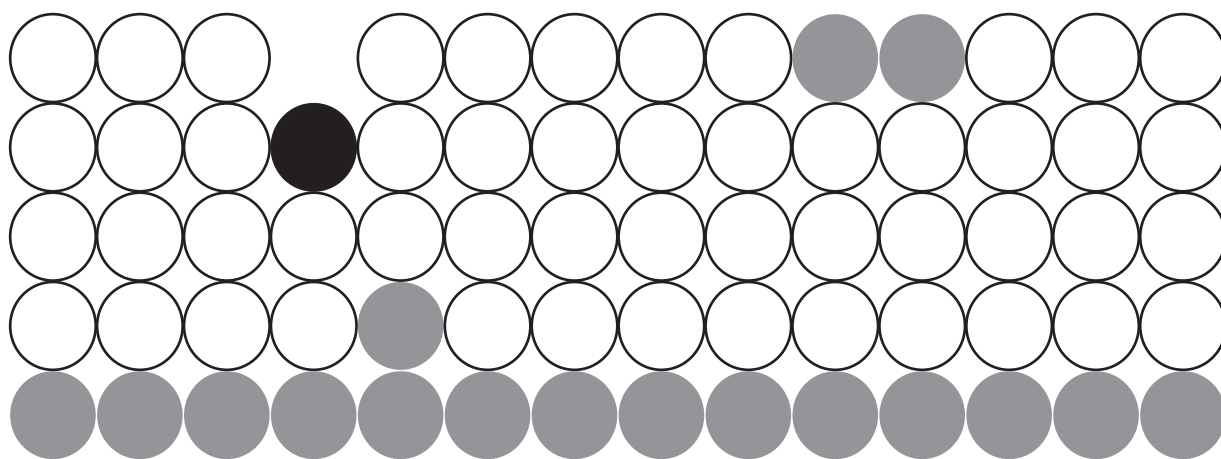


TEXTOS DE APOIO AO PROFESSOR DE FÍSICA

v.18 n.2

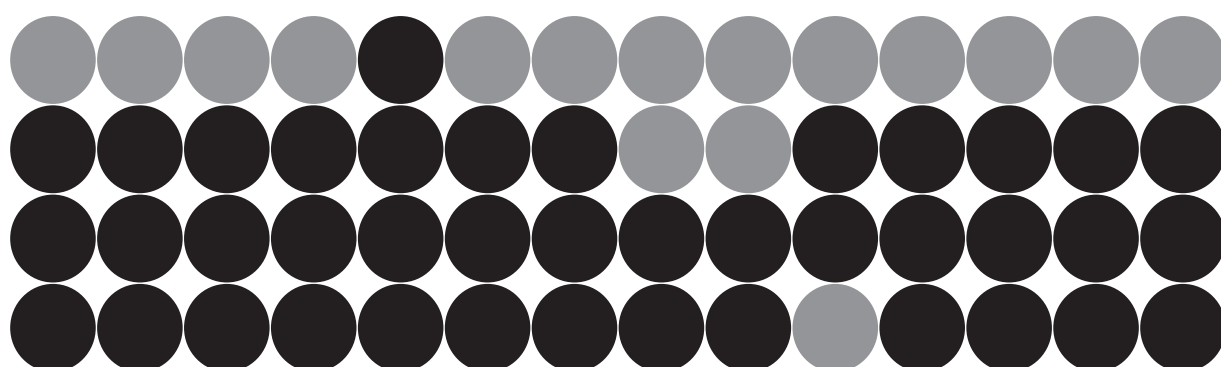
2007

ISSN 1807-2763



CONCEPÇÕES ALTERNATIVAS EM ÓPTICA

Voltaire de Oliveira Almeida
Carolina Abs da Cruz
Paulo Azevedo Soave



Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

Textos de Apoio ao Professor de Física, v.18 n.2 2007
Instituto de Física – UFRGS
Programa de Pós – Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física

Editores: Marco Antonio Moreira
Eliane Angela Veit

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecária Carla Flores Torres CRB 10/1600)

A447c Almeida, Voltaire de Oliveira

Concepções alternativas em óptica / Voltaire de Oliveira Almeida, Carolina Abs da Cruz, Paulo Azevedo Soave. – Porto Alegre : UFRGS, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, 2007.

74p. : il. (Textos de apoio ao professor de física / Marco Antonio Moreira, Eliane Angela Veit, ISSN 1807-2763; v. 18, n.2)

Produto do trabalho de conclusão do Mestrado Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, orientado pelo Prof. Dr. Marco Antonio Moreira.

1. Ensino de Física. 2. Óptica 3. Concepções Alternativas I. Cruz, Carolina Abs da II. Soave, Paulo Azevedo III. Título. IV. Série.

CDU 53:37
PACS 01.40.

Impressão: Waldomiro da Silva Olivo
Intercalação: João Batista C. da Silva

TEXTOS DE APOIO AO PROFESSOR DE FÍSICA

CONCEPÇÕES ALTERNATIVAS EM ÓPTICA^{1,2}

**Voltaire de Oliveira Almeida
Carolina Abs da Cruz
Paulo Azevedo Soave**

¹ Trabalho de iniciação científica desenvolvido sob orientação do Professor Marco Antonio Moreira, Instituto de Física, UFRGS.

² Os autores agradecem ao Professor Silvio Luiz Cunha, do Instituto de Física da UFRGS, a revisão crítica do original.

SUMÁRIO

Introdução.....	5
O que são concepções alternativas?	7
Natureza e propagação da luz	9
Concepções alternativas em Óptica.....	13
Formação de imagens através de orifícios e sombras com obstáculos	17
Cores	19
Reflexão.....	23
Refração	29
Difração	33
Interferência.....	37
Polarização	49
Espelhos.....	55
Lentes	63
Considerações finais	67
Bibliografia	69

Introdução

O ensino de Ciências, em qualquer nível de instrução, pode sofrer influência das pré-concepções errôneas que os alunos levam para a sala de aula. Esse conhecimento prévio, equivocado, sobre os conceitos científicos, é denominado *concepção alternativa*. Em outras palavras, concepções alternativas são significados contextualmente errôneos, não compartilhados pela comunidade científica (SILVEIRA, 1993). É possível que essas concepções sejam reforçadas também em sala de aula, por exemplo, pelo uso de metáforas inadequadas, na tentativa de apresentar ao aluno alguma analogia encontrada no cotidiano. A partir disso, torna-se evidente a importância de salientar as concepções alternativas para os professores de Ciências, em particular aos de Física, a fim de que direcionem o ensino à mudança conceitual e não, inadvertidamente, ao reforço dessas pré-concepções. As pesquisas realizadas sobre o ensino de Ciências permitem identificar essas concepções, revelando o que os alunos pensam em relação aos conceitos científicos, tanto antes como após a instrução formal, que, em freqüentes ocasiões, não tem sucesso nem na mudança conceitual nem na aprendizagem significativa de conceitos científicos. Partindo dessas considerações, este texto tem como objetivo apresentar as principais concepções alternativas referentes a conceitos da Óptica Geométrica e da Óptica Física, encontradas por pesquisas na área de Ensino de Ciências, que envolveram alunos dos níveis fundamental, médio e superior, com o intuito de auxiliar no ensino dos conteúdos dessas áreas da Física. Além disso, também são apresentadas, resumidamente, as concepções cientificamente aceitas para cada tópico apresentado.

O que são concepções alternativas?

De acordo com o que já foi mencionado na introdução deste texto, concepções alternativas são modelos, construtos, significados contextualmente errôneos, ou seja, não compartilhados pela comunidade científica. Podem ser encontradas tanto em estudantes dos níveis escolares fundamental e médio como em alunos de graduação. Tais concepções são, normalmente, construídas pelo sujeito em sua interação com o mundo físico, isto é, para dar sentido a eventos do mundo em que vive. Mas é possível também que tais concepções sejam reforçadas ou construídas em sala de aula, por exemplo, pelo uso de metáforas inadequadas ou pouco esclarecidas. Nesse sentido, o surgimento de uma concepção alternativa pode ocorrer devido à falta de compreensão do estudante sobre o conteúdo apresentado. Se essa dificuldade não for identificada pelo professor durante as aulas ou na avaliação do desempenho do estudante, pode se tornar um verdadeiro obstáculo pedagógico no futuro. Dessa forma, quando o aluno atinge novos estágios do ensino formal, por exemplo, traz consigo esse conhecimento prévio que, possivelmente, é muito resistente à mudança conceitual, por ser composto de “*concepções alternativas aprendidas de modo significativo*” (MOREIRA e GRECA, pg. 305, 2003). Ademais, a maneira com a qual o conhecimento científico é divulgado na mídia popular pode induzir esse tipo de concepção³. Nossa cultura parece não deixar espaço à preparação para a aquisição do conhecimento científico, chegamos à *escola formal* com concepções sobre a natureza baseadas nas crenças que se apresentam em nossa experiência diária, comumente passadas para gerações seguintes. Além disso, desde muito cedo, somos acostumados a conceber a Física, a Química e a Matemática como disciplinas muito difíceis para aprender, gerando uma espécie de repulsa em estudá-las. Talvez, isso seja mais crítico ainda com os conteúdos de Física, pois há alunos que solucionam equações matemáticas do tipo polinômios de quarta ordem, por exemplo, mas não conseguem resolver uma equação linear em um problema de Física, quando, em muitos casos, é pura aplicação de fórmulas. Por outro lado, essa “mecânica” no desenvolvimento de equações matemáticas pode estar dissimulando as concepções alternativas que os estudantes mantêm.

³ Nesse caso, seriam fruto de representações sociais (MOREIRA, 2003).

Natureza e propagação da luz

A luz é uma onda eletromagnética de propagação retilínea (meios homogêneos) com altíssima velocidade ($c \approx 3 \times 10^8$ m/s) de alcance infinito no vácuo. Galileu foi o primeiro a tentar medir a velocidade de propagação da luz a partir da determinação do tempo necessário para a luz percorrer o dobro da distância entre dois observadores. Nessa experiência, um observador A ativa uma lanterna para um observador B, que, ao enxergar a luz, ativa sua lanterna também. De acordo com a experiência de Galileu, o tempo medido entre a emissão da luz pela lanterna do observador A e sua observação da luz emitida pela lanterna do observador B corresponde ao tempo para a luz viajar o dobro da distância entre os dois observadores.

Em 1657, Pierre de Fermat encontrou um novo método para determinar a trajetória dos raios luminosos, baseado na idéia de que a natureza atua sempre pelo caminho temporalmente mais curto, ou seja, de todos os caminhos possíveis para ir de um ponto ao outro, a luz segue aquele que é percorrido no tempo mínimo, o conhecido Princípio de Fermat. Como a velocidade da luz é uma constante, decorre que o tempo mínimo equivale ao caminho óptico mínimo e, portanto, à distância mínima (válido para meios homogêneos), ou seja, o Princípio de Fermat equivale à propagação retilínea da luz (NUSSENZVEIG, 1998). Entretanto, facilmente se percebe os limites desse modelo (raio de luz) ao considerarmos os efeitos ondulatórios da luz. A teoria ondulatória da luz sugerida por Christian Huygens em 1678, explica os efeitos da refração e reflexão em termos de ondas e atribui um significado físico ao índice de refração, que pode ser definido para cada meio como a razão entre a velocidade da luz no espaço livre e a velocidade da luz em um meio (HALLIDAY et al, 1995).

De acordo com essa aproximação, temos

$$n = \frac{c}{v} \quad \text{índice de refração}$$

Além disso, a teoria ondulatória de Huygens nos permite estudar os efeitos de interferência e difração das ondas luminosas⁴. O princípio fundamental dessa teoria é o seguinte:

Todos os pontos de uma frente de onda funcionam como fontes pontuais para ondas secundárias. Depois de um tempo t , a nova posição da frente de onda será dada por uma superfície tangente a essas ondas secundárias.

⁴ Considere-se “ondas luminosas”, as localizadas na faixa visível do espectro eletromagnético.

Entretanto, foi James Clerck Maxwell quem mostrou que o estudo da “luz visível”, abordado na Óptica, é um ramo do Eletromagnetismo, pois um feixe de luz é uma configuração dos campos elétrico e magnético que se propagam, definindo a luz como onda eletromagnética. A partir de suas equações, Maxwell deduziu a equação da onda, satisfeita pelos campos elétrico e magnético, com velocidade de propagação da luz.

Partindo das equações

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \nabla \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad \text{Escritas para propagação de uma onda eletromagnética no espaço livre.}$$

aplicando o rotacional na equação da esquerda

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\nabla \times \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \nabla \times \vec{B}$$

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\frac{\partial}{\partial t} \left[\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right] = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

Onde “ μ_0 ” é a constante conhecida como permeabilidade do vácuo e vale exatamente $4\pi \times 10^{-7}$ H/m. A constante “ ϵ_0 ” é denominada permissividade do vácuo e seu valor é $8,854 \times 10^{-12}$ F/m.

Usando a identidade vetorial $\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E}$, e o fato de que $\rho = 0$ e, conseqüentemente, $\nabla \cdot \vec{E} = 0$, no vácuo, podemos escrever

$$-\nabla^2 \vec{E} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \Rightarrow \nabla^2 \vec{E} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

que pode ser reescrita como

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad \text{onde } c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

Equação da onda no espaço livre.

A mesma demonstração pode ser desenvolvida para o campo magnético. A equação da onda demonstra que o campo elétrico oscilante se propaga no vácuo com a velocidade da luz (FOWLES, 1989). Maxwell interpretou esse resultado não como uma mera casualidade, mas que indicava ser a luz uma onda eletromagnética.

Contudo, em 1905, Albert Einstein sugeriu uma nova teoria para o tratamento da luz e citou o efeito fotoelétrico como uma de suas aplicações. De acordo com essa teoria, a radiação eletromagnética tem sua energia quantizada em pacotes concentrados, os quais, algum tempo depois, foram chamados de *fótons*. Einstein supôs que um pacote de energia está inicialmente localizado em um pequeno volume do espaço, permanecendo assim enquanto se afasta da fonte com velocidade c . Também supôs que a energia de cada pacote, ou fóton, é proporcional à frequência ν da onda de luz de acordo com a seguinte equação:

$$E = h\nu$$

onde $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s é a constante de Planck.

Com esse novo tratamento para a luz, foi possível explicar os efeitos observados por Heinrich Hertz, até então inexplicáveis pela teoria ondulatória da luz, que em suas experiências com ondas eletromagnéticas, por volta de 1886, constatou que uma descarga elétrica entre dois eletrodos ocorria mais facilmente quando estes eram iluminados pela luz violeta. Essa descarga é facilitada pela emissão de elétrons do catodo devido ao ganho de energia da luz incidente, sendo arrancados da superfície do material, conforme demonstrado por Hallwachs. Tal efeito, a emissão de elétrons de uma superfície, devido à incidência de luz, é o já citado efeito fotoelétrico (EISBERG, 1979). Durante o processo fotoelétrico, de acordo com a suposição de Einstein, um fóton é totalmente absorvido por um elétron no fotocatodo e quando o elétron é arrancado da superfície do metal tem energia cinética dada por

$$K = h\nu - w$$

onde w é a energia mínima para remover o elétron do metal, conhecida como *função trabalho*.

Dessa forma, a luz tem um comportamento dual, apresentando propriedades ondulatórias e corpuscular - propaga-se como uma onda eletromagnética, mas interage com a matéria como partícula. A combinação dessas duas teorias resulta na Óptica Quântica.

Concepções alternativas em Óptica

As principais concepções alternativas identificadas nas pesquisas em Ensino de Física, relacionadas à natureza e propagação da luz são:

a) *A luz se vê*

A visibilidade da luz, independente do meio, é uma concepção detectada em várias pesquisas realizadas. Os alunos consideram que a luz pode ser observada sem que esteja incidindo nos olhos do observador. Não consideram que a luz é refletida em várias direções por partículas suspensas no ar. Provavelmente, tal concepção surja de forma natural no cotidiano, quando a experiência diária não oferece a propagação no espaço livre.

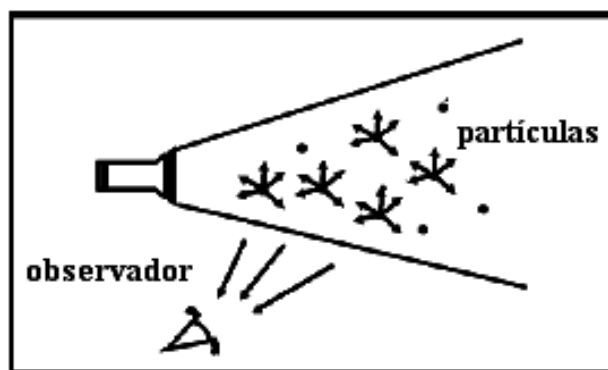


Figura 1 - Visualização das partículas suspensas no ar.

Se a luz produzida pela lanterna da figura 1 estivesse propagando no vácuo, não ocorreria o seu espalhamento e não poderíamos percebê-la na posição do observador.

b) *Alcance finito da luz*

Quanto maior a intensidade da fonte, maior será o alcance da luz, independentemente de se existe ou não perda de energia no meio de propagação. Alguns alunos acreditam que a luz se propaga por uma distância maior no escuro do que em um ambiente claro. Essa concepção alternativa viola um dos princípios fundamentais da Física: a conservação da energia. Pois, independentemente da intensidade da fonte, o alcance da luz, no espaço livre, é infinito; não existe meio para absorver a energia eletromagnética.

c) *Raios paralelos*

Alguns estudantes confundem propagação retilínea (figura 2b) com propagação paralela (figura 2a), considerando somente a emissão de raios paralelos. Uma das possíveis causas para esta concepção alternativa é a representação de raios paralelos para fontes distantes descritas em livros didáticos. Nestas descrições nem sempre é explicitado que se pode considerá-los paralelos para distâncias suficientemente grandes do observador à fonte, de forma que o ângulo entre os raios luminosos seja desprezível, ou seja, próximo a zero. Descrições desse tipo são comumente realizadas durante o estudo de formação de imagens em lentes e espelhos esféricos. Possivelmente, o aluno memoriza a imagem dos raios paralelos que incidem, por exemplo, no espelho côncavo, e aplicam esse modelo em qualquer caso que ocorra a propagação da luz.

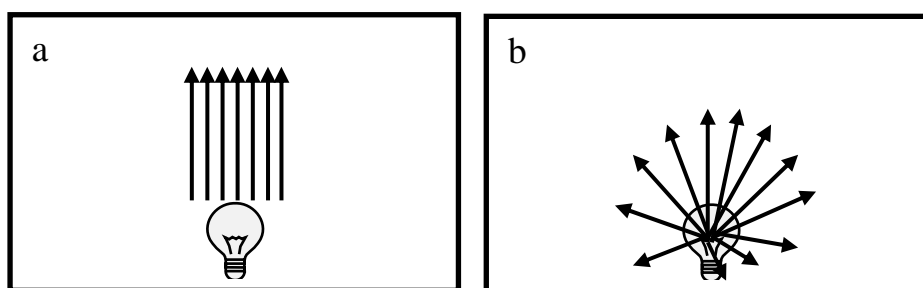


Figura 2 - Representação dos raios paralelos (a) e a mais adequada nessa abordagem (b).

d) *Raios lanterna*

Alguns alunos acreditam, erroneamente, que seja emitido somente um raio de cada ponto da fonte (figura 3a), ao invés de cada ponto emitir em todas as direções (figura 3b). Uma das razões para esta concepção pode ser a forma com a qual os livros representam a emissão de raios por uma fonte. Nessas representações não está explícito que são utilizados apenas os raios relevantes para a situação em questão.

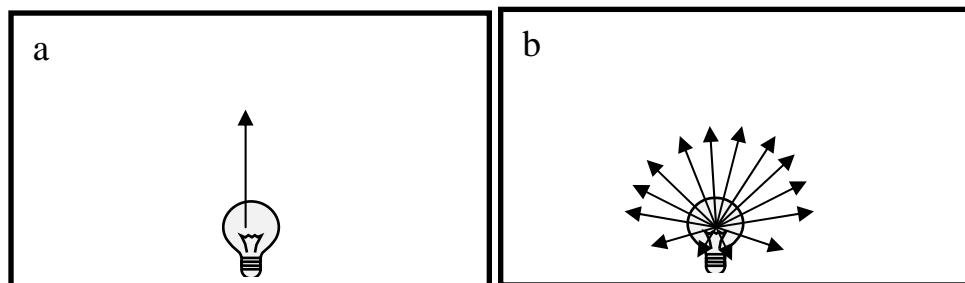


Figura 3 - Representação dos raios lanterna (a) e a científica (b).

A figura 3a representa a emissão da luz do ponto central da fonte, de acordo com a concepção alternativa.

e) *Conceitos separados de luz*

Luz solar e luz artificial são interpretadas como tendo naturezas diferentes. Alguns consideram luz solar como “luz natural”. Tal concepção pode estar sendo reforçada durante as aulas, quando o professor faz referência à luz de uma lâmpada como artificial. Deve-se enfatizar que tal denominação é adotada apenas por ser produzida por um dispositivo construído pelo homem, mas que é luz tão natural quanto a luz do Sol.

f) *Banho de luz*

A luz é entendida como um fluido estático, que ocupa todo o espaço, envolvendo os objetos, mergulhados nesse meio, permitindo que sejam vistos pelo observador, sem haver relação alguma entre o olho do observador e a luz que chega nele.

Formação de imagens através de orifícios e sombras com obstáculos

Um objeto opaco colocado entre a fonte e um anteparo (figura 4), interrompe a passagem de parte da luz, originando a sombra. O contorno desta sombra pode ser definido pelas retas que saem da fonte e tangenciam o objeto (ALVARENGA, p. 708, 1993). Um objeto (luminoso ou iluminado) quando colocado em frente a um orifício emite luz em todas as direções de cada ponto. Um estreito feixe que parte de cada ponto passa através do orifício, dando origem a uma imagem semelhante a ele, mas invertido (figura 5).

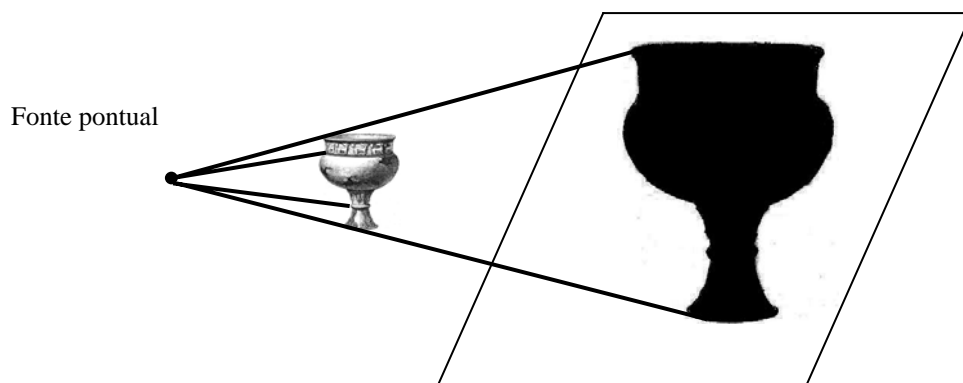


Figura 4 - Formação da sombra de um objeto iluminado por uma fonte pontual.

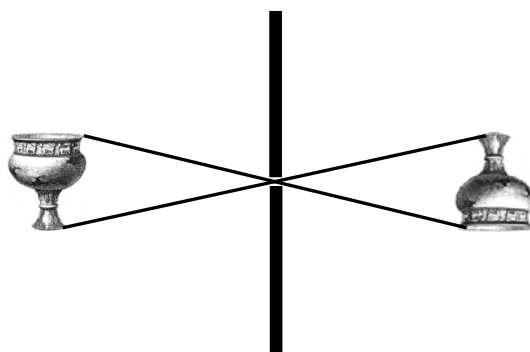


Figura 5 - Formação da imagem de um objeto por um orifício.

As principais concepções alternativas referentes à formação de imagens e sombras são:

a) *Sombras com o mesmo tamanho do obstáculo*

Nesta concepção, os estudantes utilizam os raios paralelos para justificar o tamanho da sombra, desconsiderando totalmente a situação representada na figura 4. Talvez, estejam utilizando o mesmo raciocínio quando traçam raios na formação de imagens em espelhos planos, nos quais a imagem tem o mesmo tamanho do objeto.

b) *Imagens e sombras determinadas somente pelo tamanho e forma dos orifícios e obstáculos*

Desprezando que em um sistema óptico existem as relações entre as características e dimensões do seu conjunto (distância objeto-orifício, orifício-objeto, tamanho do orifício, etc.). Esses modelos alternativos são tipificados, segundo Pesa (1999), como:

➤ **modelo de “encaixe”**: É um modelo de ajuste. Todos os raios emitidos pela fonte que “encaixam” através do orifício ou que são bloqueados pelo obstáculo, chegam ou não no anteparo. A imagem será a porção que passou pelo orifício.

➤ **modelo de “aperto”**: A luz viaja como um todo até o orifício, estreita-se e logo se abre. Assim explicam a câmara escura e a formação da imagem com a forma da fonte.

➤ **modelo de “disparador”**: Quando a luz atinge o objeto, este dispara uma sombra. Atribuem à sombra o significado de entidade física distinta, com existência concreta e característica similar a dos objetos, não sendo, simplesmente, a ausência da luz.

Cores

O Sol emite radiação eletromagnética e, uma parte dessa radiação, compreende o espectro visível. A soma de todos os comprimentos de onda localizados na região visível do espectro eletromagnético resulta na luz branca. Ela também pode ser obtida somando-se as luzes vermelha, azul e verde, denominadas *cores primárias*.

Quando duas das três cores primárias da luz são combinadas, tem-se como mostra a figura 6.

Azul + verde = ciano

Vermelho + verde = amarelo

Vermelho + azul = magenta

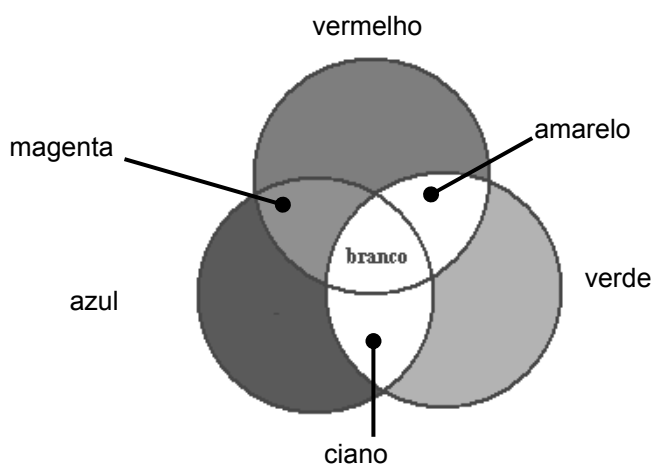


Figura 6 - Resultado da adição das cores primárias da luz.

Se duas cores combinadas produzem a luz branca são chamadas *cores complementares*, que apresentam as relações

Magenta + verde = branco

Amarelo + azul = branco

Ciano + vermelho = branco

Entretanto, para compreender o processo de visualização das cores, é necessário considerar a percepção do olho humano, quando há a superposição de diferentes ondas luminosas. As células fotossensíveis do olho, os cones e os bastonetes, enviam os sinais ao cérebro e conduzem a percepção das cores (PESA et al, 2003). Quando, por exemplo, chegam ao olho do observador as luzes de cores verde e azul, as células sensíveis a essas cores se manifestam e percebemos a combinação aditiva delas, ou seja, a cor entre ambas – ciano (ibid).

É possível, facilmente, verificar que a luz branca é composta pela combinação de todas as ondas luminosas, fazendo a luz incidir em um meio dispersivo. Ao incidir um feixe de luz policromática sobre um meio transparente, surgem raios refratados de diversas cores. Esse fenômeno de separação da luz nas cores que a constituem é denominado *dispersão cromática*. Assim, quando um feixe de luz incide em uma superfície que separa dois meios, os componentes do feixe são separados por refração, propagando-se em diferentes direções (Halliday et al, 1995).

Para a maioria das substâncias transparentes, a dispersão ocorre, pois o índice de refração é uma função inversamente proporcional ao comprimento de onda “ λ ”. Tende, portanto, a aumentar com a frequência da luz incidente. Por essa razão, a luz violeta sofre um desvio maior do que a luz vermelha ($\lambda_{\text{violeta}} \cong 400 \text{ nm}$ e $\lambda_{\text{vermelha}} \cong 700 \text{ nm}$). Destaque-se que essa aproximação nem sempre é válida. Em estudos mais detalhados sobre o índice de refração, pode-se verificar casos de dispersão “anômala” em que o desvio é maior para comprimentos de onda maiores, ou seja, há um decréscimo do índice de refração à medida que ocorre o aumento da frequência (FOWLES, 1989).

Usualmente, utiliza-se um prisma para decompor a luz policromática (figura 7), pois ele provoca duas dispersões, uma em cada superfície de separação com o ar.

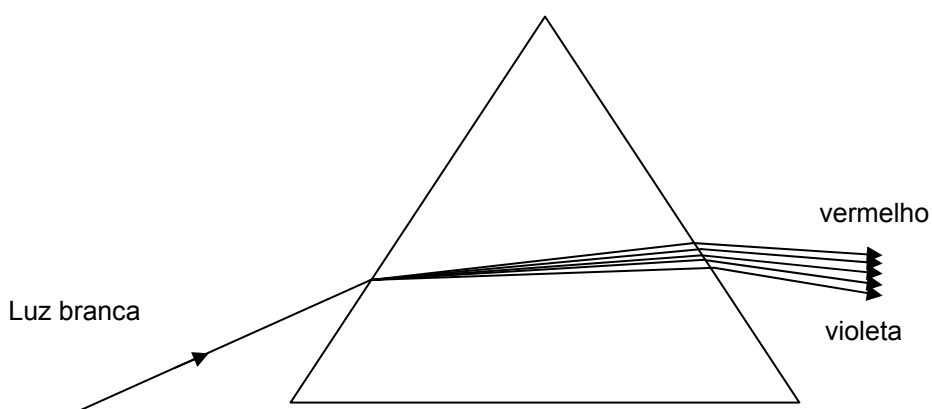


Figura 7 - Um prisma separando a luz branca em suas componentes.
 Fonte: Halliday, Resnick e Walker. Fundamentos de Física 4, 1995, p. 27.

As concepções alternativas mais frequentes para o conceito de cor são:

a) *A luz colorida é ativa*

Luz colorida atua no objeto de uma forma vigorosa, pois pode alterar a cor do objeto de duas formas: somando cores ou “escurecendo” o objeto, ou impedindo a cor “verdadeira” de ser visualizada. Ela também pode dar cor à sombra. A função da luz branca “normal” é passiva, pois ela é clara, sem cor, transparente e, simplesmente, ilumina o objeto ou a sombra para podermos ver sem provocar mudanças.

b) *A luz colorida contém cor*

Esta cor pode se misturar com a cor do objeto e mudá-lo, como pigmentos podem se misturar e criar novas cores. Ela também pode se combinar com a cor de outra luz para criar sombras de uma nova cor.

c) *A luz colorida é escura*

O termo escuro é usado com dois significados: como o oposto do claro, e como uma característica de cada cor (algumas cores são mais escuras que outras); quando ela é usada da segunda forma, o termo escuro indica uma escala de brilho de uma cor, por exemplo, a luz vermelha é mais escura que a amarela e assim por diante, em uma escala que vai do branco ao preto. Alguns alunos acreditam que objetos amarelos, por exemplo, podem ser vistos sem incidência da luz.

Reflexão

Quando uma onda que se propaga em um meio de índice de refração n_1 encontra a interface com outro meio de índice de refração n_2 , e sofre mudança na direção de propagação, mas permanece no meio 1 (caso em que $n_2 > n_1$), diz-se que a onda incidente foi totalmente refletida. Em algumas situações, a onda incidente pode passar para o meio 2, sendo parcialmente refletida e refratada, quando, por exemplo, incide em uma placa de vidro, conforme representado na figura 8. A reflexão pode ocorrer na forma especular ou difusa. A reflexão especular é quando o feixe incidente encontra uma superfície lisa sendo o feixe refletido bem definido.

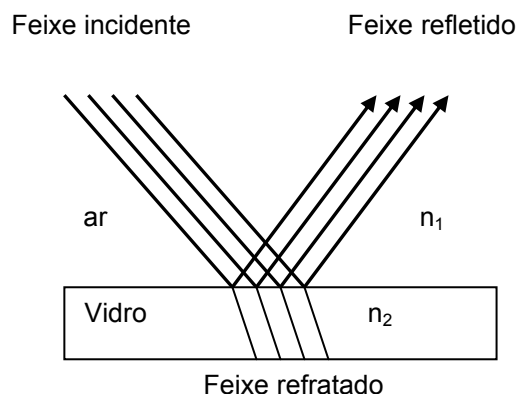


Figura 8 - Reflexão especular.

A reflexão difusa é quando um feixe de luz incide sobre uma superfície não-homogênea (figura 9). Nesse caso, cada pequena porção da superfície reflete a luz incidente em uma determinada direção e, conseqüentemente, o feixe refletido não é bem definido, observando-se o espalhamento da luz em várias direções (ALVARENGA, p. 712).

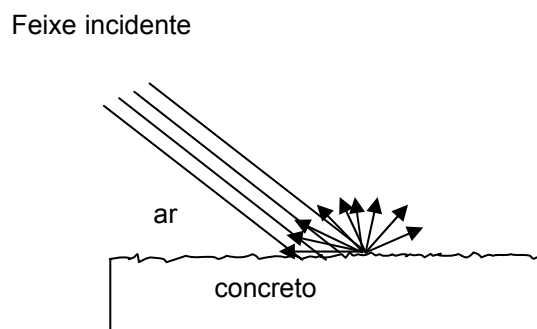


Figura 9 - Reflexão difusa.

Na figura 10 um raio luminoso incide sobre o ponto “O” de uma superfície refletora. Traçando-se a normal⁵ nesta superfície e no ponto em questão, observa-se que os raios incidente e refletido definem um plano. A reflexão ocorre de tal maneira que o raio refletido está sempre no mesmo plano que contém o raio incidente. Portanto, o raio incidente, o refletido e a normal estão todos contidos no mesmo plano, que é denominado “plano de incidência”. Tal fato é conhecido como a *1ª lei da reflexão*. Na representação da figura 10 o plano de incidência coincide com o plano da página.

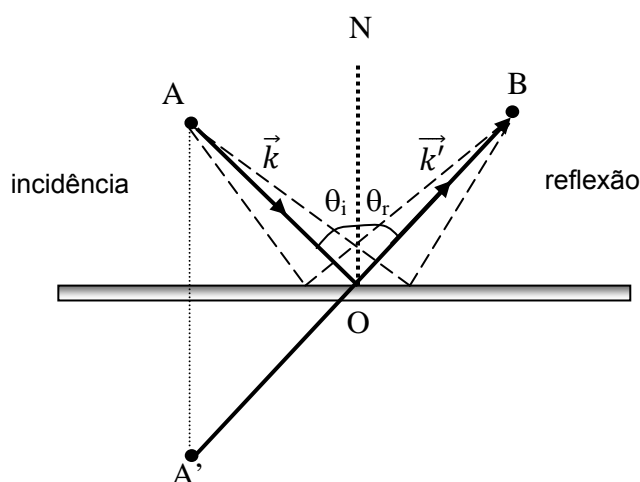


Figura 10 – Um raio incidente em um espelho plano.

O ângulo θ_i que o raio incidente faz com a normal é denominado ângulo de incidência, e o ângulo θ_r , formado entre a normal e o raio refletido, é chamado de ângulo de reflexão. De acordo com a 2ª lei da reflexão, o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão, ou seja, $\theta_i = \theta_r$.

Princípio de Fermat

Pierre de Fermat foi um matemático francês que no século XVII formulou o seguinte princípio:

De todos os caminhos possíveis entre dois pontos, a luz percorre aquele no qual o tempo de trânsito é um mínimo em comparação com o tempo em outras trajetórias.

A partir desse princípio é possível, facilmente, deduzir a 2ª lei da reflexão. A questão é (segundo o princípio de Fermat): em que ponto do espelho a luz deve ser refletida para que o tempo seja mínimo entre os pontos A e B da figura 10?

Nesse caso, como a luz permanece no mesmo meio, o menor tempo corresponde à trajetória menor. Na figura 10 as distâncias AO e A'O são iguais, pois A' é o ponto imagem da fonte A. Dessa

⁵ Reta perpendicular à superfície.

forma, as distâncias AOB e A'OB também são iguais. A distância A'OB é mínima quando os pontos A', O e B estão sobre uma reta e, quando isso ocorre, o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão. Na figura 10 está representada a trajetória percorrida pela luz, entre outras possíveis (linhas tracejadas), de acordo com o princípio de Fermat.

As duas leis da reflexão também podem ser deduzidas a partir das condições de contorno para ondas eletromagnéticas. Nesse caso, supondo que no lado esquerdo da figura 10 há a incidência de uma onda plana com vetor de onda \vec{k} e, no lado direito, a onda refletida com vetor de onda \vec{k}' , pode-se representar as ondas incidente e refletida, desconsiderando suas amplitudes, respectivamente, através das expressões complexas

$$\begin{aligned} e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} & \quad \text{onda incidente} \\ e^{i(\vec{k}' \cdot \vec{r} - \omega t)} & \quad \text{onda refletida} \end{aligned}$$

representando a dependência espaço-tempo das ondas incidente e refletida.

Considerando que num instante t e na posição O as ondas devem coincidir, os argumentos das funções exponenciais precisam ser iguais, portanto

$$\vec{k} \cdot \vec{r} = \vec{k}' \cdot \vec{r} \quad \text{na superfície refletora}$$

Essa equação informa que os vetores de onda \vec{k} e \vec{k}' são coplanares e que suas projeções na superfície são iguais. Dessa forma,

$$k \sin \theta_i = k' \sin \theta_r$$

Como os vetores de onda são iguais, pois estão no mesmo meio, resulta que

$$\theta_i = \theta_r$$

Na página 19, onde o conceito de refração é apresentado, a Lei de Snell também está demonstrada.

Reflexão interna total

Em uma transmissão em que $n_1 > n_2$ (índices de refração dos meios 1 e 2, respectivamente), conforme representado na figura 11, à medida que o ângulo de incidência θ_i é aumentado, o ângulo

de refração também aumenta até ser alcançado um valor de ângulo crítico θ_c em que o ângulo de refração é de $\pi/2$. Se o ângulo de incidência for maior do que o ângulo crítico θ_c , a luz incidente é totalmente refletida, caracterizando a reflexão interna total. Tal efeito torna possível, por exemplo, a utilização de fibras ópticas para a transmissão de dados.

O ângulo crítico θ_c pode ser determinado, sabendo-se os índices de refração n_1 e n_2 , a partir da Lei de Snell:

$$n_1 \text{sen } \theta_c = n_2 \text{sen} \left(\frac{\pi}{2} \right) \qquad \text{sen } \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

portanto,
$$\theta_c = \text{sen}^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

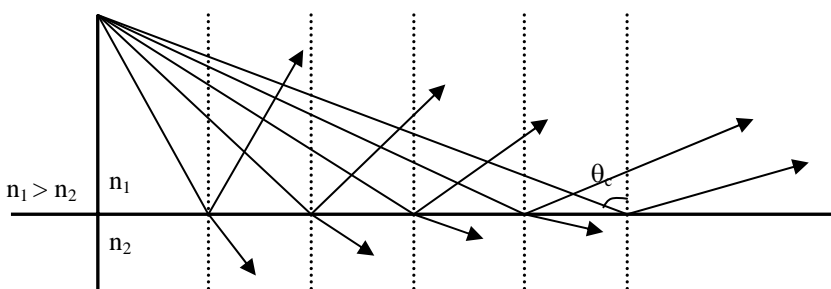
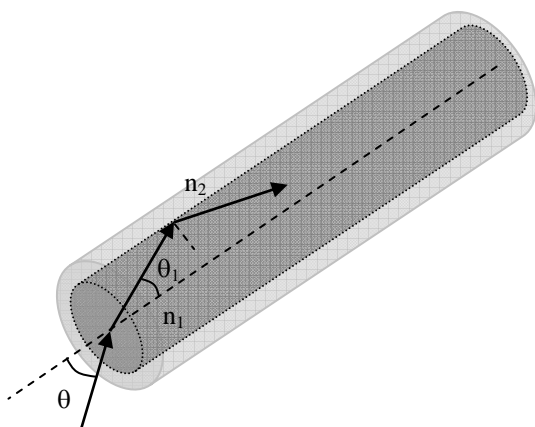


Figura 11 - Reflexão interna total.

Como exemplo, vamos considerar o seguinte problema.

Uma fibra óptica consiste em um núcleo de vidro (índice de refração n_1) envolvido por uma película (índice de refração $n_2 < n_1$). Suponha um feixe de luz que vai do ar para a fibra, fazendo um ângulo “ θ ” com o eixo da fibra, de acordo com a figura a baixo. a) Mostre que o maior valor possível de “ θ ”, para o qual um raio pode propagar-se pela fibra é dado por $\theta = \text{sen}^{-1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$. (Halliday et al, p. 50, 1995)



Vamos chamar de “ θ_1 ” o ângulo do raio refratado com a normal à área da secção transversal.

Temos as seguintes relações:

$$\text{sen } \theta = n_1 \text{sen } \theta_1 \quad (1)$$

supondo o índice de refração do ar $n = 1$

$$\text{e} \quad n_1 \text{sen} \left(\frac{\pi}{2} - \theta_1 \right) = n_1 \cos \theta_1 = n_2$$

pois estamos interessados no caso da reflexão interna total; dentro do material, a luz é totalmente refletida. Com isso, podemos escrever

$$\cos \theta_1 = \frac{n_2}{n_1} = \left(1 - \text{sen}^2 \theta_1 \right)^{\frac{1}{2}}$$

o que leva a

$$\text{sen}^2 \theta_1 = 1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \Rightarrow \text{sen } \theta_1 = \left[1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Voltando à equação “1”, temos:

$$\text{sen } \theta = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \Rightarrow \theta = \text{sen}^{-1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

As principais concepções alternativas detectadas referentes à reflexão são:

- a) *A reflexão da luz ocorre somente na forma especular*

As diferenças entre os feixes refletidos devem-se aos diferentes graus de absorção da radiação luminosa nas superfícies. Na maioria das justificativas se identifica um alto “coeficiente de reflexão” dessas superfícies. Os estudantes não consideram o processo de interação entre a luz e os objetos, quando a palavra reflexão não aparece explicitamente. A interpretação dominante para explicar o comportamento da luz em um recinto é a seguinte: “a luz sai da fonte e cai nos objetos”. Esta concepção provém, possivelmente, de um processo de aquisição de conceitos a partir de experiências prévias: com espelhos pode-se desviar a luz, porém os objetos opacos o efeito mais significativo tem lugar no mesmo objeto, podem ser observadas “zonas iluminadas”. Espera-se, então, que os estudantes freqüentemente desconheçam a possibilidade de um objeto rugoso refletir a

luz e identifiquem reflexão como sinônimo somente de reflexão especular (PESA, CUDMANI e BRAVO, 1995).

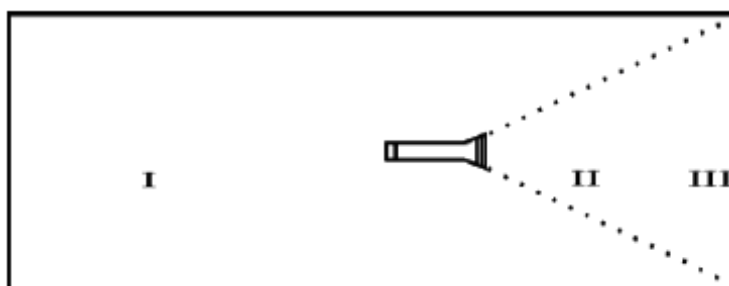


Figura 13 - Lanterna iluminando uma parede de uma sala fechada.

A justificativa de alguns estudantes para esta concepção, quanto à possibilidade de haver luz na região I, é uma “violação da propagação retilínea da luz”, pois a luz não pode dobrar-se para iluminá-la (figura 13). Em outras palavras, não consideram a reflexão da luz na parede da sala, fazendo com que parte da luz emitida pela lanterna também se propague na região I.

b) *Raios visuais*

No processo da visão pode-se identificar muitos problemas que, não raro, decorrem da dificuldade em reconhecer e aplicar corretamente as propriedades da propagação da luz. É comum o estudante considerar, que, para ver um objeto, não é necessário que venha luz do objeto até nossos olhos. Alguns estudantes apresentam de modo muito arraigado o modelo dos “raios visuais”, proposto por Aristóteles, para explicar o processo da visão (figura 14b). Na figura 14a é representada a visualização de um objeto considerando a concepção científica. Diversos raios são refletidos pela superfície do objeto, alguns chegam ao olho do observador, permitindo-lhe sua visualização.

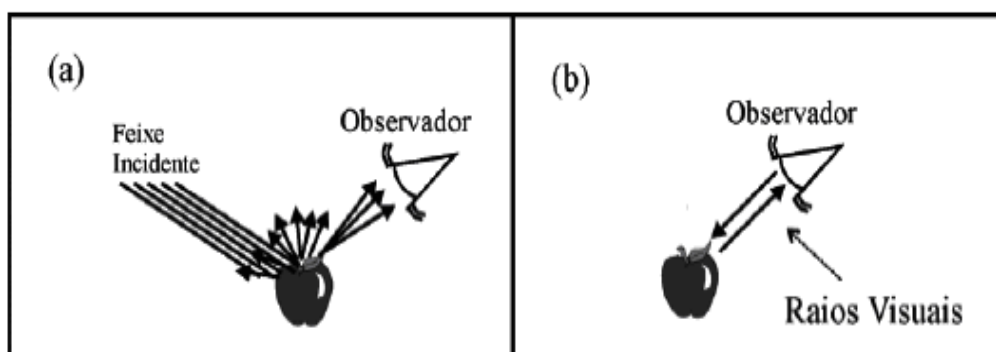


Figura 14 - Visualização de um objeto utilizando os conceitos científicos (a); raios visuais (b).

Refração

Ao fazer um feixe de luz incidir sobre uma superfície transparente lisa, que separa dois meios diferentes, parte desse feixe de luz incidente volta ao meio de origem (raios refletidos) e parte penetra no segundo meio (raios refratados). O efeito da refração consiste em uma aparente⁶ mudança da velocidade de propagação do feixe luminoso ao penetrar em um meio com diferente índice de refração, ocorrendo mudança na direção de propagação quando o feixe incide obliquamente.

A lei da refração é denominada *Lei de Snell* e tem a seguinte expressão:

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2$$

onde n_1 e n_2 são os índices de refração de cada meio, θ_1 é o ângulo de incidência e θ_2 é o ângulo de um raio refratado, em relação à normal "N", conforme representado na figura 15.

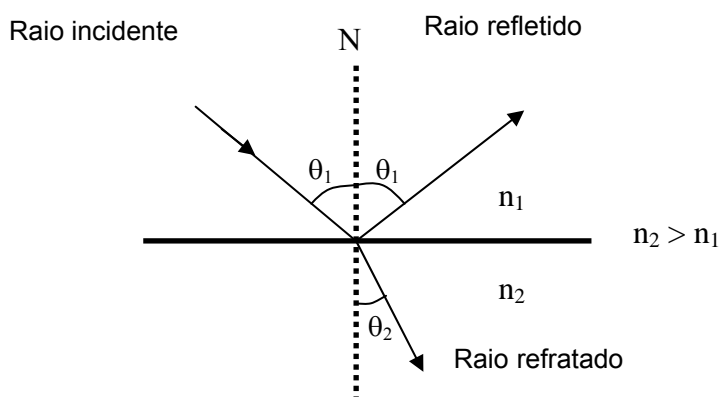


Figura 15 - Reflexão e refração de um raio de luz incidente em uma superfície plana.

Assim como no caso da reflexão, a Lei de Snell pode ser deduzida a partir das condições de contorno para ondas eletromagnéticas. Recorrendo novamente a representação das ondas, desprezando suas amplitudes, pelas expressões complexas

$$e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \quad \text{onda incidente}$$

$$e^{i(\vec{k}'' \cdot \vec{r} - \omega t)} \quad \text{onda refratada}$$

Nesse caso \vec{k}'' é o vetor de onda no meio de índice de refração n_2 .

⁶ Mais detalhes sobre a origem do índice de refração podem ser obtidos em: Feynman, R. P.; Leighton, R. B.; Sands, M. *Lectures on Physics*.

Como no caso descrito para a reflexão, a condição de contorno permite escrever

$$k \operatorname{sen} \theta_1 = k'' \operatorname{sen} \theta_2 \quad \text{onde } \theta_1 \text{ e } \theta_2 \text{ são os ângulos de acordo com a figura 15.}$$

Usando a relação dos valores de k e k'' com os índices de refração

$$k = n_1 \frac{\omega}{c} \quad \text{e} \quad k'' = n_2 \frac{\omega}{c}$$

e fazendo a substituição na equação anterior, resulta

$$n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2$$

Lei de Snell

As principais concepções alternativas em relação ao conceito de refração são as seguintes:

a) *Refração e reflexão são fenômenos sem relação*

Quando há reflexão não há refração e vice-versa, independentemente de onde ocorre o fenômeno. Essa concepção pode estar sustentada pelo estudo separado dos fenômenos, quando, por exemplo, há o enfoque da reflexão em espelhos planos e a refração em prismas, sem analisá-los conjuntamente – considerar parte da luz refletida no prisma.

b) *Refração e a dispersão são fenômenos distintos*

Alguns estudantes não consideram a refração como sendo consequência da dispersão; por isso, quando ocorre refração não pode ocorrer dispersão ou o inverso.

c) *Prisma como sumidouro*

O raio incidente em um prisma sempre sofre reflexão interna total. O ângulo de incidência na segunda face do prisma não é verificado para testar a possibilidade de reflexão interna total. Dessa forma, não saíam raios do prisma e, portanto, não ocorre refração.

d) *Refração necessita de ar*

Consideram que a refração ocorre somente do ar para outro meio, descartando a possibilidade de ocorrer tal efeito entre meios distintos, sem haver, necessariamente, a existência de ar.

Difração

A difração é o fenômeno em que as ondas contornam obstáculos e atravessam orifícios, sofrendo modificação na sua frente de onda. Para que esse fenômeno seja facilmente observado, é necessário que as fendas tenham dimensões da ordem do comprimento de onda “ λ ”, tornando possível a visualização da *figura de difração*⁷ em um anteparo. Por esse motivo, a difração da luz visível ($\lambda_{\text{luz}} = 400 - 700 \text{ nm}$) torna-se praticamente imperceptível no nosso cotidiano. Contudo, a difração também ocorre em orifícios grandes, sendo apenas mais discreta.

A equação que permite localizar os mínimos de intensidade em uma figura de difração tem a seguinte forma:

$$a \sin \phi = m \lambda \quad \text{onde "a" é a largura da fenda e } m = 1, 2, 3, \dots$$

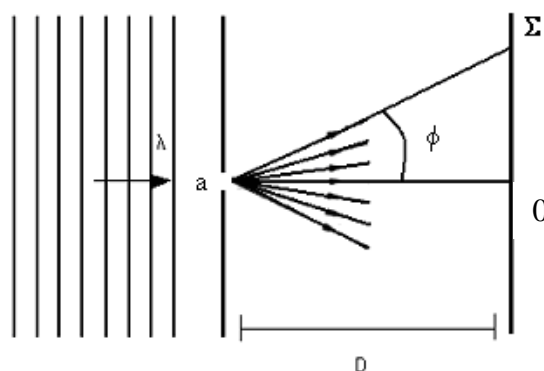


Figura 16 - Difração de uma onda plana.

A figura 16 representa a incidência de uma onda plana monocromática em uma fenda de largura “ a ”, sofrendo o efeito da difração no lado direito da figura. No anteparo “ Σ ”, surgem as franjas da figura de difração. O ângulo “ ϕ ” é o afastamento angular entre um mínimo de difração e a posição do máximo central, identificado na posição “ 0 ”.

A partir da equação do 1º mínimo ($\sin \phi = \lambda/a$), verifica-se que “ $\sin \phi$ ” varia inversamente com a largura “ a ” da fenda, por isso, ao diminuir a largura da fenda o ângulo ϕ aumenta, o que provoca um alargamento no máximo central da figura de difração. Fazendo “ $a = \lambda$ ”, resulta “ $\phi = \pi/2$ ”, e o máximo central é largo o suficiente para não observarmos os mínimos da figura de difração.

⁷ Vide figura 17 na próxima página.

Na figura 17 está representada a imagem de difração produzida por uma fenda simples, que pode ser visualizada em um anteparo colocado à frente da fenda.



Figura 17 - Figura de difração produzida por uma fenda simples.

O padrão de difração de uma única fenda é caracterizada por um máximo central, largo e mais intenso, e vários outros de intensidade menor, mais estreitos, denominados *máximos laterais* ou *secundários*. Entre cada máximo, pode-se observar os mínimos de intensidade.

As principais concepções alternativas relacionadas ao efeito de difração são as seguintes:

a) *Fendas $a < \lambda$*

Estudantes consideram que somente ocorre difração se a fenda utilizada tiver largura "a" menor que o comprimento de onda " λ " da luz incidente. Esses alunos não reconhecem a difração como um efeito de bordas, isto é, quando uma onda luminosa contorna obstáculos. Além disso, também não concebem a ocorrência da difração em orifícios grandes.

b) *Difração nas bordas*

O fenômeno da difração é interpretado apenas como um efeito de borda. A luz contorna os objetos, mas não há referência ao efeito, quando a luz atravessa uma pequena abertura.

c) *A luz não atravessa a fenda se $a < \lambda$*

Alguns estudantes consideram que a luz não atravessa a fenda no caso de sua largura ser menor que o comprimento de onda " λ ". Acreditam que a luz pode não "encaixar" na fenda. Certamente, ao reduzirmos cada vez mais o tamanho de um orifício, em algum momento ele será tão pequeno que a luz não irá mais atravessá-lo. Entretanto, para esses alunos, basta que a abertura apenas seja menor que o comprimento de onda da luz incidente.

d) *Difração ou não em fenda*

Uso da Óptica Física quando a luz atravessa uma fenda larga, independentemente da forma ou largura da fenda, ou o uso da Óptica Geométrica para fenda estreita. Dos vários "raios de luz" que

chegam à fenda, somente alguns, ou até mesmo um raio, atravessa a abertura. Concepção baseada na aplicação de luz como um feixe de raios luminosos que se propagam em linha reta; a fenda atua como um “filtro” para esses raios.

e) *Mistura da Óptica Física com a Óptica Geométrica*

Tratam a luz que passou pelo centro da fenda com a Óptica Geométrica e a que passou pelas bordas com a Óptica Física, desconhecendo a relação entre as duas teorias. Há falta de clareza sobre os modelos *ondulatório* e de *raio de luz*, em relação ao limite para o tratamento da luz como feixes luminosos. Talvez, a dificuldade seja um problema similar ao da dualidade onda/partícula, nesse caso, onda/raio.

Interferência

Utilizando duas fontes coerentes de ondas monocromáticas é possível observar a interferência, fenômeno caracterizado pela combinação de duas ou mais ondas que se sobrepõem em uma região do espaço. O fundamento teórico para a interferência de ondas eletromagnéticas é essencialmente baseado no princípio da superposição linear dos campos eletromagnéticos. De acordo com esse princípio, o campo elétrico resultante em um determinado ponto do espaço vazio é dado pela soma vetorial de vários campos elétricos no mesmo local, produzidos por diferentes fontes, ou seja:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots$$

Conforme o experimento de Thomas Young, utilizando duas fontes coerentes produzidas a partir de uma fonte iluminando duas fendas (figura 18), é possível visualizar os padrões de interferência em um anteparo colocado à frente.

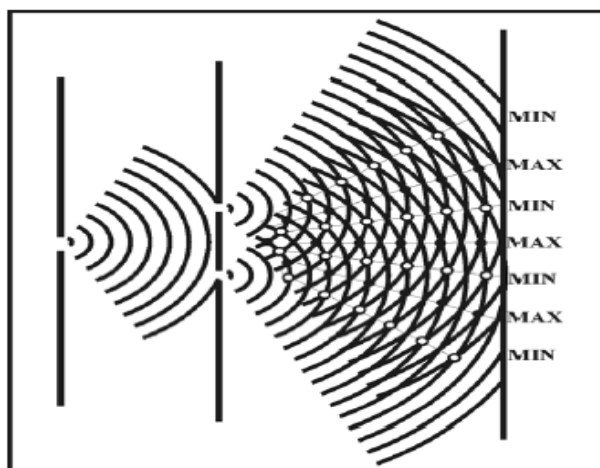


Figura 18 - Máximos e mínimos de interferência no experimento de Young.

Thomas Young elaborou seu experimento a fim de produzir duas fontes de ondas coerentes, para que fosse possível a visualização das franjas de interferência. A coerência temporal entre duas ondas significa que a diferença de fase entre elas é uma constante no tempo. Se a diferença de fase não for uma constante no tempo, varia aleatoriamente, nenhuma figura de interferência pode ser observada, pois a interferência muda de construtiva em um dado momento para destrutiva no momento seguinte, tornando o efeito imperceptível. Dizemos então que as duas ondas são *totalmente incoerentes*. Além disso, se as ondas que interferem forem polarizadas, a visualização da figura de interferência também dependerá da direção de polarização dos campos eletromagnéticos.

Considerando, por exemplo, duas ondas planas polarizadas de mesma frequência ω . Os campos elétricos podem ser representados na forma complexa

$$\begin{aligned}\vec{E}_{(1)} &= \vec{E}_1 e^{i(\vec{K}_1 \cdot \vec{r} - \omega t + \varphi_1)} \\ \vec{E}_{(2)} &= \vec{E}_2 e^{i(\vec{K}_2 \cdot \vec{r} - \omega t + \varphi_2)}\end{aligned}\quad \text{onde } \varphi_1 \text{ e } \varphi_2 \text{ são introduzidos para representar qualquer diferença de fase entre as duas ondas}$$

sendo que o valor real pode ser obtido fazendo

$$\vec{E}_{(i)}^R = \vec{E}_i + \vec{E}_i^* \quad \text{onde } i = 1, 2.$$

considerando que a intensidade é proporcional ao quadrado do módulo do campo elétrico

$$I \propto |\vec{E}|^2 = |\vec{E}_1 + \vec{E}_2|^2 = (\vec{E}_1 + \vec{E}_2)(\vec{E}_1 + \vec{E}_2)^*$$

desenvolvendo o cálculo, obtém-se o seguinte resultado

$$\begin{aligned}|\vec{E}|^2 &= \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_1^* + \vec{E}_2 \cdot \vec{E}_2^* + \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \left[e^{i(\vec{K}_1 \cdot \vec{r} - \vec{K}_2 \cdot \vec{r} + \varphi_1 - \varphi_2)} + e^{-i(\vec{K}_1 \cdot \vec{r} - \vec{K}_2 \cdot \vec{r} + \varphi_1 - \varphi_2)} \right] \\ &= |\vec{E}_1|^2 + |\vec{E}_2|^2 + 2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \cos(\vec{K}_1 \cdot \vec{r} - \vec{K}_2 \cdot \vec{r} + \varphi_1 - \varphi_2)\end{aligned}$$

O termo $2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \cos(\vec{K}_1 \cdot \vec{r} - \vec{K}_2 \cdot \vec{r} + \varphi_1 - \varphi_2)$ é chamado *termo de interferência*, que é o responsável pela visualização das franjas de interferência. A diferença de fase é dada por $\varphi_1 - \varphi_2$, se as ondas forem totalmente incoerentes, essa quantidade varia aleatoriamente com o tempo e o valor médio do cosseno vai à zero, não permitindo a visualização das franjas de interferência. Se as ondas forem polarizadas com direções perpendiculares entre os campos elétricos, o produto escalar resulta nulo. Dessa forma, a visualização da figura de interferência também dependerá da polarização das ondas (FOWLES, 1989).

A figura 19a representa uma onda plana que incide da esquerda para a direita sobre duas aberturas, atingindo o anteparo Σ no lado direito. A onda plana difrata pelas aberturas e deixa de ser plana ao atravessá-las, tornando-se, aproximadamente, esférica. Como são duas aberturas, podemos tratá-las como duas fontes de ondas, que podem interferir entre si.

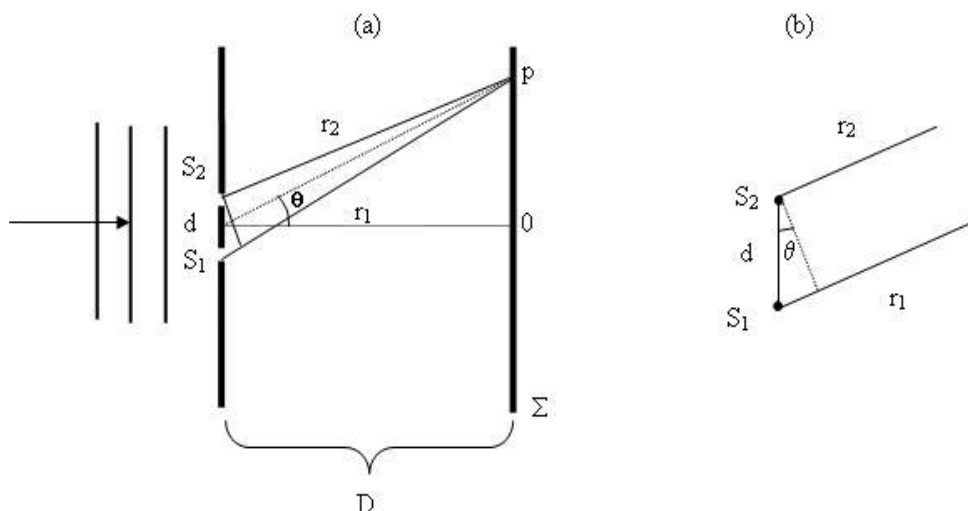


Figura 19 - (a) Interferência a partir de uma onda plana difratada. (b) Aproximação para os raios r_1 e r_2 .

Considerando $D \gg d$, pode-se tratar os raios r_1 e r_2 como paralelos, conforme representado na figura 19b. Com isso, a diferença de percurso entre os dois raios é $d \sin \theta$

Para a localização dos máximos de interferência, em uma posição p no anteparo Σ , basta igualar essa diferença a um número inteiro de comprimentos de onda:

$$d \sin \theta = m \lambda$$

pois a diferença de um número inteiro de comprimentos de onda deixa as ondas em fase, e a interferência é construtiva.

No caso dos mínimos, igualamos a diferença de caminho óptico a um número ímpar de meio comprimento de onda:

$$d \sin \theta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$$

dessa forma, as duas ondas estão defasadas de π , havendo interferência destrutiva.

Essas duas equações fornecem as posições dos máximos e mínimos de interferência tanto acima como abaixo do máximo central em "0", representado na figura 19a.

Diferentemente da figura que surge no caso de uma única fenda (figura 17), as ondas provenientes das duas fendas interferem entre si, o que provoca a modificação no padrão de interferência observado em um anteparo.

A imagem que surge na figura 20 é devido ao efeito de interferência das ondas luminosas e, nos dois casos, ocorre a difração da luz pelas fendas.



Figura 20 - Figura de interferência produzida por duas fendas.

Método dos fasores

O estudo da superposição de ondas harmônicas pode ser facilitado através do método vetorial de adição dessas ondas, a partir de uma interpretação geométrica simples de suas funções de onda. Com base nesse método é possível calcular a soma de duas ou mais ondas harmônicas sem ter que utilizar igualdades trigonométricas que, em alguns casos, envolvem cálculos mais extensos que resultam em expressões mais complicadas para a função de onda resultante

Sejam duas funções de onda dadas por

$$y_{1(x,t)} = y_1 \text{sen}(kx - \omega t + \theta) \quad e \quad y_{2(x,t)} = y_2 \text{sen}(kx - \omega t + \varphi + \theta)$$

A resultante da soma dessas duas funções pode ser escrita como

$$y_{(x,t)} = y \text{sen}(kx - \omega t + \alpha)$$

O diagrama vetorial para representar a adição dessas duas ondas é o seguinte

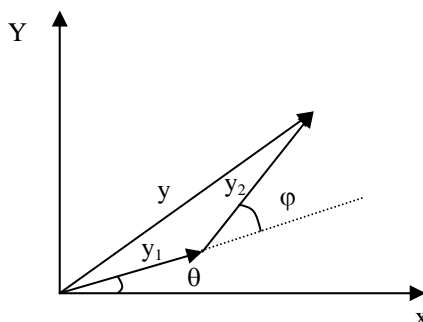


Figura 21 – Diagrama de fasores.

Os vetores que representam as funções de onda, inclusive a resultante, giram no plano com a mesma velocidade angular ω e por isso suas posições relativas não se modificam. Esses vetores girantes são chamados de *fasores*.

A figura 21 apresenta um vetor resultante (de módulo y) da soma de dois vetores de módulos y_1 e y_2 . O método se baseia em que a componente vertical (ou a horizontal) do vetor resultante é igual

à soma das componentes verticais (ou horizontais) dos vetores parciais. Assim, o módulo y do vetor resultante é dado por

$$y = \sqrt{(y_{1x} + y_{2x})^2 + (y_{1y} + y_{2y})^2}$$

Substituindo as componentes das duas funções nessa expressão, obtemos

$$y = \sqrt{[y_1 \cos\theta + y_2 \cos(\theta + \varphi)]^2 + [y_1 \sin\theta + y_2 \sin(\theta + \varphi)]^2}$$

que fornece a amplitude da onda resultante.

A fase α da onda resultante é determinada por

$$\alpha = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{y_{1y} + y_{2y}}{y_{1x} + y_{2x}} \right) = \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{y_1 \sin\theta + y_2 \sin(\theta + \varphi)}{y_1 \cos\theta + y_2 \cos(\theta + \varphi)} \right]$$

Sejam, por exemplo, duas funções de onda

$$y_{1(x,t)} = 4 \operatorname{sen}(kx - \omega t) \quad e \quad y_{2(x,t)} = 3 \operatorname{sen} \left(kx - \omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

A amplitude da onda resultante é

$$y = \sqrt{\left[4 \cos 0 + 3 \cos \left(\frac{\pi}{2} \right) \right]^2 + \left[4 \operatorname{sen} 0 + 3 \operatorname{sen} \left(\frac{\pi}{2} \right) \right]^2} = \sqrt{25} = 5$$

e a fase da onda tem o seguinte valor

$$\alpha = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{3}{4} \right) \approx 37^\circ$$

A partir desses valores, a onda resultante pode ser escrita como

$$y_{(x,t)} = 5 \operatorname{sen}(kx - \omega t + 37^\circ)$$

Mudança de meio, Índice de refração e interferência em filmes finos

Conforme já mencionado, o índice de refração pode ser definido para cada meio como a razão entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz no meio.

$$n = c/v \quad \text{índice de refração}^8.$$

Dessa forma, o comprimento de onda em um meio (λ_n) é dado por λ/n .

$$\lambda_n = v \cdot T$$

Onde “T” é o período de oscilação e “v” a velocidade de propagação no meio, e “cT” é o comprimento de onda (λ) no vácuo.

que resulta em

$$\lambda_n = v \cdot T = (cT)/n = \lambda/n$$

A onda parece sofrer uma redução no seu comprimento de onda, conseqüentemente, uma redução na sua velocidade de propagação para “c/n”. Na verdade, ao analisarmos um pouco a origem do índice de refração, quando uma onda eletromagnética muda de meio de propagação, passa a viajar em um meio material, por exemplo, no vidro, ocorre interação entre a onda e o meio de propagação. Os elétrons dos átomos do vidro tendem a oscilar com freqüência da luz, mas com amplitudes insuficientes para provocar “colisões” entre os átomos vizinhos, havendo transferência desprezível de energia para o vidro sob forma de calor. Os elétrons oscilantes reemitem a luz incidente de átomo para átomo, existindo um pequeno tempo de atraso entre a absorção e a reemissão da luz (HEWITT, 2002)⁹. Isso faz com que a luz sofra uma redução aparente na sua velocidade de propagação para “c/n”. Quando a luz emerge na outra face do vidro, esse processo deixa de existir e a luz passa a viajar com velocidade “c” novamente (supondo $n = 1$ fora do vidro). Para cada componente da luz branca, haverá uma velocidade de propagação diferente, e a luz branca pode ser separada em suas cores componentes. Esse efeito de separação da luz branca é a *dispersão cromática*, já mencionada. Em geral, o índice de refração é maior para comprimentos de onda menores. Por isso, a luz azul sofre um desvio maior do que a vermelha, por exemplo. Considere a figura 22, que apresenta dois meios de índices de refração n_1 e n_2 e mesmo comprimento L.

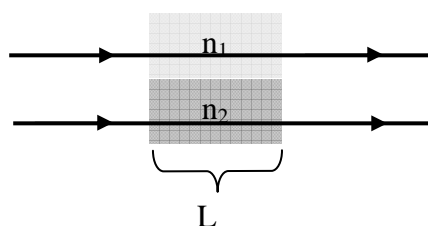


Figura 22 - Dois raios de luz incidindo em dois meios com índices de refração diferentes.

As duas ondas luminosas, com mesmo comprimento de onda, estão inicialmente em fase, representadas pelos raios incidentes à esquerda, emergem dos meios no lado direito. Para que

⁸ É importante destacar que em estudos mais detalhados sobre a propagação da luz em meios materiais essa relação nem sempre é válida.

⁹ Mais detalhes sobre a origem do índice de refração também podem ser obtidos em: Hewitt G. P., *Física Conceitual*, 2002.

interfiram destrutivamente, a diferença de caminho óptico deve ser igual a meio comprimento de onda ($\lambda/2$). Os comprimentos de onda em cada meio são

$$\lambda_{n1} = \lambda/n_1 \text{ e } \lambda_{n2} = \lambda/n_2$$

Agora, precisamos descobrir quantos comprimentos de onda “cabem” na largura L, para ambos os meios.

A partir das equações para λ_{n1} e λ_{n2}

$$N_1 = L/\lambda_{n1} = Ln_1/\lambda \text{ e } N_2 = L/\lambda_{n2} = Ln_2/\lambda$$

Para determinar a diferença de fase das duas ondas, basta calcular o módulo da diferença entre N_1 e N_2 :

$$|N_1 - N_2| = \left| \frac{Ln_1}{\lambda} - \frac{Ln_2}{\lambda} \right| = \frac{L}{\lambda} |n_1 - n_2|$$

Se tal diferença corresponder $(2m+1).0,5$, com $m = 0,1,2,3,\dots$, a diferença de fase corresponderá a meio comprimento de onda e a interferência será totalmente destrutiva. Seja, por exemplo, $m= 25$:

$$(2.25+1).0,5 = 25,5$$

são 25,5 comprimentos de onda. Isso indica que em um dos meios houve uma defasagem entre as ondas. Como os números inteiros de “ λ ” deixam as ondas em fase, interessa apenas o 0,5 comprimento de onda (o que dá meio ciclo de oscilação, $\phi = \pi$). Portanto, a interferência é destrutiva. Com o mesmo raciocínio, se a diferença corresponder a “ m ” comprimentos de onda ($m = 0,1,2,3,\dots$), a interferência será construtiva. Para casos intermediários, teremos diferenças significativas nos intervalos abertos

$$0 > |N_1 - N_2| < 0,5$$

ou

$$0,5 > |N_1 - N_2| < 1,0$$

Nesses casos, a interferência é parcial. Para um valor de 0,6, o ponto de intersecção das duas ondas fica fracamente iluminado, próximo à interferência totalmente destrutiva (diferença de 0,5).

Pode-se fazer uma analogia com as ondas mecânicas para compreender a propagação da luz quando ocorre mudança de meio. Considere uma onda produzida em uma corda conforme representado na figura 23:

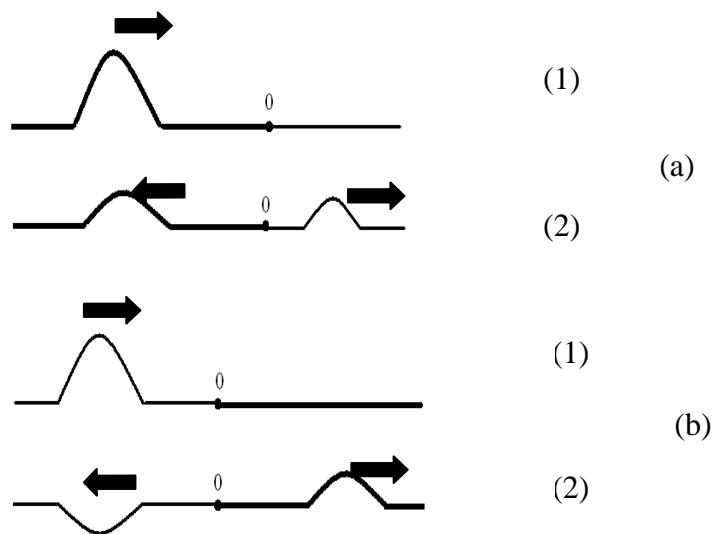


Figura 23 - Onda produzida em uma corda.

No ponto “0” há uma mudança de meio de propagação. A onda viajante chega a um meio menos denso (1), figura 23a. Parte da onda é refletida e parte é transmitida, sem ocorrer mudança de fase (2). No caso contrário, a onda encontra um meio mais denso, na reflexão há uma mudança de fase de π rad, figura 23b. Algo semelhante ocorre com a luz ao mudar de meio de propagação. Quando a onda propagante encontra uma interface entre dois meios com *índices de refração* diferentes, pode sofrer uma mudança na fase de oscilação. Essa mudança de fase tem implicações interessantes quando a interferência em filmes finos é estudada. As cores que são observadas em bolhas de sabão, em manchas de óleo, por exemplo, estão relacionadas a tal efeito. A figura 24 representa um filme fino com índice de refração n_2 , no qual a luz incide à esquerda, mergulhado em um meio de índice de refração n_1 .

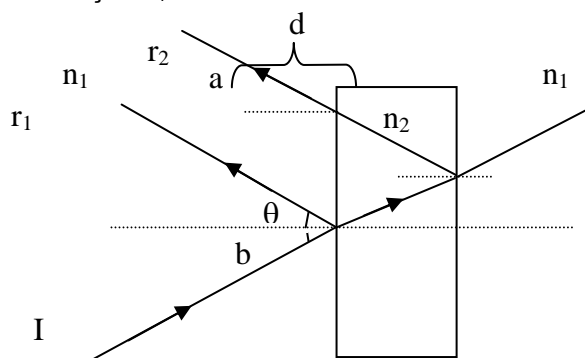


Figura 24 - Representação de luz incidindo em um filme fino.

O raio incidente “I” (figura 24) é parcialmente refletido sobre a superfície, onde encontra um meio mais denso, sofrendo uma mudança de fase de π rad, pois $n_1 < n_2$, e parte refratado, que encontra a segunda interface, também sendo parcialmente refletido e refratado, mas não há mudança

de fase, pois $n_2 > n_1$ nessa interface. Quando o raio refletido no interior do material retorna à primeira interface, novamente não há troca de fase. O resultado é que a onda incidente se divide em parte refletida e parte refratada, representadas pelos raios da figura 24, podendo haver diferença de fase igual a π rad ao emergirem da primeira superfície. Dessa forma, se os raios r_1 e r_2 chegam em fase ao olho do observador, eles produzem um máximo de interferência e a região “ab” parece clara ao observador. Se os mesmos raios chegam com fases opostas, produzem um mínimo de interferência e a região “ab” parece mínima ao observador, apesar de estar iluminada. Quando é a luz branca que incide em um filme fino, podemos observar as cores que emergem devido às interferências destrutivas e construtivas das ondas de diversas frequências. Obviamente, a espessura do filme deve ser tal que possa produzir o fenômeno (da ordem de “ λ ”), menor que o comprimento de coerência. Ademais, é possível ocorrer interferência totalmente destrutiva de toda luz incidente, e, nesse caso, não podemos enxergar a camada do filme fino. Um exemplo disso é a película de água com sabão que pode ser formada em uma argola metálica. Parte da camada escorre para a base da argola, formando uma camada mais espessa. Na parte superior, forma-se uma camada tão fina que a luz refletida sofre interferência destrutiva, tornando o filme escuro. Franjas de interferência coloridas decoram o resto do filme, mas, aos poucos, a força da gravidade faz com que o líquido escorra, tornando o filme espesso demais para que o fenômeno seja observado com clareza (HALLIDAY et al, p. 73).

Se a luz incidente na interface entre meios com diferentes índices de refração vem do meio com menor índice de refração, a reflexão ocorre com mudança de fase de π rad (correspondente a $\lambda/2$); se a luz vem do meio com maior índice de refração, a reflexão ocorre sem mudança de fase.

Para determinarmos se a interferência será destrutiva ou construtiva em filmes finos, consideramos a trajetória do raio refratado (raio r_2 da figura 24). Dado que a espessura do filme é “d”, a distância total para esse raio é, aproximadamente, “2d”.

A interferência será destrutiva, no caso da figura 24, se

$$2d = m\lambda_{n_2} \quad 2n_2d = m\lambda$$

e construtiva se

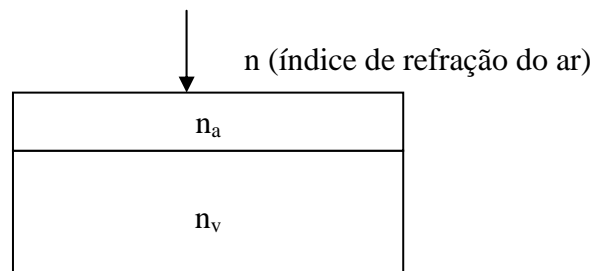
pois, para o raio refletido na primeira superfície, houve inversão de fase, mas o refratado não sofreu mudança de fase ao refletir na segunda superfície.

$$2n_2d = (m + \frac{1}{2})\lambda$$

Dessa forma, pode-se combinar meios com diferentes índices de refração para que se produza interferência da luz, tornando possível, por exemplo, reduzir a reflexão da luz incidente.

Exemplo: um filme fino de acetona ($n_a = 1,25$) cobre uma placa grossa de vidro ($n_v = 1,50$). O conjunto é exposto a luz branca, com incidência perpendicular. Uma interferência destrutiva da onda refletida é observada para um comprimento de onda de 600 nm e uma interferência construtiva é observada para 700 nm. Determine a espessura do filme de acetona (HALLIDAY et al, p. 81, 1995).

Temos que



com $n < n_a < n_v$

Na primeira reflexão, há uma mudança de fase. Na segunda também. Então, com as ondas em fase, para que ocorra interferência destrutiva da onda com $\lambda = 600 \text{ nm}$:

$$2n_a d = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda_{600}$$

para $\lambda = 700 \text{ nm}$ a interferência é construtiva, então

$$2n_a d = m\lambda_{700}$$

O valor para “d” deve ser satisfeito para ambas as equações, para tanto, precisamos descobrir o valor de “m”:

dividindo uma equação pela outra

$$m\lambda_{700} = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda_{600} \Rightarrow m = \frac{\lambda_{600}}{2(\lambda_{700} - \lambda_{600})} = 3$$

substituindo em uma das equações:

$$d = \frac{3\lambda_{700}}{2n_a} = 840 \text{ nm}$$

As principais concepções alternativas identificadas sobre o efeito de interferência são as seguintes:

- a) *Uma fenda produz os mesmos padrões de interferência de duas fendas*

Não há atribuição de diferença entre a figura de difração produzida por uma fenda e a figura de interferência produzida por duas fendas, ou seja, os estudantes acreditam que cada fenda sozinha é capaz de produzir o mesmo padrão de interferência que um par de fendas.

b) Divisão do padrão de interferência

Metade do padrão de interferência é produzida por uma fenda e a outra metade pela outra fenda, excluindo a possibilidade de um número maior de fendas.

Polarização

Por volta do ano de 1938, o físico americano Edwin Land conseguiu reproduzir o efeito da polarização com a *luz visível*. Land foi o criador do filtro polarizador para luz, conhecido como *polaróide*, barato e eficiente, e inventou uma câmera fotográfica de revelação instantânea que teve enorme sucesso, garantindo uma fortuna com suas pesquisas.

Sendo a luz uma onda eletromagnética, no espaço vazio, tem os seus campos elétrico e magnético vibrando perpendicularmente à direção de propagação. Se a vibração do campo elétrico ocorrer em um plano do espaço, tem-se uma onda linearmente polarizada (plano-polarizada). Da mesma forma, o campo magnético também estará vibrando em um plano. Na figura 25 estão representados os campos elétrico e magnético de uma onda plana monocromática, linearmente polarizada, que se propaga na direção do eixo X. O plano que contém o campo elétrico coincide com o da página.

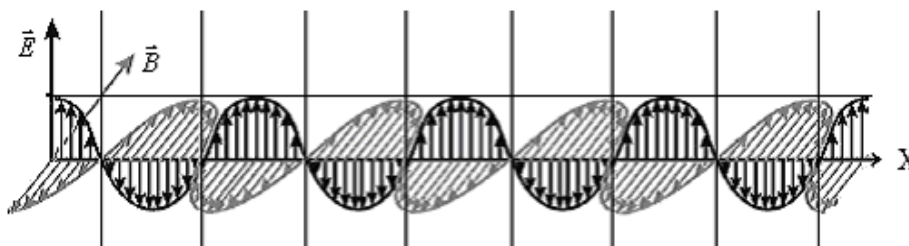


Figura 25 - Onda eletromagnética plano-polarizada.

Existem diversas formas de tornar uma onda eletromagnética polarizada: por absorção, espalhamento, reflexão e birrefringência. Provavelmente, a mais conhecida é a polarização por absorção (figura 26), na qual uma onda plano-polarizada é obtida a partir de um filtro polarizador, cujo material é construído especialmente para transmitir apenas uma direção de vibração do campo elétrico, paralelo ao seu *eixo de transmissão*. Dessa forma, podemos transformar a luz originalmente não-polarizada em luz polarizada fazendo-a passar pelo filtro polarizador, conforme representado na figura 26. No plano do filtro existe uma direção característica chamada *direção de polarização*, indicadas pelas linhas paralelas. A direção de polarização da placa é estabelecida durante o seu processo de fabricação, quando certas moléculas de cadeia longa são inseridas em uma placa de plástico flexível, estirando-a de modo que as moléculas se alinhem paralelamente umas as outras. Tal placa absorve a radiação polarizada na direção paralela às moléculas longas.

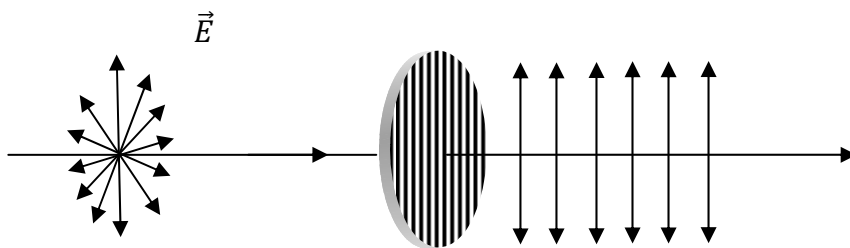


Figura 26 - Polarização por absorção do campo elétrico.

Nesse caso, são representadas as linhas de transmissão. Somente as componentes do campo elétrico nessa direção são transmitidas.

A direção das linhas de absorção, do filtro polarizador da figura 26, é horizontal. A placa só permite passar as componentes perpendiculares do campo \vec{E} a essa direção.

A polarização plano polarizada, (polarização linear) consiste, portanto, em fazer o campo elétrico oscilar em uma única direção e, conseqüentemente, o campo magnético também. Como o campo elétrico, no vácuo, é perpendicular à direção de propagação, este define um plano no espaço, chamado plano de vibração, enquanto a onda se propaga. Assim, temos dois planos perpendiculares entre si: um contendo o campo elétrico e outro o magnético.

Além desse tipo de polarização, existem também a polarização circular e a elíptica. Nos casos de fontes de luz, como o Sol ou uma lâmpada de incandescência, por exemplo, a luz emitida em uma dada direção consiste em muitas ondas independentes, com seus campos elétricos orientados em planos de vibração aleatórios, em torno da direção de propagação. Nesse caso, a luz é dita não-polarizada.

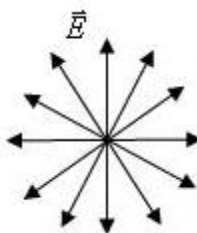


Figura 27 - Representação de luz não-polarizada.

Teoricamente, é possível decompor cada campo elétrico da figura 27 em componentes y e z e determinar o campo resultante na direção y e na direção z. Com isso, podemos transformar matematicamente a luz não-polarizada em duas ondas planas superpostas (figura 28).

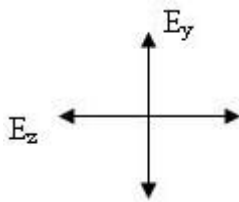


Figura 28 - Decomposição do campo elétrico.

Com isso, pode-se escrever a equação que represente o campo elétrico oscilante

$$\vec{E}_{(x,t)} = (E_y \hat{j} + E_z \hat{k}) \text{sen}(kx - \omega t)$$

supondo “E_y” e “E_z” reais.

Se as componentes do campo elétrico não estiverem oscilando em fase, o vetor do campo elétrico gira em torno do eixo de propagação, descrevendo uma onda elípticamente polarizada (figura 29): $\vec{E} = E_y \hat{j} \text{sen}(kx - \omega t) + E_z \hat{k} \cos(kx - \omega t)$, por exemplo.

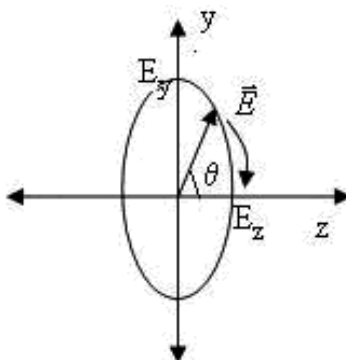


Figura 29 - Polarização elíptica.

Para o caso particular $E_y = E_z$, a onda é *circularmente polarizada*.

Quando a luz passa por uma placa polarizadora, a intensidade transmitida é, teoricamente, a metade da intensidade inicial. A intensidade transmitida varia de acordo com a seguinte expressão:

$$I = I_m \cos^2 \theta$$

Lei de Malus

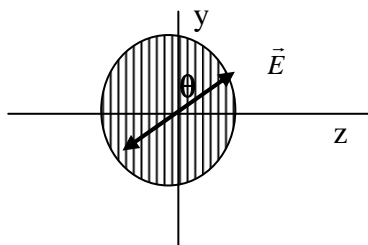


Figura 30 - Selecionando uma componente do campo elétrico polarizado.

Onde I_m é o máximo de intensidade e I a intensidade da luz transmitida. Na disposição do filtro polarizador da figura 30, somente a componente vertical do vetor campo elétrico é transmitida.

No caso de haver uma combinação de filtros polarizadores, a equação anterior assume a forma mais geral

$$I = I_m \prod_{i=1}^n \cos^2 \theta_i$$

Onde θ_i corresponde ao ângulo entre o eixo de transmissão do i -ésimo filtro polarizador e a direção do campo elétrico polarizado pelo filtro anterior.

A polarização da luz também pode ocorrer através da reflexão em uma placa de vidro ou outro material dielétrico, para um determinado ângulo crítico. Tal evento foi descoberto por acaso, em 1809, pelo estudioso Etienne Louis Malus, que deu nome à equação anterior. A figura 31 mostra um raio de luz não-polarizada incidindo em uma superfície de vidro. Os vetores do campo elétrico da luz podem ser decompostos em componentes perpendiculares ao plano de incidência (plano da página), representados por pontos, e por componentes paralelos, pertencentes ao plano de incidência, representados por setas.

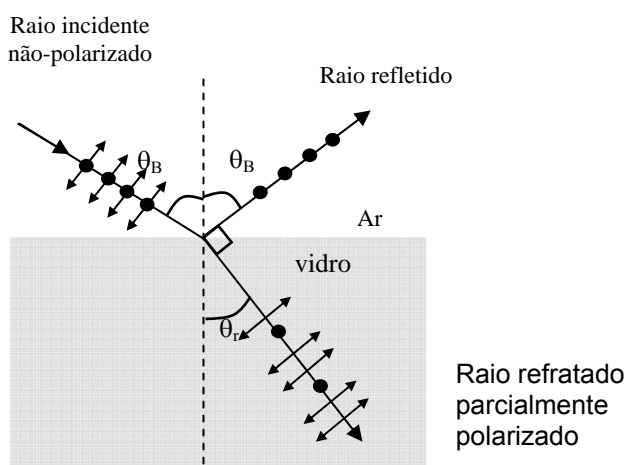


Figura 31 - Polarização por reflexão.

- Componente perpendicular
- ↔ Componente paralelo

Fonte: Halliday, Resnick e Walker. Fundamentos de Física 4, p. 30, 1995.

Para o vidro e outros materiais dielétricos, existe um ângulo de incidência particular chamado de *ângulo de Brewster* (θ_B), para o qual não há reflexão das componentes paralelas. Isso significa que a luz refletida no vidro, sob esse ângulo, é totalmente polarizada. O ângulo de Brewster (θ_B) é tal que o ângulo entre os raios refletido e refratado corresponde a $\pi/2$. Se usarmos um filtro polarizador com as linhas de transmissão (direção de polarização) perpendiculares ao campo elétrico, poderemos, teoricamente, bloquear totalmente o raio refletido. Contudo, na prática, nenhum polaróide é completamente eficaz.

A partir da Lei de Snell, considerando o ângulo de Brewster θ_B , podemos obter a relação entre a razão dos índices de refração dos dois meios e o ângulo θ_B :

$$n_1 \sin \theta_B = n_2 \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta_B \right) \quad \rightarrow \quad n_1 \sin \theta_B = n_2 \cos \theta_B$$

$$\therefore \tan \theta_B = \frac{n_2}{n_1}$$

Esta equação é conhecida como *Lei de Brewster*.

As principais concepções alternativas em relação ao efeito de polarização da luz são as seguintes:

a) *A luz polarizada está concentrada em uma só direção*

Alguns estudantes acreditam que o fenômeno da polarização se relaciona com alguma limitação na direção de propagação. Dessa forma, associam a polarização da luz a uma única direção de propagação, ao invés de relacionar com a direção de vibração dos campos elétrico e magnético.

b) *Polarização como absorção*

Consideram que a polarização ocorre quando são absorvidos determinados comprimentos de onda, resultando a monocromaticidade total ou parcial, desconsiderando a possibilidade de haver luz branca polarizada.

c) *Polarizador como rede*

Consideram que a luz polarizada é uma “luz filtrada”, que deve passar por uma superfície muito pequena, mas não única, como uma espécie de rede.

d) *Polarizador como refletor*

Segundo essa concepção, um óculos com lente polarizadora evita a reflexão da luz solar *nos olhos*, ou seja, têm a função de refletir a luz, impedindo que esta chegue ao olho do observador, protegendo-o, inclusive para evitar a luz ultravioleta.

e) *Campo magnético não-polarizável*

Os estudantes têm dificuldade em conceber a polarização do campo magnético, tratando o efeito de polarização linear somente para o campo elétrico, como se não houvesse transmissão da componente do campo magnético.

Espelhos

Espelho plano

O espelho plano pode ser considerado como um caso particular dos espelhos esféricos, considerando um raio de curvatura infinito. Também pode ser definido como uma superfície plana e lisa (homogênea) que reflete especularmente a luz. Os raios partem do objeto “O” (figura 32) e são refletidos no espelho chegando até o observador. Os raios refletidos parecem divergir de um ponto “i” atrás do espelho. O observador enxerga a imagem do objeto nesse ponto. Entretanto, os raios de luz não partem realmente dessa posição, por essa razão denomina-se a imagem de virtual (HEWITT, 2002). Chamamos de *imagem real* aquela formada na posição onde os raios luminosos realmente se cruzam.

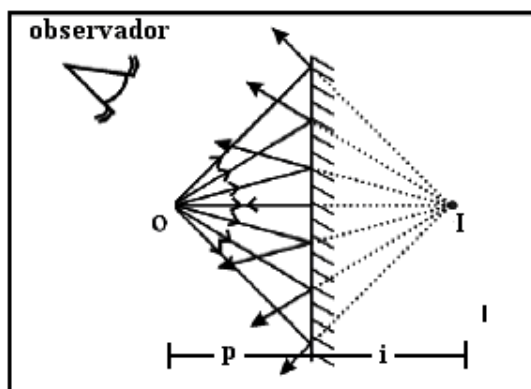


Figura 32 - Formação de imagem por espelho plano.

A imagem formada por um espelho plano é sempre virtual, porém, não sofre qualquer alteração no seu tamanho, ou seja, um espelho plano não é capaz de provocar efeito de ampliação. A imagem formada tem o tamanho do seu objeto, independente da distância que esteja do espelho. Com isso, a relação entre a distância da imagem ao espelho e do objeto ao espelho é $i = - p$. Onde, por convenção, a distância “i” da imagem ao espelho é negativa. Para um objeto extenso, a imagem é obtida determinando-se a imagem de cada ponto do objeto. Entretanto, podemos determinar a imagem a partir de três raios principais (figura 33).

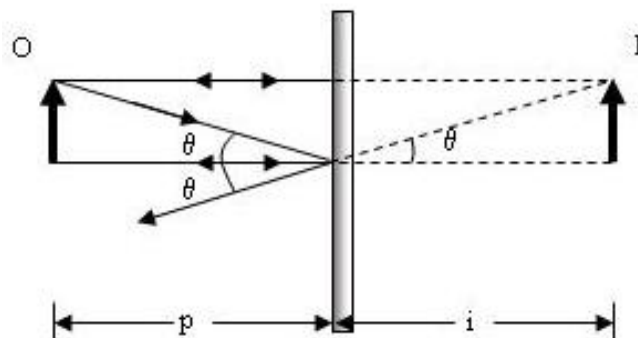


Figura 33 - Imagem de objeto extenso em um espelho plano.

As principais concepções alternativas sobre a formação de imagens por espelhos planos são:

a) *A imagem está na superfície do espelho*

Essa concepção, provavelmente, tem origem na dificuldade em conceber as características das imagens virtuais, que são formadas pelos prolongamentos dos raios refletidos na superfície do espelho, o que já sugere que a imagem não pode estar na superfície do espelho (figura 34), mas atrás dele. A imagem formada por um espelho plano não é somente do objeto em questão, mas de parte do ambiente que cerca esse objeto, sendo, portanto, reproduzida a distância que o objeto está do espelho.

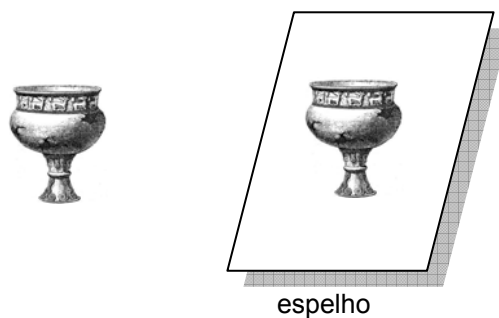


Figura 34 - Imagem está na superfície do espelho.

b) *O tamanho da imagem depende da distância do objeto ao espelho*

Quando um objeto se afasta de um espelho plano, sua imagem diminui (figura 35).

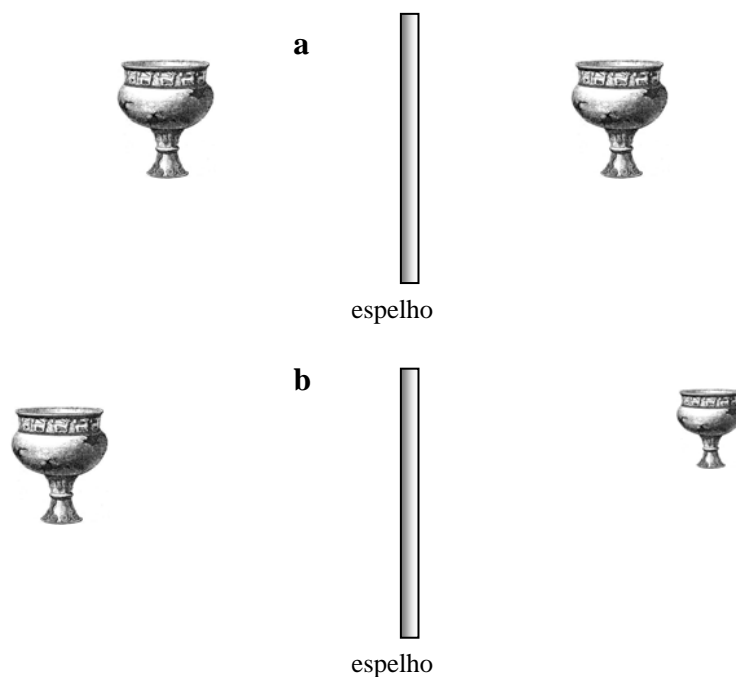


Figura 35 - Redução da imagem com o aumento da distância.

Possivelmente, tal concepção esteja relacionada à dificuldade de traçar os raios principais para determinação de imagens em espelhos planos.

c) A posição da imagem depende do observador

Quando um observador se move para um lado a imagem de um objeto observado se moverá para o lado contrário. Na verdade, a posição da imagem depende somente da posição relativa do objeto ao espelho. A visualização dessa imagem é que depende da posição na qual o observador está, ou seja, estar posicionado em um local onde os raios refletidos no espelho, provenientes do objeto, possam chegar aos olhos do observador.

d) Espelhos só podem ser feitos de metal ou vidro

Os estudantes investigados não consideram os espelhos planos simplesmente como qualquer superfície polida que reflete regularmente a luz, devendo ser, somente, de metal ou vidro.

e) Espelhos como refletores perfeitos

Alguns estudantes acreditam que os espelhos devem refletir toda luz incidente. Considerando apenas casos ideais, nos quais não há possibilidade de ocorrer absorção parcial da luz.

Espelho esférico

Pode-se definir um espelho esférico como uma superfície curva que reflete especularmente a luz. Se ocorrer a reflexão da luz em sua parte interna, tem-se um espelho côncavo, caso ocorra na parte externa, o espelho é convexo. Os elementos de um espelho esférico são: o ponto “v” denominado *vértice do espelho*; o ponto “c” é o *centro de curvatura*; o raio “r”, é o *raio de curvatura*, que corresponde à distância entre o ponto “c” e o espelho; o *ponto focal* “f”. A distância entre o ponto focal e o centro do espelho é chamada de *distância focal*. A equação dos espelhos esféricos tem a forma

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

onde “f” é a distância focal, “p” é a distância entre o objeto e o espelho e “i” é a distância entre a imagem e o espelho.

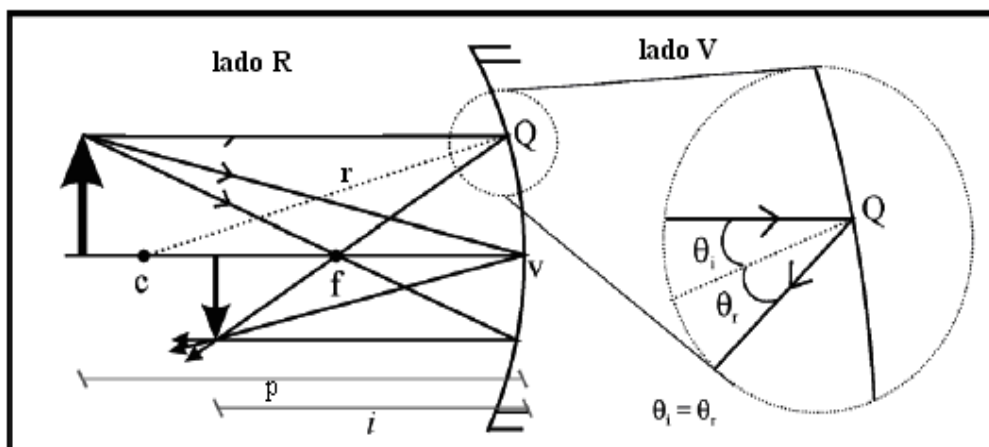


Figura 36 - Representação da validade das leis da reflexão no espelho esférico.

Por definição, o lado “R” do espelho (figura 36) é aquele no qual os raios são refletidos e podem formar *imagens reais*. O lado “V”, é o lado do espelho onde podemos ter os prolongamentos dos raios refletidos, formando as *imagens virtuais*. Além disso, para diferenciar entre os focos dos espelhos côncavo e convexo, chamamos de *foco real* (foco efetivo), no lado “R” do espelho, e *foco virtual* (foco aparente), no lado “V” do espelho, respectivamente. A distância focal “f” está relacionada ao raio de curvatura, para ambos os espelhos, da seguinte forma:

$$f = \frac{r}{2}$$

com isso, a equação dos espelhos esféricos toma a forma

$$\frac{2}{r} = \frac{1}{p} + \frac{1}{i}$$

A partir dos *raios de luz*, obtém-se um método útil para a localização de imagens com uma construção geométrica denominada *diagrama de raios*. São considerados quatro raios principais para os espelhos esféricos.

Para o espelho côncavo:

i) o raio que incide paralelamente ao eixo central (raio 1, figura 37) é refletido passando pelo foco do espelho côncavo;

ii) o raio que incide obliquamente no vértice de um espelho côncavo (raio 2, figura 37), é refletido fazendo com o eixo um ângulo igual ao de incidência;

iii) o raio que passa pelo foco de um espelho côncavo (raio 3, figura 37) é refletido paralelamente ao eixo;

iv) o raio que passa pelo centro de curvatura (raio 4, figura 37), atinge perpendicularmente a superfície do espelho e é refletido na direção de incidência.

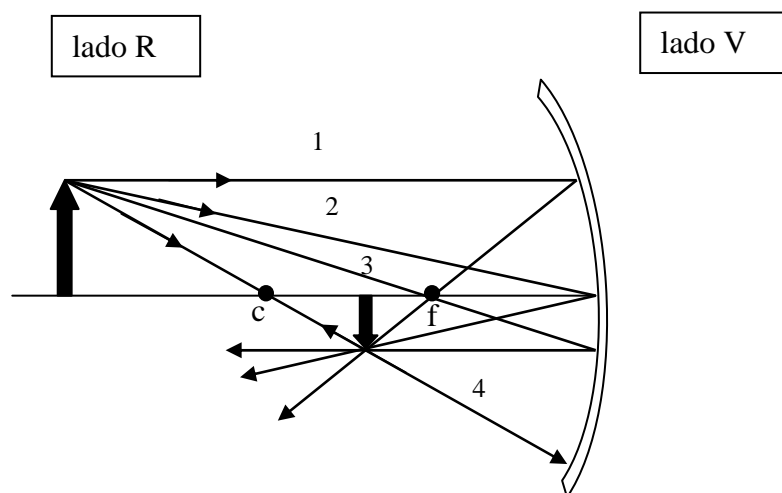


Figura 37 - Diagrama de raios principais para o espelho côncavo.

Para o espelho convexo:

i) o raio refletido, de uma incidência paralela ao eixo central de um espelho convexo, tem seu prolongamento passando pelo ponto focal virtual (raio 1, figura 38);

ii) Para o espelho convexo, o raio também é refletido na direção de incidência, caso o seu prolongamento passe pelo centro de curvatura (raio 2, figura 38);

iii) o raio que incide em um espelho convexo de forma que a sua direção passe pelo foco virtual (raio 3, figura 38), tem o prolongamento do raio refletido paralelo ao eixo;

iv) O raio que incide obliquamente no vértice do espelho convexo, reflete com ângulo, em relação ao eixo central, igual ao de incidência (raio 4, figura 38).

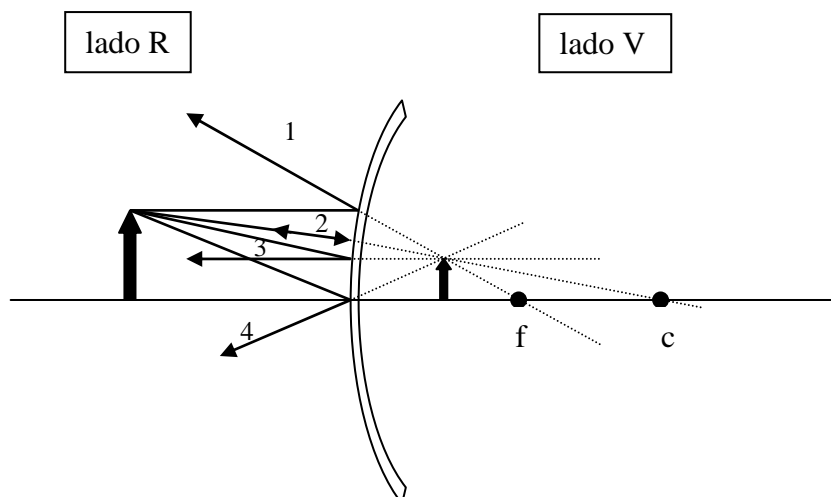


Figura 38 - Diagrama de raios principais para o espelho convexo.

De acordo com a convenção para os lados R e V do espelho, as imagens formadas por espelhos convexos são sempre virtuais, pois para qualquer posição que o objeto seja colocado, os raios incidentes no espelho serão refletidos, divergindo no lado R, e a imagem é localizada pelo cruzamento dos *prolongamentos* dos raios refletidos. Além disso, a imagem é sempre direita e reduzida. O mesmo não ocorre para espelhos côncavos, pois conforme a posição do objeto, podem formar imagens reais ou virtuais. Para um objeto posicionado entre o foco e o vértice do espelho côncavo, por exemplo, a sua imagem é virtual, direita e ampliada (figura 39).

O tamanho de um objeto, ou de sua imagem, que é medido perpendicularmente ao eixo central do espelho, é denominado de *altura*. A *ampliação lateral* m produzida por um espelho esférico está relacionada com as alturas h e h' (objeto e imagem, respectivamente) pela seguinte equação

$$|m| = \frac{h'}{h}$$

que também pode ser escrita a partir das posições do objeto e sua imagem, em relação ao espelho, através da expressão

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

Quando o valor de m é positivo e maior do que a unidade, a imagem é direita e tem altura superior à do objeto. Portanto, por convenção, se a imagem tem a mesma orientação do objeto a ampliação lateral inclui o sinal (+). No caso de a orientação da imagem ser invertida, o sinal atribuído à ampliação lateral é (-). Além disso, valores menores do que a unidade indicam que a altura da imagem é menor do que a altura do objeto. No espelho plano em que $i = -p$, temos $m = +1$, que significa que a imagem tem sempre o mesmo tamanho do objeto e a mesma orientação.

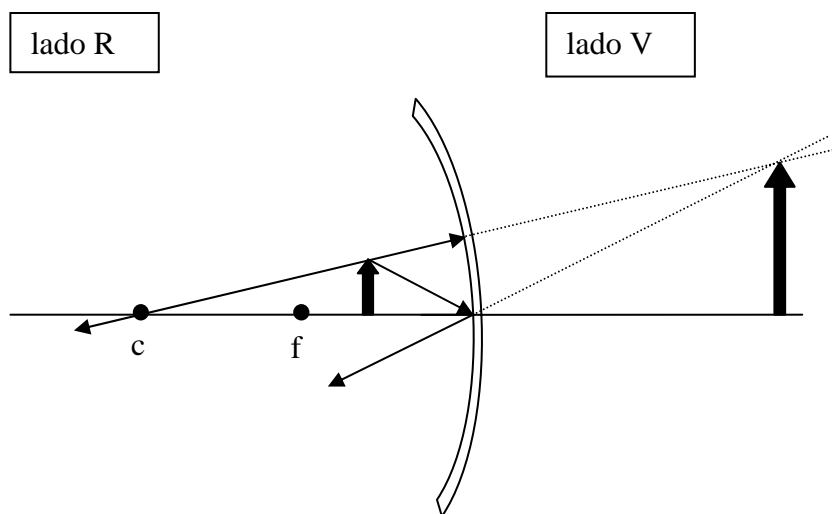


Figura 39 - Formação de imagem por espelho côncavo.

As principais concepções alternativas envolvendo espelhos esféricos são:

a) *Validade da 2ª lei da reflexão*

Os estudantes não consideram que a 2ª lei da reflexão seja aplicável para espelhos esféricos, acreditam que não é possível traçar uma normal para uma superfície esférica no ponto de incidência. Para alguns estudantes, a 2ª lei somente é válida para o centro de curvatura.

b) *A imagem não pode existir no espaço*

Independente da superfície do espelho, não é possível que a imagem de um objeto se forme no espaço, é necessário um anteparo no qual a imagem possa ser visualizada.

c) *Observação completa da imagem real*

A imagem real formada por um espelho côncavo sempre pode ser totalmente observada, independente dos limites inevitáveis do sistema óptico, como, por exemplo, o tamanho do espelho, desconsiderando a existência de um campo de visão.

Lentes

Uma lente pode ser definida como uma superfície refratora estreita limitada por duas superfícies transparentes. Quando essas superfícies são esféricas (ou apenas uma delas), a lente é denominada esférica. Existem seis tipos de lentes delgadas (figura 40) compatíveis com essa definição.

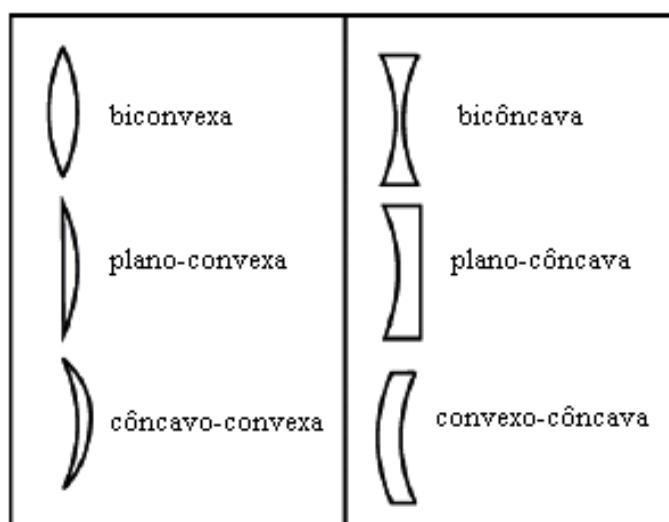


Figura 40 - Principais tipos de lentes.

As lentes convergentes (e. g., figura 41) possuem espessuras maiores em seus centros do que em suas bordas, com a condição de que essa lente tenha índice de refração maior que o meio no qual esteja imersa. Uma lente divergente é qualquer lente que seja mais delgada no seu centro do que em suas bordas, com a mesma exigência para o índice de refração. Porém, a convergência e a divergência de uma lente dependem do meio circundante, pois esses comportamentos são dependentes dos índices de refração do meio e da lente. Para cada lente existem dois focos, podendo a luz incidir em qualquer uma das faces. O ponto “C” é o centro de curvatura da lente localizado a uma distância “r” do seu centro óptico. A distância focal “f” é a distância entre o foco e o centro óptico. Por convenção, o lado *negativo* é a face em que há incidência da luz e o lado *positivo* é a face em que há transmissão da luz.

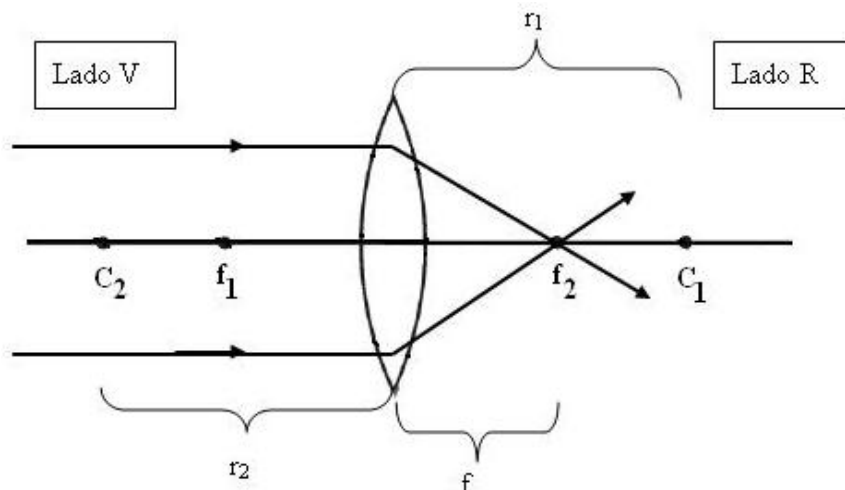


Figura 41 - Lente convergente.

Dessa forma, os sinais convencionados para as lentes são:

i (distância imagem-lente)
 imagem real (+), se a imagem está atrás da superfície (lado da transmissão)
 imagem virtual (-), se a imagem está na frente da superfície (lado da incidência)

r, f (raio de curvatura e distância focal)
 se o centro de curvatura está no lado da transmissão (+)
 se o centro de curvatura está no lado da incidência (-)

De acordo com essa convenção, o centro de curvatura C_2 da segunda superfície (esquerda para direita) está a uma distância “- r_2 ” do centro da lente, e o centro de curvatura da primeira superfície a uma distância “+ r_1 ” (HALLIDAY et al, 1995; TIPLER, 1995). Essa convenção de sinais também permite identificar os tipos de imagem, real e virtual, já comentados anteriormente. Sendo assim, atribui-se o sinal negativo à imagem virtual e o positivo à imagem real. A equação das lentes delgadas tem a seguinte forma

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

onde f é a distância focal da lente e é dada por

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

Sendo “n” o índice de refração do material da lente, com r_1 , o raio de curvatura da primeira superfície da lente e r_2 o da segunda.

Como no caso dos espelhos planos e esféricos, para a formação de imagens pelas lentes, é necessário, pelo menos, que de cada ponto do objeto que se deseja localizar a imagem emergjam dois raios na direção da lente.

Diagrama de raios principais para lentes

Para o caso das lentes delgadas, são três raios principais para localizar a imagem formada:

- o raio que incide paralelamente ao eixo principal é refratado, passando pelo segundo foco da lente convergente (raio 1, figura. 42). Na lente divergente, o raio que incide paralelamente ao eixo principal diverge como se viesse do primeiro ponto focal da lente (raio 1, figura. 43).
- o raio que passa pelo primeiro foco emerge paralelamente ao eixo principal em uma lente convergente (raio 3, figura. 42). O raio que incide em uma lente divergente, de forma que seu prolongamento passe pelo segundo ponto focal, emerge paralelamente ao eixo principal da lente (raio 3, fig. 43).
- o raio que incide no centro óptico não sofre desvio, tanto para lentes convergentes como para as divergentes (raio 2).

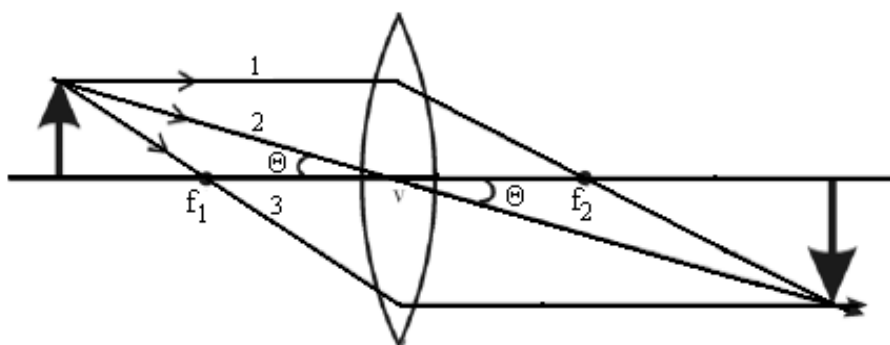


Figura 42 - Raios principais em uma lente convergente.

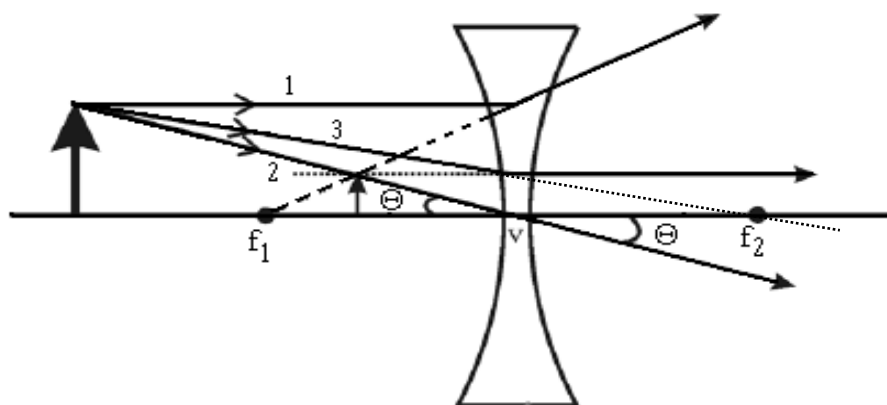


Figura 43 - Raios principais em uma lente divergente.

As concepções alternativas mais frequentes relacionadas ao conceito de lentes são:

a) *Lente como "acelerador"*

A lente aumenta a velocidade da luz que a atravessa, desconhecendo o próprio fenômeno da refração no qual um feixe que incide sobre um meio de índice de refração "n" maior, tem a sua velocidade aparentemente diminuída para "c/n".

b) *Formação de imagem com um raio ou sem lente*

Acreditam que no processo de formação de imagens seja suficiente que apenas um raio parta do objeto até o observador, desconsiderando a necessidade de haver, no mínimo, dois raios para a formação da imagem. A imagem de um objeto pode se formar em um anteparo sem a existência de lente - que pode ocorrer no caso de haver uma câmara escura, após a luz atravessar um orifício. Entretanto, nenhuma ressalva é atribuída, provavelmente por tratarem somente o caso da formação de imagens por lentes no momento do estudo.

c) *A lente deve estar completa*

Quando parte da lente é coberta será formada apenas uma parte da imagem de um objeto, como se a luz refletida pelo objeto viajasse apenas por uma região estritamente definida, sem considerar que um ponto do objeto reflete a luz em diversas direções.

Considerações finais

Essas são as principais concepções alternativas sobre os conceitos da Óptica, identificadas por pesquisas na área de Ensino de Ciências, que podem ser encontradas, não só em estudantes no início da educação científica, mas, inclusive, em alunos de graduação e até mesmo em professores. Obviamente, apenas conhecer tais concepções, identificá-las e tentar promover a mudança conceitual, não garante a aprendizagem significativa dos conteúdos de Física. Entretanto, possibilita, entre outras coisas, o desenvolvimento de materiais e tarefas potencialmente significativas para facilitar a aprendizagem. Nesse sentido, este texto objetivou apresentar as concepções contextualmente errôneas que os estudantes podem ter sobre os conteúdos da Óptica, contrapondo-as às concepções cientificamente aceitas, a partir das breves apresentações para cada tópico abordado, como uma forma de auxiliar no ensino desses conteúdos, uma vez que apresenta reunidas as diversas concepções alternativas encontradas por pesquisas em Ensino de Ciências, as quais constam da bibliografia.

Bibliografia

- ALVARENGA, B.; MÁXIMO, A. **Curso de Física**. 3ª ed. São Paulo: HARBRA, 1993. v. 2.
- AMBROSE, B. S.; SHAFFER, P. S.; STEINBERG, R. N.; MCDERMOTT, L. C. An investigation of students understanding of single-slit diffraction and double-slit interference. **American Journal of Physics**, New York, v. 67, n. 2, p. 146-155, Feb. 1999.
- AMBROSE, B. S.; HERON, P. R. L.; VOKOS, S.; MCDERMOTT, L. C. Student understanding of light as an electromagnetic wave: relating the formalism to physical phenomena. **American Journal of Physics**, New York, v. 67, n. 10, p. 891-898, Oct. 1999.
- ANDERSSON, B. and KÄRRQVIST, C. How swedish pupils, aged 12-15 years, understand light and its properties. **European Journal of Science Education**, v. 5, n. 4, p. 387-402, 1983.
- BRICKHOUSE, N. W. Children's observations, ideas, and the development of classroom theories about light. **Journal of Research in Science Teaching**, New York, v. 31, n. 6, p. 639-656, Aug. 1994.
- BENDALL, S.; GOLDBERG, F.; GALILI, I. Prospective elementary teacher's prior knowledge about light. **Journal of Research in Science Teaching**, New York, v. 30, n. 9, p. 1169-1187, Nov. 1993.
- BOUWENS, R. E. A. Misconceptions among pupil regarding geometrical optics. **Second International seminar on misconceptions in science**, vol III. Cornell, 1987.
- COLIN, P.; CHAUVET, F.; VIENNOT, L. Reading images in optics: students' difficulties and teachers' views. **International Journal of Science Education**, London, v. 24, n. 3, p. 313-332, March, 2002.
- CUDMANI, L. C.; PESA M. Obstáculos en el aprendizaje de la polarización luminosa: una experiencia con profesores de Física. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 16, n. 2, p. 208-225, ago. 1999.
- DANÓN, M. P. de; CUDMANI, L. C. de; SANDOVAL, J. S. de. Transferencia de resultados de la investigación educativa al aprendizaje de la óptica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 15, n. 1/4, p. 42-51, 1993.
- DANÓN, M. P. de. Concepciones y preconcepciones referidas a la formación de imágenes. **Revista de Enseñanza de la Física**, Cordoba, v. 12, n. 1, p. 13-46, mayo 1999.
- EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física Quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas**. 17ª tiragem. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1979.
- FEHER, E.; RICE, K. A comparison of teacher-student conceptions in optics. **Second International Seminar on misconceptions in Science**, vol II. Cornell, 1987.
- FEHER, E.; MEYER, K. R. Children's conceptions of color. **Journal of Research in Science Teaching**, New York, v. 29, n. 5, p. 505-520, May 1992.
- FETHERSTONHAUGH, T.; TREAGUST, D. F. Students' understanding of light and its properties: teaching to engender conceptual change. **Science Education**, New York, v. 76, n. 6, p. 653-672, Nov. 1992.
- FOWLES, G. R. **Introduction to modern optics**. Second edition. New York: Dover publications, 1989.
- GALILI, I.; LAVRIK, V. Flux concept in learning about light: a critique of the present situation. **Science Education**, New York, v. 82, n. 5, p. 591-613, Sept. 1998.

GALILI, I. Students' Conceptual change in geometrical optics. **International Journal of Science Education**, London, v. 18, n. 7, p. 847-868, Oct. 1996.

GALILI, I. The effects of prior knowledge and instruction on understanding image formation. **Journal of Research in Science Teaching**, New York, v. 30, p. 271-301, 1993.

GIRCOREANO, J. P.; PACCA, J. L. A. O ensino da óptica na perspectiva de compreender a luz e a visão. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 18, n. 1, p. 26-40, abr. 2001.

GOLDBERG, F. M.; MCDERMOTT, L. C. Student's difficulties in understanding image formation by a plane mirror. **The Physics Teacher**, p. 472-480, November, 1986.

GOLDBERG, F. M.; MCDERMOTT, L. C. Not all the wrong answers students give represent misconceptions: examples from interviews on geometrical optics. **First international seminar on misconceptions in science and mathematics**. Cornell, 1983.

GOLDBERG, F. M.; MCDERMOTT, L. An investigation of student understanding of the real image formed by a converging lens or concave mirror. **American Journal of Physics**, New York, v. 55, n. 2, p. 108-119, Feb. 1987.

GOULART, S. M.; DIAS, C. N.; BARROS, S. L. de S. Conceitos espontâneos de crianças sobre fenômenos relativos à luz: análise qualitativa. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 6, n. 1, p. 9-20, abr. 1989.

GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A. Modelos mentales y aprendizaje de física en electricidad y magnetismo. **Enseñanza de las Ciencias**. Barcelona, v. 16, n. 2, p. 289-303, jun. 1998.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. WALKER, J. **Fundamentos de Física**. 4ª ed., v. 4. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1995.

HARRES, J. B. S. Um teste para detectar concepções alternativas sobre tópicos introdutórios de Óptica Geométrica. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v.10, n. 3, p. 220-234, dez. 1993.

HEWITT, P. G. **Física Conceitual**. 9 ed. Porto Alegre: Editora Bookman - Artmed, 2002.

JUNG, W. Understanding students' understandings: the case of elementary optics. **Second International seminar on misconceptions in science**, vol III. Cornell, 1987.

LANGLEY, D.; RONEN, M.; EYLON, B. Light propagation and visual patterns: preinstruction learner's conceptions. **Journal of Research in Science Teaching**, New York, v. 34, N. 4, P. 399-424, Apr. 1997.

LOPES, E. M.; LABURÚ, C. E. Diâmetro de um fio de cabelo por difração (um experimento simples). **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v.18, n. 2, p. 240-246, 2001.

MOHAPATRA, J. K. Induced in incorrect generalizations leading to misconceptions: an exploratory investigation about the laws of reflection of light. **Journal of Research in Science Teaching**, New York, v. 25, n. 9, p. 777-784, Nov. 1988.

MOREIRA, M. A.; GRECA, I. M. Cambio conceptual: análisis crítico y propuestas a la luz de la teoría del aprendizaje significativo. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 9, n. 2, p. 301-315, 2003.

NUSENZVEIG, H. M. **Ótica, Relatividade e Física Quântica: curso de física básica**, v. 4. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.

PALACIOS, F. J. P.; CAZORLA, F. N.; MADRID, A. C. Misconceptions on geometric optics and their association with relevant educational variables. **International Journal of Science Education**, London, v. 11, n. 3, p. 273-286, Mar. 1989.

PESA, M.; CUDMANI, L. C. de; BRAVO, S. Formas de razonamientos asociados a los sistemas preconceptuales sobre naturaleza y propagación de la luz: resultados de una experiencia piloto. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 12, n. 1, p. 17-31, abr. 1995.

PESA, M. A.; BRAVO, S. V.; COLOMBO, E. M. **Investigando la luz y la visión**. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología – Universidad Nacional de Tucumán (UNT). Editora da UNT, 2003.

PINTÓ, R.; AMETLLER, J. Students' difficulties in reading images. Comparing results from four national research groups. **International Journal of Science Education**, London, v. 24, n. 3, p. 333-341, March, 2002.

RICE, K.; FEHER, E. Pinholes and images: children's conceptions of light and vision I. **Science Education**, New York, v. 71, n. 4, p. 629-639, July 1987.

RONEN, M.; EYLON, B. S. To see or not to see: the eye in geometrical optics: when and how? **Physics Education**, Bristol, v. 28, n.1, p. 52-59, Jan. 1993.

ROSA, C. La; MAYER, M.; PATRIZI, P. And MISSONI, M. V. Commonsense knowledge in optics: preliminary results of an investigation into the properties of light. **European Journal of Science Education**, v. 6, n. 4, p. 387-397, 1984.

SALINAS, J.; SANDOVAL, J. Objetos e imágenes reales y virtuales en la enseñanza de la Óptica Geométrica. **Revista de Enseñanza de la Física**, Cordoba, v. 12, n. 2, p. 23-36, sep. 1999.

SELLEY, N. J. Children's ideas on light and vision. **International Journal of Science Education**, London, v. 18, n. 6, p. 713-723, June 1996.

SILVEIRA, F. L. Uma epistemologia racional-realista e o ensino da física. 1993. 204 p. Tese de doutorado defendida no programa de pós-graduação em Educação da PUCRS.

SINGH, A. and BUTLER, P. H. Refraction: conceptions and knowledge structure. **International Journal of Science Education**, London, v. 12, n. 4, p. 429-442, 1990.

TIPLER, P. A. **Física para cientistas e engenheiros**. v. 4, 3ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1995.

VALADARES, J.; FONSECA, F. Uma estratégia construtivista e investigativa para o ensino da Óptica. **Revista da ABRAPEC**: Associação Brasileira de Pesquisa em Educação de Ciências, v. 4, n. 3, p. 74, set/dez, 2004. Disponível em <http://www.fc.unesp.br/abrapec/revistav4n3.htm>. Acessado em 20/08/2005.

VERGARA, D. A.; BUCHWEITZ, B. O uso de um vídeo no estudo do fenômeno de refração da luz. **Revista da ABRAPEC**: Associação Brasileira de Pesquisa em Educação de Ciências, vol 1, n. 3, p. 39, set/dez, 2001. Disponível em <http://www.fc.unesp.br/abrapec/revistav1n3.htm>. Acessado em 20/08/2005.

VIENNOT, L. Spontaneous reasoning in elementary dynamics. **European Journal of Science Education**, vol.1, n. 2, p. 205-221, 1979.

WOSILAIT, K.; HERON, P. R. L.; SHAFFER, P. S.; MCDERMOTT, L. C. Development and assessment of a research-based tutorial on light and shadow. **American Journal of Physics**, New York, v. 66, n. 10, p. 906-913, Oct. 1998.

WOSILAIT, K.; HERON, P. R. L.; SHAFFER, P. S.; MCDERMOTT, L. C. Addressing student difficulties in applying a wave model to the interference and diffraction of light. **American Journal of Physics**, New York, v. 67, n. 7, p. s5-s15, July 1999.

OUTRAS PUBLICAÇÕES DA SÉRIE “TEXTOS DE APOIO AO PROFESSOR DE FÍSICA”

- nº. 1 Um Programa de Atividades sobre Tópicos de Física para a 8ª Série do 1º Grau
Axt., R., Steffani, M.H. e Guimarães, V. H., 1990.
- nº. 2 Radioatividade
Brückmann, M.E. e Fries, S.G., 1991.
- nº. 3 Mapas Conceituais no Ensino de Física
Moreira, M.A, 1992.
- nº. 4 Um Laboratório de Física para Ensino Médio
Axt, R e Brückmann, M.E., 1993.
- nº. 5 Física para Secundaristas – Fenômenos Mecânicos e Térmicos
Axt, R. e Alves, V.M., 1994.
- nº. 6 Física para Secundaristas – Eletromagnetismo e Óptica
Axt, R e Alves, V.M., 1995.
- nº. 7 Diagramas V no Ensino de Física
Moreira, M.A, 1996.
- nº. 8 Supercondutividade – Uma proposta de inserção no Ensino Médio
Ostermann, F., Ferreira, L.M. e Cavalcanti, C.H., 1997.
- nº. 9 Energia, entropia e irreversibilidade
Moreira, M.A. 1998.
- nº. 10 Teorias construtivistas
Moreira, M.A, e Ostermann, F., 1999.
- nº. 11 Teoria da relatividade especial
Ricci, T.F., 2000.
- nº. 12 Partículas elementares e interações fundamentais
Ostermann, F., 2001.
- nº. 13 Introdução à Mecânica Quântica. Notas de curso
Greca, I.M. e Herscovitz. V. E., 2002.
- nº. 14 Uma introdução conceitual à Mecânica Quântica para professores do ensino médio
Ricci, T. F. e Ostermann, F., 2003.
- nº. 15 O quarto estado da matéria
Ziebell, L. F. 2004.
- v.16, n.1 Atividades experimentais de Física para crianças de 7 a 10 anos de idade
Schroeder, C., 2005.
- v.16, n.2 O microcomputador como instrumento de medida no laboratório didático de Física
Silva, L. F. da e Veit, E. A., 2005.
- v.16, n.3 Epistemologias do Século XX
Massoni, N. T., 2005.

- v.16, n.4 Atividades de Ciências para a 8a série do Ensino Fundamental: Astronomia, luz e cores
Mees, A. A.; Andrade, C. T. J. de e Steffani, M. H., 2005.
- v.16, n.5 Relatividade: a passagem do enfoque galileano para a visão de Einstein
Wolff, J, F de S e Mors, P. M., 2005.
- v.16, n.6 Trabalhos trimestrais: pequenos projetos de pesquisa no ensino de Física
Mützenber, L. A., 2005.
- v.17, n.1 Circuitos elétricos: novas e velhas tecnologias como facilitadoras de uma aprendizagem significativa no nível médio
Moraes, M. B. dos S. A., Ribeiro-Teixeira, R. M., 2006.
- v.17, n.2 A estratégia dos projetos didáticos no ensino de física na educação de jovens e adultos (EJA)
Espindola, K. e Moreira, M. A., 2006.
- v.17, n.3 Introdução ao conceito de energia
Bucussi, A., 2006.
- v.17, n.4 Roteiros para atividades experimentais de Física para crianças de seis anos de idade
Grala, R. M., 2006.
- v.17, n.5 Inserção de Mecânica Quântica no Ensino Médio: uma proposta para professores
Webber, M. C. M. e Ricci, T. F., 2006.
- v.17, n.6 Unidades didáticas para a formação de docentes das séries iniciais do ensino fundamental
Machado, M. A. e Ostermann, F., 2006.
- v.18, n.1 A Física na audição humano
Rui, L. R. , 2007.