

# Demonstrações de Reflexão Total Interna para Alunos do Segundo Grau

(Demonstration of total internal reflection for high school students)

C. R Mendonça, L. Misoguti, S. R. Muniz, A. M. Tuboy, V. S. Bagnato,  
*Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo*

Recebido 5 de novembro, 1997

In the body of refractive optics, the total internal reflection earns a special attention because of their practical applications, as their use in optical instruments and modern system of telecommunications. Furthermore, this effect sounds like magic to the students, that see it as a mathematical result. In this work, we propose a set of practical demonstrations to illustrate the total internal reflection effect and some of their applications. Particularly, we emphasize the application in optical fibers and the frustrate total internal reflection as examples.

Dentre os vários fenômenos de refração da luz, a reflexão total interna merece atenção especial devido as suas várias aplicações práticas, que vão desde sua utilização em instrumentos ópticos até os mais modernos sistemas de telecomunicação. Além disso, esse efeito muitas vezes parece mágico para o aluno, que o vê apenas como um resultado matemático. Neste trabalho, propomos um conjunto de demonstrações práticas para ilustrar o efeito de reflexão total interna e algumas de suas aplicações. Particularmente, destacamos o princípio de funcionamento da fibra óptica e o fenômeno de reflexão total frustrada como exemplos.

## Sistema Experimental

Para realização das demonstrações usamos o painel vertical descrito na referência [1], juntamente com um sistema de elementos ópticos composto de dois prismas, uma barra retangular e um semicírculo, todos feitos de acrílico espesso (5cm de espessura). Utilizamos também um projetor de "slides" e um obstáculo com uma fenda para produzir apenas um feixe de luz, conforme mostra a Fig. 1.

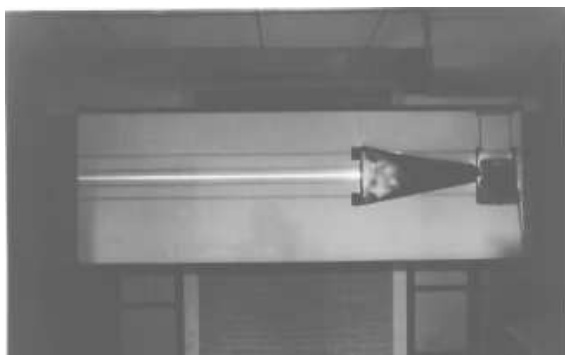


Figura 1. Foto do painel vertical completo com um feixe produzido pelo projetor de slides.

Devido a grande dimensão do painel e dos elementos

ópticos, as demonstrações podem ser visualizadas mesmo a longas distâncias, o que possibilita sua utilização em anfiteatros para um grande número de pessoas.

## Reflexão Total Interna

Antes de iniciarmos as demonstrações, é importante fazermos uma breve revisão da teoria envolvida, para que o aluno entenda melhor os conceitos que serão expostos.

Todo meio material pode ser caracterizado por uma grandeza, que define como a luz se propaga nesse meio. Essa grandeza recebe o nome de índice de refração, e para um meio uniforme é representada por um número,  $n$ . Cada material tem um índice de refração diferente, e toda vez que dois materiais são colocados em contato, temos um interface de separação entre os dois meios, onde de um lado temos um material com índice de refração  $n_1$ , e do outro um com índice de refração  $n_2$ . Essa diferença de índice de refração faz com que ocorra o fenômeno de refração, ou seja, um raio de luz sofre um desvio toda vez que passa de um meio para outro, quando a incidência não é normal a interface. O ângulo de desvio pode ser facilmente calculado por uma relação que recebe o nome de Lei de

Snell [2]. Quando a luz vai de um meio de maior índice de refração (mais refringente) para um de menor índice de refração (menos refringente), pode ocorrer que esta seja completamente refletida na interface, ao invés de sofrer um desvio passando para o outro meio. Esse efeito recebe o nome de reflexão total interna.

Para entendermos melhor como isso ocorre, consideremos raios de luz num determinado meio, por exemplo acrílico ( $n_{acr} = 1.5$ ), incidindo sobre uma superfície além da qual exista um meio menos refringente que o primeiro, por exemplo ar ( $n_{ar} = 1$ ) (ver Fig. 2). A medida em que o ângulo de incidência aumenta, aumenta também o ângulo desvio na interface, até que chega-se a uma situação em que o raio refratado sai tangente à superfície, sendo o ângulo de refração igual à  $90^\circ$ . Para ângulos de incidência maiores que este *ângulo crítico*  $\theta_C$ , não existe raio refratado, ocorrendo o fenômeno chamado de **reflexão total interna** [2]. Essa situação é ilustrada na Fig. 2.

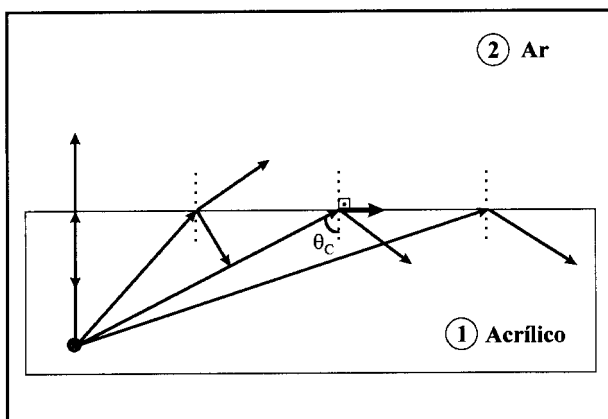


Figura 2. Demonstração do processo de reflexão total da luz; o ângulo crítico é  $\theta_C$ .

Podemos determinar o ângulo crítico fazendo  $\theta_2 = 90^\circ$  na lei de Snell:

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin 90^\circ \quad (1)$$

ou

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (2)$$

Para a interface acrílico-ar,  $\sin \theta_C = n_{ar}/n_{acr} = 1/1.5 = 0.677$ , o que faz  $\theta_C = 41.8^\circ$ . Assim, para qualquer ângulo de incidência na interface maior que  $\theta_C$  teremos a luz totalmente refletida, como num espelho. O processo de reflexão total interna ocorre apenas quando a luz provém do meio mais refringente para o menos refringente, de modo a satisfazer a lei de Snell.

Esta explicação é ilustrada com a utilização de um semicírculo de acrílico, onde a incidência na face circular

(interface ar-acrílico) é sempre normal a superfície, de maneira que o feixe não sofre desvio nessa interface. Variando o ângulo do semicírculo com relação ao feixe, estamos variando o ângulo de incidência na interface acrílico-ar, que é plana. Para um ângulo de incidência menor que o ângulo crítico  $\theta_C$ , podemos observar um feixe refletido pela interface e um feixe refratado (ver Fig. 3). Variando o ângulo de incidência de maneira que ele seja maior que  $\theta_C$ , podemos observar que não há mais o feixe refratado, mas apenas o feixe refletido, (ver Fig. 4), conforme prevê a lei de Snell. Desta forma, observamos na prática o fenômeno de reflexão total interna.



Figura 3. Semicírculo com incidência de um feixe num ângulo menor que o ângulo crítico. Aqui temos um feixe refratado e outro refletido na interface plana.



Figura 4. Semicírculo com incidência de um feixe num ângulo maior que o ângulo crítico, que resulta no processo de reflexão total interna.

### Prismas de reflexão total

Em muitos instrumentos ópticos, como por exemplo binóculos, periscópios e máquinas fotográficas, o fenômeno

de reflexão total interna é usado para desviar a luz, através de prismas.

Dentro do prisma, a luz se propaga do meio mais refringente para o menos refringente, podendo o ângulo de incidência na segunda face, ser maior que o ângulo crítico  $\theta_C$ . Nesta situação os raios luminosos no interior do prisma sofrerão o processo de reflexão total interna. O mais comum é o prisma cuja seção é um triângulo retângulo isósceles. Para os raios que incidem perpendicularmente à uma das faces, há reflexão total, obtendo-se raios emergentes paralelos (Fig. 5a) ou perpendiculares (Fig. 5b) aos raios incidentes [3].

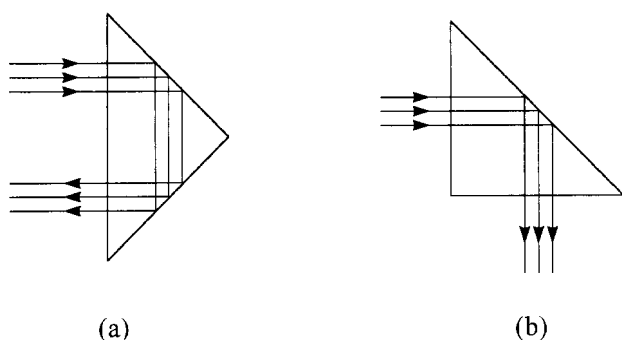


Figura 5. Prisma de reflexão total interna.

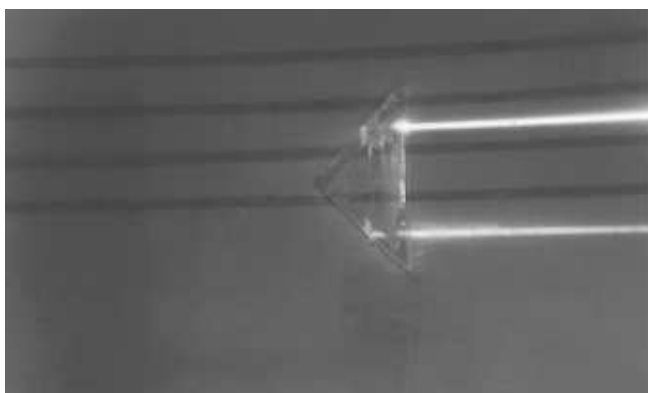


Figura 6. Foto do prisma demonstrando o processo de reflexão total interna: semelhante ao "olho de gato".

Este processo pode ser demonstrado com a utilização de um prisma isósceles, montado conforme ilustra a Fig. 6. Nesta disposição, o feixe que emerge do prisma volta paralelo ao feixe incidente, devido ao processo de reflexão total que ocorre nas duas superfícies internas do prisma.

Deve ficar claro para o aluno que, neste caso, o prisma está funcionando como um espelho, devido ao processo de reflexão total interna. Os prismas de reflexão total são muito utilizados em dispositivos por apresentarem algumas vantagens em relação aos espelhos. Uma das vantagens é que os prismas são praticamente 100% refletivos enquanto

que superfícies metálicas, dificilmente atingem esse valor. Além disso, eles permitem uma maior compactação dos equipamentos, pois aumentam o caminho óptico da luz, devido ao seu alto índice de refração.

Outra aplicação bastante conhecida dos prismas de reflexão total, são os dispositivos denominados de "olho de gato", utilizados como sinalizadores nas estradas rodoviárias. Estes dispositivos funcionam de maneira semelhante a Fig. 5a, fazendo com que a luz emitida pelos faróis dos carros seja refletida de volta, de modo a facilitar a visualização das estradas no escuro.

### Fibra óptica

Outra importante aplicação do efeito de reflexão total interna são as fibras ópticas. Podemos entender como a luz é conduzida no interior das fibras, através do exemplo de uma barra transparente [3]. Se um feixe de luz atinge a extremidade de uma barra transparente, com ângulo de incidência maior que  $\theta_C$ , Fig. 7, este será totalmente refletido internamente, ficando aprisionado dentro da barra, mesmo que esta tenha uma curvatura, não muito acentuada.

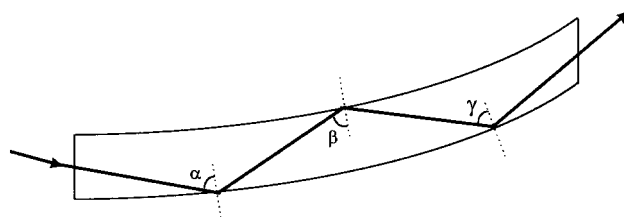


Figura 7. Raios de luz "presos" por reflexões internas;  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são sempre maiores que  $\theta_C$ .

Podemos demonstrar esse efeito de canalização, utilizamos uma barra de acrílico, como mostra a Fig. 8. Nesta figura, podemos observar as várias reflexões que ocorrem no interior da barra, gerando a condução da luz. Um feixe de fibras finas se comportará da mesma maneira, tendo a vantagem de ser flexível e ocupar menos espaço físico.

O fenômeno de reflexão total é usado atualmente para fazer a luz acompanhar finíssimas fibras de vidro, mesmo que estas fibras, muito flexíveis devido ao pequeno diâmetro (0.01 a 0.15mm), se encurvem ou se entrelacem. A canalização é conseguida por reflexão total do feixe de luz, que penetra na fibra com inclinação pequena com relação ao eixo desta, e atinge as paredes que a separam do ar com um ângulo de incidência superior ao ângulo crítico. Neste caso, ocorre a reflexão total, e o feixe de luz continua no interior da fibra, mesmo quando esta sofre uma curvatura qualquer.

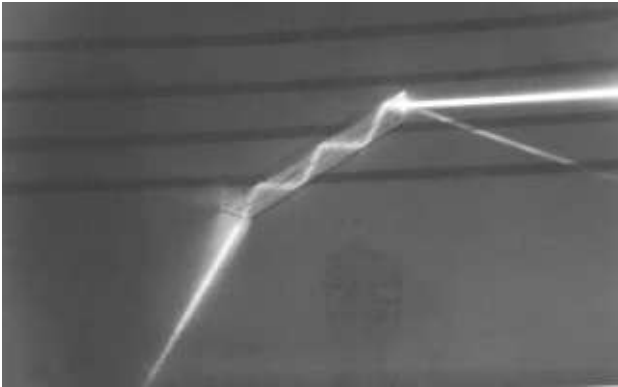


Figura 8. Foto de uma barra de acrílico conduzindo o feixe de luz através de reflexões totais internas.

As fibras ópticas possuem um grande número de aplicações práticas importantes, por exemplo, nos endoscópios usados em medicina na diagnose e operação de órgãos como o coração, os pulmões ou o estômago. Esses aparelhos são introduzidos no paciente e permitem ao médico a visualização das paredes internas destes órgãos.

As fibras ópticas são ainda, um dos elementos fundamentais na tecnologia atual de telecomunicação, permitindo altas taxas de transmissão de informações. Estas fibras utilizam vidros especiais com baixa absorção, que permitem a “canalização” da luz por distâncias da ordem de 100km sem perdas apreciáveis. Os vidros utilizados para comunicação possuem duas “janelas ópticas” (máxima transparência), para luz infra-vermelha (região do espectro eletromagnético que não pode ser vista pelo olho humano), mais especificamente nos comprimentos de onda de  $1.33\mu\text{m}$  e  $1.55\mu\text{m}$ .

### Destruindo a reflexão total interna

Para um melhor entendimento do processo de reflexão total interna e da importância da existência da interface para sua ocorrência, realizamos um experimento onde frustramos o processo de reflexão total, através da eliminação da interface.

O que muitos não sabem é que quando ocorre o processo de reflexão total interna, uma pequena fração da luz penetra no segundo meio (menos refringente), enquanto a maior parte da luz é refletida. Essa pequena fração que passa para o lado menos refringente, percorre uma distância da ordem do comprimento de onda da luz, ou seja, aproximadamente  $1\mu\text{m}$  ( $1\mu\text{m} = 1$  micrômetro, é uma subdivisão do metro e equivale a um metro dividido em um milhão de partes iguais), até que seja completamente atenuada. Embora essa luz não possa ser observada a olho nu, podemos fazer um experimento onde comprovamos sua existência. Primeiramente, deve-se colocar o prisma da maneira ilustrada na Fig. 6, de forma que, devido ao

processo de reflexão total, o feixe emergente saia paralelo ao incidente. Em seguida, coloca-se um pequeno prisma na posição onde ocorre a primeira reflexão total, conforme mostra a Fig. 9, e derrama-se um pouco de álcool para que a junção entre as superfícies fique preenchida, ou seja, elimina-se o ar dessa região. Enquanto a região de contato vai sendo preenchida com álcool, pode-se observar o surgimento de um feixe de luz do lado esquerdo do prisma (ver Fig. 9), que caracteriza a eliminação da interface acrílico-ar e portanto do processo de reflexão total.

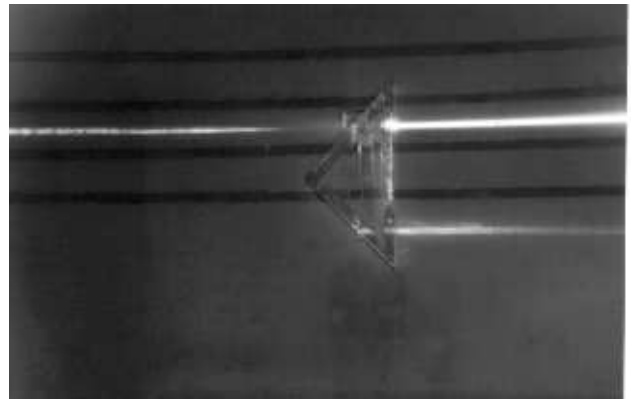


Figura 9. Foto do sistema que demonstra o processo de reflexão total frustrada.

A explicação para esse efeito é, na verdade, bastante simples. A pequena fração de luz que passa para o segundo meio, durante o processo de reflexão total, encontra agora uma fina camada de álcool com índice de refração  $n_{\text{alc}} \approx 1.35$ . Assim, a condição  $\text{sen}\theta_C = n_{\text{ar}}/n_{\text{acr}} = 1/1.5 \Rightarrow \theta_C \approx 42^\circ$  deixa de ser satisfeita pois o novo ângulo crítico será dado por  $\text{sen}\theta_C = n_{\text{alc}}/n_{\text{acr}} = 1.35/1.5 \Rightarrow \theta_C \approx 64^\circ$ . Desta forma, a luz continua sua propagação ao invés de ser atenuada. Este fenômeno é denominado de reflexão total frustrada, e mostra o papel fundamental que a interface, com dois meios de índice de refração diferentes, desempenha no processo de reflexão total.

### Conclusões

A utilização do painel vertical é uma excelente maneira para demonstrar e visualizar conceitos de óptica refrativa, tornando o seu entendimento um processo mais agradável para o estudante de segundo grau. As demonstrações realizadas no painel vertical estão sendo filmadas para compor uma série de vídeos educativos, elaborados pelo grupo de Óptica, que estarão à disposição dos interessados brevemente.

**Referências**

1. L. Misoguti, C. R. Mendonça, A. M. Tuboy, R. Habesch, V. S. Bagnato, Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. **19** n.4, 1997.
2. *Física 4* por D. Halliday e R. Resnick, 4a edição
3. Tradução: Antonio Leite Videira, Livros Técnicos e Científicos Editora, 1978.  
*Física*, Vol. 2; por F. W. Sears e M. W. Zemansky, Tradução: José de Lima Accioli, Livros Técnicos e Científicos Editora, 1977.