz que a derivada (com relação a x) dessa expressão, calculada para $x = x_o$, é igual à zero:

$$\frac{d}{dx} [APB] = n \left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} - \frac{L-x}{\sqrt{(L-x)^2 + y'^2}} \right) \quad (6)$$

Para a derivada acima ser igual a zero é preciso que:

$$\frac{x_o}{y} = \frac{L - x_o}{y'} \quad (7)$$

Pela figura, vemos que o lado esquerdo é igual a $\tan \theta_1$ e o lado direito é igual a $\tan \theta_2$. Ou seja, $\tan \theta_1 = \tan \theta_2$. Logo, como θ_1 e θ_2 são do primeiro quadrante:

$$\theta_1 = \theta_2 \quad (8)$$

Isso demonstra a lei de reflexão.

Para demonstrar a lei de refração (lei de Snell), será utilizado o esquema da figura 6:

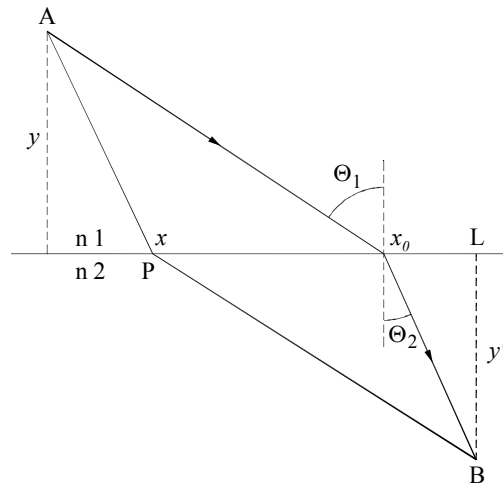


Figura 6 – Uso do princípio de Fermat para deduzir a lei de refração (lei de Snell).

O caminho óptico entre A e B, passando por P (ou seja, sofrendo uma refração) é:

$$[APB] = n_1 \sqrt{x^2 + y^2} + n_2 \sqrt{(L - x)^2 + y'^2} \quad (9)$$

Seguindo o mesmo procedimento anterior:

$$\frac{d}{dx}[APB] = \frac{n_1 x}{\sqrt{x^2 + y^2}} - \frac{n_2 (L - x)}{\sqrt{(L - x)^2 + y'^2}} \quad (10)$$

A equação 10 só pode ser igual a zero se:

$$n_1 \left(\frac{x_o}{\sqrt{x_o^2 + y^2}} \right) = n_2 \left(\frac{L - x_o}{\sqrt{(L - x_o)^2 + y'^2}} \right) \quad (11)$$

O parêntesis do lado esquerdo é igual a $\sin \theta_1$ e o parêntesis do lado direito é igual a $\sin \theta_2$. Ou seja:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (12)$$

Isso prova a lei de Snell.

IV. Desvio angular provocado por prismas

Ao passar por um prisma, um raio luminoso sofre uma refração ao penetrar na face em que está incidindo e outra ao emergir na outra face. Estas duas faces são inclinadas por um certo ângulo, de forma que o desvio produzido pela refração na primeira face é ampliado pela refração na segunda, da forma mostrada na figura 7.

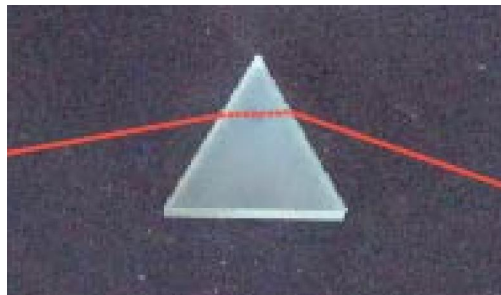


Figura 7 – Fotografia mostrando a refração e reflexão de raios de luz laser em um prisma.

O raio emergente apresenta um desvio dado pelo ângulo δ com relação ao raio incidente, como ilustrado na figura 8. Girando o prisma continuamente em torno de um eixo

normal ao prisma, esse ângulo δ decresce até alcançar um valor mínimo e, então, volta a aumentar. O ângulo de incidência para o qual δ assume seu menor valor é conhecido como ângulo de desvio mínimo, θ_m . Assim, o nosso objetivo seria em princípio relacionar o desvio do feixe δ com o ângulo de incidência θ_1 e em seguida achar para qual ângulo de incidência esse desvio é mínimo. No entanto, é mais simples relacionar δ com o ângulo de refração na primeira superfície θ_2 e como θ_1 e θ_2 estão relacionados diretamente por uma relação constante, dada pela lei de Snell, minimizar δ em relação a θ_2 é o mesmo que minimizá-lo em relação a θ_1 . Portanto, a seguir iremos relacionar δ com o ângulo θ_2 e então minimizá-lo em relação a este ângulo.

A figura 8 mostra um prisma isósceles. O desvio sofrido pelo feixe é dado pelo ângulo entre as direções inicial e final do raio, o ângulo de desvio δ vale:

$$\delta = \theta_1 + \theta_4 - \theta_2 - \theta_3 \quad (13)$$

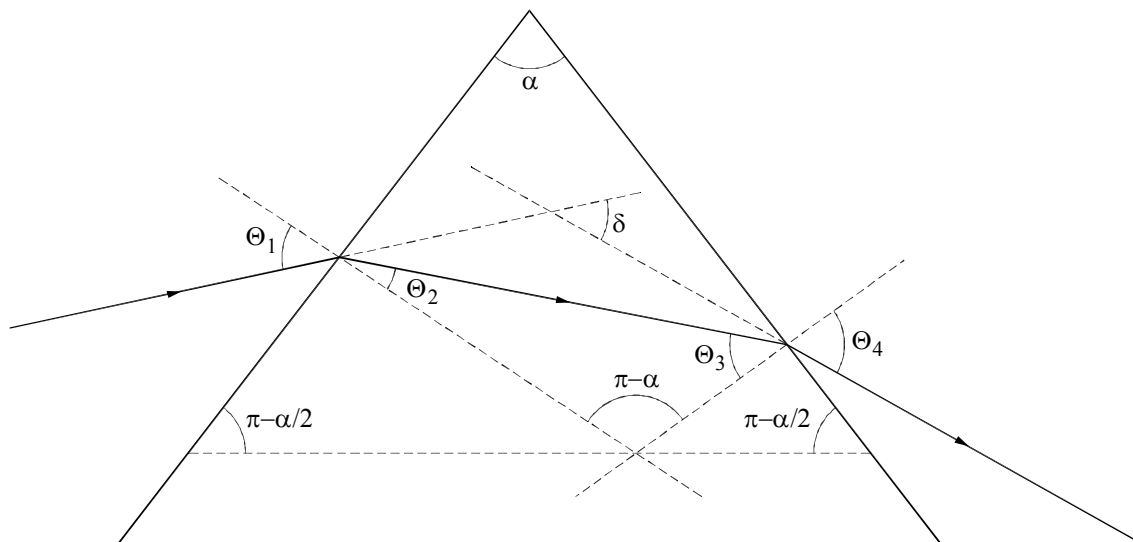


Figura 8 – Esquema de refração da luz em um prisma isósceles.

Vemos também que:

$$\theta_2 + \theta_3 = \alpha \quad (14)$$

Ou seja:

$$\delta = \theta_1 + \theta_4 - \alpha \quad (15)$$

Aplicando a lei de Snell nas duas refrações:

$$\sin \theta_2 = \frac{1}{n} \sin \theta_1 \quad (16a)$$

$$\sin \theta_4 = n \sin \theta_3 \quad (16b)$$

Substituindo θ_3 da equação 14 na equação 16b:

$$\sin \theta_4 = n \sin(\alpha - \theta_2) \quad (17)$$

O desvio total agora se escreve como:

$$\delta = \arcsin(n \sin \theta_2) + \arcsin(n \sin(\alpha - \theta_2)) - \alpha \quad (18)$$

A derivada dessa expressão com relação a θ_2 é:

$$\frac{d\delta}{d\theta_2} = \frac{n \cos \theta_2}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \theta_2}} - \frac{n \cos(\alpha - \theta_2)}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2(\alpha - \theta_2)}} \quad (19)$$

O desvio mínimo ocorre quando a derivada acima for igual a zero. Para que isso aconteça, é preciso que $\theta_2 = \alpha - \theta_2$, ou seja, $\theta_2 = \alpha / 2$. Logo:

$$\sin \theta_1 = n \sin(\alpha / 2) \quad (20)$$

Logo a equação 14 resulta que $\theta_3 = \alpha / 2$, ou seja, $\theta_2 = \theta_3$. Utilizando esse resultado nas equações 16a e b conclui-se que:

$$\theta_1 = \theta_4 \quad (21)$$

Na situação de desvio mínimo, os ângulos de incidência e de saída são iguais, ou seja, o feixe atravessa o prisma paralelamente a uma das faces.

É importante mencionar que a principal aplicação de prismas é na dispersão da luz (separação em comprimentos de onda, que será discutida em mais detalhes no capítulo sobre espectroscopia óptica) para uso, por exemplo, em espectroscopia óptica. Neste sentido, se deseja que a dispersão seja a maior possível, já que isso acarreta em maior resolução. Porém, nessas aplicações, a condição de desvio mínimo é geralmente utilizada, o que pode parecer antagônico, pois se o desvio é mínimo a dispersão é também a mínima possível para um determinado prisma. No entanto, há outro fator que influencia na qualidade do prisma, que é a distorção que ele provoca na forma do feixe desviado, que também deve ser minimizada para evitar aberrações no padrão espectral da luz dispersa. A situação de desvio mínimo é aquela que provoca a menor alteração na forma do feixe ao atravessar o prisma e por isso o uso dessa condição acarreta em menos aberrações no padrão da luz dispersa, justificando o uso dessa condição em uma grande parte das aplicações envolvendo prismas.

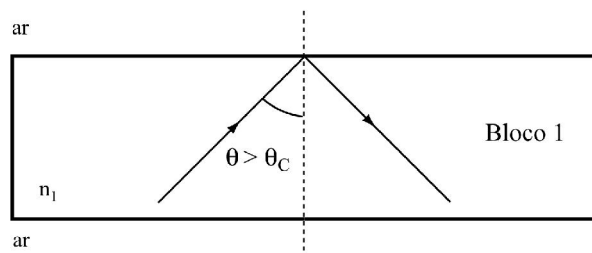
V. Reflexão interna total (e reflexão interna total frustrada)

Pela lei de Snell, se tivermos $n_i > n_r$ (ou seja, o raio está passando de um meio mais refratário a outro menos refratário), pode-se ter $\sin \theta_r > 1$. Nesse caso não há raio refratado; toda a luz é refletida como ilustrado na figura 9a para o caso de uma interface de um material de índice de refração n_i com o ar. Esse efeito é chamado de reflexão interna total. A reflexão interna total ocorre quando o ângulo de incidência é maior que o ângulo crítico (θ_c), definido como: $\sin \theta_c = n_r / n_i$. Entre outras muitas aplicações, a reflexão interna total é utilizada para guiar feixes de luz através de múltiplas reflexões, com ilustrado na figura 9b.

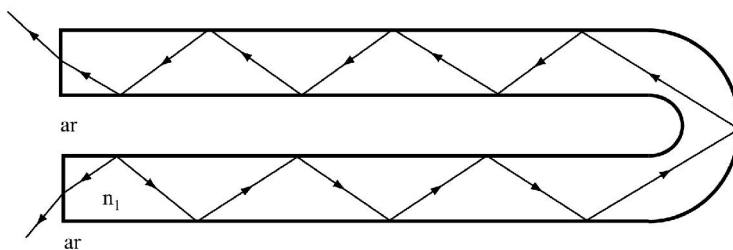
Considere agora dois blocos de vidro (indicados como 1 e 2 na figura 9c) forem colocados muito próximos com uma fina camada de ar entre eles. Assuma que o feixe de luz parte do bloco 1 e incide na interface do mesmo com o ar na condição de reflexão total ($n_2 > n_{ar}$). Se a espessura da camada de ar entre os blocos for de alguns poucos

comprimentos de onda da luz (há uma relação matemática que estabelece a condição entre a espessura do bloco e o comprimento de onda, que pode ser verificada nas bibliografias indicadas), haverá luz transmitida para o bloco 2. Esse fenômeno ocorre porque mesmo na condição de reflexão interna total a onda penetra ligeiramente no menor índice de refração. Porém, neste meio a amplitude dessa onda, usualmente denominada de onda evanescente, decai exponencialmente e não transporta energia (toda energia é refletida). Porém, com os dois blocos muito juntos, a onda pode alcançar um novo meio onde pode se propagar e se converte numa onda propagante no bloco 2. Assim, nessa situação, a luz que se propagava dentro do bloco 1 e atinge a interface com ângulo maior que o ângulo crítico tem parte de sua energia refletida e parte atravessa para o outro bloco 2, intermediada pela onda evanescente, tal como mostrado na figura 9c. Esse fato é conhecido como reflexão interna total frustrada, e é um exemplo do que os Físicos costumam denominar tunelamento, neste caso tunelamento clássico.

a)



b)



c)

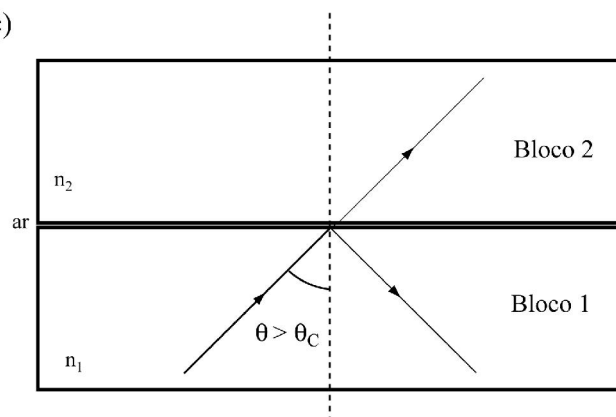


Figura 9 –Esquematização do fenômeno de reflexão interna e reflexão interna frustrada.

VI. Experimentos

Em todos os experimentos realizados, os índices de refração encontrados deverão ser comparados com valores tabelados. Além disso, evite tocar as superfícies de vidro diretamente com os dedos.

VI.1 Reflexão e refração em um bloco de vidro

a) Nesta parte do experimento, vamos estudar a reflexão e a refração da luz utilizando um bloco retangular de vidro BK7. Com isso, será possível verificar o desvio do feixe quando passa pelo vidro, o qual pode ser estimado utilizando a lei de Snell.

b) Coloque uma folha de papel sobre a plataforma goniométrica e fixe-a usando alfinetes. Marque o centro da mesa (ponto O) com um alfinete (alfinete [5] na figura 11) e incida um raio de luz laser de modo a interceptá-lo.

c) Remova o alfinete do ponto O e coloque o alfinete [1] (ver figura 10) na trajetória do feixe de luz, de modo que haja espaço suficiente para colocar bloco de vidro entre o laser e o alfinete [1]. Esta trajetória está marcada com uma linha tracejada na figura 10.

d) Coloque o bloco de vidro formando um ângulo entre 35° e 55° com o feixe de luz incidente, tal como ilustrado na figura 10. A face de incidência do bloco deve estar sobre o diâmetro da mesa. Fixe-o com alfinetes e trace seu perímetro na folha de papel. Isto permitirá a determinação da reta normal à face. Dica: posicione o bloco de vidro de modo que δ corresponda à segunda maior aresta do bloco.

e) Coloque os demais alfinetes, como mostrado na figura 10, na seguinte ordem: [2], [3], [4], [5] e [6], anotando a posição de cada um. **Importante: Siga a sugestão de ordem para colocação dos alfinetes indicada por [1],[2],..., [6]!!!**

f) Remova todos os alfinetes e o bloco de vidro, e una os furos deixados pelos alfinetes com linhas, determinando, desta forma, os ângulos α e β e o deslocamento lateral D entre o feixe incidente e o emergente.

g) Repita este procedimento para 4 ângulos de incidência diferentes.

h) Com os dados obtidos, determine o índice de refração do bloco (valor médio) e o erro associado (desvio padrão). Compare com o valor padrão do índice de refração do vidro BK7.

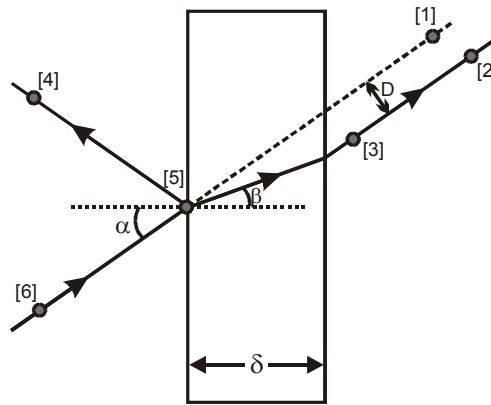


Figura 10 – Esquema mostrando a ordem de fixação dos alfinetes em um bloco de vidro e definição dos parâmetros α , β e D .

i) Com esses dados, mostre que seus resultados são consistentes com:

$$D = \delta \sin \alpha \left(1 - \frac{\tan \beta}{\tan \alpha} \right) \quad (23)$$

Onde δ é, como mostrado na figura 10, a espessura do bloco de vidro. Calcule D utilizando essa relação, determine seu erro a partir do desvio padrão das medidas de α e β e compare com o valor medido experimentalmente.

j) Mostre que o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão. Para isso, faça um gráfico de $\alpha_{\text{incidente}}$ versus $\alpha_{\text{refletido}}$ e verifique se obtém uma reta que passe pela origem cuja inclinação seja 45° . Discuta o grau de confiança de suas medidas.

k) A principal fonte de erros nesta medida é causada pela largura do feixe de laser. Estime esses erros e discuta-os em seu relatório.

Desvio lateral em um bloco de faces paralelas

$\alpha_{\text{incidente}}$	$\alpha_{\text{refletido}}$	β	$D_{\text{medido}} \text{ (cm)}$	$D_{\text{esperado}} \text{ (cm)}$

VI.2 Ângulo de desvio mínimo em um prisma

a) Coloque uma folha de papel sobre a plataforma goniométrica e fixe-a usando alfinetes. Marque o centro da mesa com um alfinete (ponto O) e incida um raio de luz laser de modo a interceptá-lo.

b) Retire o alfinete que marca o ponto O e coloque um prisma equilátero sobre a folha de papel. Fixe-o com alfinetes e trace os contornos do prisma no papel. A marca existente na superfície opaca do prisma deve coincidir com o centro de rotação da mesa (ponto O). Em seguida, gire a plataforma de forma que o feixe de luz incidente reflita na primeira face do prisma sobre si mesmo (retro-reflexão). Quando isso acontece, a incidência do feixe é perpendicular à face.

c) Gire a plataforma de modo a ter um ângulo de incidência θ . Identifique o feixe emergente na superfície oposta à incidência, conforme a figura 11. Gire a plataforma de modo a variar o ângulo θ . Assim, você verá o feixe emergente do prisma mover-se em uma determinada direção. Em um determinado instante, este movimento cessará e, embora você continue girando a plataforma na mesma direção, o feixe de luz começará a se mover na direção contrária.

O momento em que o movimento cessa define o ângulo de desvio mínimo, δ_m . É importante notar que uma vez cessado o movimento do feixe emergente é possível girar a plataforma de alguns graus sem que se perceba nenhum deslocamento do feixe, o que reflete uma fonte de erro para suas medidas.

Para obter uma medida mais precisa, meça o ângulo para o qual o movimento cessa, θ_m^1 , e o ângulo para o qual o movimento recomeça, θ_m^2 . O ângulo θ_m será determinado, então, pelo valor médio dos ângulos θ_m^1 e θ_m^2 , ou seja:

$$\theta_m = \frac{\theta_m^1 + \theta_m^2}{2} \quad (24)$$

d) Use alfinetes para determinar a direção do feixe emergente no prisma nas condições onde são obtidos os ângulos θ_m^1 e θ_m^2 . Após isso, trace a trajetória dos raios no papel (como mostrado na figura 11) e a reta normal à superfície do prisma e determine os

ângulos θ_m^1 e θ_m^2 . A partir destes resultados, utilize a equação 20 (com $\theta_1 = \theta_m$) para determinar o índice de refração do prisma. Estime os erros em seus cálculos, considerando o erro na determinação do ângulo como sendo $\Delta\theta_m = \frac{\theta_m^1 - \theta_m^2}{2}$.

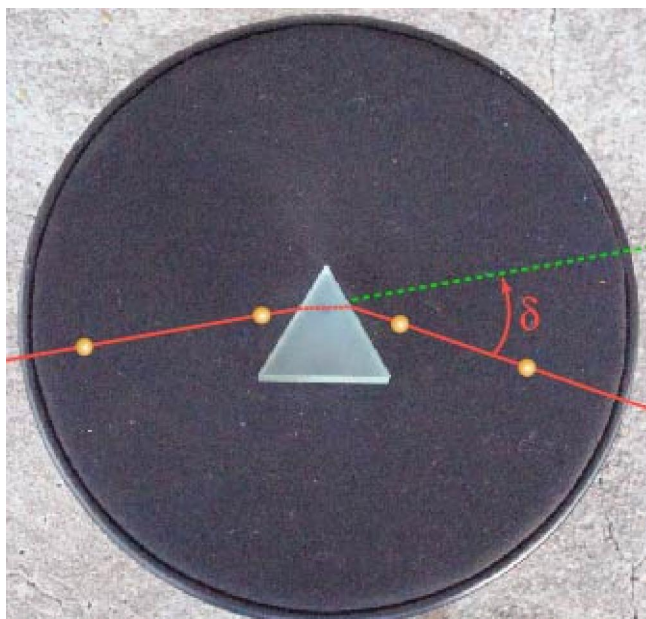


Figura 11 – Fotografia do experimento, mostrando os alfinetes que permitem determinar a direção dos raios.

Ângulo de desvio mínimo em prismas

Prisma de vidro		Prisma oco com líquido	
θ_m		θ_m	
θ_m		θ_m	
θ_m		θ_m	
θ_m médio		θ_m médio	
n		N	

e) O método anterior pode ser utilizado para determinar o índice de refração de líquidos. Para isso, basta que o prisma seja substituído por um prisma oco de paredes delgadas preenchido com o líquido em questão. Realize essas medidas com o prisma oco

preenchido com água e determine o seu índice de refração. Compare com os valores da literatura.

VI.3 Reflexão interna total em um bloco de acrílico semicircular

Neste experimento, vamos considerar a luz se propagando de um meio com maior índice de refração para outro de menos índice de refração. Nesse caso, conforme o ângulo de incidência aumenta atinge-se um ponto onde nenhuma luz é transmitida para o meio de índice de refração menor. Este ângulo, em particular, é chamado ângulo crítico (θ_C). Para ângulos maiores que θ_C , toda luz é refletida de volta ao meio incidente com um ângulo igual ao ângulo de incidência, como ilustrado na figura 12.

a) Coloque uma folha de papel sobre a mesa goniométrica fixando-a com a ajuda de alfinetes. Em seguida coloque um bloco de vidro semicircular sobre a folha de modo que o centro da mesa goniométrica coincida com o centro da face plana do bloco (ponto O da figura 12a). Desenhe o contorno do bloco no papel e fixe-o utilizando alfinetes. Posicione então o laser de modo que o feixe incida perpendicularmente à face plana do bloco exatamente em O, tal como mostrado na figura 12a. Na condição ideal, o raio refletido pela face plana volta na mesma trajetória do raio incidente (retro-reflexão). Utilize alfinetes para acompanhar a trajetória do feixe de luz laser.

b) Gire o bloco e faça o feixe do laser incidir como na figura 12b. Determine então a trajetória do raio incidente e refratado pelo bloco; para fazer isso, marque a trajetória dos raios no papel com a ajuda de alfinetes, tal como ilustrado na figura 12b (que mostra quatro alfinetes). Analise a trajetória seguida pelos raios utilizando a lei de refração.

c) Faça o traçado de raios no papel e determine os ângulos de incidência e refração, θ_1 e θ_2 , para 4 ângulos de incidência distintos.

d) Determine o índice de refração do bloco de acrílico através de um gráfico de $\sin \theta_1$ versus $\sin \theta_2$. Utilize esse valor para calcular o ângulo crítico e estime seu erro.

e) Gire lentamente o bloco até que o feixe refratado saia rasante à face plana do bloco semicircular (como na figura 12c). Determine as trajetórias dos raios para esta

situação. Observe e discuta a reflexão interna total que acontece se o bloco é girado além deste ponto.

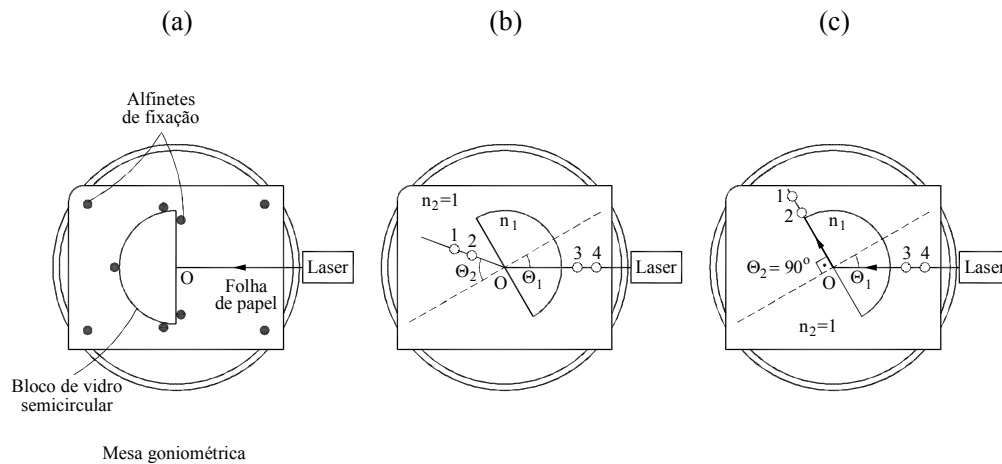


Figura 12 – (a) Fixação do bloco semicircular na mesa goniométrica; (b) Trajetória do feixe de luz; (c) Trajetória no caso de refração rasante. Para ângulos de incidência ligeiramente maiores que o indicado em (c) observa-se a reflexão interna total.

Na condição em que se atinge o ângulo crítico $\theta_i = \theta_c$ tem-se que o ângulo de refração θ_2 é 90° . Assim, na situação ilustrada na figura 12c, o ângulo crítico é dado por:

$$\sin \theta_c = 1/n \quad (25)$$

Onde n é o índice de refração do bloco de acrílico.

f) Faça uma medida direta do ângulo crítico, θ_c , e estime o seu erro. A partir destes dados estime o índice de refração do bloco. Compare os valores obtidos para o índice de refração medido através da lei da refração.

Determinação dos ângulos de incidência e refração

θ_i	θ_2	θ_i	θ_2
n =			

Determinação do ângulo crítico

θ_c (medida direta)	n

VII. Bibliografia

- 1) Nussenzveig, H.M., "Curso de Física Básica", Vol. 4, 1998.
- 2) Tipler, P.A., "Física", Vol. 4 3ª edição, 1991.
- 3) Halliday, D. & Resnick, R., "Física II"
- 4) Sears, F.W., Zemansky M.W., "Física", Vol. 4, 2ª edição, 1977.
- 5) Eisberg, R.M., Lerner, L.S., "Física-Fundamentos e Aplicações", Vol. 4, 1983.