

# **Material teórico – Óptica Geométrica III**

## **Propriedades básicas e leis da refração**

**Segundo Ano do Ensino Médio**

**Autor: Thales Azevedo**

**Revisor: Lucas Lima**



## 1. Introdução

Quando demos início ao estudo do fenômeno da reflexão da luz, vimos que, ao encontrar a superfície que separa dois meios diferentes, um raio luminoso pode tanto ser transmitido quanto refletido. Vimos também que as leis da reflexão são essenciais para compreender o funcionamento dos espelhos e analisar as imagens formadas por eles.

O caso em que o raio luminoso é transmitido, passando a se propagar em um novo meio, está relacionado com o fenômeno da **refração** da luz, cujo estudo será iniciado neste texto. Em particular, veremos que a velocidade de propagação da luz depende do meio, o que levará naturalmente ao conceito de **índice de refração**. Tal alteração na velocidade de propagação vem, em geral, acompanhada de uma mudança na direção do raio luminoso, que é quantificada pela chamada **lei de Snell–Descartes**, como também veremos.

Assim como o entendimento dos espelhos está diretamente ligado ao fenômeno da reflexão da luz, a compreensão do fenômeno da refração da luz é condição imprescindível para o estudo dos instrumentos óticos conhecidos como **lentes delgadas**, que abordaremos mais adiante. Além disso, a refração da luz está por trás de muitos fenômenos interessantes, como, por exemplo, a **decomposição da luz branca por um prisma**, a **formação do arco-íris** e o fato de que uma piscina cheia aparenta ser mais rasa do que realmente é, como ilustra a figura 1.



Figura 1: Uma piscina com fundo plano parece ter profundidade variável devido ao fenômeno da refração da luz.

## 2. Índice de refração absoluto

Como antecipado na introdução, a velocidade com que a luz viaja depende do meio em que se dá a propagação. Essa velocidade é máxima quando o meio em questão

é o vácuo, ou seja, na ausência de matéria. De fato, a velocidade da luz no vácuo é uma das constantes fundamentais da natureza, denotada por  $c$  e com o valor aproximado de

$$c \approx 300.000 \text{ km/s.}$$

De acordo com a Teoria da Relatividade de Einstein, que vem sendo consistentemente corroborada por diversos experimentos desde a sua proposição há mais de um século, esta é uma velocidade limite no nosso universo, sendo impossível transmitir informação com uma velocidade superior a  $c$ .

Quando a luz propaga-se em um meio material, portanto, a velocidade de propagação naquele meio, que podemos denotar por  $v$ , será necessariamente inferior a  $c$ . Nesse contexto, define-se o *índice de refração absoluto*, ou simplesmente *índice de refração* daquele meio, como a razão entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade com que ela se propaga no meio em questão. Ou seja, o índice de refração  $n$  é definido como

$$n = \frac{c}{v}.$$

A partir da definição, é imediato deduzir que o índice de refração do vácuo é igual a 1 (porque neste caso  $v = c$ ), enquanto para qualquer meio material teremos um valor de  $n$  maior do que 1 (porque neste caso  $v < c$ ). A tabela 1, a seguir, traz alguns exemplos de meios de propagação e seus respectivos índices de refração. Um dado meio é dito *mais refringente* que outro quando o índice de refração daquele é maior que o do outro.

Meio de propagação	Índice de refração
Ar	1,0003
Água	1,3321
Álcool	1,36
Acrílico	1,49
Diamante	2,42

Tabela 1: Exemplos de meios de propagação e seus respectivos índices de refração.

Note que o índice de refração do ar é muito próximo de 1, motivo pelo qual na grande maioria das aplicações é possível tomá-lo como igual a 1. Além disso, geralmente os materiais possuem índice de refração menor que 2, sendo o diamante uma das poucas exceções.

### 3. Leis da refração e algumas de suas consequências

Conforme vimos, ao atingir a fronteira que separa dois meios distintos, um raio luminoso é parcialmente refletido e parcialmente transmitido, ou seja, sofre refração. A figura 2 ilustra essa situação. Note que os raios refletidos e refratados possuem intensidade menor que a do raio incidente, como esperado por conservação de energia. As relações entre essas intensidades dependem do ângulo de incidência e também das propriedades dos meios em questão, e estão fora do escopo da Óptica Geométrica, sendo tema de cursos avançados de Eletromagnetismo.

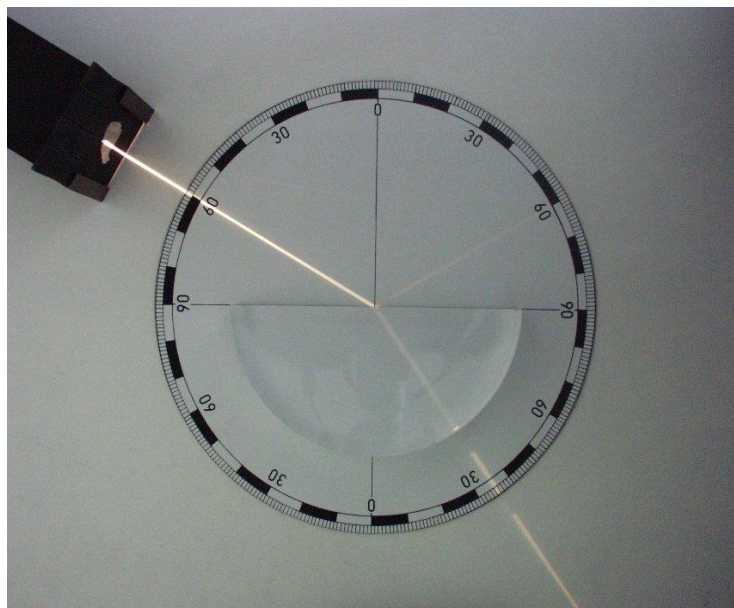


Figura 2: Reflexão e refração de um raio de luz.

Tendo sido a reflexão luminosa extensivamente estudada, vamos nos concentrar agora apenas no fenômeno da refração, representado na figura 3. Naquela figura, vemos um raio luminoso que é transmitido do meio A para o meio B. O ângulo de incidência é denotado por  $\theta_A$ , enquanto que o ângulo de refração é denotado por  $\theta_B$ , ambos medidos em relação à reta normal  $n$ .

Dadas essas definições e a figura 3, podemos enunciar claramente as duas leis que caracterizam o fenômeno da refração:

1. O ângulo de incidência e o ângulo de refração estão relacionados com os índices de refração dos meios através da chamada lei de Snell–Descartes:

$$n_A \text{sen} \theta_A = n_B \text{sen} \theta_B.$$

2. O raio refratado sempre pertence ao plano definido pelo raio incidente e a reta normal, denominado *plano de incidência*.

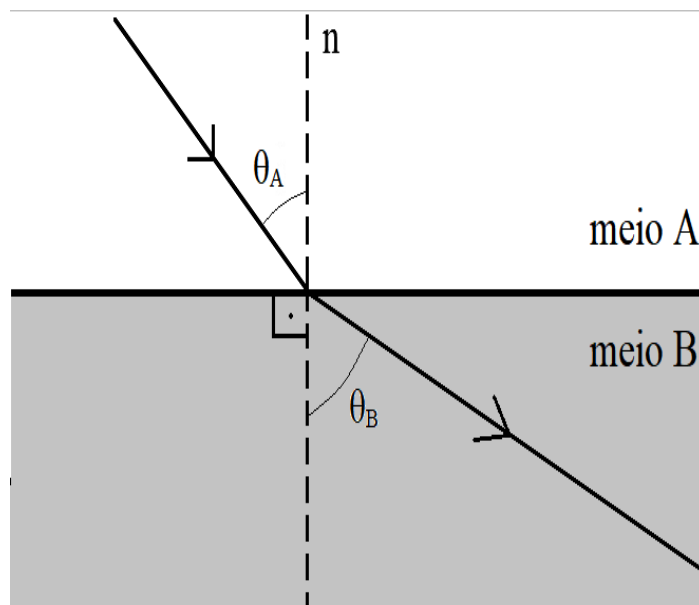


Figura 3: Representação da refração de um raio luminoso.

A lei de Snell–Descartes quantifica a mudança na direção de propagação do raio incidente devido à refração. De fato, é essa aparência de raio “quebrado” que motiva o nome “refração” (palavra derivada do latim *refractus*, que pode ser traduzida exatamente como “quebrado”). Essa lei está relacionada com a determinação da trajetória que deve ser percorrida caso desejemos sair de um ponto no meio A e chegar a um ponto no meio B no menor tempo possível, levando em conta que as velocidades de propagação nos dois meios são diferentes. Pode-se mostrar que a trajetória desejada é precisamente aquela que segue da lei de Snell–Descartes.

Através da lei de Snell–Descartes, podemos deduzir também que, na situação representada na figura 3, o meio A é mais refringente que o meio B, ou seja,  $n_A > n_B$ . De fato, podemos reescrever aquela lei na forma

$$\frac{n_A}{n_B} = \frac{\text{sen}\theta_B}{\text{sen}\theta_A}.$$

Agora, com base na figura, vemos que  $\theta_B > \theta_A$ . Além disso, para  $0 \leq x \leq 90^\circ$ , a função *sen* é crescente, ou seja,  $\theta_B > \theta_A$  implica  $\text{sen}\theta_B > \text{sen}\theta_A$ . Logo, concluímos que

$$\frac{n_A}{n_B} > 1$$

$$n_A > n_B,$$

conforme havíamos antecipado. Na verdade, tal conclusão pode ser generalizada da seguinte forma: ao ser transmitido de um meio mais refringente para um meio menos refringente, o raio luminoso afasta-se da reta normal. Pelo princípio da reversibilidade dos raios luminosos, é imediato deduzir também o resultado oposto: sempre que um raio luminoso passa de um meio menos refringente para um meio mais refringente, ele se aproxima da reta normal. (Note que esses resultados são válidos somente quando o ângulo de incidência é diferente de zero.)

*Exemplo:* Como exemplo da aplicação da lei de Snell–Descartes, podemos determinar o valor aproximado do índice de refração do material que aparece na figura 2. Primeiro, podemos supor que o meio no qual o objeto está inserido é o ar e, portanto, tomar  $n_A = 1$ . Além disso, a figura permite-nos concluir que  $\theta_A = 60,0^\circ$  e  $\theta_B = 35,5^\circ$ . Substituindo tais valores na lei de Snell–Descartes, ficamos com

$$\begin{aligned}n_A \operatorname{sen} \theta_A &= n_B \operatorname{sen} \theta_B \\1 \cdot \operatorname{sen}(60,0^\circ) &= n_B \cdot \operatorname{sen}(35,5^\circ) \\n_B &= \frac{\operatorname{sen}(60,0^\circ)}{\operatorname{sen}(35,5^\circ)}.\end{aligned}$$

Finalmente, com o auxílio de uma calculadora, encontramos  $n_B \approx 1,49$ . Como o esperado,  $n_B > n_A$ , uma vez que o raio refratado aproxima-se da normal. Além disso, comparando com os dados expostos na tabela 1, vemos que o objeto da figura 2 poderia ser feito de acrílico.

#### 4. Referências

[1] <https://pt.wikipedia.org/wiki/Refra%C3%A7%C3%A3o> (acesso em 12/12/2020)

[2] <https://en.wikipedia.org/wiki/Refraction> (acesso em 12/12/2020)