

## CAPÍTULO 8

### A LUZ – Propriedades e Características

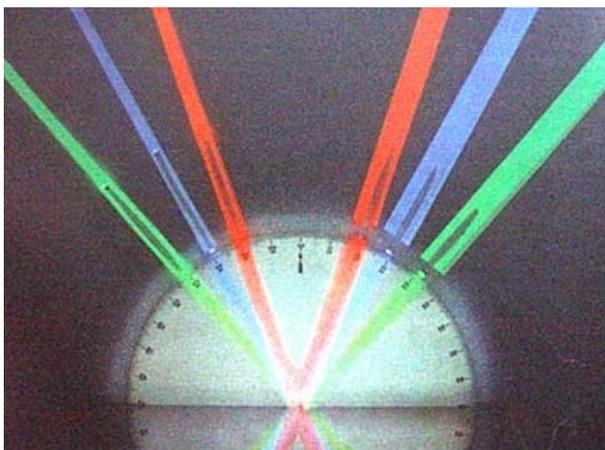
#### 1. Um pouco de História: a Ciência e a Luz

Luz é um fenômeno que intriga cientistas há muito tempo, e mesmo hoje em dia não há um consenso sobre sua verdadeira natureza. Os próprios gregos já haviam indagado a respeito, chegando a duas conclusões, por vezes conflitantes, que dividiam as opiniões dos estudiosos: uns acreditavam que todo objeto visível emitia uma torrente constante de partículas luminosas, que eram captadas por nossos olhos. Outros ainda acreditavam sair dos nossos olhos uma onda vibratória que atingia os objetos e tornava-os visíveis.

Apesar das teorias parecerem estranhas e ingênuas, elas foram especuladas praticamente sem nenhum conhecimento científico, apenas com base filosófica, e ambas geraram idéias sobre a luz que mantiveram os cientistas ocupados por muito tempo, pois da concepção grega decorrem as duas principais teorias sobre a luz durante a história da humanidade, a teoria das partículas e a teoria das ondas.

As partículas propagavam-se como gotas saindo de uma mangueira, e as ondas, como uma pedra atirada na água. Durante toda a história as teorias alternavam a preferência dos cientistas, e incrivelmente, hoje sabemos que ambas são parcialmente verdadeiras.

A primeira descoberta importante surgiu ainda na Grécia com Heron, de Alexandria, que, fazendo experiências com espelhos, descobriu que a luz caminha em linha reta, o que levou à seguinte lei: **o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão.**



**Fig. 1** – Demonstração da Lei de Heron, em que os ângulos de incidência são iguais aos de reflexão.

Daí até o séc. XVII, o progresso foi lento. O que mais intrigava os cientistas da época era saber se, afinal, a luz era uma partícula ou uma onda. E não conseguiam explicar como, sendo que a luz caminha em linha reta, um pedaço de madeira num copo com água parecia mudar de direção no novo meio líquido, ou seja, não parece reto ao observador.

Foi somente em 1621 que o matemático Wilbord Snell explicou o fenômeno, dizendo que ao penetrar num novo meio, os raios mudam de direção em função da variação de velocidade da luz nos diferentes meios por onde passa. Mas isso não contradiz a lei formulada por Heron? Snell contorna o aparente paradoxo, explicando que a luz continua em linha reta depois de atravessar o novo meio.

Snell mediu então o desvio em vários meios como água, ar, vidro, e constatou que o desvio variava de acordo com o meio.

A esse fenômeno ele chamou **REFRAÇÃO**.

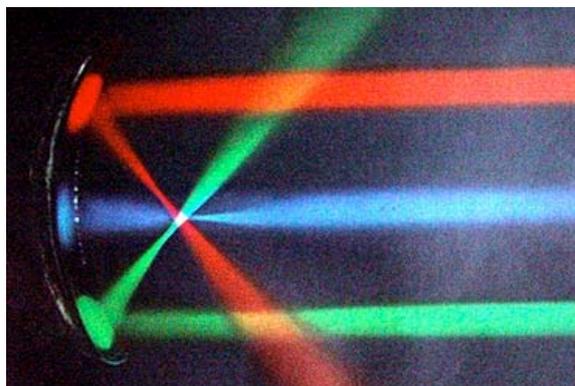
O ângulo de refração varia também com o ângulo de incidência. Se o raio incidir num ângulo de  $90^\circ$ , não há desvio nenhum, uma parte é refletida e outra é transmitida na mesma direção.

Em 1678, Christian Huygens sugeriu que o índice de refração é determinado pela velocidade que a luz atravessa o meio. Ele pensava que a luz era um movimento ondulatório, e se estivesse certo, o índice de refração seria maior quanto menor fosse a velocidade com a qual a luz penetrasse no meio. Mas se fosse partícula, acorreria o posto, ou seja, num meio mais denso, a velocidade seria maior, porque as partículas seriam atraídas pelas moléculas. Mas não havia tecnologia disponível para medir a velocidade da luz com precisão, de maneira que permaneceu a dúvida quanto à natureza do fenômeno luminoso, embora Huygens estivesse certo quanto à refração ser decorrente da alteração de velocidade.

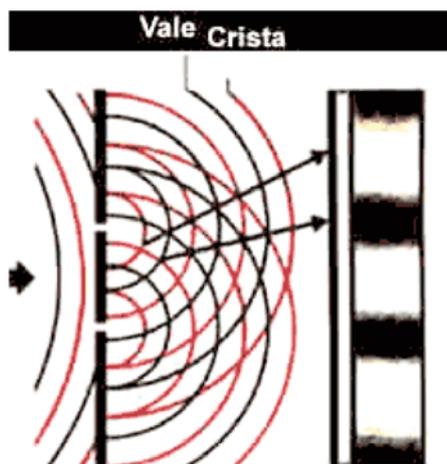
Sir Isaac Newton foi um dos cientistas do século XVII que mais contribuíram para o desenvolvimento científico em torno da luz e da cor, chegando a resultados que apenas no século XX foram admitidos verdadeiros.

A princípio, fazendo um feixe de luz passar por um prisma, percebeu que a luz se decompunha num espectro de cores, passando do alaranjado, amarelo, azul, até o violeta, e que podia recompor em luz branca este espectro à vontade. Assim, descobriu que a luz branca era formada por todas as cores do espectro, e que portanto cada cor correspondia a uma frequência. Isso o levou a estudar a cor como uma onda, mas, isolando as cores, nada podia fazer para alterar sua natureza.

**Fig. 2** – Experiência de Newton, no qual os feixes não mudam a trajetória nem a cor quando se cruzam uns aos outros.



Assim, experimentou cruzar feixes de luz com cores diferentes e, apesar de feixes de luz apresentarem uma resultante, o feixe após o cruzamento mantinha-se como o raio original. Esse fenômeno não poderia ser explicado se a luz fosse uma onda. Assim, Newton foi o primeiro a postular que a luz poderia ser de uma natureza dupla, partículas e ondas. Mas, para a época, era uma idéia tão avançada que Newton preferiu apenas especular sobre o tema em seu *Principia Optica*. Einstein, muito tempo depois, ao ler tais reflexões, percebeu que Newton quase havia chegado à verdade sobre a luz, e escreveu num prefácio sobre isso: “ Sir Isaac Newton, para quem a natureza não tinha segredos”.



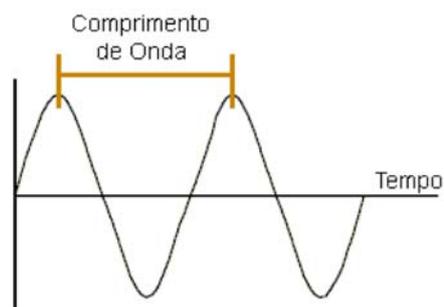
**Fig. 3** – Experiência de Grimaldi e Young: A difração e o padrão de interferência

Mas a comunidade científica era incapaz, como ainda é em muitos casos, de aceitar uma idéia que lhes pareça absurda, como esta da dupla natureza da luz. Assim, a vitória da teoria ondulatória foi quase total com o cientista italiano Francesco Grimaldi, contemporâneo de Newton, que, ao estudar a formação de sombras, verificou que elas nunca apresentavam contornos nítidos, chamando este fenômeno de **DIFRAÇÃO**. Pouco tempo depois, Thomas Young, partindo dos mesmos pressupostos, fez a seguinte experiência: deixando um feixe de luz atravessar uma parede com dois buracos, verificou que a sombra projetada numa segunda parede alternava sombras e luz.

Concluiu que, por sua natureza ondulatória, a luz, quando cruzavam as cristas das ondas, mantinham a luz, mas quando cruzavam os vales, permaneciam em sombra. Essa alternância de luz e sombra é chamado **Padrão de Interferência** (conf. Fig.3), e decorre do reforço e anulação de ondas que chegam em tempos diferentes.

Cabe então definir alguns conceitos: a distância entre uma crista à outra é chamado Comprimento de Onda, e o número de cristas, ou ondas, que passam por um determinado espaço de tempo, é chamado de Frequência. A frequência é medida normalmente em ciclos (ondas) por segundo, cuja unidade é o Hertz (Hz). Quando dizemos que uma onda tem frequência de 50 hertz, dizemos que existem 50 ondas num segundo.

Assim, **comprimento de onda x frequência = velocidade**, conf. Fig.4 à direita:



Em se tratando de luz, a velocidade num dado meio é constante. Assim, quanto maior for o número de ondas por segundo, menor será a distância que cada um terá que percorrer e portanto, seu comprimento será menor.

Essas diferenças são percebidas, por exemplo, na cor. Cada cor, tendo uma freqüência, tem um comprimento de onda, e é justamente isso que a diferencia.

Graças à experiência de Young é que conhecemos o fenômeno da polarização. Dois cristais, com características moleculares semelhantes, deixarão passar toda a luz, mas, ao girá-los, a luz irá diminuindo até o ponto em que nenhum raio conseguirá ultrapassar o segundo.

Até então, a teoria ondulatória reinava soberana, pois a teoria das partículas não conseguia explicar os fenômenos de interferência e difração.

A dúvida sobre a natureza da luz persistiu por causa da experiência de Newton: Considerando que a passagem da luz através de um prisma, se a luz fosse um fenômeno ondulatório, as diferentes cores obtidas em sua decomposição deveriam chocar-se umas com as outras quando devidamente desviadas da trajetória original, assim como o padrão de interferência de Young. Mas tal fenômeno não era verificado sob nenhuma condição, pois os raios decompostos não sofriam qualquer tipo de alteração da trajetória entre eles próprios. E, embora as evidências sobre a teoria ondulatória reinassem soberanas, ainda persistiam dúvidas insolúveis que eram deixadas muitas vezes de lado como argumento.

Somente no final do séc. XIX é que os cientistas voltaram a perguntar afinal, o que é a luz. O físico teórico inglês James Clerk Maxwell demonstrou que a luz fazia parte de um imenso espectro eletromagnético, e é percebida por nosso olho lhe ser sensível. Maxwell descobriu ainda que existe um elemento de ligação entre todo o espectro eletromagnético, e este era sua velocidade. No vácuo, todo o espectro viaja a aproximadamente 300.000 km/s, ou  $3,00 \times 10^8$  m/s. Desde os comprimentos quilométricos de baixa freqüência até os minúsculos comprimentos que só podem ser medidos em frações de milímetros, todos caminham à velocidade da luz. A teoria ondulatória seria universalmente aceita se, no advento do novo século, novas experiências não tivessem destronado a ondulatória como natureza absoluta da luz.

As experiências do físico Phillip Lenard, em 1900, demonstraram um fenômeno aparentemente inexplicável: ao expor uma placa de zinco à luz ultravioleta, esta liberava elétrons (negativos) e a placa adquiria carga positiva. A quantidade de elétrons emitidos por segundo era proporcional à intensidade de luz emitida. Isso foi caracterizado como efeito fotoelétrico, e sua aplicação atual é, principalmente nos aparelhos e câmaras de TV. Se a teoria ondulatória valesse para explicar esse fenômeno, a energia liberada destes elétrons seria também proporcional à intensidade de luz, mas isso não foi verificado, e sim que a energia liberada era inversamente proporcional aos comprimentos de ondas do feixe. Um raio de luz de comprimento pequeno emitia grande quantidade de energia, e vice-versa.

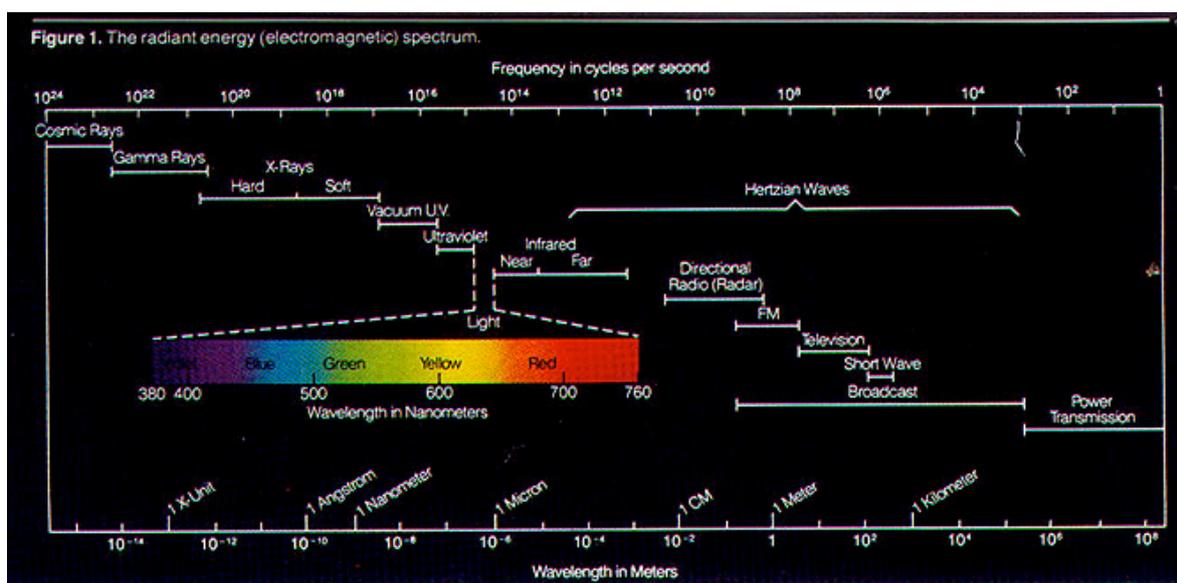


Fig. 5 – Espectro eletromagnético

Foi somente em 1905, com Albert Einstein, que o fenômeno foi explicado. Ele propôs que a teoria ondulatória era incompleta, e que a luz poderia ter características de partículas também. Matematicamente, demonstrou que um elétron liberado podia absorver uma partícula radiante, e ela então daria energia a ele, chamando essa energia de fóton ou quantum de energia. Então, quanto menor o comprimento de onda, mais energia ela poderia liberar.

Em 1923, Arthur Compton demonstrou que os fótons tinham energia cinética, e, portanto, massa.

*A luz, portanto é ondulatória e corpuscular, predominando por vezes uma, por vezes outra, mas sua constituição é de ambas características.*

Hoje sabemos, graças à tese sobre o Efeito Fotoelétrico de Einstein (que lhe valeu o prêmio Nobel de 1905), que a luz é um fenômeno elétrico, ligado à troca de energia entre elétrons. Assim é um determinado átomo possui um determinado número de camadas onde rodeiam os elétrons. Quando estes elétrons recebem um estímulo qualquer, sofrem alterações físicas, somente visíveis através das conseqüências destas alterações. A luz é uma destas conseqüências. Se uma determinada quantidade de energia incidir sobre o elétron, este poderá, dependendo da quantidade de energia, se desprender de sua camada original e passar para outra, mais interna ou mais externa. Quando isto acontece, o elétron libera a energia excedente desta passagem, energia esta chamada fóton. Fóton é, em última análise, a menor unidade daquilo que chamamos luz. Fóton é luz. Na prática, o que acontece é que quando passamos uma corrente elétrica por um filamento de metal, seus elétrons se aquecem, em decorrência do estímulo desta passagem. Como se trata de muita energia, os elétrons do filamento começam a trocar de camada e assim produzem fótons, milhões deles que são liberados dando assim a sensação da luz.

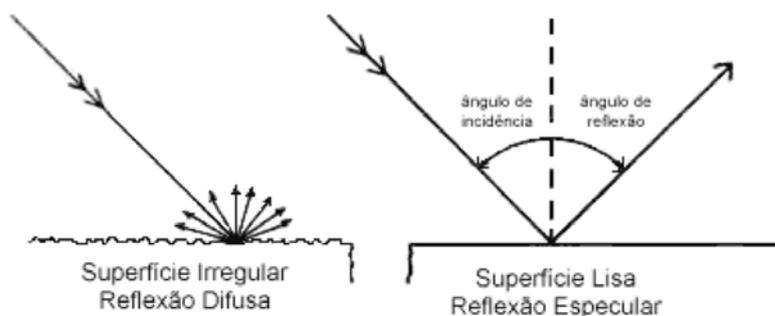
## 2. Características da Luz

Podemos então enumerar algumas características da luz, descobertas ao longo destes milênios de estudos sobre a sua natureza. A maior parte daquilo que utilizamos no cinema e na fotografia vem das propriedades ondulatórias da luz, e não propriamente das características quânticas ou corpusculares. Vamos a elas:

1) A luz visível é apenas uma ínfima parte do espectro eletromagnético. Isso significa que diversas outras frequências, como as mais próximas, o infra-vermelho e o ultra-violeta, apesar de não se fazer visíveis, por vezes alteram cor e contraste na imagem. Por isso é recomendável a utilização de filtros durante filmagens exteriores com luz do sol.

2) A luz, tendo massa, pode alterar qualitativamente uma estrutura qualquer. Isso significa que a luz não é apenas um estado energético, é uma entidade híbrida que combina matéria e energia de uma forma ainda desconhecida. Tudo que sabemos sobre isso é que a luz é capaz de transportar uma informação.

3) A luz segue os seguintes princípios: Ao ser emitida sobre um objeto qualquer, ocorrerá :



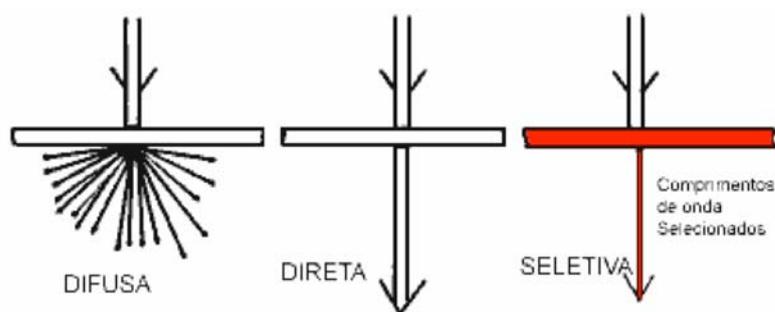
a) **Reflexão**, se o objeto for opaco, e poderá ser especular ou difusa. Se for especular, o ângulo de incidência será igual ao ângulo de reflexão. Se for difusa, os raios divergirão em várias direções, conf. Fig. 6 à esquerda.

b) **Absorção**, em quase todos os casos, principalmente se o objeto for preto, e aí todos os comprimentos de onda serão absorvidos, e transformados em calor. Todos os objetos opacos, translúcidos ou mesmo

transparentes, absorvem e refletem alguma quantidade de luz. Quanto mais ele absorve, mais escuro é o objeto, e quanto mais reflete, mais claro.

c) **Transmissão** ocorre num meio translúcido ou transparente, como o vidro, por exemplo. Sempre alguma luz, por mínima que seja, é refletida, ou então nem veríamos os objetos. Mas como deixam passar a maior quantidade de luz por eles, são chamados transparentes. Translúcidos serão aqueles que deixam passar a luz, também em grande quantidade, mas cuja transmissão sofre perdas e desvios significativos dos raios, dispersando a luz e tornando-a difusa.

Se o meio tiver uma cor, todas as demais serão barradas por ele, só deixando passar a frequência correspondente à mesma cor do meio.



**Fig. 7** – Transmissão da luz num meio translúcido (transmissão difusa), transparente (transmissão direta) e com seleção cromática (filtragem)

Os objetos, ao refletirem ou transmitirem a luz solar, não só o fazem em quantidade, mas também em qualidade. Significa que, de acordo com suas características físico-químicas, refletem ou transmitem determinados comprimentos de onda, adquirindo assim cores próprias.

Assim, um objeto que reflita ou transmita uniformemente todos os comprimentos de onda e examinado à luz solar aparecerá como branco (ou cinza, se absorver ou transmitir uniformemente uma parte da luz total incidente). Uma maçã é vermelha porque reflete apenas a porção de luz vermelha que sobre ela incide, absorvendo as demais. Um pedaço de veludo preto absorverá todos os comprimentos de onda da luz incidente sobre si. Um vidro transparente incolor transmite uniformemente todos os comprimentos de onda que sobre ele incidem, ao passo que um verde somente deixa passar os comprimentos de onda correspondentes ao verde e absorve os demais. Tais conceitos de absorção, reflexão e transmissão são importantes para o bom entendimento da ação da luz e formação das cores. Em especial serão úteis para o estudo do emprego dos filtros, tanto na fotografia a cores como em Preto-e-branco.

d) **Refração**, se a luz incidir em ângulo sobre uma superfície transmissora. Como a superfície transmissora é um meio onde a luz altera sua velocidade, ocorre a refração sob a seguinte fórmula:

$\text{Sen } A1 / \text{Sen } A2 = \text{Constante}$ , que é  $v1/v2$ , ou seja, a velocidade de cada meio. Considerando  $n = \text{velocidade da luz no vácuo} / \text{velocidade da luz no meio}$ , temos que  $n$  é o índice de refração, se aplicado à fórmula  $n1 \text{Sen} A1 = n2 \text{Sen} A2$ .

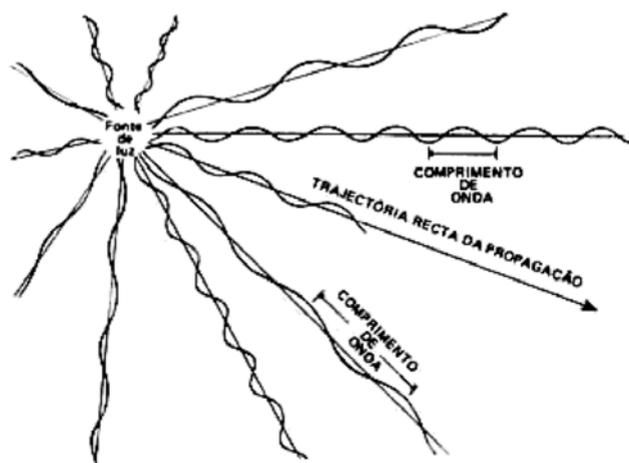
Portanto, quanto maior for o ângulo de incidência, maior será o ângulo de reflexão. Mas existe um limite para refração, que é o ângulo de  $90^\circ$  formado por seus senos. Ultrapassando esse limite, todo o feixe de luz será refletido.

e) **Dispersão** ocorre em todos os casos com exceção do raio laser, pois a luz saída de uma fonte tende sempre a se dispersar em todas as direções, o que explica o fenômeno das sombras não definidas (ver fig. 8)

A luz, na Terra, caminha em linha reta. Quando falamos em distâncias macrocósmicas, a luz, por ter massa, sofre desvios em função do campo gravitacional de grandes corpos celestes. Mas, aqui

na Terra, a gravidade dela não chega a se fazer sentir em termos de desvios de luz, e por isso dizemos genericamente que a luz não faz curva. A aplicação mais direta dessa propriedade é a fabricação de chassis para câmeras fotográficas e cinematográficas, em que uma simples curva de encaixe impede que a luz penetre e queime o filme.

Fig. 8 – Dispersão da luz



4) Quanto maior for a distância de uma fonte de luz ao seu objeto, menor será a luz por este recebido, na razão da quarta parte cada vez que se duplica a distância. Ou seja, Uma intensidade de luz determinada por uma distância, é reduzida à quarta parte cada vez que se dobra a distância. Esta lei é conhecida como "**Lei do inverso dos quadrados da distância**".

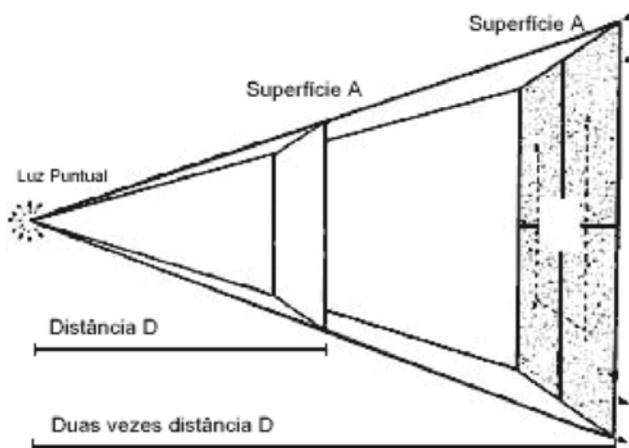


Fig. 9 – Lei do Inverso dos quadrados da distância: Cada vez que se dobra a distância da fonte de luz ao seu objeto, a quantidade de luz é reduzida em 4 vezes.

BIBLIOGRAFIA:

**BROWN, Blain.** *Cinematography: theory and practice*. Amsterdam: Focal Press, 2002

**LANGFORD, Michael.** *Fotografia Básica*. Dinalivro/Martins Fontes, 1979

**MUELLER, Conrad & RUDOLPH, Mae.** *Luz e Visão*. In Biblioteca Científica Life, Livraria José Olympio Editora, RJ, 1968

**RYAN, Rod (org.)** *American Cinematographer Manual*, ASC Press, CA, EUA, 7ª Edição, 1993