

FÍSICA

ÍNDICE

CAPITULO 01: HIDROSTÁTICA; EQUILÍBRIO DOS FLUIDOS	187
CAPITULO 02: ONDAS	192
CAPITULO 03: ACUSTICA.....	196
CAPITULO 04: LUZ	201
CAPITULO 05: REFRAÇÃO DA LUZ	209

PROFESSOR:

CAPÍTULO 01: HIDROSTÁTICA: EQUILÍBRIO DOS FLUIDOS

1 – Densidade (d)

A **densidade d** de um corpo é a razão entre sua massa e seu volume, independente da existência ou não de vazios em seu interior. Quando se trata de um material homogêneo, sem vazios, como no caso da maioria dos líquidos, a densidade é também denominada **massa específica**.

$$d = \frac{m}{V}$$

Unidades: kg / m^3 - g / cm^3
 $1 \text{ g} / \text{cm}^3 = 1000 \text{ kg} / \text{m}^3$

Alguns valores importantes:

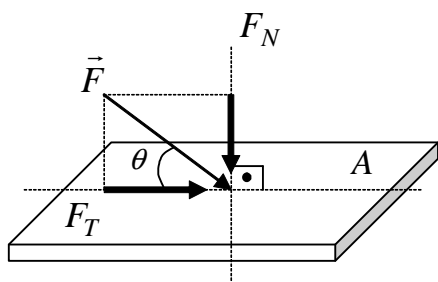
Material	d (g / cm ³)	d (kg / m ³)
Água	1,0	1.000
Mercúrio	13,6	13.600

2 – Definição de Pressão

Imagine uma força aplicada em uma superfície, inclinada de um ângulo θ em relação a ela, conforme está ilustrado. Seja **A** a área da superfície, assim, essa força apresenta duas componentes perpendiculares entre si:

- F_N : componente normal (perpendicular) à superfície.
- F_T : componente tangencial à superfície.

Uma vez que a compressão sobre a superfície se deve exclusivamente à componente F_N , a **pressão p** é definida como:



Note que a componente tangencial F_T provoca somente uma tendência de escorregamento sobre a superfície, sem comprimi-la, efeito este denominado de **cisalhamento**.

$$\frac{\text{Unidade de força}}{\text{Unidade de área}} = \frac{N}{m^2} = \text{Pa (Pascal)}$$

$$p = \frac{F_N}{A}$$

Outras unidades usuais:

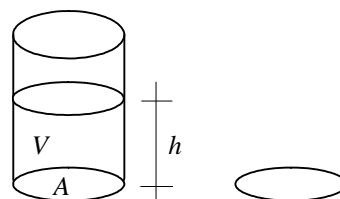
atm (atmosfera) $\Rightarrow 1 \text{ atm} = 100.000 \text{ Pa}$

mm Hg $\Rightarrow 1 \text{ atm} = 760 \text{ mm Hg}$

ba (bária) $\Rightarrow 1 \text{ Pa} = 10 \text{ ba}$

3 – Pressão Exercida por uma Coluna de Fluido

Imagine a seguinte situação: Uma altura **h** de um fluido de densidade **d**, encerrado em um recipiente cilíndrico de volume **V** e de área da base **A**, como está ilustrado abaixo. A pressão **p** exercida pelo peso desse fluido contra o fundo do recipiente é então dada por:



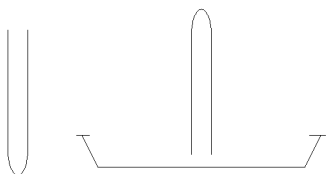
Observações Importantes:

- Uma vez que a pressão se deve exclusivamente às forças **normais** à superfície, sempre que houver um orifício na parede do recipiente, o fluido será projetado **perpendicularmente** à superfície.
- Quanto maior a coluna líquida $\Rightarrow > p$
- A pressão exercida por um fluido só depende da altura **h** da coluna de fluido, independentemente da forma do recipiente ou da quantidade de fluido contido nele.

4 – Experiência de Torricelli

Desde a época dos gregos antigo, já se sabia que o peso da atmosfera exerce uma certa pressão sobre “nossos ombros”, a pressão atmosférica. Mas somente na primeira metade do século XVII é que se propôs uma forma de se quantificar essa pressão. Para isso, o físico e matemático italiano Torricelli propôs a seguinte experiência, a ser realizada ao nível do mar:

- Enche-se de mercúrio (Hg), um tubo de aproximadamente 1 m de altura;
- Em seguida, emboca-se o tubo em uma “bacia”, também contendo mercúrio, observando-se a conseqüente acomodação do mercúrio no interior do tubo.



• Repetindo-se esse processo repetidas vezes, verifica-se que o desnível entre a superfície livre de Hg na “bacia” e no interior do tubo é de 76 cm = 760 mm, conforme ilustra a figura:

• Assim, a pressão que sustenta a coluna de Hg é a própria pressão atmosférica externa, impedindo que o nível de Hg da “bacia” se levante ainda mais, isto é:

$$P_{\text{atm}} = P_{760\text{mmHg}} = P_{0,76\text{mHg}}$$

• Sendo $d_{\text{Hg}} = 13600 \text{ kg/m}^3$ a densidade do mercúrio, então a pressão atmosférica, expressa em Pascal, é:

$$P_{\text{atm}} = d_{\text{Hg}}gh = 13600 \cdot 9,8 \cdot 0,76 \approx 101.300\text{Pa}$$

• Podemos concluir que:

$$1\text{atm} = 760 \text{ mmHg} \approx 10^5 \text{ Pa}$$

• Note que a experiência se realiza ao nível do mar, pois a pressão atmosférica depende da altitude do local.

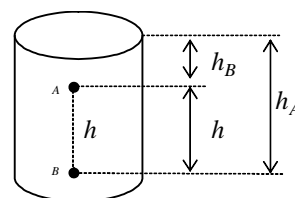
• Uma vez que a experiência de Torricelli foi realizada ao nível do mar, por que não utilizou a água ao invés do Hg?

• Uma outra unidade de pressão bastante comum é **mca** (metro de coluna d’água). Isto implica que paca cada 10 m de profundidade de água, corresponde um acréscimo de pressão de **1 atm**.

Exercício (UEPG-PR) Recentemente, um mergulhador estabeleceu um novo recorde, alcançando a marca de 62 m de profundidade, sem o uso de aparelhos. Se no local do mergulho a aceleração da gravidade era $9,8 \text{ m/s}^2$, $d_{\text{Hg}} = 13600 \text{ mmHg}$, a $d_{\text{H}_2\text{O}} = 1000 \text{ kg/m}^3$ e a $p_{\text{atm}} = 760 \text{ mmHg}$, o limite da profundidade alcançada a pressão exercida era:

- o dobro da pressão atmosférica.
- a pressão atmosférica.
- nenhuma, porque a pressão se anula por efeito da água.
- aproximadamente seis pressões atmosféricas.
- aproximadamente sete pressões atmosféricas.

5 – Teorema de Stevin



Considere os pontos **A** e **B** de um fluido em equilíbrio, de modo que a profundidade h_A do ponto **A** seja maior do que a profundidade h_B do ponto **B**, conforme ilustra a figura:

Mas a pressão devida a uma coluna de fluido, além da pressão atmosférica, é dada por **$p = dgh$** , logo:

O teorema de Stevin estabelece que:

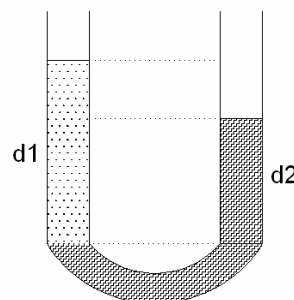
A diferença de pressão entre dois pontos no interior de um líquido em equilíbrio independe de suas profundidades, mas somente da diferença de nível entre esses dois pontos. Portanto:

Pontos nivelados → mesma pressão

Independente de suas profundidades.

6 – O tubo em “U”

Considere dois fluidos imiscíveis (água e óleo, por exemplo) de densidade d_1 e d_2 em um tubo em “U” ilustrados na figura abaixo. A interface de separação entre os dois fluidos é representada pelo alinhamento **XX**:

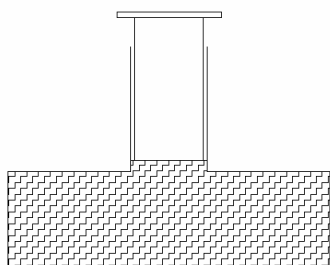


De acordo com o teorema de Stevin, os pontos nivelados devem estar submetidos a pressão idênticas. Porém, deve-se observar que o teorema de Stevin só se aplica a pontos de um mesmo fluido. Um ponto na interface de separação entre dois fluidos pode ser considerado como pertencente de ambos os fluidos.

Qual dos dois fluidos é o mais denso?

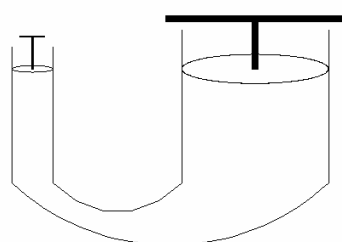
7 – Princípio de Pascal

O acréscimo de pressão aplicada sobre um ponto qualquer de um fluido em equilíbrio, transmite-se integralmente a todos os pontos do fluido.



8 – Prensa Hidráulica

A prensa hidráulica é um dispositivo que funciona como um multiplicador de força. Ela nada mais é do que um tubo “fino” interligado a um tubo “grosso”. Trata-se de um dispositivo muito utilizado em elevadores de automóveis.



Com uma pequena força, aplicada sobre a área do lado estreito da prensa, consegue-se erguer grandes cargas depositadas sobre o êmbolo de are do lado largo da prensa, pois, pelo princípio de Pascal, a pressão exercida do lado estreito deve se transmitir integralmente para o outro da prensa hidráulica:

$$\Delta p_{\text{LADOESTREITO}} = \Delta p_{\text{LADOLARGO}}$$

Como pressão = força / área, obtém-se:

$$\frac{f}{a} = \frac{F}{A}$$

9 - Empuxo

Desde os tempos mais remotos sabe-se que os corpos imersos em um fluido “se tornam mais leves”, tanto é que, dentro d’água, conseguimos erguer pedras tão pesadas que, fora d’água, não conseguiríamos sequer move-las.

Arquimedes descobriu uma maneira de se determinar a intensidade dessa força, denominada EMPUXO, que torna os objetos imersos mais leves, enunciando a famoso princípio de Arquimedes:

Todo corpo, total ou parcialmente imerso em um fluido, recebe deste um empuxo (força) vertical dirigida para cima, igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo.

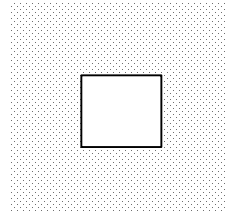
Como determinar a intensidade do empuxo?

Qual é a origem do empuxo?

A resposta pode ser extraída da expressão $p = d \cdot g \cdot h$, pressão exercida por um fluido a uma profundidade h pois:

$$> \text{profundidade} \Rightarrow > p \Rightarrow > F$$

Assim, representando as forças nos pontos mais profundos por vetores maiores, o diagrama de forças sobre um bloco imerso em um fluido é:



Portanto, lateralmente, essas forças se neutralizam mas verticalmente, há um excesso de forças de baixo para cima originada a força a que Arquimedes denomina de EMPUXO.

• Equação de empuxo

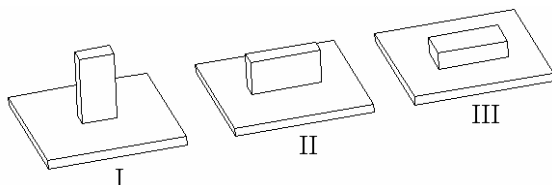
QUATRO CASOS IMPORTANTES

1. Se um corpo é mais denso do que o fluido (ferro e água, por exemplo), o seu peso é maior que o empuxo ($P > E$), de modo que o corpo desce com aceleração constante, apoiando-se no fluido.
2. Se a densidade do corpo é igual a do fluido (certas madeiras e a água, por exemplo), ele penetra totalmente no fluido, de modo que o seu peso é igual ao empuxo ($P = E$) e ele flutua totalmente submerso.
3. Se o corpo é menos denso do que o fluido (gelo e água, por exemplo), ao forçarmos o corpo de modo a afundá-lo totalmente no fluido, o empuxo é maior do que seu peso ($E > P$), de modo que o corpo sobe aflorando na superfície.
4. Se o corpo estiver imerso em líquido não miscível, o empuxo total sobre o corpo deve ser decomposto em três parcelas pois $d_1 \neq d_2 \neq d_3$ e $V_1 \neq V_2 \neq V_3$, ou seja:

$$E = d_1 V_1 g + d_2 V_2 g + d_3 V_3 g$$

LISTA DE EXERCÍCIOS GILCIMAR

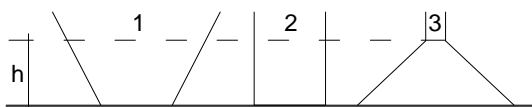
1. As figuras mostram um mosto tijolo, de dimensões $5 \times 10 \times 20 \text{ cm}$, apoiado sobre uma mesa de três maneiras diferentes. Em cada situação, a face do tijolo que está em contato com a mesa é diferente.



As pressões exercidas pelo tijolo sobre a mesa nas situações I, II e III são, respectivamente P_1 , P_2 e P_3 . Com base nessas informações, é correto afirmar que:

- a) $P_1 = P_2 = P_3$
- b) $P_1 < P_2 < P_3$
- c) $P_1 > P_2 < P_3$
- d) $P_1 > P_2 > P_3$
- e) $P_1 = P_2 > P_3$

2. Três recipientes que contêm água até uma mesma altura h , têm bases cujas áreas são A , A e $2A$, respectivamente.



Em relação às pressões P_1 , P_2 e P_3 e às intensidades das forças F_1 , F_2 e F_3 exercidas pela água no fundo dos recipientes, é correto afirmar:

- a) $P_1 = P_2$ $F_1 = F_3/2$
- b) $P_1 < P_2$ $F_1 = F_2$
- c) $P_2 = P_3$ $F_2 = 2F_3$
- d) $P_2 < P_3$ $F_2 = F_3$
- e) $P_1 = P_2 = P_3$ $F_1 = F_2 = F_3$

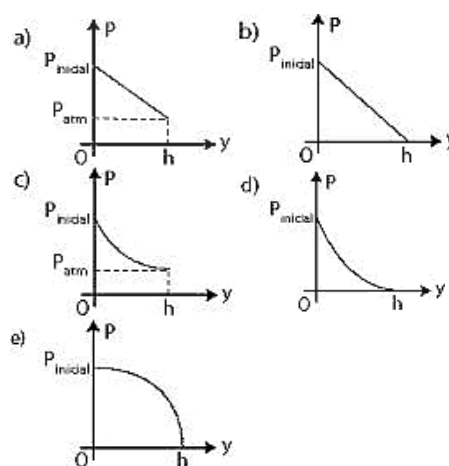
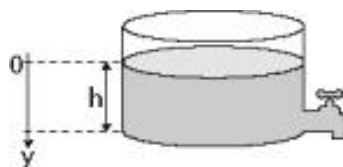
3. Um mergulhador está nadando horizontalmente a uma profundidade de 15 m numa região onde a pressão atmosférica ao nível do mar é $1,0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ e, devido à salinidade excessiva, a água do mar tem densidade 1100 kg/m^3 . A pressão total que atua sobre o mergulhador é:

- a) $2,50 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
- b) $2,55 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
- c) $2,60 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
- d) $2,65 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
- e) $2,75 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

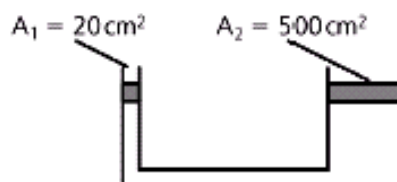
4. Para tirar sangue de uma pessoa faz-se 'vácuo' no interior de uma seringa, cuja agulha é introduzida na veia dessa pessoa. O sangue flui para a seringa porque:

- a) é colocada uma tira de borracha, apertando a veia, para expulsar o sangue.
- b) a agulha possui diâmetro interno muito pequeno possibilitando a capilaridade.
- c) ele tende a atingir o mesmo nível na seringa e na veia, por serem vasos comunicantes.
- d) a pressão sangüínea é maior que a pressão no interior da seringa.
- e) a seringa fica em um nível mais baixo que o ponto da picada.

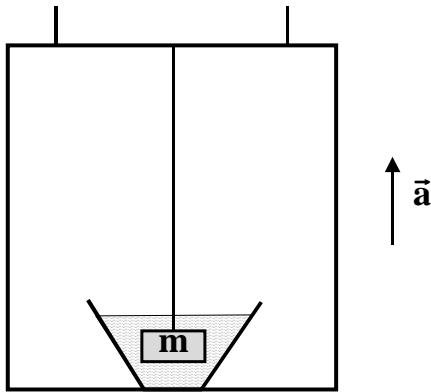
5. Um reservatório cilíndrico aberto, conforme ilustração a seguir, possui uma torneira pela qual flui um líquido, de forma que o nível do reservatório baixe com velocidade constante. O gráfico que melhor representa a pressão total no fundo do reservatório desde o início da vazão do líquido até seu esvaziamento completo é:



6. No macaco hidráulico representado a seguir sabe-se que $A_1 = 20 \text{ cm}^2$ e $A_2 = 0,05 \text{ m}^2$. Qual o peso máximo que este macaco pode levantar quando fazemos uma força de 10 N em A_1 ?



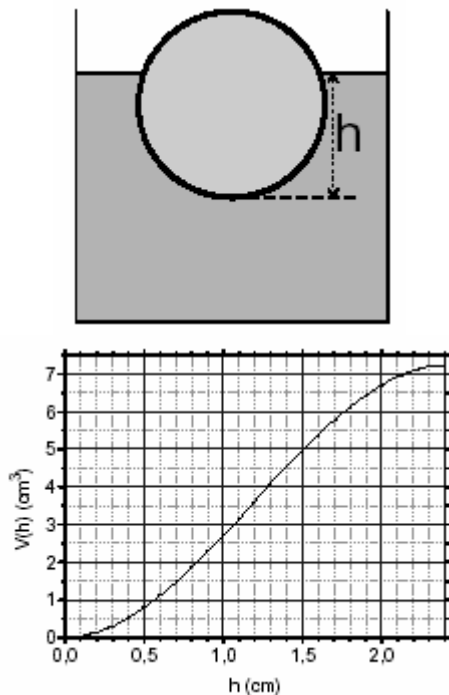
- a) 250 N
- b) 1000 N
- c) 100 N
- d) 1500 N
- e) 500 N



7. Um bloco homogêneo de massa m e densidade d é suspenso por meio de um fio leve e inextensível preso ao teto de um elevador. O bloco encontra-se totalmente imerso em água, de densidade ρ , contida em um balde, conforme mostra a figura. Durante a subida do elevador, com uma aceleração constante \vec{a} , o fio sofrerá uma tensão igual a

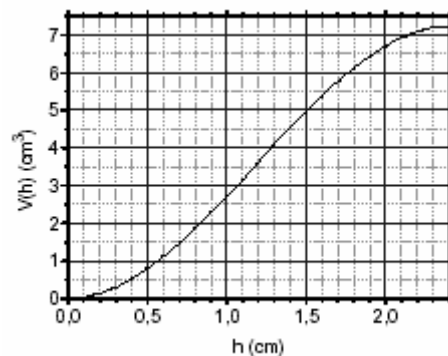
- $m(g+a)(1-\rho/d)$
- $m(g-a)(1-\rho/d)$
- $m(g+a)(1+\rho/d)$
- $m(g-a)(1+d/\rho)$
- $m(g+a)(1-d/\rho)$

8. Uma esfera de raio 1,2 cm e massa 5,0 g flutua sobre a água, em equilíbrio, deixando uma altura h submersa, conforme a figura. O volume submerso como função de h é dado no gráfico. Sendo a densidade da água 1,0 g/cm³.

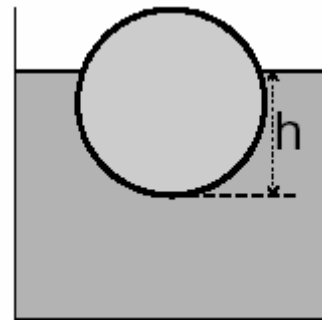


a) calcule o valor de h no equilíbrio; ($h = 1,5\text{cm}$)

b) ache a força vertical para baixo necessária para afundar a esfera completamente. ($F = 2,2 \times 10^{-2} \text{ N}$)



Uma esfera de raio 1,2 cm e massa 5,0 g flutua sobre a água, em equilíbrio, deixando uma altura h submersa, conforme a figura. O volume submerso como função de h é dado no gráfico. Sendo a densidade da água 1,0 g/cm³.



a) calcule o valor de h no equilíbrio;
b) ache a força vertical para baixo necessária para afundar a esfera completamente.

a)



No equilíbrio:

$$P = E$$

$$mg = \rho Vg$$

onde ρ é a densidade da água e V é o volume

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{5,0 \text{ g}}{1,0 \text{ g/cm}^3} = 5,0 \text{ cm}^3$$

Através do gráfico fornecido, obtém-se a altura submersa:

$$h = 1,5 \text{ cm}$$

(2 pontos)

d) Com a esfera totalmente submersa, $h = 2r = 2,4 \text{ cm}$. Do gráfico:

$$V' = 7,2 \text{ cm}^3$$

Nestas condições, para que se tenha equilíbrio:

$$\begin{aligned} \vec{F} &= \vec{E} - \vec{P} \\ F &= E - P \\ F &= (\rho V' - m)g \\ &= (1,0 \text{ g/cm}^3 \cdot 10^{-3} \text{ kg/g} \cdot 7,2 \text{ cm}^3 - 5,0 \text{ g} \cdot 10^{-3} \text{ kg/g}) \cdot 10 \text{ m/s}^2 \\ &= 2,2 \times 10^{-2} \text{ N} \end{aligned} \quad (3 \text{ pontos})$$

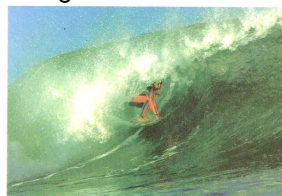
CAPÍTULO 02: ONDAS

As coisas tangíveis tornam-se insensíveis à palma da mão. Mas as coisas finas, muito mais que lindas, essas ficarão.

Carlos Drummond de Andrade

Assistindo a um jogo de futebol você comemora um gol de falta. Quando a bola balança a rede, houve transporte de energia dos pés do jogador para a rede, mas essa transferência de energia foi feita pela bola que se deslocou. O mesmo acontece quando uma pedra atinge o vidro de um carro ou quando o vento empurra um barco a vela.

Seria possível transportar energia sem envolver o transporte de matéria? A resposta é sim. Imagine agora um passageiro, sentado em uma estação ferroviária, aguardando calmamente a chegada do trem. Mesmo de olhos fechados, ele percebe a aproximação do trem. Um pequeno tremor passa por seus pés, o ruído das rodas atinge seus ouvidos e, finalmente, abrindo os olhos, ele vê o trem se aproximando. O passageiro não se sentiu arrastado pelas vibrações que chegaram a seus pés nem pelo ruído que chegou a seus ouvidos nem tampouco pela luz que recebeu do trem. Esses sinais correspondem à energia que se propaga pelo solo e pelo ar, mas sem arrastar o meio em que se propagam. Isso também acontece quando atiramos uma pedra na água e vemos os objetos que flutuam serem atingidos pela oscilação ou quando o rádio do carro recebe os sinais de uma emissora. Esta é a principal característica das ondas: elas transportam energia sem envolver o transporte de matéria.



A energia da onda eleva o surfista e a ação da gravidade o faz escorregar para baixo.

Mas como os cientistas conseguiram explicar as vibrações e suas propagações? O grande salto para essa compreensão foi dado por Christiaan Huyghens (1625-1695), no século XVII, com trabalhos sobre oscilações mecânicas e ondas. Suas idéias no campo da Ondulatória foram utilizadas nos trabalhos de Snell, René Descartes, Fresnel, Young, Louis de Broglie, Planck e outros.

Na Astronomia, as ondas desempenham um papel fundamental. Pelas ondas captadas dos confins do espaço sideral, os astrônomos procuram equacionar os céus, buscando o entendimento da criação do Universo.

Atualmente, são inúmeras as aplicações da Ondulatória.

Entre outras, podemos citar o fono microondas, o ultra-som, os raios X, o radar e as telecomunicações.

1. CLASSIFICAÇÃO DAS ONDAS

Uma onda é uma perturbação que se propaga transportando energia, sem envolver transporte de matéria.

Podemos classificar as propagações ondulatórias de acordo com a direção da vibração, com a natureza da vibração e com os graus de liberdade para a propagação.

Em relação à direção da vibração, temos:

- ondas transversais - a direção da vibração é perpendicular à direção em que se propaga a onda.
- ondas longitudinais - a direção da vibração é a mesma em que se efetua a propagação da onda.
- ondas mistas - ambas as condições anteriores ocorrem simultaneamente, como é o caso das perturbações se propagando na superfície dos líquidos.

Em relação à natureza da vibração, temos:

- ondas mecânicas - transportam vibrações mecânicas: as partículas materiais estão vibrando. É o caso das ondas em cordas, molas, superfície e interior dos líquidos, sólidos (terremotos) e gases (som no ar) etc. As ondas mecânicas necessitam de um meio material para sua propagação.
- ondas eletromagnéticas (ondas de rádio, microondas, luz visível, raios X e outras - não necessitam, obrigatoriamente, de um meio material para sua propagação, fazendo-o até mesmo no vácuo, onde todas as ondas eletromagnéticas têm a mesma velocidade: 300.000 km/s. Em relação aos graus de liberdade para a propagação,

temos:

- ondas unidimensionais - a propagação da onda acontece sobre uma linha. Como exemplo, temos as ondas em cordas.
- ondas bidimensionais - a propagação da onda acontece sobre uma superfície. É o caso das ondas na superfície dos líquidos.
- ondas tridimensionais - a propagação da onda acontece sobre todo o espaço tridimensional.

Como exemplo, temos o som se propagando no ar.

2. PULSOS

Uma onda correspondente a uma perturbação simples é denominada *pulso* (figura 1).

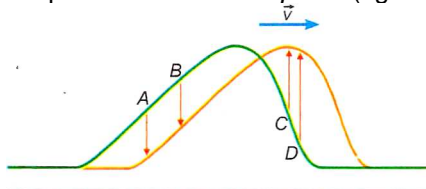


Figura 1 Instantâneo de um pulso transversal propagando-se para a direita, numa corda.

A linha vermelha corresponde a uma posição futura a ser ocupada pela perturbação, após um intervalo de tempo Δt . As setas indicam os deslocamentos que sofrerão os vários pontos da corda para atingir a nova posição. Os pontos A e B estão descendo, os

pontos C e D estão subindo.

3. ONDAS PERIÓDICAS

Uma sucessão de pulsos iguais produz uma onda periódica. Das ondas em geral, as periódicas apresentam especial interesse, tanto pela facilidade de descrição quanto pelas aplicações práticas. Analisaremos as ondas periódicas unidimensionais (figura 2).

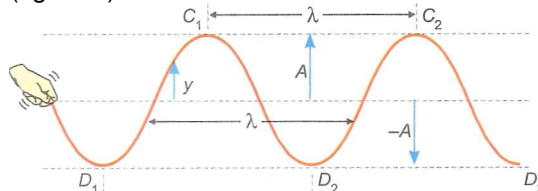


Figura 2 Ondas periódicas.

Nas ondas periódicas, destacamos:

- **elongação** (y): valor algébrico da ordenada do ponto oscilante da corda.
- **amplitude da onda** (A): o maior valor da elongação, relacionada com a energia transportada pela onda.
- **frequência** (f): número de oscilações executadas por qualquer ponto da corda, por unidade de tempo.
- **período** (T): tempo de uma oscilação completa de qualquer ponto da corda.
- **fase** (ϕ): ângulo pelo qual, no M.H.S., calculamos a elongação.
- **cristas e vales**: os pontos C_1, C_2, \dots são denominados cristas, e os pontos D_1, D_2, \dots vales.
- **concordância de fase**: dois pontos estão em concordância de fase quando têm sempre o mesmo sentido de movimento (C_1 e C_2 ; D_1 e D_2).
- **oposição de fase**: dois pontos estão em oposição de fase quando têm sempre sentidos opostos de movimento (C_1 e D_2).
- **comprimento de onda** (λ): genericamente, é a menor distância entre dois pontos que vibram em concordância de fase; em particular, é a distância entre duas cristas ou dois vales consecutivos.

As ondas periódicas são periódicas no tempo e no espaço. Assim, a cada intervalo de tempo igual a um período (T) as fases se repetem. Se fixarmos um instante (fotografia), a cada comprimento de onda (λ), as fases também se repetem. Portanto:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T}$$

$$f = \frac{1}{T}$$

Como $f = \frac{1}{T}$, obtemos:

$$v = \lambda f$$

Observações

- A frequência de uma onda é a frequência da fonte que a produziu, não variando, portanto, durante a propagação.
- A velocidade de propagação é característica do meio.

Para ondas de mesmo tipo, num mesmo meio, teremos' mesma velocidade.

4. REFLEXÃO DE ONDAS

Uma onda sofre reflexão quando, ao atingir a fronteira de separação de dois meios, retoma ao meio de origem (figura 3).

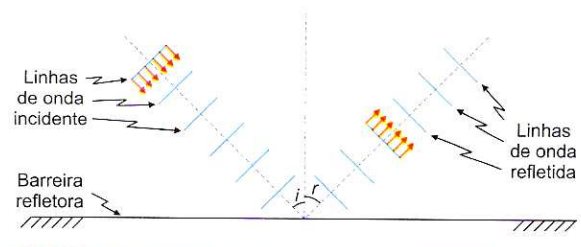


Figura 3 Reflexão de ondas.

Observações

- Como a velocidade é característica do meio de propagação, a onda refletida tem a mesma velocidade da onda incidente, pois ambas se propagam no mesmo meio.
- A frequência, por ser uma característica da fonte, permanece inalterada.
- O comprimento de onda também permanece inalterado.

5. REFRAÇÃO DE ONDAS

Uma onda sofre refração quando transpõe a fronteira de separação de dois meios de propagação, passando a se propagar no outro meio e, naturalmente, com outra velocidade (figura 4).

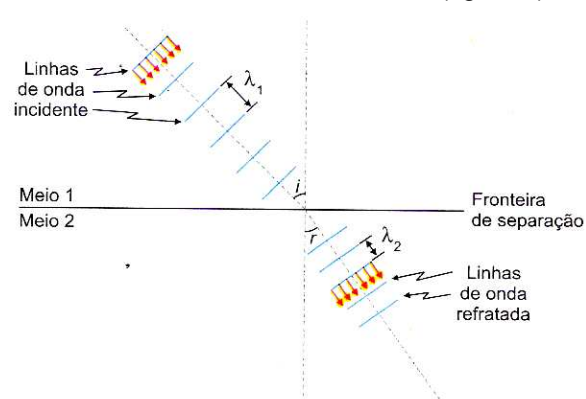


Figura 4 Refração de ondas.

O que caracteriza a refração é uma mudança na velocidade de propagação, podendo haver ou não mudança de direção de propagação, dependendo do ângulo de incidência.

A refração de ondas obedece à lei de Snell-Descartes:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

Observações

- A frequência das ondas, característica da fonte de ondas, não se altera na refração.
- A reflexão e a refração ocorrem simultaneamente;

são analisadas em separado por motivos didáticos.

6. DIFRAÇÃO

A difração ocorre quando uma onda encontra uma fenda ou um obstáculo. As ondas conseguem contornar obstáculos e fendas que, se levada em consideração apenas a propagação retilínea, não seriam atingidos (figura 5).

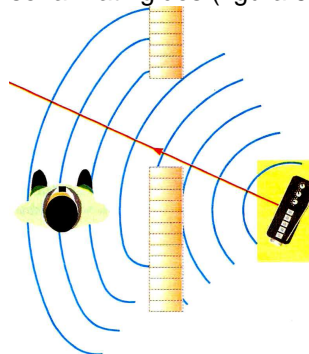


Figura 5: A pessoa consegue ouvir o som do rádio, mesmo havendo uma parede separando-a dele.

7. CONCORDÂNCIA E OPOSIÇÃO DE FASE

Dois pontos de uma onda encontram-se em concordância de fase quando a distância entre eles é:

$$D = n\lambda \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Os pontos que representam as cristas de uma onda estão em concordância de fase; o mesmo acontece com os pontos que determinam os vales (figura 6).

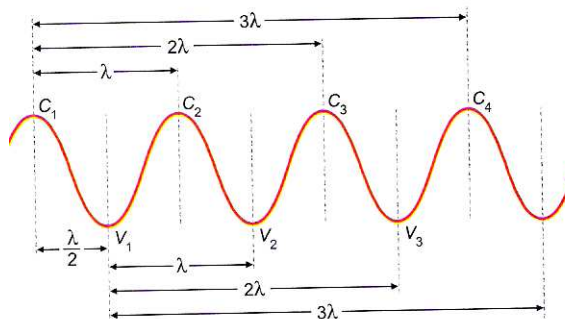


Figura 6 "Instantâneo" de uma onda senoidal: cada ponto da onda encontra-se em uma fase da oscilação.

Vejamos, agora, as condições para que dois pontos de uma onda encontrem-se em oposição de fase. Na figura acima, os pontos C_1 e V_1 estão em oposição de fase. O ponto C_1 está em oposição de fase em relação a todos os pontos que estejam em concordância de fase com V_1 . Assim, temos:

$$D_1 = \frac{\lambda}{2}$$

- Distância de C_1 a V_1 :

- distância de V_1 a outro vale qualquer: $D_2 = n\lambda$

A distância D entre dois pontos quaisquer em oposição de fase é dada por:

$$D = D_1 + D_2$$

$$D = n\lambda + \frac{\lambda}{2} \rightarrow D = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

8. INTERFERÊNCIA

Consideremos dois pulsos unidimensionais propagando-se em uma corda elástica em sentidos opostos (figura 7).

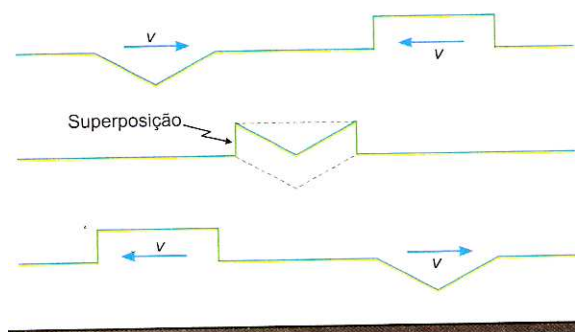


Figura 7 Interferência de um pulso retangular e outro triangular.

Um pulso não interfere na propagação do outro. Na realidade, não há interferência de ondas; o que ocorre nos pontos onde elas se encontram é uma superposição.

Vejamos, agora, os vários tipos de superposição (interferência) que podem ocorrer quando duas ondas bidimensionais atingem simultaneamente o mesmo ponto.

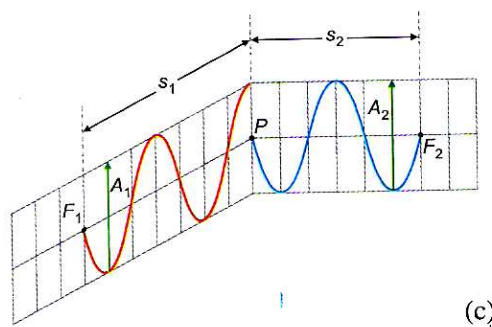
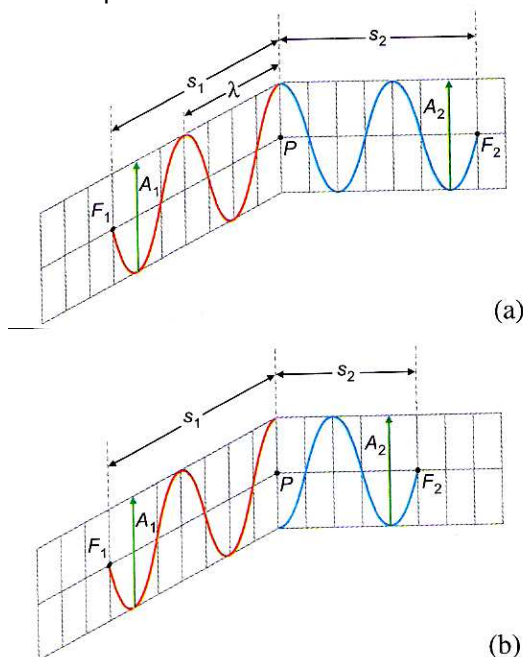


Figura 8 Duas fontes F_1 e F_2 , em concordância de fase, produzindo ondas bidimensionais que atingem o ponto P . Em (a) temos interferência construtiva, em (b), interferência destrutiva, e em (c), interferência parcial.

Sejam: S_1 o percurso da onda da fonte F_1 ao ponto P , S_2 o percurso da onda da fonte F_2 ao ponto P e $\Delta s = |S_1 - S_2|$ a diferença de percurso.

Ao atingirem o ponto P , as ondas podem provocar três tipos de superposição:

- **Interferência construtiva** - as ondas, ao atingirem o ponto P , estão em concordância de fase. Sendo A_1 a amplitude da primeira onda e A_2 , a amplitude da segunda, o ponto P , em virtude da superposição, passará a oscilar com amplitude $A = A_1 + A_2$.

A diferença de percurso deve corresponder à distância entre pontos em concordância de fase:

$$\Delta s = n\lambda \quad (n: \text{número natural})$$

- **Interferência destrutiva** - as ondas, ao atingirem o ponto P , estão em oposição de fase. Pelo princípio da superposição, as ondas passarão a

oscilar com amplitude $A = |A_1 - A_2|$. Em particular se $A_1 = A_2$, a amplitude resultante será nula ($A = 0$).

Nesse caso, a diferença de percurso deve ser a distância entre pontos que oscilam em oposição de fase:

$$\Delta s = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

- **Interferência parcial** - é uma situação intermediária entre as superposições destrutiva e construtiva, em que:

$$|A_1 - A_2| < A < A_1 + A_2$$

Observações

$$\frac{\Delta s}{\lambda}$$

Se $\frac{\Delta s}{\lambda}$ for um número natural, a interferência será construtiva.

$$\frac{\Delta s}{\lambda}$$

- Se $\frac{\Delta s}{\lambda}$ for um número natural mais meia unidade, a interferência será destrutiva.

- Nos demais casos, a interferência será parcial.

9. ONDA ESTACIONÁRIA

A onda estacionária é um caso particular de interferência. Duas ondas periódicas unidimensionais, de frequências iguais e constantes e amplitudes constantes também iguais, propagando-se em sentidos opostos, superpõem-se (figura 9).

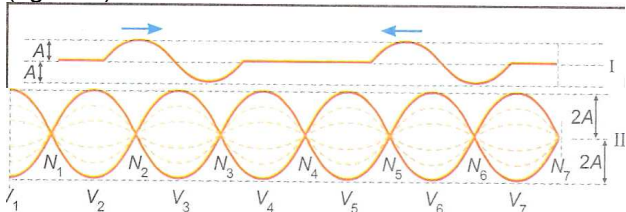


Figura 9 Superposição de duas ondas estacionárias.

Os pontos N_1 , N_2 , N_3 etc. são pontos nos quais as ondas estão em oposição de fase. A interferência é destrutiva. Como, por hipótese, as ondas têm, rigorosamente, a mesma frequência, elas permanecerão indefinidamente em fase nesses pontos e, a interferência será sempre destrutiva. São, portanto, pontos que não vibram, chamados **nós**, ou **nodos** da vibração estacionária.

Os pontos V_1 , V_2 , V_3 etc. são pontos em que as ondas estão em concordância de fase no instante considerado, e estarão sempre, pois as frequências, por hipótese, permanecem idênticas. A interferência é construtiva, e esses pontos vibrarão com uma amplitude que será a soma das amplitudes das duas ondas constituintes. Esses pontos são chamados **ventres**.

A distância entre dois nós ou dois ventres

$$d = \frac{\lambda}{2}$$

consecutivos será $\frac{\lambda}{2}$. A região compreendida entre dois nós consecutivos é um **fuso**. A dimensão

$$d = \frac{\lambda}{2}$$

de cada fuso é, portanto,

CAPÍTULO 03: ACUSTICA

... as goteiras pingavam lá fora, o vento sacudia os ramos da catingueira, e o barulho do rio era como um trovão distante.
Graciliano Ramos

Raramente nos damos conta de que nossa audição tem características muito especiais. Fechando os olhos por alguns momentos percebemos o seu poder.

Ouvimos uma buzina distante, o vento nas janelas, um carro passando, um botão caindo. Todas essas perturbações chegam aos nossos ouvidos ao mesmo tempo, mas a nossa percepção auditiva é capaz de identificá-las isoladamente.

Além disso, somos capazes de dizer quais fontes sonoras estão mais próximas e mais distantes, assim como a direção de onde elas provêm.

É realmente uma verdadeira percepção tridimensional, muitas vezes ofuscada pela predominância da visão, mas com tantas características especiais que justificam um ramo da Física inteiramente dedicado ao seu estudo - a Acústica.

1. SOM

As ondas sonoras são ondas longitudinais que se propagam no ar e em outros meios. Elas têm origem mecânica e, portanto, não se propagam no vácuo.

As ondas sonoras têm a propriedade de sensibilizar os nossos ouvidos. A sensibilidade do ouvido humano varia de pessoa para pessoa, assim como, para uma mesma pessoa, varia com a idade. Os parâmetros médios adotados são 20 Hz como frequência mínima audível e 20.000 Hz,

Como frequência máxima. Abaixo de 20 Hz, as vibrações são chamadas infra-som e acima de 20.000 Hz, ultra-som.

Velocidade do som

Por ser uma onda mecânica, em geral o som se propaga mais rapidamente nos sólidos que nos líquidos, e nos líquidos mais rapidamente que nos gases. No vácuo não há propagação de som.

No ar, a 15°C, a velocidade do som é 340 m/s; na água, a 20°C, o som se propaga a 1.482 m/s, e, no ferro, a 4.480 m/s.

Observação

- Nos fluidos (gases e líquidos), a temperatura tem uma influência muito grande na velocidade de propagação do som.

Qualidades do som

Há várias grandezas físicas que caracterizam um som.

As principais são: a altura, a intensidade e o timbre.

A altura é uma qualidade do som que

permite ao ouvido humano diferenciar entre um som grave e um som agudo. Som grave é o som de baixa frequência; som agudo é o som de alta frequência. A voz do homem é mais grave do que a da mulher.

A intensidade está relacionada ao fato de que as ondas sonoras podem ser mais intensas ("som forte") ou menos intensas ("som fraco").

O timbre nos permite distinguir entre sons de mesma frequência (mesma altura) e de mesma intensidade, emitidos por fontes diferentes. Por exemplo, uma mesma nota musical emitida por um piano e por uma flauta é distinguida por nossos ouvidos porque o timbre do som emitido por um instrumento difere do outro.

2. REVERBERAÇÃO E ECO

Todas as nossas sensações correspondem a uma combinação entre os órgãos sensitivos e nossa mente. Um aspecto comum a todas as sensações é que elas não são instantâneas. Elas começam, perduram um pequeno intervalo de tempo e se vão. A dor de uma alfinetada, por exemplo, mesmo retirado o estímulo, ainda perdura.

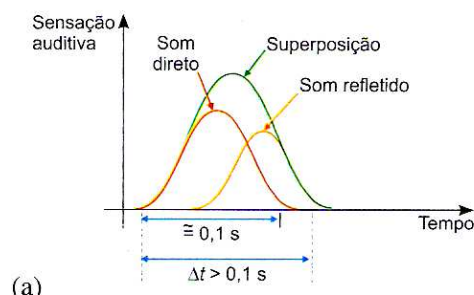
O conhecimento desse aspecto é o ponto básico para o entendimento dos fenômenos do eco e da reverberação. Vamos admitir que, recebida uma vibração auditiva, por mais curta que seja, sua sensação perdure por um décimo de segundo (0,1 s). Chamemos esse intervalo de tempo de **tempo de remanescência** (Δt_r).

Vamos supor, agora, que recebemos dois sons: o primeiro chega diretamente da fonte (som direto), e o segundo, após reflexão numa barreira qualquer. Se recebermos o segundo som, idêntico ao primeiro, menos em relação à intensidade, antes que termine o tempo de remanescência do anterior, teremos uma superposição de ambas as sensações, resultando numa sensação única, mais intensa e prolongada, chamada **reverberação do som** (figura 1a).

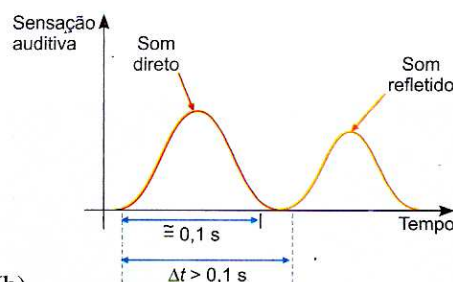
Observação

- Quando conversamos em campo aberto, não há reforço para o som direto. Nossa voz parece mais fraca, e os sons ficam mais curtos.

Para que haja eco, devemos receber o som refletido com um atraso maior que o tempo de remanescência (figura 1 b).



(a)



(b)

Figura 1 (a) Reverberação do som e (b) eco.

Analisemos o caso de uma pessoa diante de uma barreira ouvindo o eco de sua própria voz: o som direto chega imediatamente, enquanto o som refletido deve percorrer uma distância d até chegar à parede e a mesma distância d para retomar à pessoa.

Como $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$, temos $\Delta t = \frac{\Delta s}{v}$. Esse intervalo de tempo deve ser maior que o tempo de remanescência. Assim:

$$\frac{\Delta s}{v} > \frac{\Delta t_r}{1} \Rightarrow 2d > v \cdot \Delta t_r$$

$$d > \frac{v \cdot \Delta t_r}{2}$$

Considerando a velocidade do som no ar 340 m/s, a distância d , a partir da qual teremos eco, é:

3. CORDAS VIBRANTES

Um sistema mecânico possui um ou mais modos de vibração livre. A cada um dos modos de vibrar corresponde uma frequência, denominada **frequência natural**.

Uma corda fixa em seus extremos possui vários modos de vibração: um, chamado **fundamental**, e outros, com frequências múltiplas do modo fundamental, chamados **modos harmônicos**.

Os instrumentos musicais de corda são constituídos, basicamente, de uma corda esticada e fixa em ambas as extremidades. A perturbação produzida em um ponto qualquer entre os extremos da corda se propaga para as duas extremidades, onde é refletida e volta em sentidos contrários, sucessivamente. Temos, portanto, a formação de uma onda estacionária (figura 2).

Observação

- Entre dois nós (pontos que não vibram) teremos, sempre, pelo menos um ventre.

$$\ell = n \frac{\lambda_n}{2}$$

como ℓ , o temos, para um numero genérico de fusos:

$$\lambda_n = \frac{2\ell}{n}$$

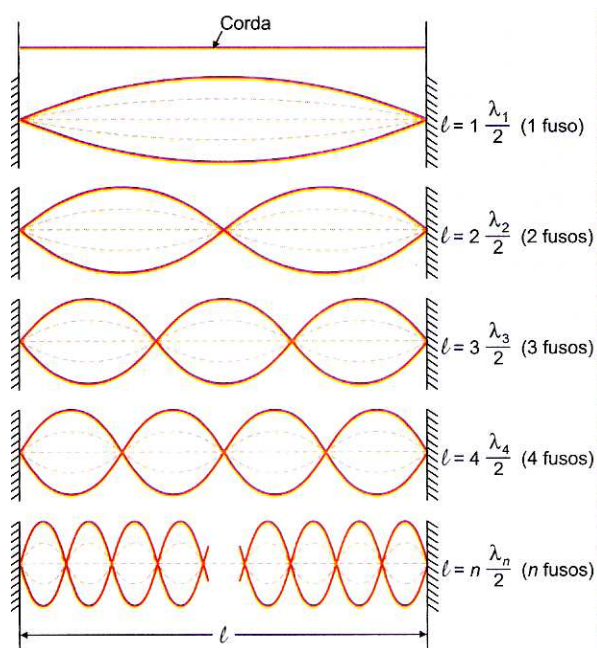


Figura 2 Vários modos de vibração de uma corda fixa em seus extremos e a comparação entre o comprimento de onda de cada modo com o comprimento da corda. Como as extremidades da corda são fixas, esses pontos não vibram.

Lembrando ainda que $v = \lambda f$; podemos escrever:

$$v = \frac{2\ell}{n} f_n \rightarrow f_n = \frac{n}{2\ell} v$$

Nessa expressão, f_n é a frequência do n ésimo modo de vibração.

O primeiro modo de vibração ($n = 1$) é chamado **modo fundamental ou primeiro harmônico**.

As vibrações subsequentes à fundamental possuirão frequências que são múltiplas do primeiro modo, e são chamadas **harmônicas**.

A velocidade de propagação v de uma onda transversal na corda é determinada por:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

Nessa expressão, F é o módulo da força de tração a que está sujeita a corda, e μ é a densidade linear da corda (massa por unidade de comprimento).

Observação

- Para produzir uma melodia com um instrumento de corda, o instrumentista dispõe de três variáveis: ele controla o valor de e (porção vibrante da corda), muda de uma corda mais grossa para outra mais fina (alterando μ) ou, ainda, altera a intensidade da força de tração ao fazer a afinação do instrumento usando roscas especiais (cravilhas).

4. TUBOS SONOROS

Os tubos sonoros contêm uma coluna de ar que pode executar uma vibração estacionária. Se o tubo é aberto nas duas extremidades, é chamado de **tubo aberto**; chamamos de **tubo fechado** àquele

que é fechado em uma das extremidades.

Observações

- As extremidades abertas são locais onde a vibração é livre, correspondendo, portanto, a ventres.
- As extremidades fechadas são locais onde não há vibração longitudinal; são, portanto, nós.

Tubo aberto

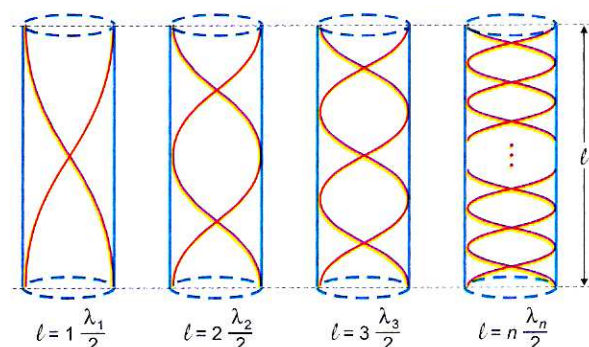


Figura 3 Modos de vibração de uma coluna de ar em um tubo aberto.

Genericamente, temos:

$$\lambda_n = \frac{2\ell}{n}$$

Nessa expressão, n é a ordem do harmônico que o tubo está emitindo. Como $v = \lambda \cdot f$, obtemos:

$$f_n = n \frac{v}{2\ell}$$

Tubo fechado

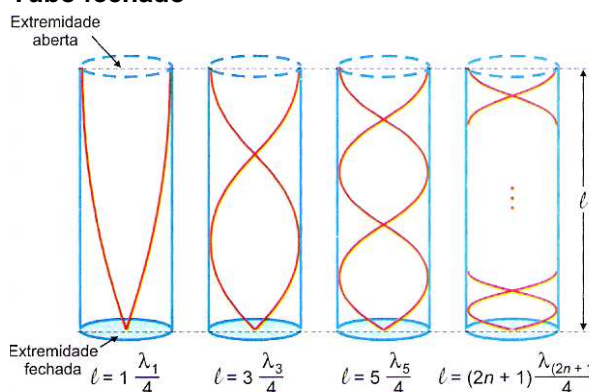


Figura 4 Modos de vibração de uma coluna de ar em um tubo fechado.

Observação

- Os tubos fechados só contêm os harmônicos ímpares ao passo que o tubo aberto possui os harmônicos pares e ímpares.

A frequência para um harmônico genérico é dada por:

$$f_{(2n+1)} = (2n + 1) \frac{v}{4\ell}$$

É importante observar que, nesse caso, a ordem do harmônico não é dada pelo número n , mas, sim, pelo número ímpar $2n + 1$.

5. EFEITO DOPPLER

O efeito Doppler se caracteriza por uma mudança na frequência do som ouvido por um observador (receptor) quando há movimento relativo entre ele e a fonte emissora das ondas.

- **Receptor em movimento e fonte sonora em repouso** Consideremos uma fonte sonora em repouso emitindo um som de frequência f . Se o receptor se movimenta de encontro às ondas, ele intercepta um maior número delas por unidade de tempo, ou seja, a frequência percebida pelo receptor (f') é maior que a frequência (f) das ondas. Caso o receptor se movimenta no mesmo sentido das ondas, ele receberá um número menor de ondas por unidade de tempo, ou seja, a frequência percebida pelo receptor (f') é menor que a frequência (f) das ondas.

A relação entre f' (frequência aparente) e f (frequência real) depende das velocidades do receptor (v_{rec}) e do som (v_{som}) em relação ao meio em que a onda se propaga, sendo dada por:

$$f' = f \frac{v_{som} \pm v_{rec}}{v_{som}}$$

Observação

- O sinal (+) deve ser usado para o receptor aproximando-se da fonte em repouso e o sinal (-), para o receptor afastando-se da fonte.
- **Fonte sonora em movimento e receptor em repouso**

No caso de a fonte de som aproximar-se de um receptor em repouso, a frequência aparente do som (f') que atinge o receptor é maior do que a frequência real do som (f). Costuma-se dizer que acontece um "encurtamento" no comprimento de onda das ondas que chegam ao observador, devido ao movimento da fonte. Agora, se a fonte sonora se afasta do receptor em repouso, a frequência aparente do som (f') que atinge o receptor é menor do que a frequência real do som (f).

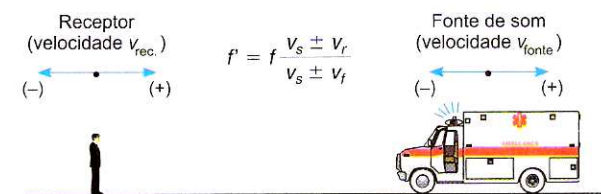
Nessas situações, escrevemos:

$$f' = f \frac{v_{som}}{v_{som} \pm v_{fonte}}$$

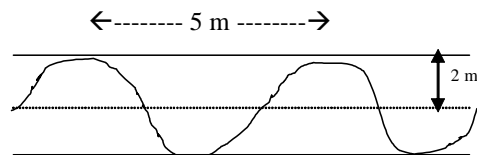
Observação

- O sinal (+) deve ser usado para a fonte afastando-se do receptor e o sinal (-) para a fonte aproximando-se do receptor em repouso.
- **Fonte sonora e receptor em movimento**

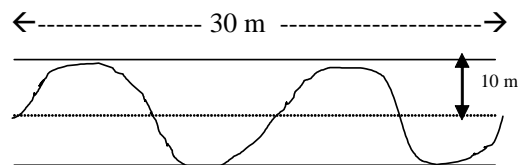
A definição do sinal (+) ou (-) é feita tomando-se como referência a figura abaixo:

**Exercícios**

1. A figura representa uma onda periódica que se propaga numa corda com velocidade $v = 10$ m/s. Determine a frequência dessa onda e a amplitude.



2. Um conjunto de ondas periódicas transversais, de frequência 20 Hz, propaga-se em uma corda. A distância entre uma crista e um vale adjacente é de 2m. Determine: A) o comprimento de onda; B) a velocidade da onda.
3. Num tanque pequeno a velocidade de propagação de uma onda é de 0,5 m/s. Sabendo que a frequência do movimento é de 10 Hz, calcule o comprimento da onda.
4. Determine o comprimento de onda de uma estação de rádio que transmite em 1000 kHz.
5. Uma onda se propaga ao longo de uma corda com frequência de 60 Hz, como ilustra a figura. A) Qual a amplitude da onda? B) Qual o valor do comprimento de onda? C) Qual a velocidade de propagação dessa onda?



6. Uma fonte produz ondas periódicas na superfície de um lago. Essas ondas percorrem 2,5 m em 2 segundos. A distância entre duas cristas sucessivas de onda é 0,25 m. Determine: A) a velocidade de propagação da onda; B) o comprimento de onda; C) a frequência.

Questões

7. O que é crista de uma onda? O que é vale?
8. O que é período de uma onda? E frequência?
9. O que é amplitude de uma onda?
10. Como podemos produzir uma onda?

Exercícios complementares

11. Ondas periódicas produzidas no meio de uma piscina circular de 6m de raio por uma fonte de frequência constante de 2 Hz demoram 10 s para atingir a borda da piscina. Qual o comprimento de onda dessa vibração?
12. Num lago, correntes de ar produzem ondas periódicas na superfície da água, que se propagam à razão de 3 m/s. Se a distância entre duas cristas sucessivas dessas ondas é

12 m, qual o período de oscilação de um barco ancorado?

13. Numa corda tensa, propaga-se uma onda de comprimento de onda 0,2 m com velocidade igual a 8 m/s. Determine a frequência e o período dessa onda.

Questões

14. Conta-se que um famoso tenor italiano, ao soltar a voz num agudo, conseguia romper um copo de cristal. Como é possível explicar fisicamente essa ocorrência?
15. As ondas luminosas também podem sofrer difração, como as ondas sonoras. Explique por que é mais fácil perceber a difração sonora do que a difração luminosa.
16. Conta-se que na Primeira Guerra Mundial uma ponte de concreto desabou quando soldados, em marcha cadenciada, passaram sobre ela. Como é possível explicar essa ocorrência?
17. No filme *Guerra nas estrelas*, as batalhas travadas entre as naves são acompanhadas pelo ruído característico das armas disparadas e dos veículos explodindo. Fisicamente, isso realmente poderia ocorrer? Por quê?
18. Em um filme americano de faroeste, um índio colocou seu ouvido ao chão para verificar se a cavalaria estava se aproximando. Há uma justificativa física para esse procedimento? Explique.
19. De que forma dois astronautas podem conversar na superfície da Lua?
20. Se você observar a distância alguém cortando lenha, primeiro verá o martelo batendo na madeira e só depois ouvirá o barulho. O mesmo fenômeno acontece com os raios, em dia de tempestade: primeiro vemos o clarão e depois ouvimos o trovão. Por que isso acontece?
21. Em que princípio se baseia o funcionamento do radar? E o do sonar?
22. Por que o som do eco é mais fraco que o som emitido?
23. A afirmação abaixo está errada. Comente o erro e corrija a frase: "Quando você fala, as partículas de ar se movem da sua boca até o ouvido de quem escuta".
24. Os morcegos têm uma visão extremamente deficiente, orientando-se, em seus vôos, pelas vibrações ultra-sônicas. Explique como isso é possível.

Exercícios

25. Uma pessoa ouve o som de um trovão 2 segundos depois de ver o relâmpago. Determine a que distância aproximadamente do observador caiu o raio. Considere a velocidade do som no ar igual a 340 m/s.
26. Se uma pessoa ouve o som do disparo de uma arma de fogo 5 s após a ter visto ser disparada, qual a distância entre o ouvinte e o atirador? Considerando $v_{\text{som}} = 340 \text{ m/s}$.

27. A velocidade de propagação do som no ar é 340 m/s. Uma onda sonora de comprimento de onda no ar igual a 34 m é audível pelo homem? Justifique a sua resposta.
28. No stand de tiro-ao-alvo, o atirador ouve o eco do tiro que ele dispara 0,6 s após o disparo. Sendo a velocidade do som no ar igual a 340 m/s, determine a distância entre o atirador e o obstáculo que reflete o som.
29. Num passeio ao "vale do eco", um turista percebe que o primeiro eco de seu grito é ouvido 4 s após a emissão. Sendo a velocidade do som no ar igual a 340 m/s, determine a que distância dele se encontra o obstáculo refletor.
30. O som se propaga na água com velocidade de 1450 m/s. Qual a distância entre uma pessoa e a barreira refletora, para que ela possa receber o eco, nesse meio?
31. Com o "sonar", verifica-se, numa dada região do oceano Atlântico, que o intervalo de tempo entre a emissão de um pulso sonoro e sua posterior recepção é de 2 s. Se a velocidade do som na água do mar é 1500 m/s, qual a profundidade da região pesquisada?

Questões de Vestibular

32. (FMU–SP) O fenômeno físico que caracteriza uma onda é:
- o transporte de energia;
 - o transporte de matéria;
 - o transporte de energia e matéria;
 - o transporte de intervalos de tempo;
 - o transporte de fontes de luz.
33. (Unifor–CE) Ondas estacionárias ocorrem em consequência de:
- refração de ondas;
 - reflexão de ondas;
 - difração de ondas;
 - polarização de ondas;
 - dispersão de ondas.
34. (Unirio – adaptada) Entre as afirmativas abaixo, a respeito de fenômenos ondulatórios, assinale a que é falsa:
- A velocidade de uma onda depende do meio de propagação.
 - A velocidade do som no ar independe da frequência.
 - No vácuo, todas as ondas eletromagnéticas possuem o mesmo período.
 - Ondas sonoras são longitudinais.
 - Ondas sonoras são tridimensionais.
35. Uma onda sonora propaga-se no ar com uma velocidade de 340 m/s e possui comprimento de onda igual a 40 cm. É correto afirmar que sua frequência vale:
- 3.400 Hz
 - 1.700 Hz
 - 850 Hz

- d) 340Hz
e) 40Hz
36. (Uneb–BA) A comunicação entre os seres humanos ocorre, sobretudo, através da fala, e os sons são vibrações elásticas que se propagam no ar com velocidade em torno de 340m/s. Se as ondas sonoras emitidas por um homem e uma mulher que falam se propagam no ar, com frequências respectivamente iguais a 100Hz e 250Hz, então o homem:
- a) e a mulher emitem ondas mecânicas transversais;
 - b) e a mulher emitem ondas sonoras de mesmo período;
 - c) e a mulher emitem ondas sonoras de mesmo comprimento de onda;
 - d) emite som mais grave que o emitido pela mulher;
 - e) emite som mais agudo que o emitido pela mulher.
37. Um objeto pode ser detectado fazendo-se incidir ondas sobre ele, com um sonar ou com um radar, desde que o objeto seja maior que o comprimento de onda das ondas incidentes. Os morcegos podem ondas ultra-sônicas de 100kHz, por meio das quais detectam objetos tão pequenos quanto os insetos. Sendo a velocidade do ultra-som no ar igual a 340m/s, o tamanho mínimo que os morcegos podem detectar, em cm, é:
- a) 34
 - b) 3,4
 - c) 0,34
 - d) 1,7
 - e) 17
38. (UFPI) Se n cristas de uma onda são detectadas por minuto, qual o período dessa onda em segundos?
- a) 30
 - b) 60
 - c) 120
 - d) 60/n
 - e) 120/n

CAPITULO 04: LUZ

Mas no meu pequeno planeta, bastava apenas
recuar um pouco a cadeira.
E contemplavas o crepúsculo todas as vezes que
desejavas ...
- Um dia eu vi o Sol se pôr quarenta e três vezes!
Antoine de Saint-Exupéry

1. LUZ

A luz é uma forma de energia radiante que sensibiliza nossos órgãos visuais. Ela se propaga nos meios materiais e também no vácuo. A luz que recebemos do Sol - estrela mais próxima da Terra - percorre uma distância de 150 milhões de quilômetros, a uma velocidade de 300 mil quilômetros por segundo, em 8 minutos e 20 segundos.

Em virtude de as distâncias astronômicas serem representadas por números extremamente grandes, é muito comum a utilização da grandeza denominada **ano-luz**, definida como a "distância percorrida pela luz no vácuo em um ano".

Considerando que 1 ano corresponde a $3,15 \cdot 10^7$ s e a velocidade da luz no vácuo é igual a $3,0 \cdot 10^8$ m/s, então, no S.I.:

$$1 \text{ ano-luz} = 3,0 \cdot 10^8 \text{ (m/s)} \cdot 3,15 \cdot 10^7 \text{ (s)} \quad 1 \text{ ano-luz} = 9,5 \cdot 10^{15} \text{ m} = 9,5 \cdot 10^{12} \text{ km}$$

2. RAIOS DE LUZ

Os raios de luz são linhas orientadas que representam a direção e o sentido de propagação da luz. Os raios de luz não têm existência física; são meros elementos geométricos de representação. Um conjunto de raios de luz (feixe de luz) é denominado **pincel de luz** (figura 1).

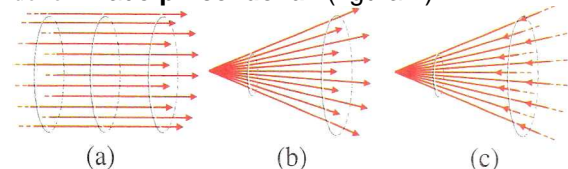


Figura 1 (a) Pincel cilíndrico, (b) pincel cônico divergente e (c) pincel cônico convergente.

3. FENÔMENOS DA PROPAGAÇÃO DA LUZ

Quando a luz atinge a fronteira entre dois meios ópticos, podem ocorrer basicamente três fenômenos luminosos: reflexão, refração e absorção (figura 2).

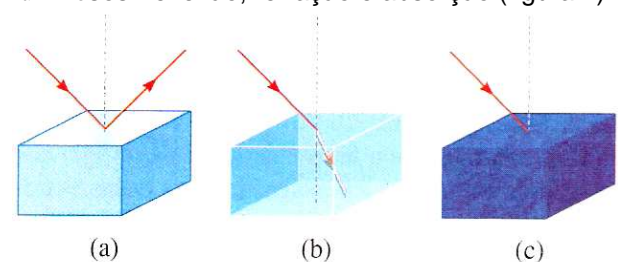


Figura 2 (a) Reflexão luminosa. (b) refração luminosa e (c) absorção luminosa.

Em geral, os três fenômenos acontecem simultaneamente. Por exemplo, em uma piscina, a luz

solar é refletida na superfície da água e, ao mesmo tempo, a água é aquecida pela absorção da energia radiante enquanto o seu fundo é iluminado pela luz refratada. A análise em separado de cada um dos fenômenos se faz apenas por uma questão de simplicidade e clareza.

Observações

- A reflexão pode ser regular ou difusa, dependendo de a superfície refletora ser lisa ou áspera. Nos espelhos em geral, temos reflexão regular, enquanto, numa parede caiada, temos a reflexão difusa (figura 3).

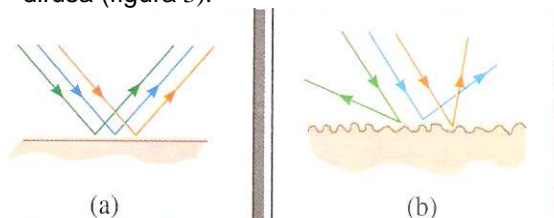


Figura 3 (a) Reflexão regular e (b) reflexão difusa.

- A mesma distinção pode ser feita quando a luz se refrata. A refração pode ser regular, como numa superfície tranqüila das águas de um lago, ou difusa, como numa janela de vidro fosco.

4. ORIGEM DA LUZ

Existem determinados corpos que emitem luz naturalmente, sendo chamados de **corpos luminosos**. Os corpos luminosos constituem as fontes primárias de luz. Como exemplo, temos as estrelas (fontes naturais) e as lâmpadas acesas (fontes artificiais).

A maioria dos corpos, como, por exemplo, a Lua e as páginas deste livro, em condições normais, não emitem luz; não são luminosos. Esses corpos somente são visíveis quando refletem a luz que recebem: são as fontes de luz secundárias, chamadas de **corpos iluminados**.

Os corpos iluminados podem, em determinadas situações, tornar-se corpos luminosos. Como exemplo, podemos citar um metal aquecido ao rubro ou um fragmento de carvão em brasa.

5. TRANSPARÊNCIA DE OBJETOS E SUBSTÂNCIAS

De acordo com sua transparência, os objetos podem ser classificados em:

- **transparentes** - permitem a passagem da luz de uma maneira regular, como, por exemplo, um aquário ou o vidro de uma ampulheta.
- **opacos** - não permitem a passagem da luz, como, por exemplo, uma parede de tijolos.
- **translúcidos** - embora permitam a passagem da luz, isso não acontece de maneira regular, tornando difusa a visualização das imagens. É o caso do vidro fosco e do papel de seda.

Com relação às substâncias, elas podem ser opacas ou transparentes. No primeiro caso, a substância não permite a propagação da luz, enquanto no segundo elas se constituem no meio de propagação,

como, por exemplo, o ar, o vidro e a água, entre outros.

6. A COR DE UM CORPO

A luz branca (branco-amarelado) que recebemos do Sol é uma radiação policromática (várias cores). As cores componentes da luz branca solar são sete: vermelho, alaranjado, amarelo, verde, azul, anil e violeta.

Quando os objetos são iluminados com luz solar, eles não se comportam todos do mesmo modo em relação às componentes da luz branca. Algumas componentes são absorvidas, outras, refletidas.

Na determinação da cor de um corpo, o importante é a componente, ou as componentes, refletida difusamente pelo objeto. Se um objeto iluminado com luz branca solar refletir de forma difusa só a componente verde, ele será visto na cor verde; se refletir somente o azul, será visto na cor azul, e assim sucessivamente. O corpo branco é aquele que reflete difusamente todas as cores componentes da luz branca, e um corpo negro é aquele que absorve todas as cores que nele incidem.

Vemos assim que a nossa percepção de cores depende de vários fatores, como fonte de luz usada, luz refletida difusamente e nossa sensibilidade visual em relação à luz refletida.

7. PRINCÍPIOS DA ÓPTICA GEOMÉTRICA

A Óptica geométrica se alicerça em três princípios básicos:

- **princípio da propagação retilínea** - um meio é denominado **homogêneo** quando apresenta as mesmas propriedades em todos os seus pontos. O princípio da propagação retilínea estabelece que: Nos meios homogêneos e transparentes, a luz se propaga em linha reta.
- **princípio da independência dos raios luminosos** quando vários feixes luminosos, emitidos por fontes diferentes, propagam-se simultaneamente, cada um deles se comporta como se os outros não existissem. Isso significa dizer que os feixes podem se cruzar sem que um altere a propagação do outro.
- **princípio da reversibilidade dos raios luminosos** a trajetória de um raio de luz não se modifica quando se inverte o sentido de sua propagação.

8. SOMBRA E PENUMBRA

Em Óptica, a palavra **sombra** significa "região não iluminada". Ela pode ser produzida pela interposição de um objeto opaco entre uma fonte de luz e um anteparo, sendo uma consequência da propagação retilínea da luz.

Ao produzir sombras, podemos observar que algumas delas se apresentam com contornos bem-definidos e outras não (figura 4).

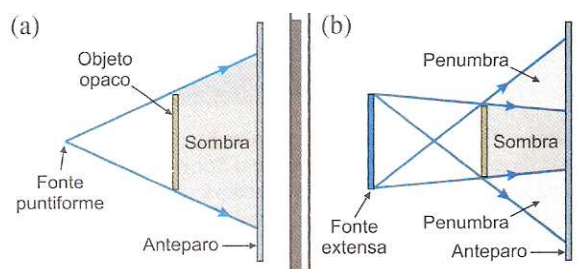


Figura 4 (a) Região totalmente escura (sombra), com um contorno bem-definido, seguido de uma região totalmente clara; (b) região totalmente escura (sombra) com contornos não muito bem-definidos, uma região que gradativamente vai clareando (penumbra) e, finalmente, uma região totalmente clara.

9. CÂMARA ESCURA DE ORIFÍCIO

A câmara escura de orifício é um dispositivo utilizado na comprovação do princípio da propagação retilínea da luz. Basicamente, a câmara escura consiste numa caixa cujas paredes são de material opaco, sendo que, em uma das paredes, existe um orifício para a penetração da luz. Colocando um objeto luminoso, ou iluminado, na frente da parede com o orifício, obteremos, na parede oposta, uma imagem invertida desse objeto (figura 5).

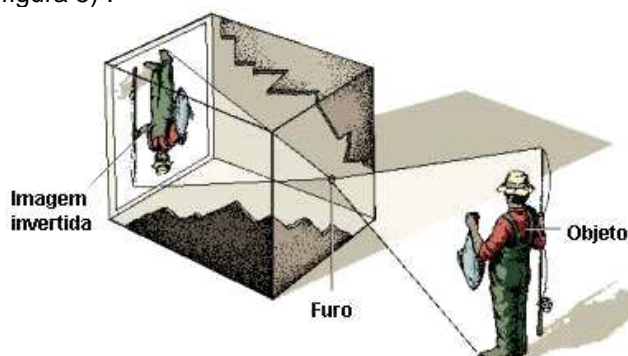


Figura 5 Câmara escura de orifício.

Por semelhança de triângulos, podemos mostrar que:

$$\frac{o}{p} = \frac{i}{p'}$$

Observação

- A câmara escura de orifício ilustra o princípio básico de funcionamento de uma máquina fotográfica.

10. ECLIPSES

A palavra **eclipse** significa "ocultação", total ou parcial, de um astro pela interposição de um outro, entre o astro e o observador, ou entre um astro luminoso e outro iluminado (figura 6).

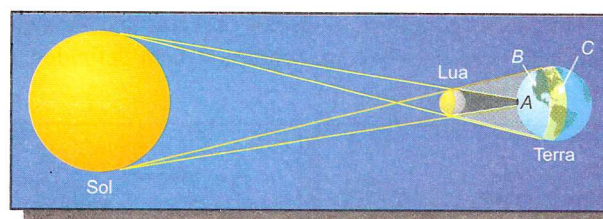


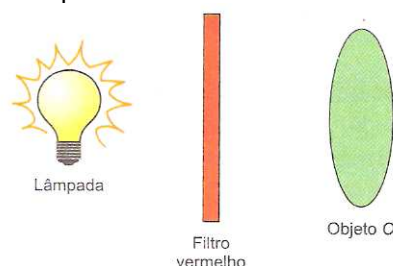
Figura 6 O eclipse do Sol ocorre quando a Lua, em seu movimento de translação, coloca-se entre o Sol e a Terra. Conforme a localização de uma pessoa, ela poderá observar um eclipse total ou parcial. Existe ainda a possibilidade de a pessoa não perceber o eclipse.

Observações

- Uma pessoa colocada na região A observa um eclipse total do Sol. Ela se encontra na região de sombra.
- Uma pessoa colocada na região B, região de penumbra, observa um eclipse parcial.
- Uma pessoa colocada em qualquer ponto da região C, região totalmente iluminada, não observa o eclipse.

EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO

- (UFMS) Os quasares, objetos celestes semelhantes às estrelas, são os corpos mais distantes da Terra já observados. Verificou-se, pelas medidas astronômicas, que a distância entre um determinado quasar e a Terra é $9 \cdot 10^{22}$ km. Sabendo que a velocidade da luz no vácuo é $3 \cdot 10^8$ m/s e que um ano-luz é a distância percorrida pela luz no vácuo durante um ano (365 dias), assinale as afirmativas corretas.
 - Um ano-luz é igual a aproximadamente $9,5 \cdot 10^{12}$ km
 - A luz emitida pelo quasar leva aproximadamente $9 \cdot 10^9$ anos para chegar à Terra.
 - A distância do quasar à Terra é igual a aproximadamente $1 \cdot 10^{10}$ anos-luz; isso significa que, se esse quasar desaparecer, o evento será percebido na Terra somente após $1 \cdot 10^{10}$ anos.
- (U. F. Ouro Preto-MG) A figura mostra uma fonte de luz branca (lâmpada). À sua direita, um filtro vermelho.
 - Qual é a cor da luz transmitida?
 - À direita do filtro vermelho encontra-se um objeto O, verde. Qual é a cor desse objeto quando iluminado pela luz transmitida?



- (Enem) A sombra de uma pessoa que tem 1,80 m de altura mede 60 cm. No mesmo momento, a seu lado, a sombra projetada de um poste mede 2,00 m. Se, mais tarde, a sombra do poste diminuiu

50 cm, a sombra da pessoa passou a medir:

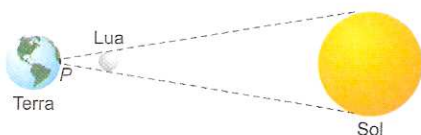
- 30 em
- 45 em
- 50 cm
- 80 cm
- 90 em

4) Um poste de 3,0 m de altura está a 5,0 m do orifício de uma câmara escura e a imagem que se forma no fundo da câmara mede 12 cm.

a) Qual é a distância da imagem ao orifício da câmara?

b) Para se obter uma imagem do poste com 6,0 cm, a câmara deve se aproximar ou se afastar do poste? Justifique.

5) A figura ilustra um eclipse do Sol como o ocorrido em 11 de agosto de 1999. Num dado instante, a Terra, a Lua e o Sol ficam alinhados e, para um observador no ponto P , o disco da Lua encobre exatamente o disco do Sol. Sabe-se que o diâmetro do Sol é 400 vezes o diâmetro da Lua e que a distância do ponto P ao centro da Lua é 375 mil quilômetros.



Assinale certo ou errado nas afirmativas abaixo:

- Para um observador colocado em P , o eclipse é parcial.
- Para um observador colocado em P é noite e o eclipse é total.
- A distância de P ao centro do Sol é 400 vezes 375 mil quilômetros.
- A figura está em escala.

REFLEXÃO LUMINOSA

No reflexo do espelho auridebruado as costas não decoradas da árvore anã olhavam para as costas tesas da coruja empalhada
James Joyce

Na superfície plana de uma poça d'água, temos uma reflexão regular da luz, portanto ela pode funcionar como um espelho plano. Talvez esse tenha sido o primeiro espelho plano usado pelo homem.

Quanto aos espelhos, tais como os conhecemos hoje, são muito antigos. No Antigo Egito já eram usados espelhos de bronze. Tanto na Grécia quanto na Roma Antiga superfícies de prata polida já eram usadas para produzir reflexões. Na própria Bíblia, encontramos menção a espelhos de latão. Formas grosseiras de espelhos recobertos de vidro já eram produzidas em Veneza, por volta do ano 1300.

Os espelhos em geral e, em particular, o espelho plano são desse tipo de objeto ao qual tanto nos acostumamos que deixamos de perceber as qualidades e importância. Sua imagem é tridimensional, colorida e rigorosamente fiel às dimensões dos objetos. Com eles ampliamos nossos limites de visão, como no retrovisor do carro ou

quando vemos nossa própria imagem. É como se tivéssemos os olhos fora de nosso corpo.

1. REFLEXÃO LUMINOSA

O fenômeno da reflexão luminosa ocorre quando um raio de luz incide na superfície de separação de dois meios e retoma ao meio de origem (figura 1).

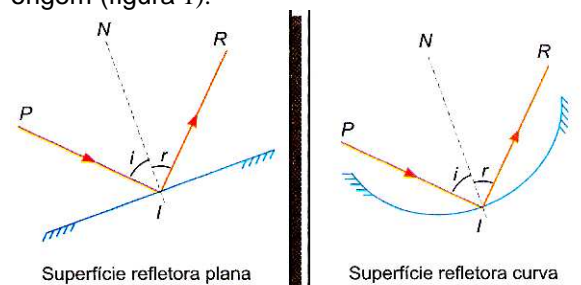


Figura 1 Reflexão luminosa em duas superfícies refletoras: plana e curva.

Na figura, temos:

PI : raio de luz incidente

I : ponto de incidência na superfície refletora S

IR : raio de luz refletido pela superfície S

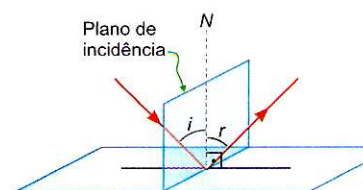
N : normal à superfície refletora no ponto I de incidência

i : ângulo de incidência (PIN)

r : ângulo de reflexão (RIN)

A reflexão luminosa de um raio de luz obedece a duas leis:

- O raio incidente (PI), o raio refletido (IR) e a normal (N), no ponto de incidência, estão no mesmo plano.
- A medida do ângulo de incidência (i) é igual à medida do ângulo de reflexão (r): $i = r$.



Observações

As leis da reflexão luminosa são válidas tanto para superfícies lisas quanto para rugosas.

Numa superfície rugosa, devido a sua irregularidade, a reta normal, ponto por ponto, tem direção diferente. Assim sendo, a luz é refletida em todas as direções. A reflexão difusa é responsável pela nossa visão dos objetos iluminados.

2. ESPELHOS PLANOS

Os espelhos planos constituem os chamados sistemas ópticos refletores, associando uma imagem a um objeto.

Considerando apenas um sistema óptico, o objeto (um ponto ou um conjunto de pontos) pode ser:

- real** - quando determinado pelo cruzamento efetivo dos raios luminosos incidentes no sistema óptico.

- **virtual** - quando determinado pelo cruzamento dos prolongamentos dos raios luminosos incidentes. A imagem (um ponto ou um conjunto de pontos) também pode ser:
- **real** - quando determinada pelo cruzamento efetivo dos raios luminosos refletidos (emergentes) do sistema óptico;
- **virtual** - quando determinada pelo cruzamento dos prolongamentos dos raios luminosos refletidos do sistema óptico (figura 2).

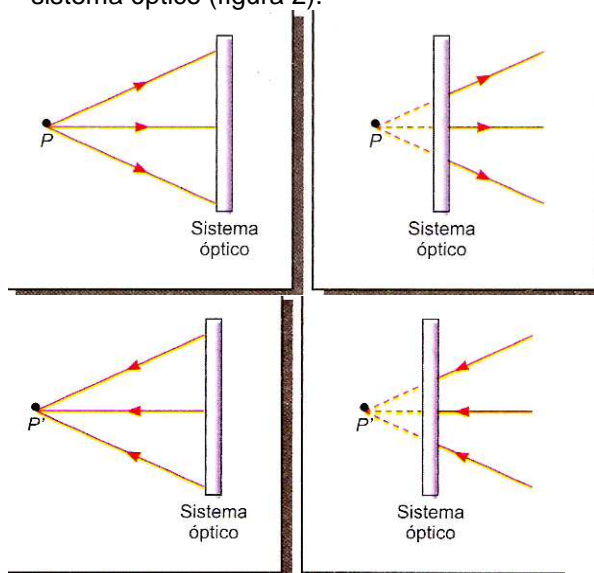


Figura 2 (a) Ponto objeto real (POR), (b) ponto objeto virtual (POV), (c) ponto imagem real (PIR) e (d) ponto imagem virtual (PIV).

Imagem no espelho plano

Na figura 3, o ponto O (cruzamento efetivo dos raios incidentes) representa um ponto objeto real. Do ponto O partem raios de luz que atingem o espelho plano E, sofrendo reflexão luminosa regular.

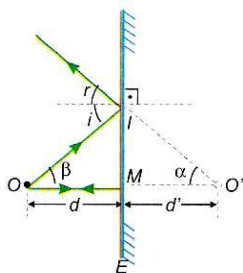


Figura 3 O espelho plano E associa ao ponto O (ponto objeto real) o ponto O' (ponto imagem virtual). A construção da imagem em um espelho plano é feita do seguinte modo:

- Primeiramente, obtemos o ponto O', simétrico do ponto O, em relação ao plano do espelho. Pontos simétricos em relação a um plano são aqueles que estão numa mesma perpendicular a esse plano e, além disso, são eqüidistantes desse mesmo plano.
- Em seguida, traçamos o raio incidente OI. O raio refletido é traçado como se ele se originasse no ponto O' e passasse pelo espelho no ponto I. Os triângulos OIM e O'IM são congruentes. Logo:

Como $i = r$ e $OM = O'M$ (ângulos alternos internos),

A medida do ângulo de incidência é igual à medida do ângulo de reflexão.

Nos espelhos planos, o ponto objeto e seu respectivo ponto imagem são simétricos em relação ao plano do espelho, ou seja, são eqüidistantes do espelho e contidos numa mesma perpendicular ao plano do espelho.

Uma imagem virtual não pode ser projetada sobre uma tela, por ser formada pelo cruzamento dos prolongamentos dos raios que emergem do sistema óptico.

O mesmo processo pode ser aplicado para obtenção da imagem de um objeto extenso AS, conjugada por um espelho plano (figura 4).

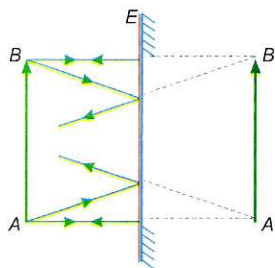


Figura 4 Imagem de um objeto extenso conjugada por um espelho plano.

Observação

- O objeto e sua respectiva imagem possuem as mesmas dimensões, independentemente da distância a que esteja o objeto do espelho. Quando um carro, por exemplo, se afasta de nossos olhos, ele será visto sob um ângulo visual cada vez menor, mas suas dimensões permanecem as mesmas.

O espelho plano não inverte a imagem. O termo correto é **reversão**: a imagem corresponde ao "avesso" do objeto. Objetos simétricos, como o ser humano, por exemplo, possuem um lado que é exatamente o avesso do outro em relação ao eixo de simetria. A mão direita corresponde ao avesso da esquerda, assim como outras partes.

Campo visual de um espelho plano

Consideremos uma pessoa enxergando uma certa região do espaço por um espelho plano. Essa região é denominada **campo visual do espelho** (figura 5).

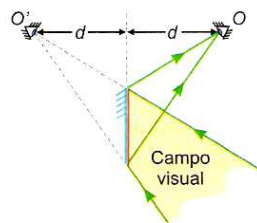


Figura 5 Determinação do campo visual de um espelho plano.

A determinação do campo visual é feita do seguinte modo:

- Inicialmente, determinamos o ponto O', imagem do observador O (O e O' são simétricos em relação ao espelho).
- A partir de O', traçamos dois segmentos de reta tangenciando os extremos do espelho que determinam o campo visual do espelho para essa

posição do observador.
 a campo visual depende da posição do observador e da geometria do espelho (tamanho e forma).

Imagens em dois espelhos planos

A associação de espelhos planos nos permite obter várias imagens de um mesmo objeto (figura 6).

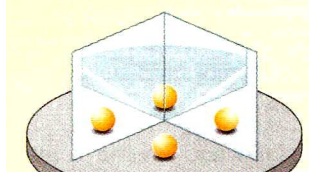


Figura 6 Um objeto e suas três imagens obtidas pela associação de dois espelhos planos perpendiculares entre si.

Dependendo do ângulo entre os espelhos, podemos obter um número relativamente grande de imagens. Teoricamente, obtêm-se infinitas imagens no caso de espelhos paralelos.

a número (n) de imagens formadas na associação de dois espelhos planos depende do ângulo θ entre eles e é dado por:

$$n = \frac{360^\circ}{\theta} - 1$$

Isso será válido nos seguintes casos: 360

- Se a relação $\frac{360}{\theta}$ for um número par para um objeto θ colocado em qualquer ponto entre os dois espelhos.

- Se a relação $\frac{360}{\theta}$ for um número ímpar para um objeto colocado no plano bis setor do ângulo θ .

3. ESPELHOS ESFÉRICOS

o espelho esférico é construído a partir do espelhamento de uma calota esférica. Quando o espelhamento é feito na superfície interna da calota, o espelho esférico é denominado **côncavo** e, quando o espelhamento é feito na superfície externa da calota, o espelho esférico é **convexo** (figura 7).

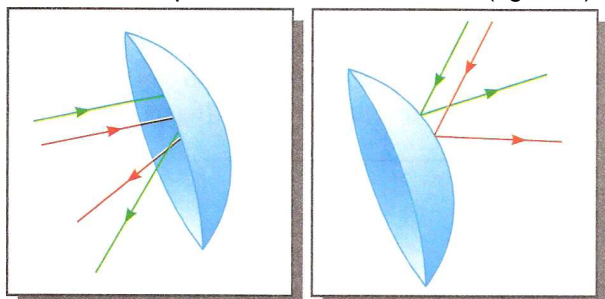


Figura 7 (a) Espelho esférico côncavo e (b) espelho esférico convexo.

A representação de um espelho esférico está mostrada na figura 8:

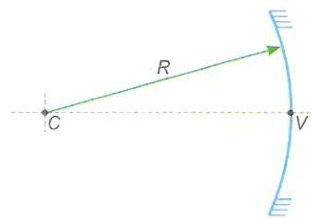


Figura 8 Representação de um espelho esférico côncavo.

Na figura, temos:

C: centro de curvatura do espelho

R: raio de curvatura do espelho

V: vértice do espelho

CV: eixo principal do espelho

4. CONDIÇÕES DE NITIDEZ DE GAUSS

Estudaremos a reflexão luminosa nos espelhos esféricos, dando destaque àqueles que obedecem às condições de nitidez de Gauss. Para que um espelho esférico obedeça às condições de Gauss, é preciso que (figura 9): os raios luminosos que atingem o espelho sejam paralelos ou pouco inclinados em relação ao eixo principal do espelho, e próximos do vértice, ou seja, a região útil do espelho deve ser, no máximo, 10° .

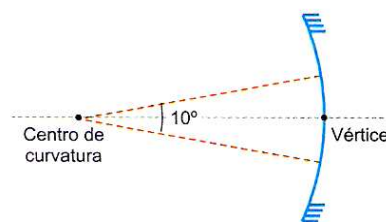


Figura 9 Espelho esférico dentro das condições de Gauss. As dimensões do espelho são muito pequenas em relação ao seu raio.

5. FOCO DE UM ESPELHO ESFÉRICO DE GAUSS

Consideremos um pincel cilíndrico incidindo num espelho esférico. Se o espelho for côncavo, o pincel cilíndrico será transformado, após a reflexão no espelho, em um pincel cônico convergente para o ponto F (foco real); se o espelho for convexo, o feixe será transformado em um pincel cônico divergente do ponto F' (foco virtual), conforme nos mostra a figura 10.

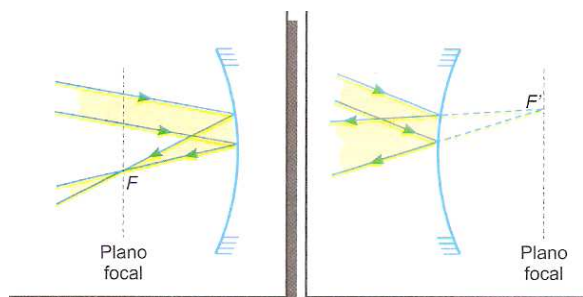
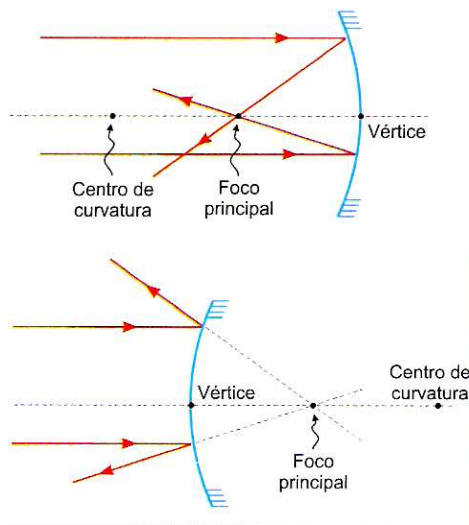


Figura 10 (a) Espelho côncavo: foco real e (b) espelho convexo: foco virtual.

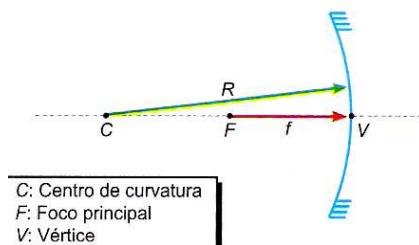
Observação

- No caso específico de um pincel cilíndrico paralelo ao eixo principal do espelho, o foco principal localiza-se sobre o eixo principal, tanto o real (espelho côncavo) quanto o virtual (espelho convexo).



Nos espelhos esféricos de Gauss, o foco principal F localiza-se, aproximadamente, no ponto médio entre o centro de curvatura C e o vértice V do espelho. Chamando de f a distância entre o foco e o vértice, temos:

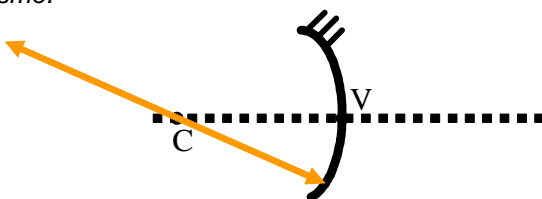
$$f = \frac{R}{2}$$



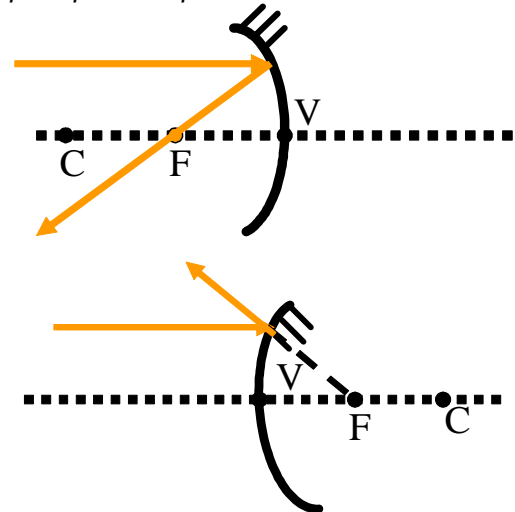
6 – RAIOS NOTÁVEIS DE LUZ

Os Raios Notáveis não são os únicos que ocorrem num sistema óptico, mas como o próprio nome diz, eles se destacam dos outros pela facilidade de traçá-los. Nosso objetivo será desenhar pelo menos dois deles em cada situação. Vejamos quais são estes raios:

Todo raio que incide numa direção que passa pelo centro de curvatura, reflete-se sobre si mesmo.



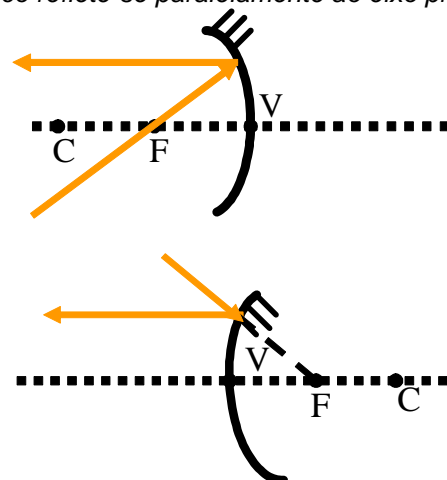
Todo raio que incide paralelamente ao eixo principal reflete-se numa direção que passa pelo foco principal do espelho.



É importante saber que:

- O foco F do espelho côncavo é Real;
- O foco F do espelho convexo é virtual.

Todo raio que incide numa direção que passa pelo foco reflete-se paralelamente ao eixo principal.



Esse raio notável decorre do princípio da reversibilidade da luz.

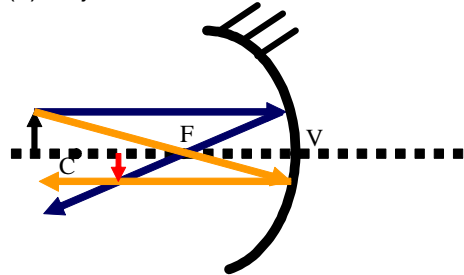
7. DETERMINAÇÃO GRÁFICA DA IMAGEM

Para determinarmos graficamente uma imagem, basta traçarmos dois raios quaisquer de luz entre os notáveis que acabamos de aprender.

Usaremos a notação i e o significando, respectivamente, a medida da imagem e do objeto.

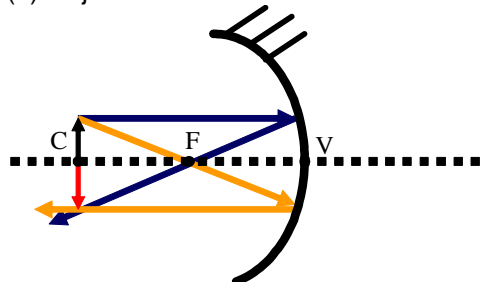
Espelho Côncavo

(1) Objeto situado antes do centro de curvatura C:



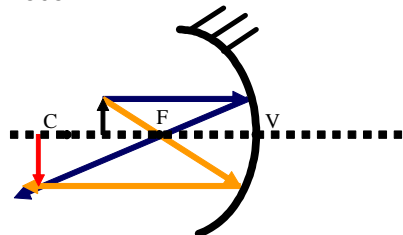
→ Imagem: Real, Invertida e Menor.

(2) Objeto situado sobre o centro de curvatura C:



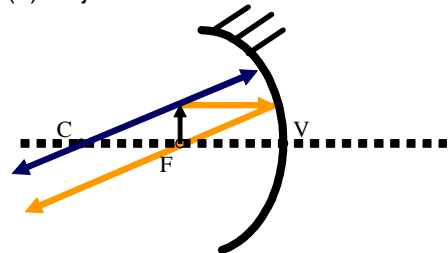
→ Imagem: Real, Invertida e Igual.

(3) Objeto situado entre o centro de curvatura C e o Foco F:



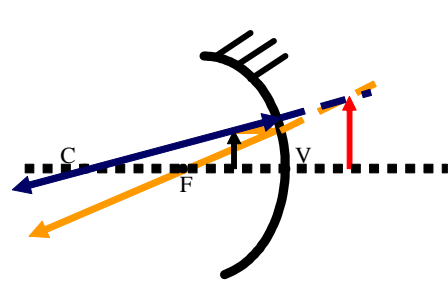
→ Imagem: Real, Invertida e Maior.

(4) Objeto situado sobre o Foco F:



→ Imagem: Imprópria.

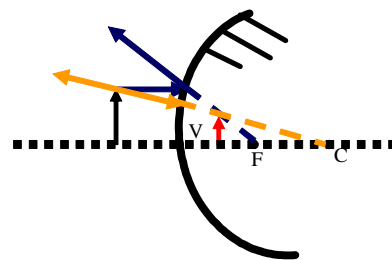
(5) Objeto situado entre o Foco F e o Vértice:



→ Imagem: Virtual, Direita e Maior.

Espelho Convexo

Neste caso temos apenas um caso:



→ Imagem: Virtual, Direita e Menor.

OBSERVAÇÃO:

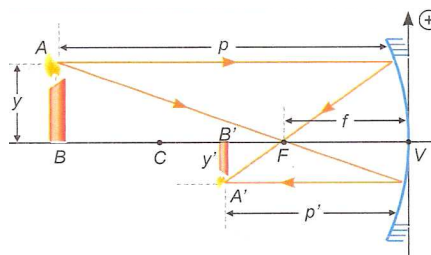
O espelho convexo é usado como espelho retrovisor de motocicletas e em portas de garagens devido ao maior campo visual que oferece.

Após tudo o que vimos, podemos tirar algumas conclusões:

- ☞ Uma imagem real está localizada na frente do espelho e poderá ser projetada sobre um anteparo (uma tela) colocada na posição em que ela se forma, pois é constituída pela intersecção dos próprios raios de luz.
- ☞ Uma imagem virtual está localizada atrás do espelho e, embora possa ser visualizada, não é constituída por luz e, sim pelos prolongamentos dos raios.

8. DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DA IMAGEM

Agora procuraremos expressar de forma matemática algumas expressões que nos permita determinar a posição e o tamanho da imagem.



Equação Conjugada de Gauss

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

Temos que a distância focal pe dada por:

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

Aumento Linear Transversal

Por definição, o aumento linear transversal A é a razão entre a altura da imagem i e a altura do objeto o .

$$A = \frac{i}{o} = -\frac{p'}{p}$$

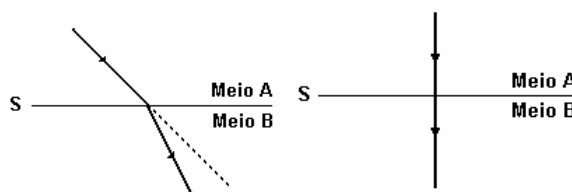
Convenção de Sinais

Objeto	Real $\rightarrow p > 0$	Virtual $\rightarrow p < 0$
Imagem	Real $\rightarrow p' > 0$	Virtual $\rightarrow p' < 0$
Espelho	Côncavo $\rightarrow R > 0$ e $f > 0$	Convexo $\rightarrow R < 0$ e $f < 0$
Altura da Imagem para $o > 0$	Direita $\rightarrow i > 0$	Invertida $\rightarrow i < 0$

CAPÍTULO 05: REFRAÇÃO DA LUZ

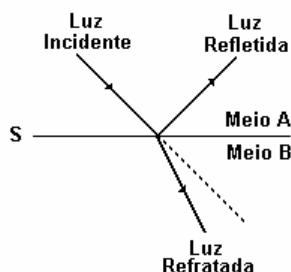
Já discutimos o fato da velocidade da luz depender do meio de propagação. A velocidade de uma dada luz monocromática assume valores diferentes em diferentes meios de propagação tais como: vácuo, ar, água, vidro, etc.

A luz sofre refração quando passa de um meio para outro, modificando sua velocidade. Em geral, a refração é acompanhada por um desvio na trajetória da luz, consequência da mudança de velocidade. O único caso de refração no qual a luz não sofre desvio é quando incide perpendicularmente à superfície de separação dos meios S .



Os dois meios de propagação, A e B , e a superfície de separação S constituem o que chamamos de **DIOPTRO**.

Nos dióptros reais, o fenômeno da refração é acompanhado pela reflexão da luz. Assim, o raio de luz incidente na superfície S divide-se em dois raios, um refratado e outro refletido.



É importante também dizer que ocorre em S o fenômeno da absorção da luz, onde parcela da energia luminosa é transformada em energia térmica, por exemplo.

NO DIOPTRO IDEAL SÓ OCORRE REFRAÇÃO DA LUZ.

1 – ÍNDICE DE REFRAÇÃO ABSOLUTO

Seja c a velocidade da luz no vácuo e v a velocidade da luz em um meio qualquer, definimos índice de refração absoluto (n) de um meio a razão entre as velocidades da luz no vácuo e no meio considerado:

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

O índice de refração absoluto do vácuo é naturalmente igual a 1 ($v = c$). Como a velocidade da luz no vácuo é uma velocidade limite, em qualquer outro meio ela será inferior:

$$v < c, \text{ logo: } n > 1$$

Conclusões:

- ☞ O índice de refração absoluto de qualquer meio material é sempre maior que 1.
- ☞ Quanto maior for o índice de refração absoluto do meio, menor é a velocidade da luz nesse meio.

2 – ÍNDICE DE REFRAÇÃO RELATIVO

Se n_A e n_B são, respectivamente, os índices de refração absolutos dos meios A e B para uma dada luz monocromática, então definimos o índice de refração relativo do meio A em relação ao meio B, $n_{A,B}$ como sendo a razão dos índices de refração absolutos do meio A e B:

$$n_{A,B} = \frac{n_A}{n_B}$$

Podemos relacioná-lo com as velocidades de propagação da luz nesses meios:

Como $n_A = \frac{c}{v_A}$ e $n_B = \frac{c}{v_B}$, temos que:

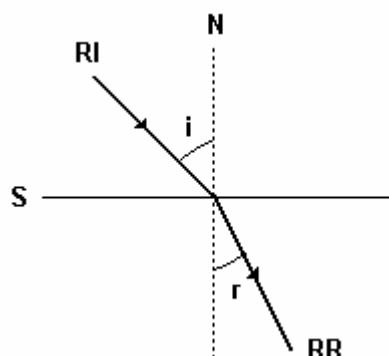
$$n_{A,B} = \frac{\frac{c}{v_A}}{\frac{c}{v_B}} = \frac{v_B}{v_A}$$

$$n_{A,B} = \frac{v_B}{v_A}$$

Portanto:

3 – LEIS DE REFRAÇÃO LUMINOSA

Considerando um raio de luz monocromático incidente numa superfície separadora de dois meios de propagação e o correspondente raio de luz refratado. Traçamos a reta normal à superfície pelo ponto de incidência da luz.



TEMOS:

RI → Raio Incidente;
RR → Raio Refratado;
N → Reta Normal;
i → ângulo de incidência;
r → ângulo de refração.

As leis que regem a refração da luz são:

1ª Lei: O raio de luz incidente RI, a reta normal N e o raio de luz refratado RR estão situados num mesmo plano (coplanares)

é importante notar que os raios de luz incidente e refratado ficam em lados opostos em relação à reta normal.

2ª Lei ou Lei de Snell - Descartes: É constante a relação entre os senos dos ângulos de incidência e refração.

Podemos escrever que:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \text{constante}$$

Essa constante é o índice de refração relativo do meio B em relação ao meio A, assim:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{n_B}{n_A}$$

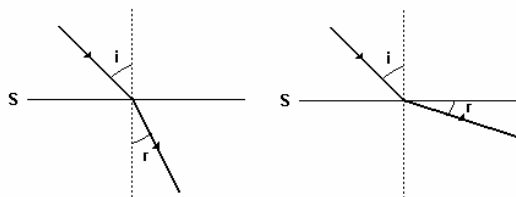
ou: Lei de Snell – Descartes

$$n_A \cdot \text{sen } i = n_B \cdot \text{sen } r$$

Podemos concluir que:

- ☞ Quando a luz passa de um meio menos refringente (menor índice de refração) para um meio mais refringente (maior índice de refração), o raio de luz se aproxima da normal e a velocidade de propagação diminui.
- ☞ Reciprocamente, quando a luz passa de um meio mais refringente para um meio menos

refringente, o raio de luz se afasta da normal e a velocidade de propagação da luz aumenta.



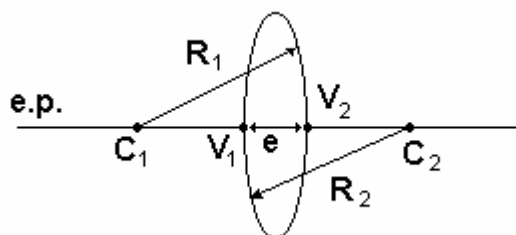
Lentes Esféricas

As lentes esféricas constituem sistemas ópticos de amplas aplicações na atualidade. Elas desempenham um papel um papel importantíssimo, desde os sofisticados “LASERS” até os mais simples pares de óculos.

Podemos defini-las como sendo um meio transparente e homogêneo, limitado por duas superfícies curvas, ou por uma curva e outra plana.

A lente será denominada esférica, quando pelo menos uma de suas faces o for. Em caso contrário poderá ser parabólica ou cilíndrica, por exemplo.

1 – ELEMENTOS GEOMÉTRICOS



TEMOS:

C_1 e C_2 → Centros de Curvatura;
 R_1 e R_2 → Raios de Curvatura;
 V_1 e V_2 → Vértices;
 e → espessura da lente;
e.p. → eixo óptico principal.

OBSERVAÇÃO:

Uma lente é delgada quando a espessura (e) for desprezível em relação aos raios de curvatura. ($e \ll R$)

2 – CLASSIFICAÇÃO DAS LENTES

Podemos classificar as lentes quanto a dois aspectos: tipos de faces e comportamento óptico.

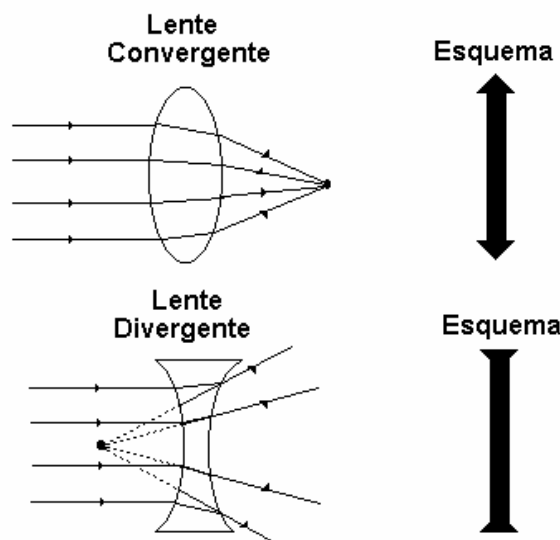
☞ Classificação quanto as faces:

BORDOS FINOS	BORDOS GROSSOS
biconvexa	bicôncava
plano-convexa	plano-côncavo
côncavo-convexa	convexo-côncava

OBSERVAÇÕES:

Os nomes das lentes segue a convenção que devemos citar em primeiro lugar a face de maior raio de curvatura.

☞ Classificação quanto ao Comportamento Óptico:



Nessas figuras consideramos que as lentes são de vidro e estão imersas no ar ($n_{\text{vidro}} > n_{\text{ar}}$), que é o caso mais comum na prática. Nessas condições, as lentes de bordos finos são convergentes e as lentes de bordos grossos são divergentes.

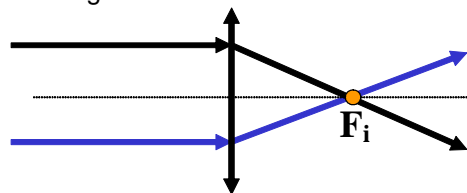
8.3 – TIPOS DE FOCOS

Vamos considerar neste estudo, lentes delgadas e raios de luz dentro das condições de Gauss, como vimos no estudo de espelhos esféricos.

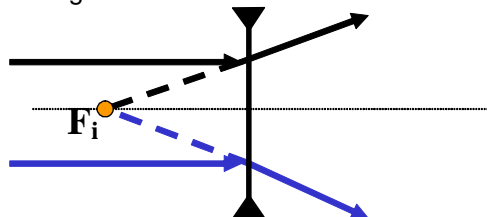
Foco Imagem

É o ponto imagem que a lente conjuga de um objeto impróprio, definido por raios de luz paralelos ao e.p..

Lente Convergente



Lente Divergente

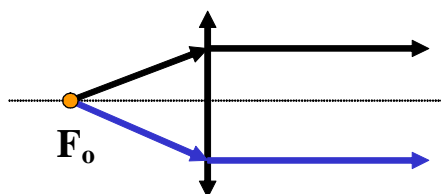


Observando temos: Na lente Convergente o Foco é Real, na Lente Divergente o Foco é Virtual.

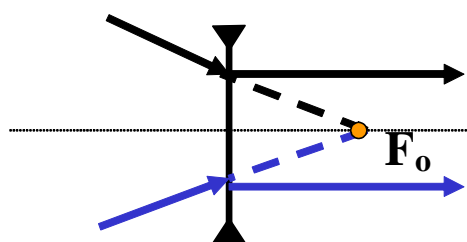
Foco Objeto

É o ponto objeto associado pela lente, a uma imagem imprópria, definida por raios de luz paralelos ao e.p..

Lente Convergente



Lente Divergente

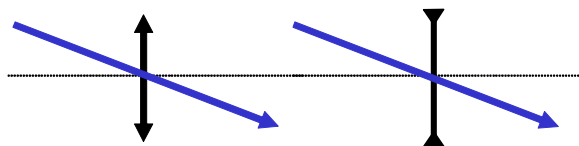


Observando temos: Na lente Convergente o Foco é Real, na Lente Divergente o Foco é Virtual.

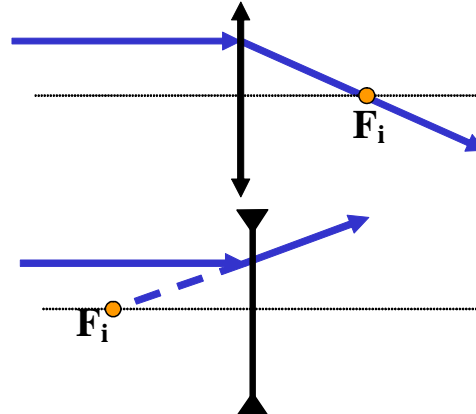
4 – RAIOS NOTÁVEIS

Assim como foi feito para os espelhos esféricos, iremos agora descrever alguns raios que são fáceis de serem utilizados na determinação da imagem numa lente esférica.

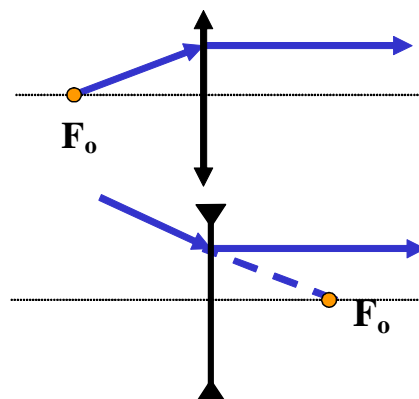
☞ Todo raio que incide no centro óptico atravessa a lente sem sofrer desvio.



☞ Todo raio que incide paralelamente ao eixo principal emerge numa direção que passa pelo foco imagem.



☞ Todo raio que incide sob o foco objeto emerge paralelo ao eixo principal.

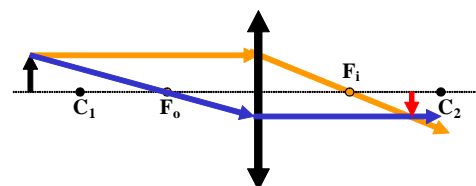


5 – DETERMINAÇÃO GRÁFICA DA IMAGEM

De maneira análoga ao que fizemos para espelhos esféricos iremos proceder agora para lentes.

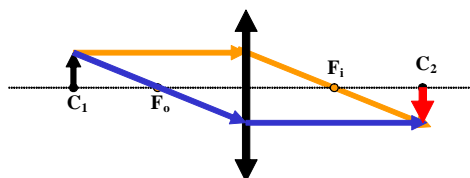
Lentes Convergentes

(1) Objeto situado antes do Centro de Curvatura:



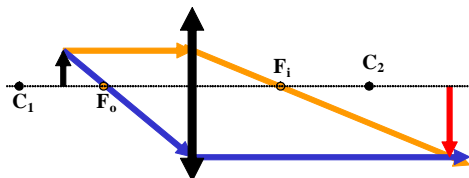
→ Imagem: Real, Invertida e Menor.

(2) Objeto situado no Centro de Curvatura:



→ Imagem: Real, Invertida e Igual.

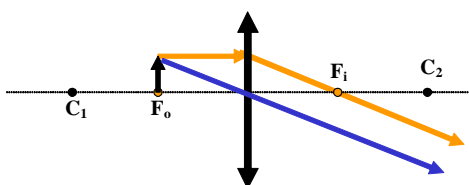
(3) Objeto situado entre o Centro de Curvatura e o Foco:



→ Imagem: Real, Invertida e Maior.

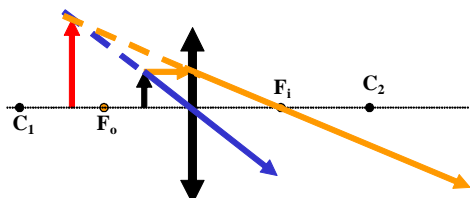
Este caso corresponde à imagem produzida por projetores, tanto de slides como de filmes.

(4) Objeto situado no Foco



→ Imagem: Imprópria.

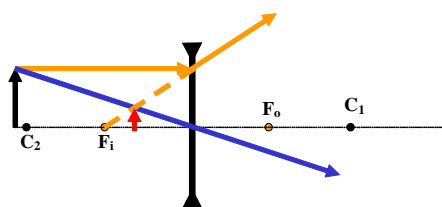
(5) Objeto situado entre o foco e o centro óptico



→ Imagem: Virtual, Direita e Maior.

Este é o caso da lupa.

Lente Divergente

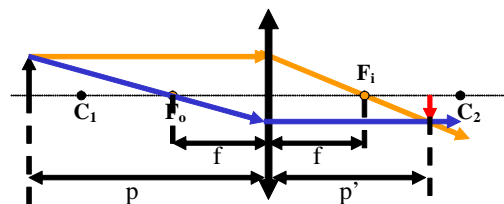


Existe apenas um caso que devemos considerar:

→ Imagem: Virtual, Direita e Menor.

8.6 – DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DA IMAGEM

As equações que utilizaremos para a determinação da posição e tamanho da imagem são análogas às utilizadas no estudo de espelhos esféricos.



Equação de Gauss

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

TEMOS:

f → distância focal;
 p → posição do objeto;
 p' → posição da imagem;

Equação do Aumento Linear Transversal

$$A = \frac{i}{o} = -\frac{p'}{p}$$

TEMOS:

A → aumento linear transversal;
 o → altura do objeto;
 i → altura da imagem;

Convenção de Sinais

Objeto	Real → $p > 0$	Virtual → $p < 0$
Imagem	Real → $p' > 0$	Virtual → $p' < 0$
Lente	Convergente → $R > 0$ e $f > 0$	Divergente → $R < 0$ e $f < 0$
Altura da Imagem para $o > 0$	Direita → $i > 0$	Invertida → $i < 0$

8.7 – VERGÊNCIA DE UMA IMAGEM

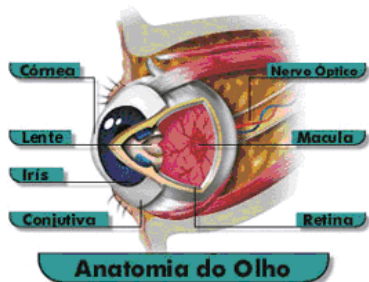
Verifica-se que, quanto menor a distância focal de uma lente, mais ela converge ou diverge um feixe de luz. Essa “potência” da lente de convergir ou divergir a luz é caracterizada por uma grandeza denominada Vergência que é comumente chamada de grau do óculos. A vergência V de uma lente de distância focal f é definida como:

$$V = \frac{1}{f}$$

Se f é medido em metros (m), a unidade de V é m^{-1} , que recebe o nome de diopia (di) (no popular grau do óculos).

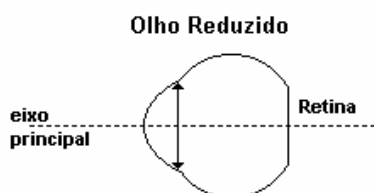
$$1 \text{ di} = 1 \text{ m}^{-1}$$

9 – ÓTICA DA VISÃO



O olho humano assemelha-se a uma filmadora (ou a uma máquina fotográfica) de grande sofisticação. E o cérebro tem a função de reprojetar a imagem obtida pelo olho fornecendo a visão real do objeto

Dispensaremos esse sistema, extremamente complexo, do olho humano e utilizaremos uma representação mais simples – o olho reduzido.



Elementos do Olho Humano

Analisaremos algumas partes que consideramos de grande importância em nosso olho reduzido.

- ☞ Íris: anel colorido de forma circular, que se comporta como um diafragma, controlando a quantidade de luz que penetra no olho. Na sua parte central existe um orifício de diâmetro variável, chamado pupila.
- ☞ Cristalino: é uma lente convergente de material flexível, do tipo biconvexa. Fornecerá de um objeto real uma imagem real, invertida e menor sobre a retina. Pode assumir diferentes formas em função da distância do objeto ao olho.
- ☞ Músculos Ciliares: são responsáveis pela mudança na forma do cristalino, comprimindo-o convenientemente, de maneira a alterar sua distância focal e permitir uma melhor acomodação da imagem sobre a retina.

Quando o objeto está infinitamente afastado, os músculos ciliares e o cristalino estão relaxados, ou seja, o olho não realiza nenhum esforço de acomodação. À medida que o objeto se aproxima, os músculos ciliares vão se contraindo, diminuindo a distância focal do cristalino e mantendo a imagem acomodada na retina.

Em síntese:

Objeto Próximo = Menor Distância Focal;
Objeto Distante = Maior Distância Focal.

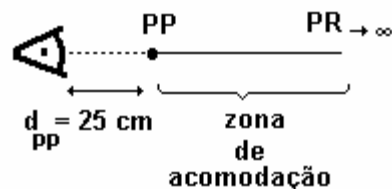
O trabalho realizado pelos músculos ciliares, fazendo variar a distância focal do cristalino é chamado de acomodação visual.

Retina: é a parte sensível à luz, onde deve se formar a imagem para ser nítida. A distância do cristalino a retina é da ordem de 1,5 cm. Composta por células nervosas chamadas bastonetes (visão preto e branco) e cones (visão a cores), a retina possui uma área mais sensível à luz sob condições normais. Esta área consiste numa depressão na parte posterior do olho no eixo do cristalino, e é denominada fóvea.

9.1 – PONTO PRÓXIMO E PONTO REMOTO

A menor distância do globo ocular segundo a qual uma pessoa, de visão normal, pode ver nitidamente a imagem de um objeto qualquer denomina-se Ponto Próximo (PP). Neste caso, os músculos ciliares estão em sua maior contração, realizando esforço máximo de acomodação. Logo, o ponto próximo correspondente à distância mínima de visão distinta, à qual se atribui um valor médio convencional de 25 cm.

O ponto mais afastado do olho humano, corresponde a uma imagem nítida forma sem esforço de acomodação visual, denomina-se Ponto Remoto (PR). Esta é a máxima distância de visão distinta que, teoricamente, permite a uma pessoa uma visão normal de enxergar objetos no infinito.



Intervalo de visão distinta ou zona de acomodação é a região do espaço compreendida entre os dois pontos (PR e PP) figurados anteriormente.

9.2 – PROBLEMAS DE VISÃO

Iremos agora estudar alguns problemas de visão.

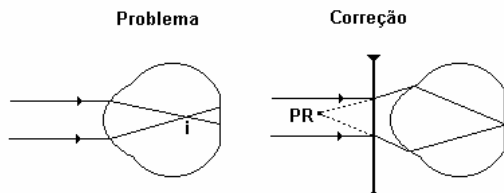
Miopia

A deficiência de um olho míope está na visualização de objetos distantes. Ou seja, o seu ponto remoto (PR) não está no infinito e sim a uma distância finita (d_{PR}).

Isso ocorre, pelo fato da imagem do objeto distante recair antes da retina.



Para corrigir esse defeito, demos tornar o olho míope menos convergente. Para tanto, associamos a ele uma lente divergente:



Podemos demonstrar que a distância focal da lente corretiva da miopia é igual, em módulo, à distância do ponto remoto.

$$f_c = -d_{PR}$$

O sinal negativo deve-se à convenção que atribui distâncias focais negativas às lentes divergentes.

OBSERVAÇÃO:

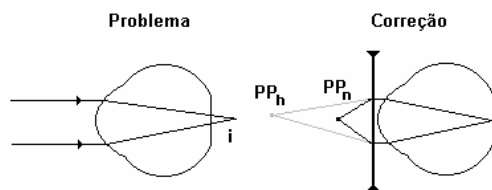
☞ O FATO DO PONTO REMOTO DO MÍOPE ESTAR A UMA DISTÂNCIA FINITA, ACARRETA UMA DIMINUIÇÃO DA DISTÂNCIA DE SEU PONTO PRÓXIMO.

Hipermetropia

A deficiência de um olho hipermetrope está na visualização de objetos próximos. Ou seja, o seu ponto próximo (PP) está mais afastado do que o olho normal. Logo a distância do ponto próximo é maior que 25 cm.

No olho hipermetrope, a imagem de um objeto recai após a retina.

Para corrigir este defeito demos tornar o olho hipermetrope mais convergente, associando a ele uma lente convergente.



A lente corretora deverá, de um objeto colocado a 25 cm do olho, fornecer uma imagem no ponto próximo (PP) do hipermetrope, ou seja, a uma distância d_{PP} do olho.

Assim a distância focal da lente corretiva da hipermetropia é calculada da seguinte forma:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{f_c} = \frac{1}{25\text{cm}} - \frac{1}{d_{PP}}$$

O sinal negativo se deve ao fato da imagem, fornecida pela lente corretora, ser virtual

Presbiopia:

É um defeito determinado pela fadiga dos músculos que efetuam a acomodação e por um aumento na rigidez do cristalino. Tal defeito acentua-se com a idade. O olho se acomoda mal para objetos

próximos e, em consequência, a distância mínima da visão distinta aumenta. A correção é feita com uso de lentes bifocais, que têm uma parte para ver objetos distantes e outra para ver objetos próximos.

Astigmatismo:

É um defeito determinado pela forma não esférica da córnea ou do cristalino, causando uma deformação na imagem. A correção é feita mediante o uso de lentes cilíndricas, que compensam a falta de simetria do sistema óptica ocular.

Estrabismo:

Consiste na incapacidade de se dirigir a visão de ambos os olhos para um mesmo ponto. A correção é feita por ginástica ocular para recuperar os músculos, ou através de cirurgia, ou através de lentes prismáticas.

Daltonismo:

É um defeito genético que faz com que seu portador não consiga distinguir certas cores. Não existe, ainda, correção possível para esse defeito.