Ondas

Aste Physics

March 2025

Contents

1 Movimento Harmônico Simples **2**
1.1 Movimento oscilatório . . . 3
1.2 Movimento Harmônico Simples . . . 4
1.3 Função horária da elongação no MHS . . . 5
1.4 Função horária da velocidade escalar instantânea . . . 8
1.5 Função horária da aceleração escalar instantânea . . . 8
1.6 Velocidade escalar no MHS em função da elongação . . . 9
1.7 Velocidade escalar nos pontos de inversão e no ponto central . . . 10
1.8 Aceleração escalar no MHS em função da elongação . . . 10
1.9 Força no movimento harmônico simples . . . 12
1.10 Período do MHS . . . 12
1.11 Oscilador massa-mola horizontal . . . 13
1.12 Oscilador massa-mola vertical . . . 15
1.13 Pêndulo simples . . . 16

2 Ondas **17**
2.1 Ondas mecânicas e ondas eletromagnéticas . . . 17
2.2 Raios α, γ, γ, X e catódicos. . . . 19
2.3 Ondas de rádio AM e FM e ondas de TV . . . 20
2.4 Ondas longitudinais, ondas transversais e ondas mistas . . . 21
2.5 Equação de uma onda periódica transversal propagando-se em uma corda tensa 31
2.6 Reflexão de ondas transversais . . . 31
2.7 Reflexão de ondas que se propagam na superfície de líquidos . . . 33
2.8 Demonstração da Lei de Snell . . . 36
2.9 Refração e reflexão de ondas transversais em cordas . . . 37
2.10 Superposição de pulsos em cordas . . . 38

3 Acústica **39**
3.1 Intensidade sonora . . . 39
3.2 Cordas sonoras . . . 40
3.3 Tubos sonoros . . . 43
3.4 Velocidade de propagação do som . . . 45
3.5 Velocidade do som num gás perfeito . . . 45
3.6 Sonoridade . . . 50

1 Movimento Harmônico Simples

Nos movimentos oscilatórios temos enquadrado os M.H.S (Movimentos harmônicos simples), possuem importantes aplicações. Sabendo-se o movimento de vaivém de um objeto, podemos determinar a duração aproximada de um intervalo de tempo. Basta conhecermos o comprimento, valor da aceleração da gravidade e o número de vaivéns realizados nesse intervalo de tempo. Se conhecermos o tempo de duração de cada vaivém, o comprimento, podemos estimar o valor da aceleração da gravidade.

Movimento periódico

Um movimento é periódico quando a posição, a velocidade e a aceleração do móvel (estado cinemático) repetem-se em intervalos de tempos iguais. O movimento elíptico de translação de um planeta em relação ao Sol é um exemplo de movimento periódico.

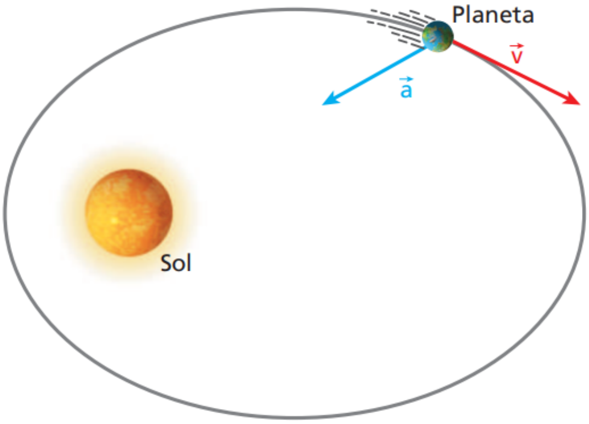


Ilustração com tamanhos e distâncias fora de escala.

A cada volta que o planeta completa a partir da posição indicada na figura, sua posição, sua velocidade vetorial ($\vec{v}$) e sua aceleração vetorial ($\vec{a}$) repetem-se.

O intervalo de tempo necessário para que ocorra uma repetição do movimento é denominado período do movimento (T). Assim, se ocorrerem n repetições do movimento num intervalo de tempo Δt,seu período será:

$$T = \frac{\Delta t}{n} \tag{I}$$

O período pode ser medido em qualquer unidade de tempo. No SI, sua unidade é o segundo (s). Outra grandeza a ser destacada num movimento periódico é a sua frequência (f), que corresponde ao número de vezes que esse movimento se repete na unidade de tempo. Assim, ocorrendo n repetições do movimento no intervalo de tempo Δt, sua frequência é:

$$f = \frac{n}{\Delta t} \tag{II}$$

Comparando as expressões (I) e (II):

$$\Delta t = T \cdot n \quad \text{e} \quad \Delta t = \frac{n}{f}$$

Temos portanto que

$$\frac{n}{f} = n \cdot T$$

Eliminando n dos dois lados obtemos

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

Reorganizando temos

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

A unidade de frequência, no SI, é o hertz (Hz). A frequência de 1 Hz significa que o movimento repete-se uma vez por segundo.

$$\boxed{1 \text{ Hz} = 1 \ s^{-1}}$$

1.1 Movimento oscilatório

Um movimento é oscilatório (ou vibratório) quando ocorre com alternâncias de sentido, porém na mesma trajetória para os dois sentidos. Um exemplo é o do movimento do pêndulo de um relógio de parede.

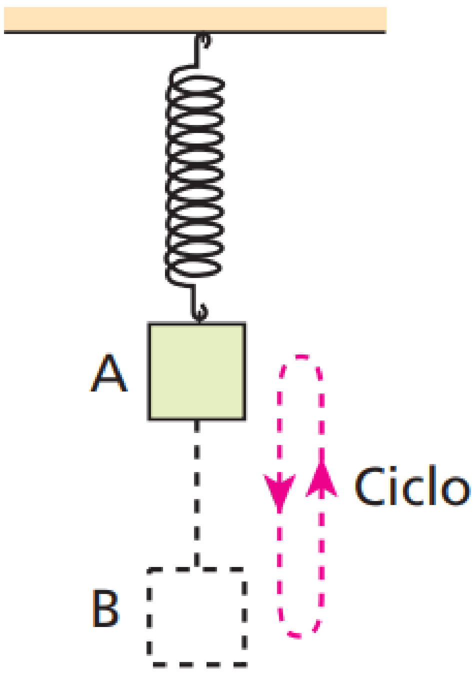


Figure 1:]
*Movimento de um bloco que oscila periodicamente entre A e B. Desprezada a dissipação de energia mecânica, o movimento do bloco é periódico e oscilatório.

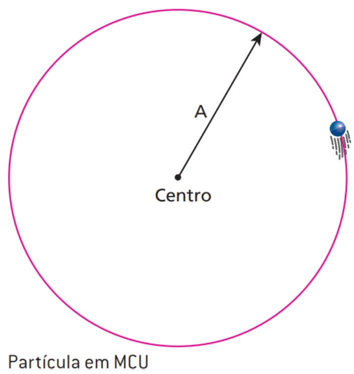
Quando o bloco repete uma situação inicial, dizemos que completou um ciclo, uma vibração ou uma oscilação. É o que acontece quando ele sai de A, vai até B e volta a A. O intervalo de tempo decorrido num ciclo é o período do movimento e o número de ciclos completados na unidade de tempo é a frequência.

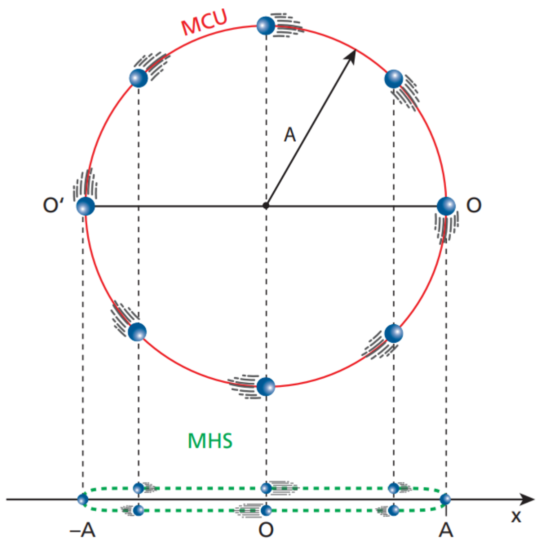
Grandes estruturas (como pontes e edifícios)	maior que 1 s
Cordas vocais	de 10^{-2} s a 10^{-3} s
Colunas de ar em instrumentos musicais de sopro	de 10^{-2} s a 10^{-3} s
Cordas de instrumentos musicais	de 10^{-2} s a 10^{-4} s

Períodos de oscilação de alguns sistemas mecânicos.

1.2 Movimento Harmônico Simples

Alguns movimentos oscilatórios e periódicos, descritos por funções horárias harmônicas (funções seno ou cosseno), são denominados movimentos harmônicos simples (M.H.S)





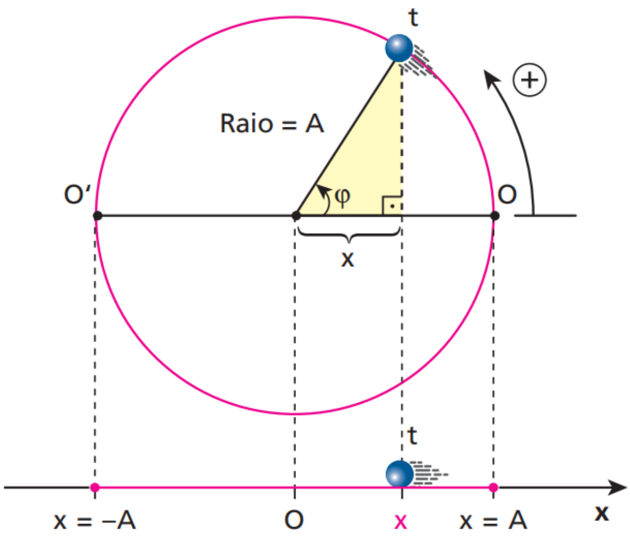
Projeção do MCU sobre um eixo Ox, paralelo ao diâmetro OO' da circuferência e contindo no plano dela

Enquanto a partícula em MCU desloca-se do ponto O até o ponto O', sua projeção desloca-se do ponto de abscissa $x = A$ até o ponto de abscissa $x = -A$. Enquanto a partícula em MCU desloca-se de O' até O, projeção desloca-se de $x = -A$ até $x = A$. Esse movimento retílineo da projeção também é periódico e oscilatório. O período desse movimento da projeção é igual ao período do movimento circular e uniforme. O movimento da projeção do MCU sobre o eixo Ox é um movimento harmônico simples (MHS). No MHS, a abscissa (espaço) x é medida a partir do ponto médio da trajetória e denomina-se elongação.

No ponto médio da trajetória temos $x = 0$ (elongação nula) e nos pontos extremos da trajetória temox $x = -A$ (elongação mínima) e $x = A$ (elongação máxima).

A grandeza A, que corresponde ao raio da circuferência e é também a elongação máxima do MHS, denomina-se amplitude do MHS.

1.3 Função horária da elongação no MHS



Posição ocupada no instante t por uma partícula em MCU numa circunferência de raio A, e posição de sua projeção sobre o eixo Ox, paralelo ao diâmetro $OO^{'}$ e contido no plano da circuferência.

Seja ω a velocidade angular da partícula em MCU. O ângulo φ, denominado fase do movimento estabelece a posição da partícula em relação ao ponto O da circunferência e é dado por:

$$\varphi = \omega t + \varphi_0 \tag{I}$$

No triângulo retângulo destacado, temos:

$$x = A\cos(\varphi) \tag{II}$$

Sabemos portanto que $\varphi = \omega t + \varphi_0$, podemos substituir em $\cos(\varphi)$ ficando então:

$$\boxed{x = A\cos(\omega t + \varphi_0) \quad \text{Função horária da elongação no MHS}}$$

- A constante A (raio da circunferência em que ocorre o MCU) é a amplitude do MHS;
- A constante ω (velocidade angular da partícula em MCU) é denominada pulsação ou frequência angular do MHS;
- A constante φ_0 é a constante de fase ou fase inicial, ou seja, é o valor da fase φ instante $t = 0$. Para valores fixados de A e ω, a fase inicial φ_0 determina as características do MHS em $t = 0$.

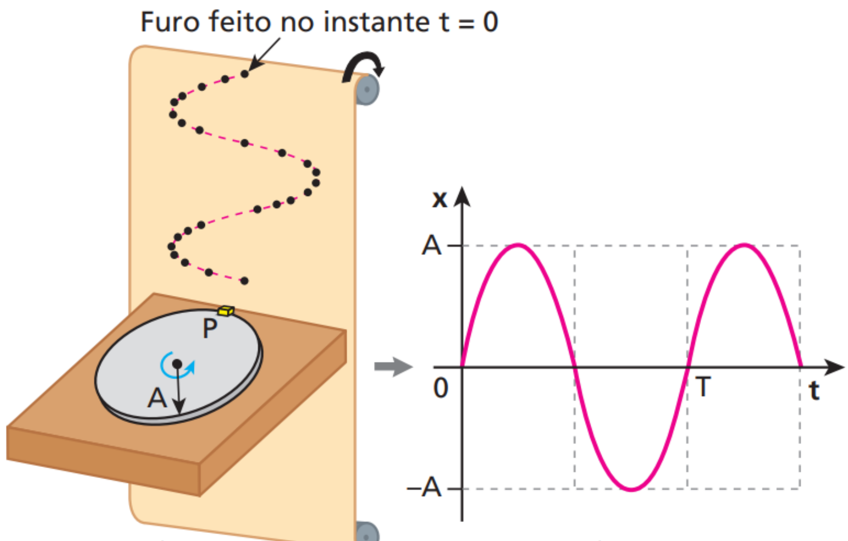
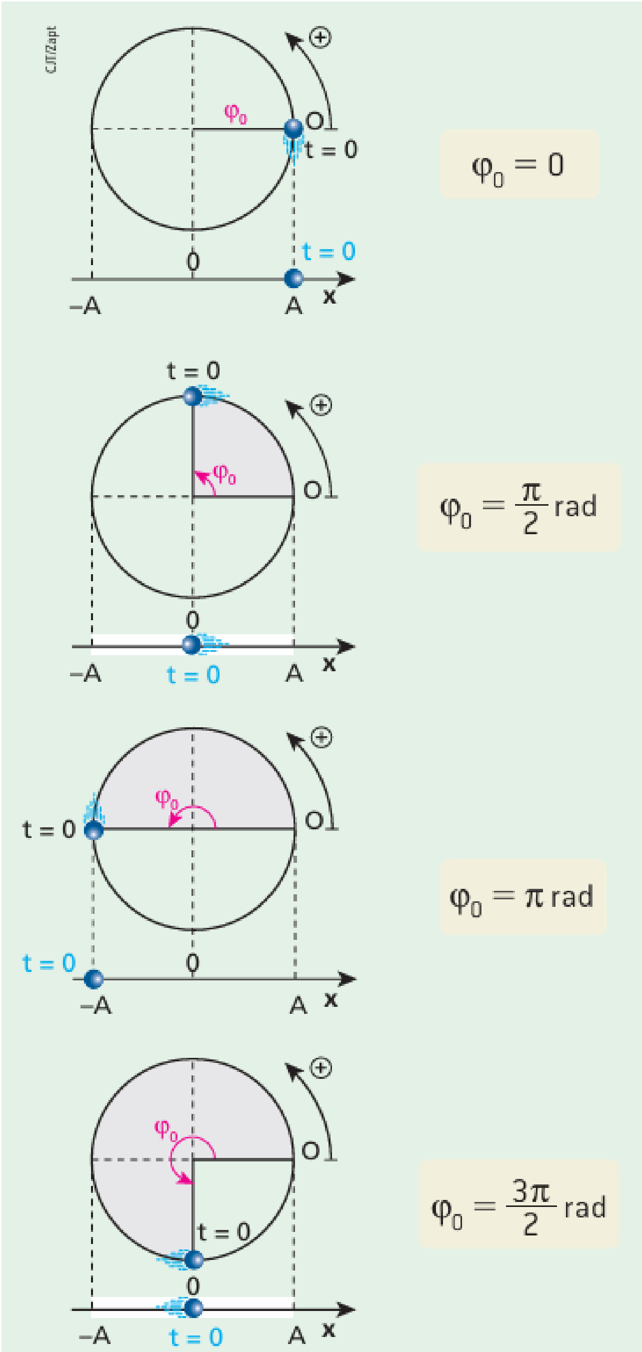


Figura 1 Figura 2

A (figura) 1 representa um toca-discos. O prato de raio A, está em movimento de rotação uniforme e período T. Suponha que o dispositivo P, acoplado à periferia do prato, atire projéteis periodicamente, sempre numa direção perpendicular a uma fita que sobe com velocidade constante, perfurando-a. Se o intervalo de tempo entre dois tiros consecutivos for bem menor que T, as perfurações da fita determinarão uma linha sinusoidal, que corresponde ao gráfico da elongação x em função do tempo t para o MHS gerado pela projeção do MCU (Figura 2)

Fase inicial do MHS (φ_0)

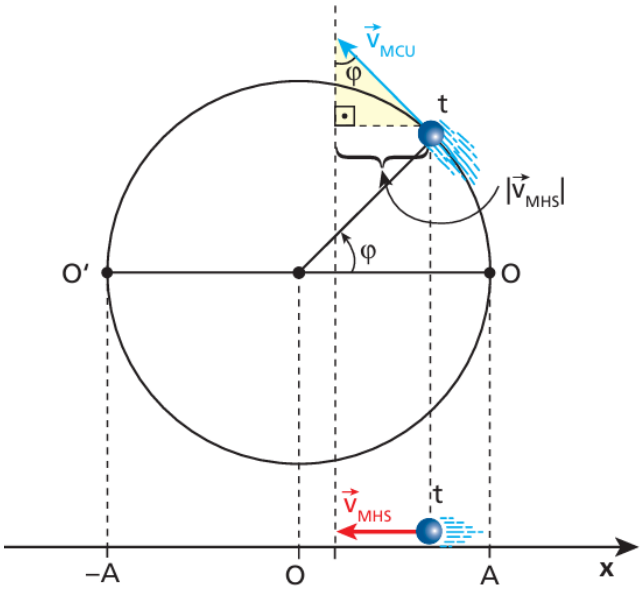
As figuras a seguir ilustram alguns valores notáveis de φ_0



1.4 Função horária da velocidade escalar instantânea

No item anterior, determinamos a posição no MHS pela projeção da posição no MCU.

A velocidade instantânea no MHS também é determinada pela projeção da velocidade no MCU sobre a trajetória em que se dá o MHS. Essa projeção está ilustrada na figura a seguir.



No triângulo retângulo destacado, temos:

$$|\vec{v}_{MHS}| = |\vec{v}_{MCU}|\,\mathrm{sen}\,\varphi$$

Lembrando que

$$|\vec{v}_{MCU}| = \omega\,A \quad \text{e} \quad \varphi = \omega\,t + \varphi_0$$

Obtemos:

$$|\vec{v}_{MHS}| = \omega\,A\;\mathrm{sen}(\omega\,t + \varphi_0)$$

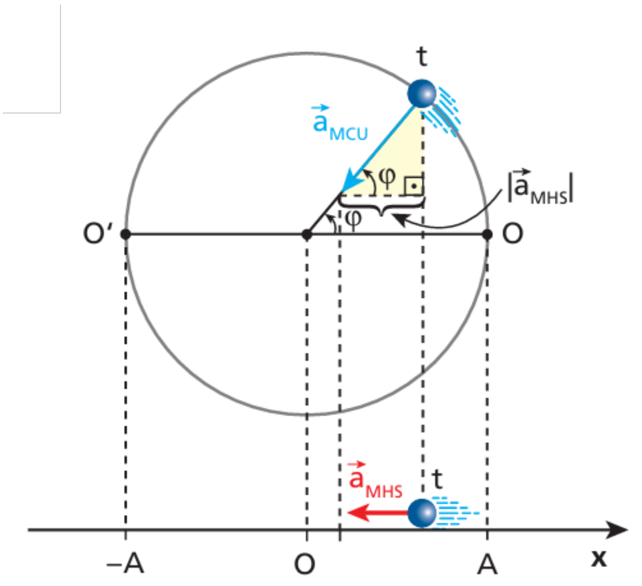
Como o MHS tem sentido contrário ao do eixo do Ox (movimento retrógrado) no instante t, obtemos a seguinte expressão da velocidade escalar instantânea v para esse movimento:

$$v = -\omega A\,\mathrm{sen}(\omega\,t + \varphi_0)$$

Essa é a função horária da velocidade escalar instantânea em um MHS.

1.5 Função horária da aceleração escalar instantânea

A aceleração instantânea no MHS é determinada também pela projeção da aceleração no MCU, que é centrípeta, sobre a trajetória em que ocorre o MHS. Essa projeção está representada na figura a seguir.



No triângulo destacado na figura, temos:

$$|\vec{a}_{MHS}| = |\vec{a}_{MCU}| \cos\varphi$$

Como:

$$|\vec{a}_{MCU}| = \omega^2 A \quad \text{e} \quad \varphi = \omega\, t + \varphi_0$$

Obtemos

$$|\vec{a}_{MHS}| = \omega^2 A \cos(\omega\, t + \varphi_0)$$

Observando que o MHS é acelerado no instante t, concluímos que nesse instante a velocidade escalar e a aceleração escalar devem ter o mesmo sinal. Sendo negativa a velocidade escalar, deduzimos que a aceleração escalar também é negativa. Obtemos, então, para o MHS, a função horária da aceleração escalar instantânea α, como segue:

$$\alpha = -\omega^2 A \cos(\omega\, t + \varphi_0)$$

1.6 Velocidade escalar no MHS em função da elongação

Já vimos como a velocidade escalar no MHS varia em função do tempo (t). Veremos agora como essa velocidade relaciona-se com a **elongação (x)**. Para isso, temos:

$$x = A\cos(\omega\, t + \varphi_0) \Rightarrow \cos(\omega\, t + \varphi_0) = \frac{x}{A}$$

$$v = -\omega\, A \,\mathrm{sen}(\omega\, t + \varphi_0) \Rightarrow \mathrm{sen}(\omega\, t + \varphi_0) = -\frac{v}{\omega A}$$

Lembrando que a soma do quadrado do seno com o quadrado do cosseno de um mesmo ângulo é sempre igual a 1, temos:

$$\left(-\frac{v}{\omega A}\right)^2 + \left(\frac{x}{A}\right)^2 = 1 \Rightarrow \frac{v^2}{\omega^2 A^2} + \frac{x^2}{A^2} = 1$$

E assim:

$$v^2 = \omega^2 (A^2 - x^2)$$

Observe que, nessa expressão, a velocidade escalar é dada em função da elongação (x) e não em função do tempo (t).

1.7 Velocidade escalar nos pontos de inversão e no ponto central

Os pontos de inversão do movimento harmônico simples são as extremidades da trajetória, ou seja, os pontos de elongação $x = A$ e $x = -A$. Substituindo esses valores de x na expressão deduzida, obtemos:

$$v^2 = \omega^2(A^2 - A^2) = 0 \Rightarrow v = 0$$

Assim, concluímos que a velocidade é nula nos pontos de inversão, como era esperado.

No **ponto central** da trajetória do MHS, a elongação é nula. Substituindo $x = 0$ naquela expressão, obtemos:

$$v^2 = \omega^2(A^2 - 0) = \omega^2 A^2 \Rightarrow v = \pm\omega A \qquad \text{(máxima, em valor absoluto)}$$

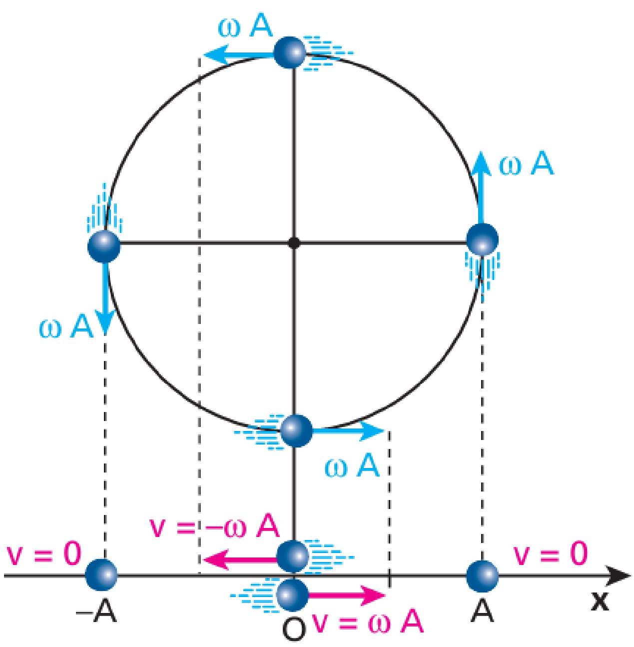
Assim, concluímos que a velocidade escalar no ponto central é igual a $+\omega A$, quando o movimento ocorre no sentido da trajetória, e $-\omega A$, quando ocorre em sentido oposto.

Observe, então, que:

A **velocidade escalar máxima** no MHS é dada pelo produto pela pulsação pela amplitude, ocorrendo no ponto central da trajetória:

$$\boxed{v_{\text{máx}} = \omega A}$$

Também podemos chegar a esses resultados pela projeção direta da velocidade no MCU sobre a trajetória do MHS, como ilustra a figura abaixo.



1.8 Aceleração escalar no MHS em função da elongação

Já obtivemos uma expressão que relaciona a aceleração escalar no MHS com o **tempo (t)**. É muito importante, porém, relacioná-la também com **elongação (x)**.

Para tanto, usaremos as seguintes expressões, já deduzidas:

$$x = A\cos(\omega\, t + \varphi_0) \tag{I}$$

$$\alpha = -\omega^2 A\cos(\omega\, t + \varphi_0) \tag{II}$$

Substituindo (I) em (II), temos:

$$\alpha = -\omega^2 x$$

Aceleração escalar nos pontos de inversão e no ponto central

Nos **pontos de inversão** do MHS, temos $x = A$ e $x = -A$.

$$\text{Em } x = A: \quad \alpha = -\omega^2 A \quad \text{(valor mínimo)}$$

$$\text{Em } x = -A: \quad \alpha = \omega^2 A \quad \text{(valor máximo)}$$

No **ponto central** da trajetória do MHS, temos $x = 0$. Consequentemente, a aceleração escalar é nula nesse ponto

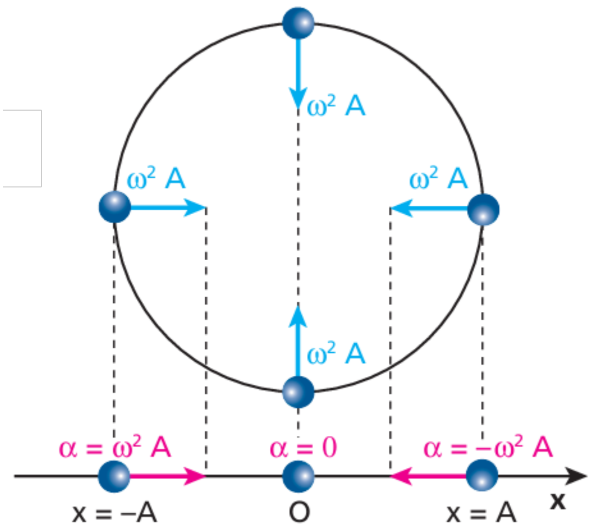
$$\alpha = 0$$

Destaquemos que:

A **aceleração escalar máxima** no MHS é dada pelo produto do quadrado da pulsação pela amplitude, ocorrendo no ponto de inversão em que a elongação é $x = -A$:

$$\alpha_{\text{máx}} = \omega^2 A$$

Também podemos obter esses resultados pela projeção da aceleração no MCU sobre a trajetória do MHS, como ilustra a figura abaixo.



1.9 Força no movimento harmônico simples

A partir do conhecimento das forças que atuam em um sistema, conseguimos saber se um corpo realiza MHS ou não.

A aceleração escalar de uma partícula em função da elongação é dada por:

$$\alpha = -\omega^2\, x$$

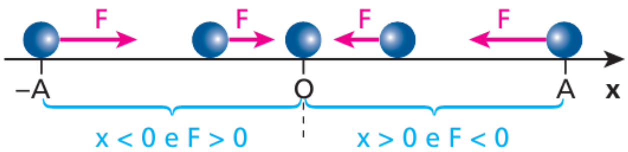
O valor algébrico da força resultante que atua em uma partícula de massa **m** executando esse movimento retilíneo fica determinado pela expressão:

$$F = m\,\alpha \quad \Rightarrow \quad F = -m\,\omega^2 x$$

Como a massa m e a pulsação ω são constantes em um determinado MHS, podemos substituir $m\,\omega^2$ por uma única constante K , denominada constante de força do MHS. Obtemos então:

$$F = -Kx$$

Essa expressão revela que o valor algébrico da força resultante que atua em uma partícula em MHS é **proporcional** à elongação, tendo F e x sinais opostos. É essa característica que se deve ter em mente quando é preciso decidir se determinado movimento é ou não um movimento harmônico simples. A força resultante num corpo em MHS é denominada **força restauradora**, porque ela atua de modo a garantir o prosseguimento das oscilações: toda vez que o corpo passa pela posição central, a força entra em ação para retardá-lo e, depois, trazê-lo de volta. Esse fato pode ser observado na análise de sinais na expressão $F = -Kx$. Quando a elongação (x) é positiva, o valor algébrico da força (F) é negativo, o que significa, que a força tem sentido oposto ao do eixo Ox. Quando, porém, a elongação é negativa, o valor algébrico da força é positivo, o que significa que a força tem o mesmo sentido do eixo Ox.



Ponto de equilíbrio do MHS

No ponto central da trajetória do MHS, a elongação (x) é nula. O mesmo ocorre, consequentemente, com a força resultante.

Em qualquer movimento, o ponto da trajetória em que a força resultante se anula denomina-se **ponto de equilíbrio** do movimento. A partir disso concluímos que:

O **ponto de equilíbrio** de um MHS é o ponto central da trajetória, isto é, o ponto de elongação x igual a zero.

1.10 Período do MHS

Na maioria dos casos, a importância prática do MHS está no conhecimento de seu **período (T)**, porque a partir dele podemos determinar outras grandezas.

Dedução

A constante de força do MHS é:

$$K = m\,\omega^2$$

Isolando ω e extraindo a raíz, obtemos uma expressão para a pulsação do MHS.

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{m}}$$

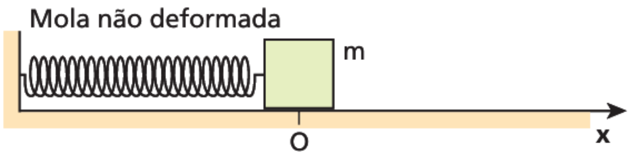
Sabendo que $\omega = \dfrac{2\,\pi}{T}$, temos:

$$\frac{2\,\pi}{m} = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad \Rightarrow \quad T = 2\,\pi\sqrt{\frac{m}{K}}$$

Observe que, fixando o valor de K, a frequência é inversamente proporcional à raiz quadrada da massa.

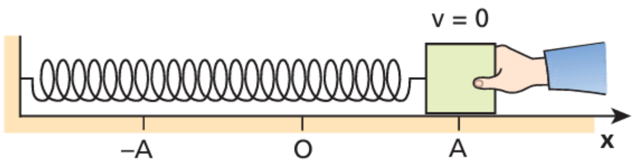
1.11 Oscilador massa-mola horizontal

Considere um bloco de massa m, em repouso num plano horizontal suposto perfeitamente liso, preso a uma mola, como mostra a figura a seguir. A mola é supostamente de massa desprezível e sua constante elástica é K.

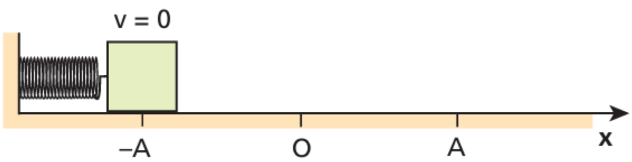


Observe que a posição do bloco é de equilíbrio, pois a mola não está deformada. Assim, a força resultante nele é nula. Um eixo Ox está associado ao plano horizontal, com a origem na posição de equilíbrio e na mesma direção do eixo da mola.

Vamos afastar o bloco da posição de equilíbrio, deslocando-o, por exemplo, para a direita até a posição $x = A$, e deixá-lo aí, como mostra a figura a seguir:



Supondo que a mola opere em regime de elasticidade perfeita e desprezando qualquer influência do ar, concluímos que o bloco executará, se solto, um movimento oscilatório e periódico entre $x = A$ e $x = -A$ (sistema conservativo).



Nesse movimento, a elongação e a própria deformação da mola. Além disso, a força elástica da mola é a força resultante sobre o bloco. Lembrando que a força elástica é proporcional à deformação da mola, obtemos a seguinte expressão para o valor algébrico da força resultante:

$$F = -Kx$$

Isso prova que o movimento em questão é um movimento harmônico simples. Sendo assim, o período de oscilação é dado por:

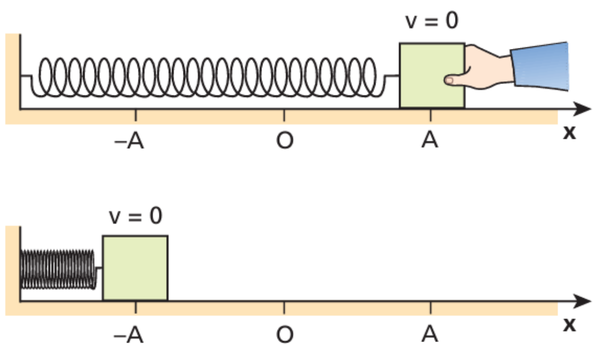
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{K}}$$

Observe, mais uma vez, que o período não depende da amplitude, ou seja, da posição em que o bloco é abandonado para oscilar, desde que oscile nas condições ideais consideradas.

Podemos resumir as principais informações sobre o oscilador massa-mola em plano horizontal e em condições ideais da seguinte forma:

- O corpo preso à mola executa MHS
- A elongação no MHS é, em módulo, a própria deformação (distensão ou contração) da mola.
- A força resultante no corpo é a própria força elástica aplicada pela mola.
- No ponto de equilíbrio, a força elástica (força resultante) é nula, e a mola não está deformada.

Análise energética



Na posição $x = A$, a energia potencial elástica (E_p) armazenada e a energia cinética (E_c) valem:

$$E_p = \frac{K\,A^2}{2} \quad \text{e} \quad E_c = 0$$

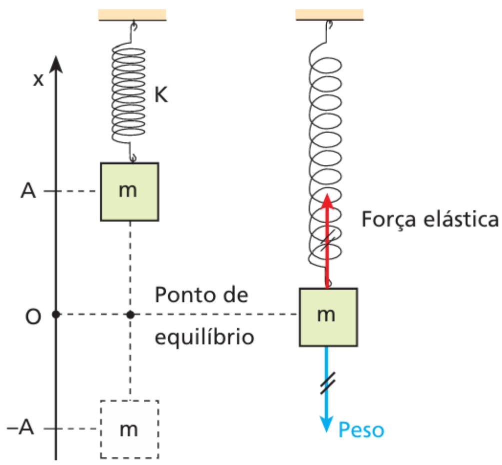
Assim, a energia mecânica do sistema é dada por:

$$E_m = E_p + E_c = \frac{KA^2}{2} + 0 \Rightarrow \boxed{E_m = \frac{KA^2}{2}}$$

Essa energia mecânica mantém-se constante, pois o sistema é conservativo. Ao se deslocar de $x = A$ até $x = 0$, toda energia potencial elástica converte-se em energia cinética e o bloco passa por $x = 0$ com velocidade de módulo máximo. De $x = 0$ até $x = -A$, a energia cinética se converte em energia potencial elástica e o movimento oscilatório prossegue indefinidamente.

1.12 Oscilador massa-mola vertical

Observe agora o bloco de massa m oscilando verticalmente na extremidade da mola de constante elástica K, em condições ideais.

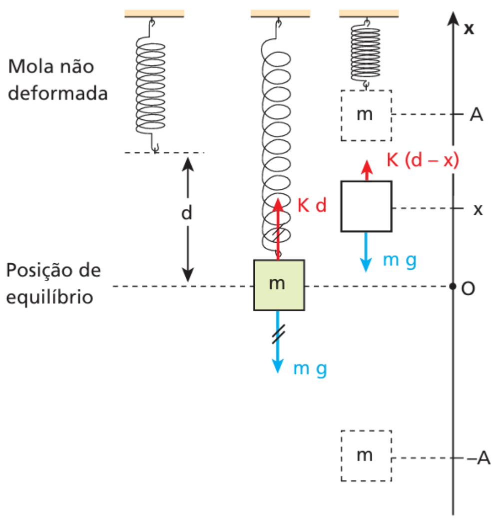


Situação no ponto de equilíbrio: a força resultante é nula, mas a mola está deformada.

Note que nesse oscilador a força resultante no bloco não é mais a força elástica, mas sim a composição vetorial da força elástica com a força peso do bloco. Desse modo, no ponto de equilíbrio ($x = 0$), a força elástica não é nula: sua intensidade é igual à intensidade do peso do bloco, pois nessa posição a força **resultante** é nula. Assim, a mola está deformada no ponto de equilíbrio, ao contrário do que acontece no oscilador horizontal. Por isso, no oscilador vertical o módulo da elongação x já não é igual à deformação da mola. Apesar de todas essas diferenças, o movimento do bloco continua sendo harmônico simples, como provaremos a seguir.

Na posição de equilíbrio, indicada na figura a seguir, temos:

$$K\,d = m\,g \tag{I}$$



Numa posição genérica de elongação x, o valor algébrico F da força resultante no bloco é dado por:

$$F = K\,(d - x) - m\,g$$

$$F = K\,d - K\,x - m\,g$$

Substituindo em , temos:

$$F = m\,g - Kx - m\,g$$

$$\boxed{F = -K\,x}$$

Concluímos, então, que o valor algébrico da força resultante no bloco é proporcional à elongação e tem sinal oposto ao dela. Isso significa que **o movimento é harmônico simples**.

Observe que a constante de força continua sendo a constante elástica da mola (K). Portanto, o período das oscilações continua dado pela expressão:

$$\boxed{T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{K}}}$$

1.13 Pêndulo simples

Vamos acompanhar a análise do movimento oscilatório de um corpo preso na extremidade de um fio. Veremos que o movimento

2 Ondas

Ondas de variados tipos estão presentes em nossa vida. Ao vermos um objeto, nossos orgãos visuais estão sensibilizados por ondas luminosas (eletromagnéticas). Devido a limitações biológicas (visuais), outras ondas eletromagnéticas não podem ser vistas - como as ondas de rádios, micro-ondas, etc.
Ouvimos músicas, vozes, ruídos devido a ondas sonoras. Porém assim como acontece nosso sistema visual, acontece com o nosso sistema auditivo, as limitações não nos permitem ouvir ondas do mesmo tipo do som, um exemplo é o ultra-som.

Além da luz (ondas eletromagnéticas) e o som (ondas mecânicas), há outras ondas como as formadas na superfície da água quando nela cai alguma coisa, ou como aquelas que se formam quando pegamos uma corda esticamos e sacudimos uma de suas extremidades.

Todas as ondas possuem algo em comum, transportam energia, porém o meio não acompanha essa propagação, de maneira geral, transportam energia sem transportar matéria.

2.1 Ondas mecânicas e ondas eletromagnéticas

A onda em sua natureza (características físicas), classificam-se em dois grupos: ondas mecânicas e ondas eletromagnéticas.

Ondas mecânicas

São deformações que se propagam em meios elásticos. Esse fenômenos ocorre apenas em meios materiais, pois as ondas mecânicas necessitam de partículas para se propagarem. Elas nunca se propagam no vácuo!

A propagação de uma onda mecânica através de um meio material envolve o transporte de energia cinética e de energia potencial mecânica e depende de dois fatores fundamentais: a inércia e a elasticidade do meio.

Uma onda mecânica não transporta o meio onde se propaga. É apenas a energia que muda de local, passando de partícula para partícula do meio material.

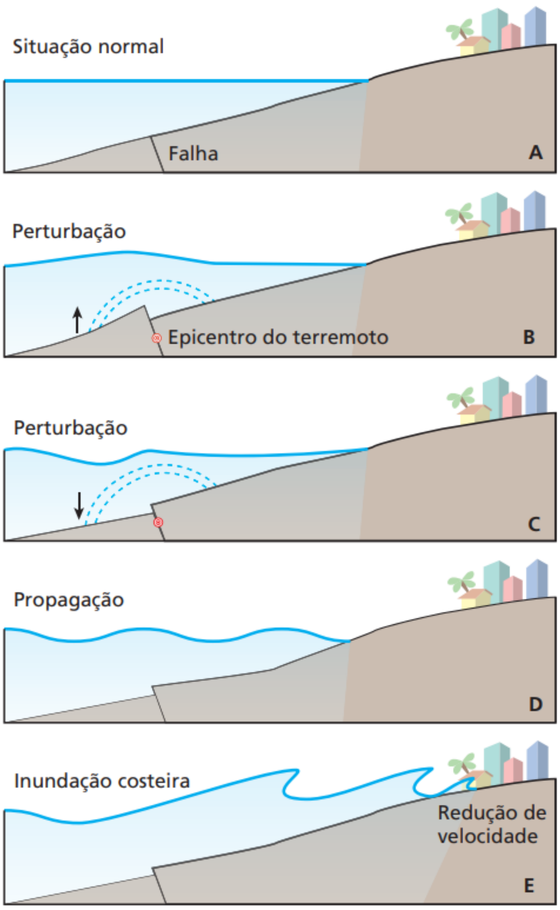
Onda mecânica é a propagação de energia através de partículas de um meio material, sem que essas partículas sejam transportadas. Uma onda mecânica nunca se propaga no vácuo.

Tsunami, uma onda mecânica

O termo tsunami é de origem japonesa - tsu significa porto e nami onda. Esse termo surgiu do relato de um grupo de pescadores que estavam em alto-mar pescando. Quando retornaram ao porto, encontraram-no devastado por ondas imensas. Como eles não haviam percebido essas ondas enquanto navegavam, concluíram que foram formadas próximas ao porto. Por isso "onda de porto"

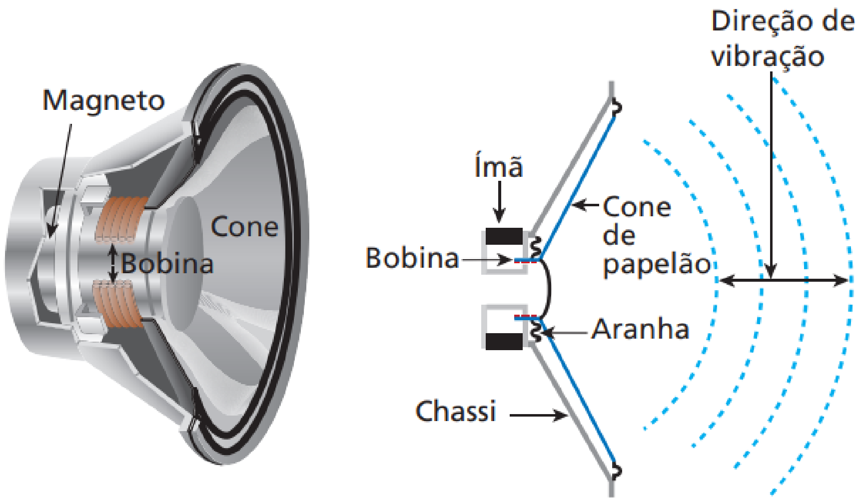
Hoje se sabe que tais ondas são formadas após um rápido deslocamento vertical da coluna de água em regiões de grande profundidade. Tal deslocamento pode ser causado por um abalo sísmico, por uma atividade vulcânica, por um grande deslocamento de terra ou gelo ou pela queda de um meteorito. A potência de um tsunami depende de sua amplitude e sua velocidade. Quando a onda se aproxima da praia, sua velocidade diminui e sua amplitude aumenta, podendo atingir alturas de mais de 30 metros, devastando assim a orla marítima. Momentos antes da chegada dessas grandes ondas ocorre um rebaixamento significativo do nível do mar. Esse sinal serviria de aviso silencioso sobre o perigo iminente para que a população pudesse refugiar-se em áreas elevadas.

A região de maior probabilidade de ocorre tais ondas é o Oceano Pacífico, onde existem muitas placas oceânicas que deslizam sob placas continentais. Esses deslizamentos, que acontecem a grandes profundidas (4000 m), provocam ondas que se propagam na superfície a até 700 km/h.



O alto-falante emite ondas mecânicas

O alto-falante é um dispositivo utilizado para produzir ondas sonoras a partir de iumpulsos elétricos. Os primeiros alto-falantes surgiram na década de 1920, nos Estados Unidos, acompanhando os primeiros fonógrafos elétricos.
Através de um cone de papelão (circular ou elíptico) que avança e recua, os alto-falantes emitem ondas mecânicas longitudinais.
Os **sons agudos (altas frequências)**, acima de 4000 Hz, são emitidos por unidades pequenas (tweeters) de 3 cm a 5 cm de diâmetro. Os **sons graves (baixa frequência)**, abaixo de 500 Hz, são emitidos pelas unidades (woofers) de 25 cm de diâmetro. Já os sons intermediários, de 500 Hz a 4000 Hz, são emitidos por unidades de 15 cm de diâmetro. No entanto, podemos encontrar um único alto-falante que emite os sons médios e graves.

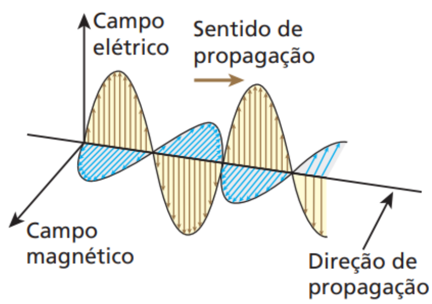


Ondas eletromagnéticas

As ondas eletromagnéticas são formadas por dois campos variáveis, um elétrico e outro magnético, que se propagam. Essa propagação pode ocorrer no vácuo e em determinados meios materiais.

As ondas de rádio são ondas eletromagnéticas, dentre elas as ondas de AM (Amplitude Modulada) e as de FM (Frequência Modulada), as ondas de TV, as ondas luminosas (luz), as micro-ondas, os raios X e γ. Essas denominações são dadas de acordo com a principal fonte geradora das ondas e se diferenciam e especial pelas faixa de frequência. Todas as ondas eletromagnéticas têm em comum sua velocidade de propagação no vácuo: aproximadamente 300 000 km/s. A velocidade propagação depende do material do meio e da frequência da onda. Em meios materiais transparentes a essas ondas, a velocidade é menor que 300 000 km/s.

Ondas eletromagnéticas constituem um conjunto de dois campos, um elétrico e outro magnético, que se propagam no vácuo com velocidade aproximada de 300 000 km/s. Em meios materiais, quando ocorre propagação, a velocidade é menor que 300 000 km/s.



Os campos citados são perpendiculares entre si e, ainda, perpendiculares à direção de propagação da onda

2.2 Raios α, γ, γ, X e catódicos.

Os raios α são partículas formadas por 2 prótons e 2 nêutrons, núcleos de um dos isótopos do hélio. Os raios β e os raios catódicos são compostos de elétrons. Assim, os raios α, β e catódicos não são ondas, e sim partículas dotadas de carga elétrica, podendo ser desviadas por campos magnéticos.

Dentre os raios α, β, γ, X e catódicos, apenas os raios γ e X são ondas eletromagnéticas. Os raios γ são obtidos por processos nucleares e, sendo fatais para microorganismos, têm aplicação em esterilização de instrumentos cirúrgicos. Cereais que precisam ficar muito tempo armazenados também costumam ser expostos a raios γ, para que fiquem livres de fungos e bactérias que produzem a deterioração dos grãos. Esses raios ainda são empregados para destruir tumores cancerígenos.

Na Medicina os raios X são largamente usados para a obtenção de radiografias, e na indústria dentre outras aplicações, são utilizados para detectar falhas em peças metálicas que irão constituir uma máquina. Minúsculos defeitos e microfissuras podem ser descobertos com o uso dos raios X.

Raio laser

A palavre laser é formada pelas letras iniciais das palavras que formam a expressão inglesa light amplification by stimulated emission of radiation (amplificação da luz por emissão estimulada de radiação). A invenção do laser data de 1960, no entanto, já em 1954 havia sido inventado o maser, no qual usava-se não a luz, mas micro-ondas (microwave).

A principal característica de um laser é que, pela estimulação de átomos de uma substância particular, se obtém um estreito feixe de luz monocromática, colimada e coerente, isto é, luz de uma mesma cor, em feixe concentrado e em fase. Nesse feixe, todas as partículas de luz (fótons) possuem as mesmas propriedades.

A cada fóton emitido está associado o mesmo comprimento de onda. Dessa forma, pode-se obter uma grande concentração de energia em uma pequena superfície. Para gerar o feixe de luz, um meio (sólido, líquido ou gasoso) é estimulado por uma corrente elétrica, por uma descarga elétrica ou mesmo por outra fonte de luz. Assim, o laser transforma energia dispersa em energia concentrada em forma de luz.

Dependendo da finalidade de cada laser, ele pode ser obtido de uma substância diferente. Na indústria, por exemplo, são utilizados laser obtidos de moléculas de dióxido de carbono (CO_2) ou de íons de neodímio em matrizes sólidas. Nesse caso, a energia gerada é utilizada para soldagem ou cortes de chapas metálicas. Na medicina, o laser pode ser usado como bisturi ou para cauterização de vasos sanguíneos. Na Odontologia, ele substituirá o temido "motorzinho", podendo retirar cáries sem que um pedaço do dente também seja retirado. Os lasers usados na Medicina e na Odontologia são obtidos a partir de érbio, hólmio, argônio, neodímio e dióxido de carbono.

O laser também é usado na mira de armas modernas, como fuzis e lançadores de mísseis. Em aparelhos de CD e DVD, o laser é usado para "ler" o conteúdo dos discos.

2.3 Ondas de rádio AM e FM e ondas de TV

Em 1887, o físico alemão Heinrich Rudolf Hertz descobriu os princípios básicos da emissão e da recepção de ondas de rádio. No início, captava-se no receptor apenas um sinal contínuo. Somente depois de 1904, com o desenvolvimento da válvula termoiônica de Fleming, é que foi possível o início da transmissão via ondas eletromagnéticas. Para que essas ondas fossem portadoras de mensagens, elas deviam ser moduladas, isto é, deviam sofrer variações em sua amplitude (AM) ou em sua frequência (FM).

As ondas de amplitude modulada (AM) são divididas em três faixas, de acordo com seu comprimento de onda: ondas curtas (OC), ondas médias (OM) e ondas longas (OL). Por causa do longo alcance dessas ondas, elas são utilizadas por emissoras comerciais, nas comunicações entre aviões, por radioamadores etc.

As ondas de frequência modulada (FM), embora tenham um alcance menor, podendo ser captadas apenas em um raio de pouco mais de 100 km da fonte emissora, apresentam melhor qualidade.

Dessa forma, as ondas de FM têm uma aplicação de mais local, para pequenas distâncias. É por isso que, estando em São Paulo, você não pode captar no rádio emissoras de FM do Rio de Janeiro, enquanto algumas emissoras de AM podem ser captadas. Em um aparelho de televisão, uma faixa de ondas de FM é utilizada para levar sinais que se transformam em imagens e sons. Para cada emissora há um conjunto de duas frequências próximas, uma transportando os sinais de imagem e a outra os sinais de som. Alguns receptores de rádio têm sua banda de frequências ampliada, podendo "captar o som" de canais de TV.

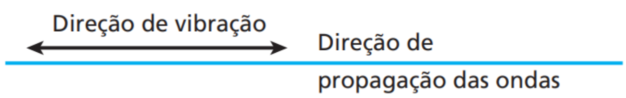
A banda de frequências reservadas às emissoras de TV é dividida em duas faixas: a de VHF (very high frequencies - frequênciais muito altas) e a de UHF (ultra high frequencies - frequências ultra-altas).

2.4 Ondas longitudinais, ondas transversais e ondas mistas

Em uma propagação ondulatória, as vibrações podem ocorrer em direção idêntica à da propagação ou em direção perpendicular à dela. As ondas são classificadas em longitudinais e transversais.

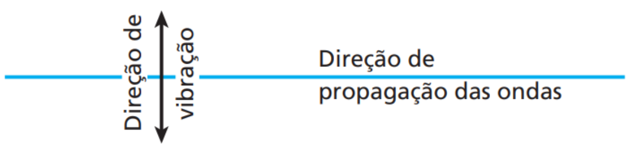
Ondas longitudinais

São ondas mecânicas que produzem perturbações nas partículas do meio material na mesma direção em que propagam.



Os sons, quando se propagam em meios fluidos (líquidos, gases e vapores), são ondas longitudinais.

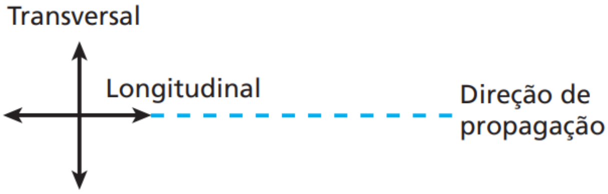
Ondas transversais

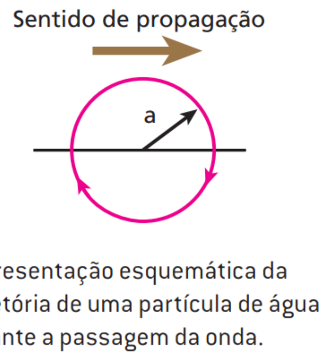


As ondas eletromagnéticas são constituídas de dois campos variáveis (um elétrico e outro magnético), perpendiculares entre si e perpendiculares à direção de propagação das ondas, portanto elas são transversais. As perturbações eletromagnéticas que atingem os pontos de um meio, seja ele vácuo ou não, são sempre perturbações transversais.

Ondas mistas

São ondas mecânicas constituídas de vibrações transversais e longitudinais simultâneas. Quando uma partícula de um meio material é atingida por uma perturbação mista, ela oscila simultaneamente na direção de propagação e na direção perpendicular à de propagação.





Representação esquemática da trajetória de uma partícula de água durante a passagem da onda.

Os sons, quando se propagam em meios sólidos, também são exemplos de perturbações mistas.

Frente de onda e raio de onda

Numa propagação, podemos observar três tipos distintos de ondas:

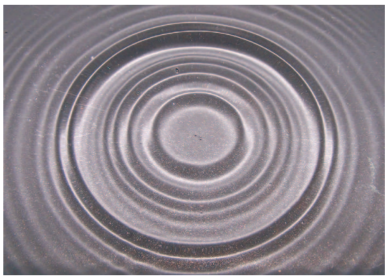
1. **Unidimensionais:** Propagam-se em uma única dimensão. Por exemplo, ondas em cordas;

2. **Bidimensionais:** Propagam-se em duas dimensões, isto é, num plano. Por exemplo, ondas em superfície de líquidos.

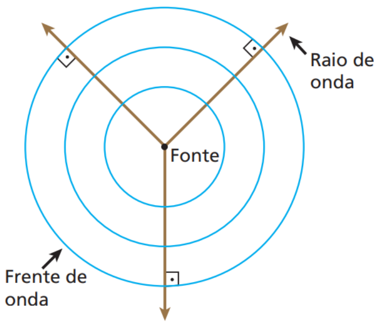
3. **Tridimensionais:** Propagam-se em três dimensões, isto é, no espaço. Por exemplo, ondas luminosas e ondas sonoras no ar.

Frente de onda é a fronteira entre a região já atingida pela onda e a região ainda não atingida.
Raio de onda é uma linha orientada que tem origem na fonte de ondas e é perpendicular às frentes de onda. Os raios de onda indicam a direção e o sentido de propagação das ondas num meio.

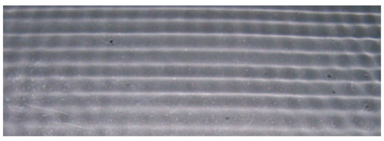
Entre as ondas bidimensionais que se propagam na superfície de líquidos, destacam-se as ondas circulares, cujas frentes de onda são circunferências, e as ondas retas, cujas frentes são segmentos de reta.



Ondas circulares geradas na superfície da água.



Representação esquemática de ondas circulares que se propagam na superfície de um líquido.



Ondas retas geradas na superfície da água

Representação esquemática de ondas retas que se propagam na superfície de um líquido.

Entre as ondas tridimensionais (som e luz) que se propagam no espaço, destacam-se aquelas cujas frentes de onda são esféricas ou planas.

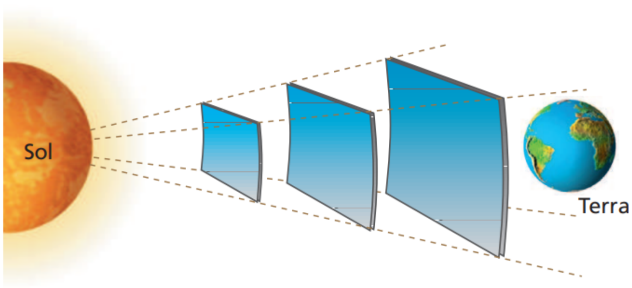
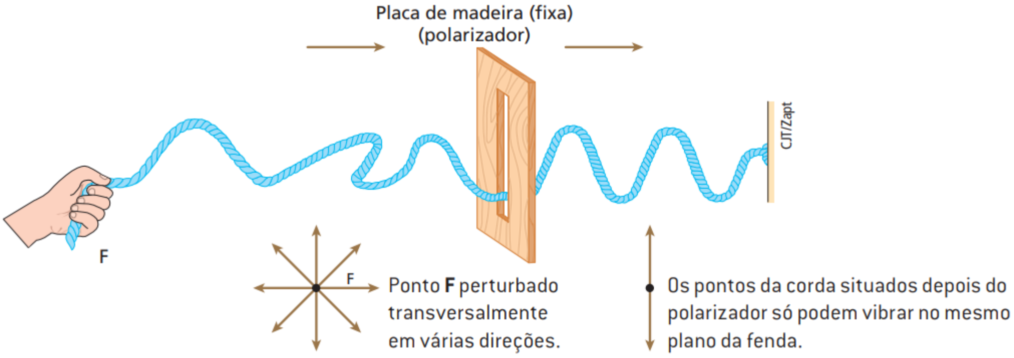


Ilustração com tamanhos e distâncias fora de escala. A luz emitida pelo Sol avança pelo espaço apresentando frentes de onda esféricas.

Onda polarizada

A polarização de uma onda transversal ocorre quando ela é "filtrada", permitindo apenas a passagem das vibrações que ocorrem na mesma direção que a previamente estabelecida pelo polarizador. Exemplo, usando uma e uma placa de madeira com uma fenda.

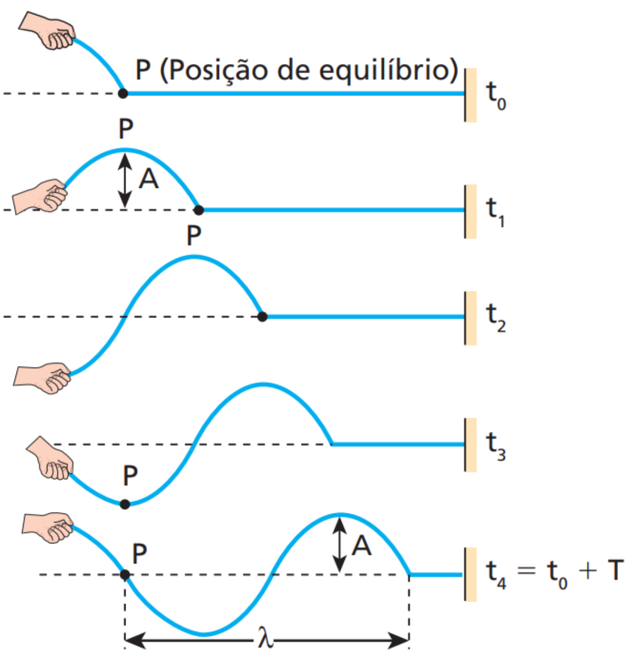


É possível gerar vibrações transversais em todas as direções, mas só vão passar pela placa de madeira aquelas que ocorrem na direção estabelecida pela fenda. As ondas que se propagam após a fenda são denominadas ondas polarizadas.

Apenas ondas transversais podem polarizadas. A luz, que é uma onda transversal, pode ser polarizada utilizando-se uma lâmina especial (polarizador). Ondas longitudinais, como o som nos fluidos, não podem ser polarizadas.

Grandezas físicas associadas às ondas

De acordo com a observação e o estudo de fenômenos ondulatórios, percebemos a necessidade de definirmos várias grandezas físicas associadas às ondas. As principais grandezas são: **amplitude (A), período (T), frequência (f) e comprimento de onda (λ).**



Ondas periódicas geradas continuamente (trem de ondas) numa corda, disposta horizontalmente, por um movimento harmônico simples (MHS), executado verticalmente na extremidade livre dessa corda.

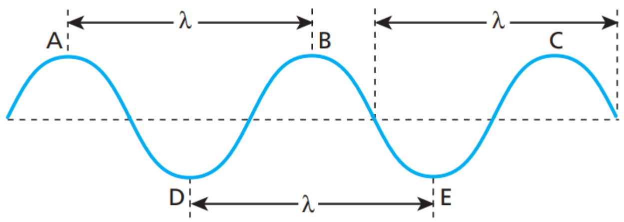
Supondo que não haja dissipação de energia na propagação, observamos que essas ondas fazem cada ponto da corda oscilar verticalmente, repetindo o movimento harmônico simples original. O ponto P, por exemplo, oscila com a mesma amplitude A do MSH que gerou as ondas. O valor de **A** é denominado **amplitude da onda**. Ele permanece constante ao longo da corda quando a propagação é conservativa (não há dissipação de energia) e diminui ao longo da corda quando a propagação é dissipativa (caso real, em que parte da energia da onda se dissipa). Se duas ondas diferem apenas na amplitude e propagam-se no mesmo meio, a mais intensa (mais forte) é aquela que tem maior amplitude.

De t_0 a t_4 o ponto P completa uma oscilação (um ciclo). Assim, o intervalo de tempo de t_0 a t_4 é o período do MHS do ponto P, também denominado **período da onda (T).** O número de oscilações executadas pelo ponto P na unidade de tempo é denominado **frequência da onda (f)**. Convém notar que a frequênmcia de uma onda é sempre igual à frequência da fonte que a originou e se mantém constante durante toda a existência dessa onda.

A unidade de frequência no SI é o **hertz (Hz)**, valendo a relação:

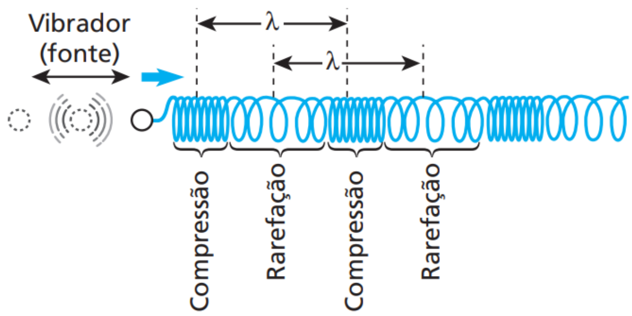
$$\boxed{f = \frac{1}{T}}$$

Durante um período T da onda - correspondente a uma oscilação completa do ponto P -, ela avança uma determinada distância, a que chamamos de comprimento de onda. Essa distância é indicada pela letra grega λ (lambda).



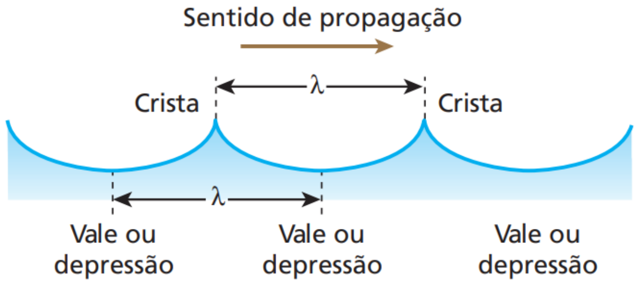
Os pontos A, B e C são denominados cristas da onda, enquanto os pontos D E são chamados vales ou depressões da onda. A distância entre duas cristas consecutivas ou entre dois vales consecutivos também é igual a λ.

Nas ondas longitudinais, o comprimento de onda é a distância entre os centros de duas compressões ou de duas rarefações sucessivas.



Executando movimentos periódicos de vaivém na extremidade de uma mola, observamos ondas periódicas constituídas de compressões e rarefações.

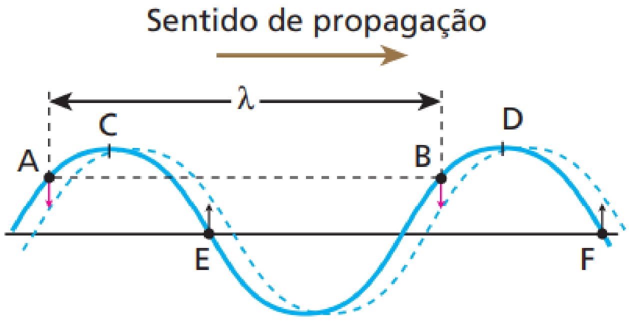
Nas ondas mistas, o comprimento de onda pode ser obtido pela distância entre duas cristas ou dois vales consecutivos.



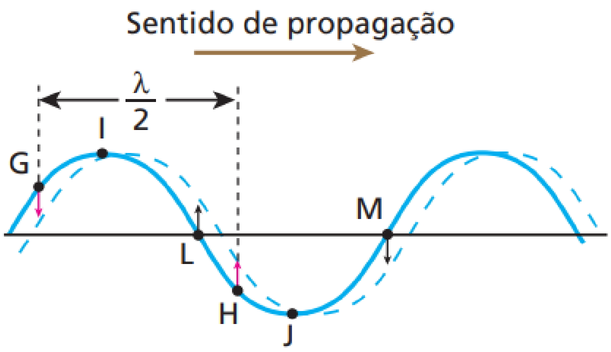
As cristas provocam, nas partículas do líquido, deslocamentos para cima e para a frente, enquanto os vales provocam deslocamentos para baixo e para trás. Convém destacar que os conceitos de período, frequência, amplitude e comprimento de onda aplicam-se a qualquer onda periódica, não se restringindo aos exemplos citados.

Concordância e oposição de fase

O comprimento de onda também pode ser conceituado como a distância entre dois pontos consecutivos que vibram em **concordância de fase**, isto é, que se apresentam a mesma elongação e se movem no mesmo sentido, em qualquer instante.



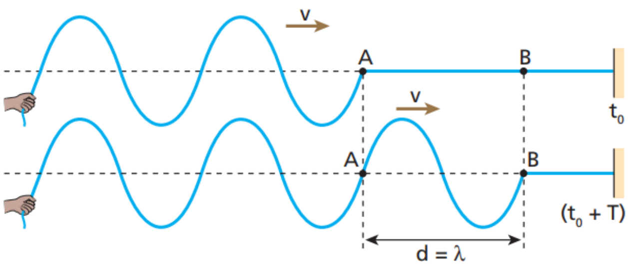
Os pontos A e B apresentam a mesma elongação e se movem no mesmo sentido (ambos estão descendo). Por isso, dizemos que os pontos A e B estão em concordância de fase, sendo λ a distância entre eles. Também estão em concordância de fase os pontos C e D e os pontos E e F. Portanto, $\overline{CD} = \overline{EF} = \overline{AB} = \lambda$



Dizemos que dois pontos vibram em oposição de fase quando apresentam elongações opostas e se movem em sentidos também opostos. Os pontos G e H vibram em oposição de fase, o mesmo ocorrendo com I e J e com L e M. A "distância" entre dois pontos consecutivos em oposição de fase é $\dfrac{\lambda}{2}$

Velocidade de propagação de uma onda periódica

Quando uma onde se propaga através de um meio, ela percorre uma distância d igual ao seu comprimento de onda ($d = \lambda$, num intervalo de tempo igual a um período ($\Delta t = T$).



Num meio homogêneo, a velocidade de propagação (v) de uma onda é constante, seja ela mecânica, seja ela eletromagnética, valendo a relação:

$$v = \frac{d}{\Delta t} \Longrightarrow v = \frac{\lambda}{T}$$

Como $f = \dfrac{1}{T}$, temos

$$\boxed{v = \lambda f}$$

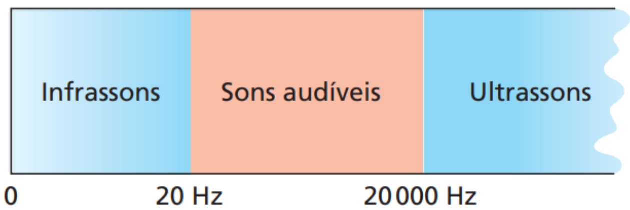
Essa relação é fundamental e se aplica à propagação de todas as ondas.

O som

O som é constituído de um conjunto de ondas mecânicas que podem ser percebidas pelo sistema auditivo dos seres humanos e de muitos outros animais. A velocidade de propagação das ondas sonoras depende das condições do meio em que se propagam. No ar,a $15°\,C$, a velocidade do som é de aproximadamente 340 m/s; na água, de 1500 m/s, e nos sólidos, pode variar de 3000 m/s a 6000 m/s, dependendo da rigidez desse meio.

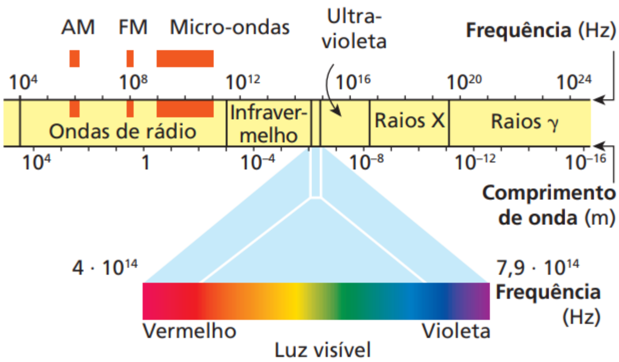
O sistema auditivo humano é sensível às ondas sonoras que tenham frequência entre 20 Hz e 20000 Hz, aproximadamente. Esse intervalo varia de pessoa para pessoa e de acordo com a idade de cada um.

Se a frequência for menor que 20 Hz, essa onda será denominada infrassom. Se a frequência da onda for maior que 20000 Hz, ela será chamada de ultrassom. Ultrassons e infrassons não são ouvidos por seres humanos. Porém, alguns ultrassons podem ser ouvidos por animais, como o cachorro, o golfinho ou o morcego.



A luz

A luz, que é uma onda eletromagnética, só pode sensibilizar nosso sistema visual se tiver sua frequência compreendida entre $4 \cdot 10^{14}$ Hz e $8 \cdot 10^{14}$ Hz, aproximadamente. Nessa faixa, na ordem crescente de frequências, encontramos as cores vermelha, alaranjada, amarela, verde, azul, anil e violeta, que formam as sete cores principais que observamos no arco-íris. As frequências logo abaixo dos $4 \cdot 10^{14}$ Hz são denominadas infravermelhas e as logo acima dos $8 \cdot 10^{14}$ Hz ultravioletas.



Esquema do espectro eletromagnético, com a localização aproximada das faixas de frequência das principais ondas eletromagnéticas.

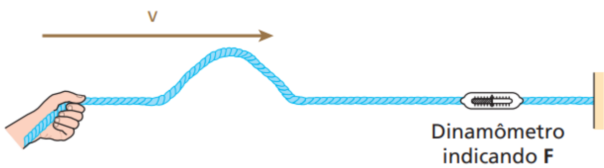
A diferença entre as ondas eletromagnéticas que podem "enxergar" (luz visível) e as ondas de rádio, está principalmente na frequência. A propagação de todas as ondas eletromagnéticas se faz no vácuo a uma velocidade próxima de 300000 km/s. Em meios materiais, essa propagação é feita a velocidades menores, e os valores dependem do meio transparente e da frequência da onda.

Velocidade de propagação de ondas transversais em cordas tensas

As cordas tensas (esticadas) constituem ótimos meios para observação da propagação de ondas mecânica transversais. Considerando uma corda de massa m e comprimento L, temos que a densidade linear δ (delta) dessa corda é a razão entre sua massa m e seu comprimento L. Portanto

$$\boxed{\delta = \frac{m}{L} \quad \text{Unidade no SI: kg/m}}$$

A grandeza δ fornece a massa da corda por unidade de comprimento. Podemos constatar que, na propagação de um pulso transversal ou de uma onda periódica transversal, a velocidade v depende apenas de dois fatores: da densidade linear (δ) da corda e da intensidade da força tensora (F) a que ela está submetida.

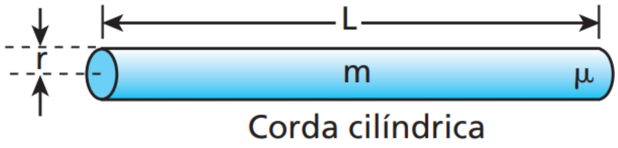


Experimentalmente se comprova que, para o cálculo da velocidade v de propagação da onda, vale a relação

$$\boxed{v = \frac{F}{\delta}}$$

Essa expressão é chamada de **fórmula de Taylor**.

Como as cordas em geral são cilíndricas, podemos escrever essa relação de outra maneira.



A corda tem:

- Volume: $V = \pi r^2 L$
- Densidade absoluta (volumétrica): $\mu = \dfrac{m}{V}$

Assim

$$\mu = \frac{m}{V} = \frac{m}{\pi r^2 L} \Rightarrow m = \mu \pi r^2 L$$

Entretanto, a densidade linear δ é dada por:

$$\delta = \frac{m}{L} \Rightarrow \delta = \frac{\mu \pi r^2 L}{L} \Rightarrow \delta = \mu \pi r^2$$

Substituindo esse resultando na relação do cálculo da velocidade das ondas em cordar, obtemos:

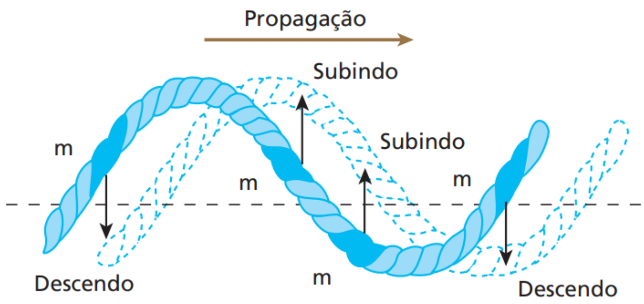
$$v = \sqrt{\frac{F}{\delta}} = \sqrt{\frac{F}{\mu \pi r^2}}$$

$$\boxed{v = \frac{1}{r}\sqrt{\frac{F}{\mu \pi}}}$$

Energia mecânica na propagação da onda

A propagação ondulatória sempre envolve uma transmissão de energia. No caso das ondas na corda, essa energia, que é mecânica, apresenta-se parte sob a forma de energia cinética e parte sob a forma de energia potencial elástica.

A energia cinética está na massa da corda, que naquele instante está subindo ou descendo. A energia potencial está na parte da corda que apresenta deformação, pois essa corda é um corpo elástico.



Um pequeno pedaço de massa m da corda, em cada instante, está subindo ou descendo (exceto quando por ele passa uma crista ou um vale). Assim, esse pedaço possui energia cinética.

2.5 Equação de uma onda periódica transversal propagando-se em uma corda tensa

Reflexão

Dos fenômenos que podem ocorrer com a luz no nosso dia a dia, o mais comum é a reflexão. Excluindo-se os corpos que emitem luz, todos os outros podem ser observados por causa da reflexão da luz em sua superfície.

A respeito do fenômeno ondulatório reflexão, podemos enunciar:

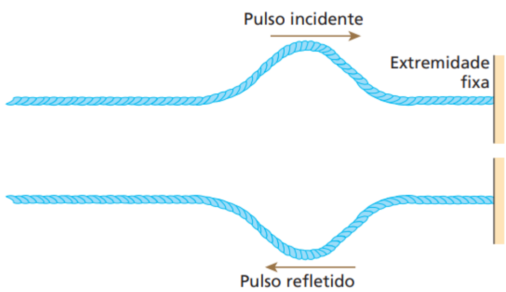
Uma onda que se propaga em um meio sofre reflexão quando, apos incidir nu m segundo meio características diferentes, volta a se propagar no meio original.

Qualquer que seja o tipo de onda, o módulo de sua velocidade de propagação não se altera na reflexão, pois ela continua a propagar-se no mesmo meio em que estava. Como a frequência, característica da onda que se mantém sempre constante, o comprimento da onda também não varia na reflexão.

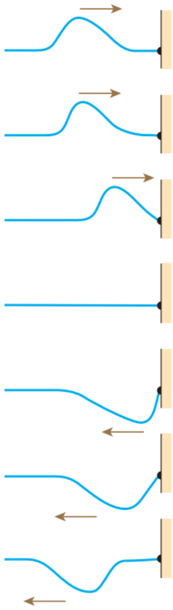
2.6 Reflexão de ondas transversais

A análise da reflexão de pulsos ou de ondas transversais nas extremidades de cordas deve ser dividade em duas partes:

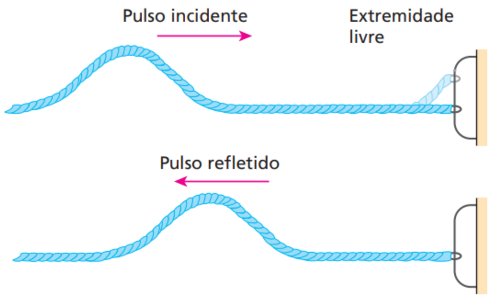
1ª) Em extremidade fixa:



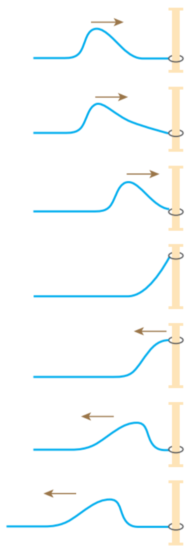
O pulso gerado, à medida que passa pelos pontos da corda, faz cada um deles subir e descer. No entanto, quando esse pulso atinge uma extremidade fixa (uma parede, por exemplo) e tenta movê-la, esta, pela 3ª Lei de Newton (Princípio da Ação e Reação), reage sobre a corda, gerando um pulso refletido invertido em relação ao pulso incidente. Diz-se, então, que o pulso refletido está em oposição de fase em relação ao pulso incidente, pois, se o pulso incidente provoca um sobe e desce, o refletido provoca um desce e sobe.



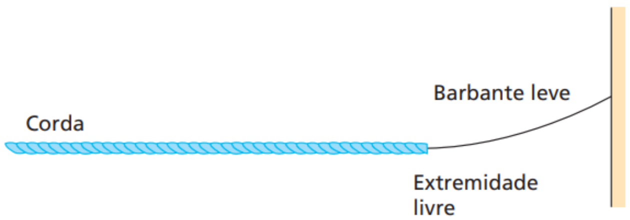
2ª) Em extremidade livre:



A extremidade livre pode ser idealizada por um anel leve, que possa deslizar sem atrito ao longo de uma haste. Quando o pulso atinge o anel, ele sobe e desce e o pulso é refletido sem inversão. Dizemos, então, que o pulso refletido está em fase com o pulso incidente, pois tanto um como o outro provocam um movimento de sobe e desce. Tal fato é facilmente aceitável, pois se alguém executasse no anel um movimento de sobe e desce seria gerado um pulso que se propagaria para a esquerda com as mesmas características do pulso refletido.

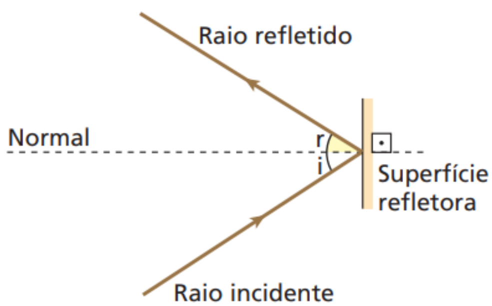


A extremidade livre costuma ser obtida, na prática, amarrando-se um barbante muito leve, flexível e não elástico na extremidade da corda.



2.7 Reflexão de ondas que se propagam na superfície de líquidos

As reflexões de ondas bidimensionais e tridimensionais podem ser representadas por seus raios de onda ou pelas próprias frente de onda.



Representação utilizando-se raios de onda, últil para apresentação das duas leis que regem a reflexão de qualquer tipo de onda.

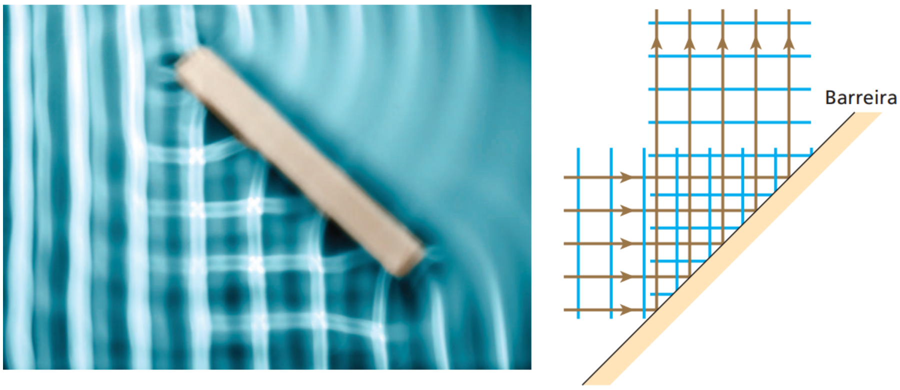
1ª Lei da Reflexão

O raio incidente, o raio refletido e a reta normal à superfície refletora no ponto de incidência estão contidos sempre em um mesmo plano (são coplanares).

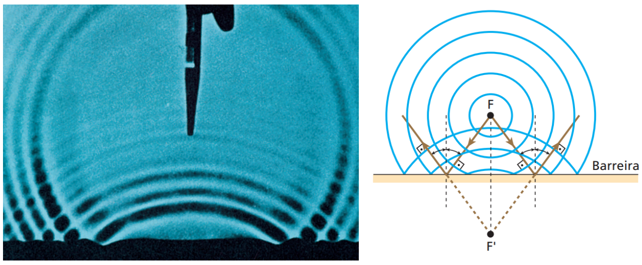
2ª Lei da Reflexão

O ângulo formado pelo raio incidente e a normal (ângulo de incidência i) e o ângulo formado pelo raio refletido e a mesma normal (ângulo de reflexão r) são sempre de mesma medida:

$$i = r$$



Fotografia de ondas retas que se propagam na superfície da água e refletem em uma barreira plana e a representação esquemática da situação observada na fotografia.



Fotografia de ondas circulares propagando-se na superfície da água e refletindo em uma barreira plana. Representação esquemática da situação observada na fotografia. Os raios refletidos "partem" do ponto F', simétrico a F em relação à barreira plana. Perceba que as ondas refletidas continuam circulares.

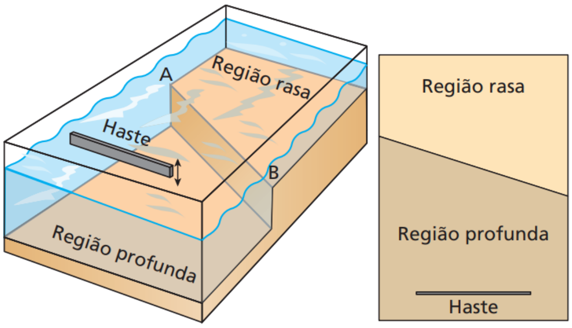
Refração

A respeito do fenômeno ondulatório denominado refração, podemis dizer que:

Chama-se refração de uma onda a passagem dessa onda de um meio para outro, de características diferentes.

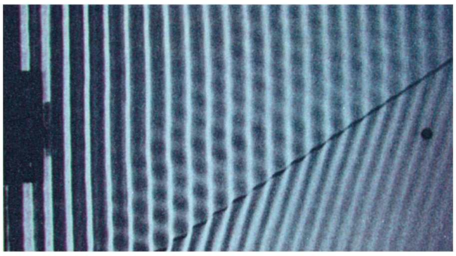
Qualquer que seja o tipo de onda, sua frequência não se altera na refração. No entanto, devido à mudança de meio, a velocidade se modifica, o mesmo ocorrendo com o comprimento de onda. A onda refratada está sempre em fase com a onda incidente. Isso é válido para todos os tipos de onda.

É de verificação experimental que a velocidade de propagação de ondas na superfície de um líquido pode depender da profundidade do local. Observa-se que o módulo da velocidade diminui quando as ondas passam de regiões profundas para regiões rasas (aquelas cujas profundidades são menores que o comprimento de onda dessas ondas ou comparáveis a ele). Dessa forma, meios

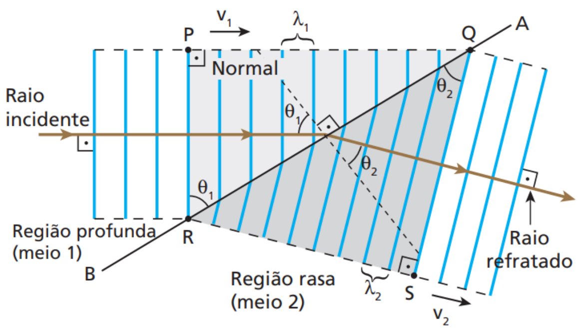


O recipiente com água e que possui duas regiões, uma profunda e uma rasa. Uma haste bate periodicamente na superfície da água, gerando ondas retas que se propagam da região profunda para a região rasa, determinando uma refração.

de diferentes profundidades podem ser considerados diferentes meios de propagação. Ondas que se propagam na superfície da água, por exemplo, sofrem refração quando passam de uma região profunda para uma rasa ou de uma região rasa para uma profunda.



Fotografia de refração de ondas retas que se propagam na superfície da água, passando de uma região de maior profundidade para uma de menor profundidade.

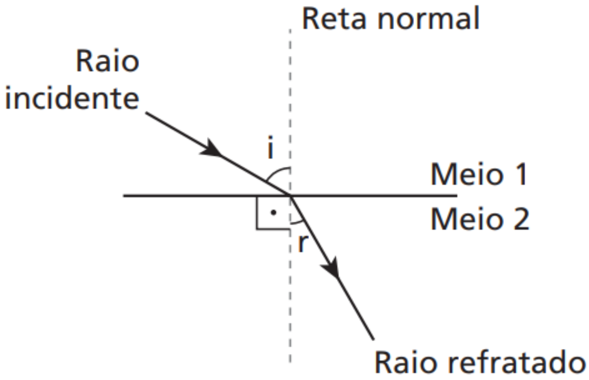


Representação esquemática da refração das ondas que se propagam na superfície da água mostrada na fotografia anterior. A mudança de direção ocorre porque os pontos de uma frente de onda não sofrem mudanças de velocidade simultaneamente.

Na figura, temos:

- θ_1 : ângulo formado pelo raio incidente pela normal (ângulo de incidência) na região profunda. O ângulo formado pelas frentes incidentes e pela fronteira entre as duas regiões também θ_1;
- θ_2 : ângulo formado pelo raio refratado e pela normal (ângulo de refração) na região rasa. Também vale θ_2 o ângulo formado pelas frentes refratadas e pela fronteira entre as duas regiões;

- v_1 e λ_1: respectivamente velocidade de propagação e comprimento de onda na região profunda; v_2 e λ_2: respectivamente velocidade de propagação e comprimento de onda na região rasa.



Simplificação a representação da refração, usando um raio de onda

Sendo:
i = ângulo de incidência r = ângulo de refração
A refração de ondas obedece a duas leis:

1ª Lei da Refração

O raio incidente, a normal à fronteira no ponto de indicência e o raio refratado estão contidos no mesmo plano (são coplanares).

2ª Lei da Refração

Denominada **Lei de Snell**, a 2ª Lei da Refração é expressa pela relação:

$$\frac{\text{sen}(\theta_1)}{\text{sen}(\theta_2)} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

(As grandezas θ_1, θ_2, v_1, v_2, λ_1 e λ_2 estão indicadas na figura esquemática e simplificada da refração.) O matemático holandês Willebrord Snell (1581-1626) descobriu experimentalmente a veracidade da relação existente entre os ângulos de incidência e de refração. Em sua homenagem, essa relação matemática recebeu a denominação de Lei de Snell.

2.8 Demonstração da Lei de Snell

Na figura anterior, é observado que a distância PQ é percorrida com velocidade v_1 durante o mesmo intervalo de tempo Δt em que a distância RS é percorrida com velocidade v_2 ($v_2 < v_1$).

No triângulo retângulo PQR, temos:

$$\text{sen}(\theta_1) = \frac{PQ}{RQ} = \frac{v_1 \Delta t}{RQ} \tag{I}$$

No triângulo RQS, temos:

$$\text{sen}(\theta_2) = \frac{RS}{RQ} = \frac{v_2 \Delta t}{RQ} \tag{II}$$

Dividindo membro a membro a expressão pela expressão , vem:

$$\frac{\text{sen}(\theta_1)}{\text{sen}(\theta_2)} = \frac{v_1}{v_2} \tag{III}$$

A frequência (f) é a mesma nos dois meios, temos:

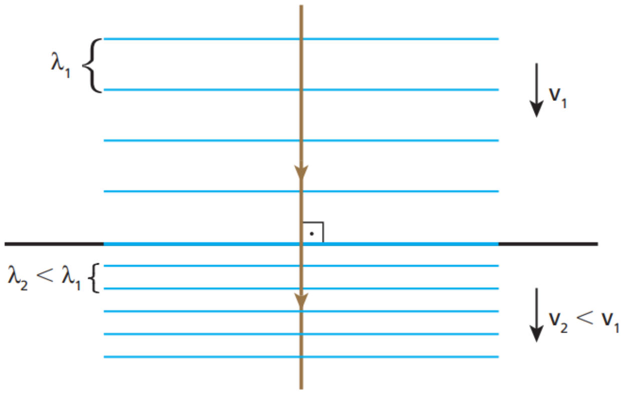
$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1 f}{\lambda_2 f} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \tag{IV}$$

Reunindo os resultados III e IV, chegamos à expressão da Lei de Snell, apresentada anteriormente:

$$\frac{\text{sen}(\theta_1)}{\text{sen}(\theta_2)} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

Nota

- A incidência de raios perpendiculares à fronteira que separa as duas regiões é um caso particular de refração em que não ocorre desvio na propagação da onda, já que, nesse caso, todos os pontos da frente da onda sofrem mudança de velocidade simultaneamente.

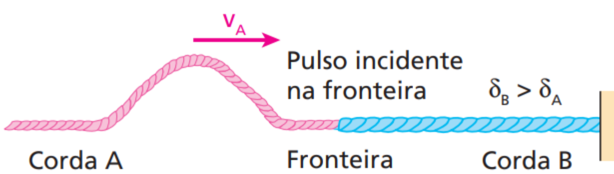


2.9 Refração e reflexão de ondas transversais em cordas

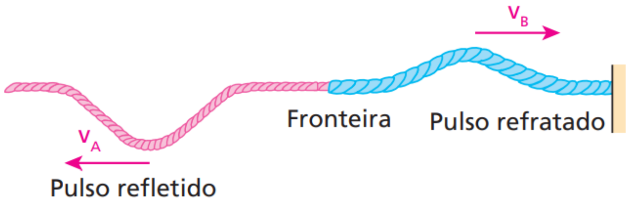
A refração e a reflexão de ondas transversais em cordas tensas podem ser facilmente visualizadas e também obedecem às regras básicas da refração e da reflexão.

Considere duas cordas de densidades lineares diferentes emendadas. Como primeira hipótese, suponha que a densidade linear da corda B seja maior que a da corda A. Um pulso gerado na corda A propaga-se e incide na fronteira entre A e B.

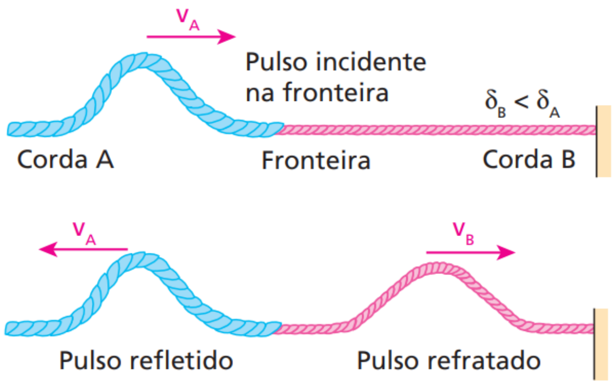
Um pulso gerado na corda A propaga-se e incide na fronteira entre A e B. Nesse local, parte da energia do pulso incidente transmite-se (sofre refração), passando a propagar-se na corda B. Note que o pulso refratado está sempre em fase com o pulso incidente, isto é, ambos os pulsos estão "voltados para cima".



Na mesma fronteira, ocorre reflexão de uma parcela da energia através do pulso refletido. Quando a reflexão ocorre com o pulso propagando-se da corda de menor para a de maior densidade linear, o pulso refletido apresenta-se em **oposição de fase** em relação ao incidente.



Os pulsos incidente e refletido têm velocidades de mesmo módulo v_A, enquanto o pulso que sofreu refração tem velocidade de módulo v_B. Lembrando que $v = \sqrt{\dfrac{F}{\delta}}$, concluímos que v_B é menor que v_A, pois $\delta_B > \delta_A$ e a força tensora têm o mesmo valor nas duas cordas (pela 3ª Lei de Newton, a força com que A puxa B e a força com que B puxa A têm o mesmo módulo). Como segunda hipótese, suponha que a corda B tenha menor densidade linear que a corda A. Assim, obtemos:



Como sempre, o pulso refratado está em fase com o pulso incidente e sua velocidade é, agora, maior que a do pulso incidente, pois $\delta_B < \delta_A$. Note que, nesse caso, o pulso refletido também está em fase com o pulso incidente.

2.10 Superposição de pulsos em cordas

A superposição de duas ou mais ondas de mesma natureza provoca no local da superposição uma perturbação resultante igual à "soma algébrica" das perturbações individuais de cada onda. Em uma corda tensa fica mais fácil visualizar esse fenômeno. Assim, considere uma corda esticada, disposta horizontalmente. Nas suas extremidades vamos produzir dois pulsos de mesma largura e amplitudes diferentes: A_1 e A_2. O resultado da superposição depende da forma como esses pulsos foram originados. Devemos, então, considerar duas situações:

3 Acústica

Em acústica, estudamos as fontes das ondas sonoras e os fenômenos ondulatórios que podem ocorrer durante a propagação dessas ondas. Entre as fontes sonoras, além do nosso aparelho fonador, merecem destaque as cordas, as colunas de ar e as membranas vibrantes, principalmente pelo uso delas na maioria dos instrumentos musicais.

Fazendo uma fonte sonora vibrar, ela também faz vibrar o meio em que se encontrar, em geral o ar; assim acontece a emissão do som. Quando fazemos uma corda de um instrumento vibrar, ela o faz simultaneamente em diversas frequências. Então, o som que ela emite também é composto de diversas frequências: cada uma é denominada um harmônico do som emitido.

Nos instrumentos de sopro, o som produzido na embocadura é constituído de muitas frequências diferentes, mas só os sons de determinadas frequências entram em ressonância com uma coluna de ar. Assim, os sons que têm essas frequências se reforçam, e cada uma delas também é um dos vários harmônicos do som emitido.

3.1 Intensidade sonora

Por ser uma propagação ondulatória, o som é um processo de transporte de energia (no caso, mecânica). Para garantir uma boa qualidade de audição, é importante, para um ouvinte, a quantidade de energia sonora que o atinge por unidade área e por unidade de tempo. Por isso, definimos mais uma grandeza - a **intensidade sonora:**

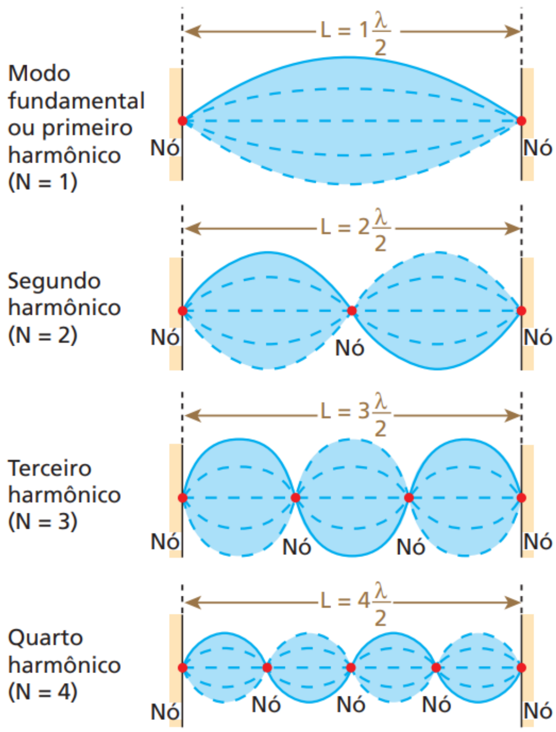
A **intensidade sonora** é a quantidade de energia sonora que atravessa a unidade de área de uma superfície disposta perpendicularmente à direção de propagação, na unidade de tempo. Em outras palavras, é a potência sonora recebida por unidade de área da superfície. No SI, a unidade de medida da intensidade sonora é $\frac{J}{m^2 s}$ ou $\frac{W}{m^2}$

3.2 Cordas sonoras

Modos de vibração

Uma corda elástica apresenta várias frequências naturais de vibração, denominadas modos de vibração, que podem ser obtidos sacudindo-se uma das extremidades da corda em uma de suas frequências naturais. Dessa maneira, a corda entra em ressonância com o agente que a sacode.

Uma vez atingido determinado modo de vibração, ainda que se pare de sacudir a extremidade da corda, ela continuará vibrando até perder toda a energia de vibração. Essa maneira de obter os modos de vibração permite tratar cada modo como uma configuração de onda estacionária, resultante da superposição da onda que emitimos quando balançamos a corda com a onda refletida na outra extremidade.



Quatro primeiros modos de vibração de uma corda de comprimento L, presa pelas extremidades. Evidentemente, apenas algumas frequências podem gerar ondas estacionárias, uma vez que nas extremidades fixas há, necessariamente, **nós**.

É imprescindível lembrar que, numa configuração de onda estacionária, a distância entre dois nós consecutivos é igual à metade do comprimento de onda das ondas que se superpõem. O modo mais simples de vibrar uma corda denomina-se modo fundamental ou primeiro harmônico. Portanto:

$$L = 1\frac{\lambda}{2} \Rightarrow \lambda = 2L$$

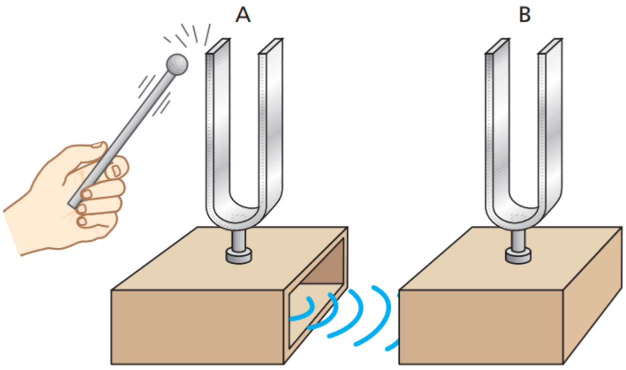
Sendo v a velocidade de propagação das ondas na corda e lembrando que $v = \lambda f$, obtemos:

$$v = 2Lf \Longrightarrow f = \frac{v}{2L} \quad \text{(Frequência fundamental de vibração da corda ou primeiro harmônico)}$$

Batimento, ressonância e difração do som

Os **batimentos** sonoros entre dois sons de frequências f_1 e f_2 próximas poderão ser percebidos apenas se a frequência desses batimentos não ultrapassar 7 Hz. A frequência dos batimentos é dada pela diferença positiva entre f_1 e f_2. Além disso, eles podem ser produzidos, por exemplo acionando-se simultaneamente duas teclas adjacentes de um piano correspondentes a notas baixas.

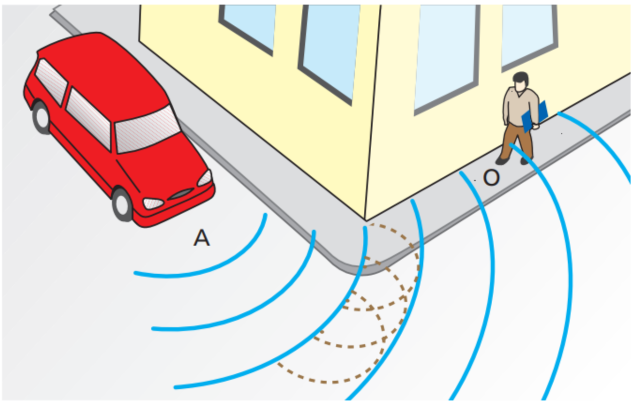
A **ressonância** sonora pode ser constatada com o uso de um diapasão, que é uma peça metálica em forma de **U**, acoplada a uma caixa oca de madeira que tem uma face lateral aberta (caixa de ressonância). Batendo-se na peça metálica, o diapasão vibra, emitindo uma onda sonora pura (única frequência) que costuma ser utilizada como padrão de frequência para a afinação de instrumentos. O experimento descrito a seguir permite a constatação do fenômeno da ressonância.



Ressonância

Na figura, A e B são diapasões idênticos. Batendo-se apenas no diapasão A, observamos que o diapasão B também vibra. Isso ocorre porque B é excitado pelas ondas sonoras provenientes de A, cuja frequência é igual à sua frequência de vibração natural. Esse fenômeno é a ressonância. De modo análogo, se tocarmos a corda de um violão colocado perto de outro, estando ambos com essa corda afinada igualmente, a corda do outro também vibrará (ressonância).

A difração é um fenômeno que ocorre frequente e acentuadamente com as ondas sonoras. Essa acentuação dá-se quando os obstáculos atingidos apresentam dimensões inferiores às do comprimento de onda ou, pelo menos, da mesma ordem de grandeza. E, pelo fato de o som ter comprimentos de onda que variam de aproximadamente 17 mm até 17 m, ele encontra grande facilidade para se difratar.



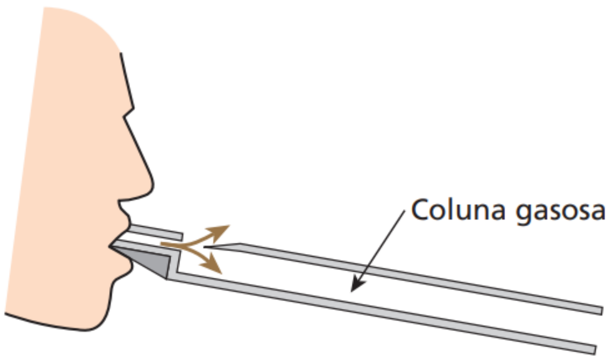
Um observador em O, embora não veja o automóvel A, consegue ouvir muito bem o ruído produzido por ele. As ondas elementares de Huygens justificando a difração.

Os sons graves, por terem maior comprimento de onda, difratam-se mais que os agudos. Isso é facilmente notado numa caixa acústica, já que os sons agudos são muito mais direcionais que os graves. Por isso, uma pessoa bem afastada lateralmente em relação à caixa ouve muito melhor os graves que os agudos.

3.3 Tubos sonoros

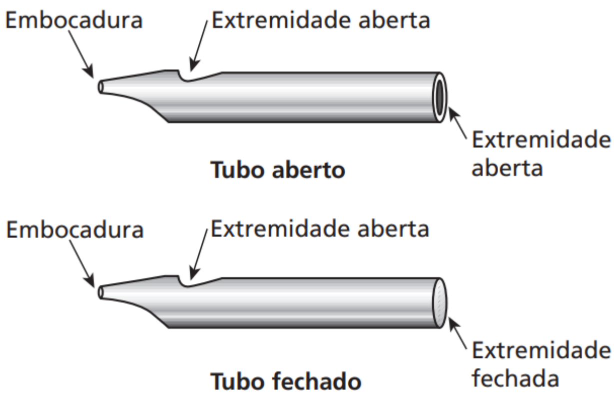
Uma coluna gasosa também possui suas frequências naturais de vibração (longitudinal). Assim, quando uma dessas colunas é excitada em uma ou mais de suas frequências naturais, ocorre ressonância e o som amplifica-se. Essas colunas gasosas. normalmente de ar, estão confinadas em tubos sólidos e ocos denominados **tubos sonoros.**

Muitos instrumentos musicais utilizam tubos sonoros como ressoadores (por exemplo, a flauta, o saxofone, o órgão de foles). Nesse tipo de instrumento, os sons são produzidos por fluxos de ar numa das extremidades. Esses sons compõem-se de várias frequências, mas só ressoam, ou se amplificam, aquelas que correspondem a frequências naturais, isto é, ao som fundamental e aos harmônicos da coluna gasosa.



O ar soprado na embocadura de uma flauta gera um jato vibrante, dirigido ora para fora, ora para dentro, que emite um som de muitas frequências.

Os tubos são classificados em abertos e fechados. Os tubos abertos são aqueles que têm as duas extremidades abertas (uma delas próxima da embocadura). Os fechado são aqueles que têm uma extremidade aberta, próxima da embocadura, e a outra fechada.



Do mesmo modo que nas cordas, as vibrações das colunas gasosas podem ser estudadas como ondas estacionárias resultantes da interferências do som enviado na embocadura com o som refletido na outra extremidade do tubo. Em uma extremidade aberta, o som reflete-se em fase, havendo aí um **ventre** de deslocamento.

3.4 Velocidade de propagação do som

O som propaga-se com velocidade maior nos meios sólidos que nos líquidos, e maior nos meios líquidos que nos gasosos. No ar, a velocidade de propagação do som é de aproximadamente 340 m/s, valendo cerca de 1500 m/s na água e aproximadamente 5000 m/s no ferro. A velocidade de propagação do som emitido por uma fonte sonora não depende da velocidade da fonte, mas apenas de características e condições do meio de propagação (isso vale para qualquer onda). Assim, quando a buzina de um automóvel em movimento é acionada, o som emitido no ar propaga-se com a mesma velocidade que se propagaria se o veículo estivesse em repouso.

Meio	Velocidade do som (m/s)	Meio	Velocidade do som (m/s)
Ar (a 0 °C)	331	Água (a 20 °C)	1482
Ar (a 15 °C)	340	Chumbo	1210
Oxigênio (a 0 °C)	316	Alumínio	5000
Hidrogênio (a 0 °C)	1284	Aço	5960
Mercúrio (a 20 °C)	1450	Berílio	12870

Valores precisos da velocidade do som em alguns meios. Em relação aos meios sólidos (chumbo, alumínio, aço e berílio), a tabela refere-se às ondas sonoras longitudinais.

A velocidade de propagação do som não depende de sua intensidade ou de sua frequência.

3.5 Velocidade do som num gás perfeito

Em virtude da rapidez com que ocorrem, as compressões e as expansões provocadas num gás pela propagação de vibrações acústicas podem ser consideradas transformações adiabáticas. Pode-se demonstrar que a velocidade de propagação do som num gás perfeito é dada pela seguinte expressão:

$$\boxed{v = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}}}$$

Em que:

- **v** é o módulo da velocidade de propagação do som no gás;
- **R** é a constante de Clapeyron;
- **T** é a temperatura absoluta do gás;
- **M** é a massa molas do gás;
- γ é a razão entre o calor específico do gás medido a pressão constante (c_p) e o calor específico do gás medido a volume constante (c_V). Assim $\gamma = \frac{c_p}{c_V}$.

Em geral, os valores de γ são típicos da atomicidade do gás, ou seja, da quantidade de átomos por molécula do gás. Assim, para um gás monoatômico, temos $\gamma = 1,7$; para um gás diatômico, $\gamma = 1,4$; e para um gás poliatômico, γ está em torno de 1,3 (alguns gases fogem a esses padrões).

A velocidade de propagação do som num gás perfeito não depende da pressão ou da densidade do gás. É proporcional à raiz quadrada da temperatura absoluta e inversamente proporcional à raiz quadrada de sua massa molar, dependendo também de sua estrutura molecular (atomicidade).

A velocidade do som num gás perfeito não depende de sua densidade, pois as vibrações se transmitem de molécula para molécula a uma velocidade praticamente igual à da agitação térmica. Essa agitação é, para cada gás, função exclusiva da temperatura absoluta.

Nota

- Verificou-se experimentalmente que a velocidade do som no ar aumenta aproximadamente 0,6 m/s para cada elevação de 1° na temperatura.
- A velocidade do som no ar aumenta ligeiramente quando aumenta o grau de umidade. Isso corre porque a adição de vapor de água ao ar dá origem a uma mistura de massa molar média (M) inferior à do ar seco.
- Os ventos também influem na velocidade do som no ar em relação à Terra. A velocidade resultante de propagação do som em relação à Terra é dada pela composição vetorial da velocidade do som na ausência do vento com a velocidade do vento.

Efeito Doppler

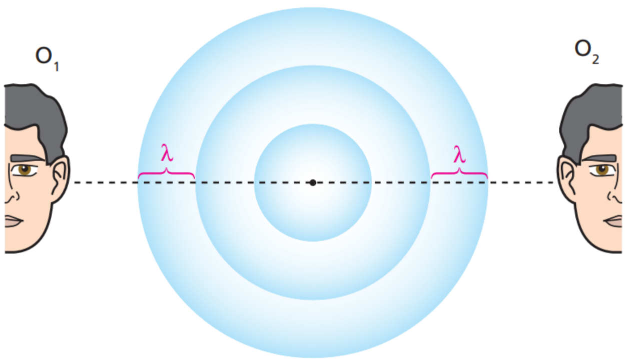
Em 1842, o físico austríaco Christian Johann Doppler (1803-1853) escreveu um artigo afirmando que a frequência sonora percebida por um observador depende do movimento relativo entre fonte e observador. Esse fenômeno, denominado efeito Doppler, pode ser definido da seguinte maneira:

Efeito Doppler é a alteração da frequência percebida pelo observador em virtude do movimento relativo de aproximação ou de afastamento entre fonte e observador.

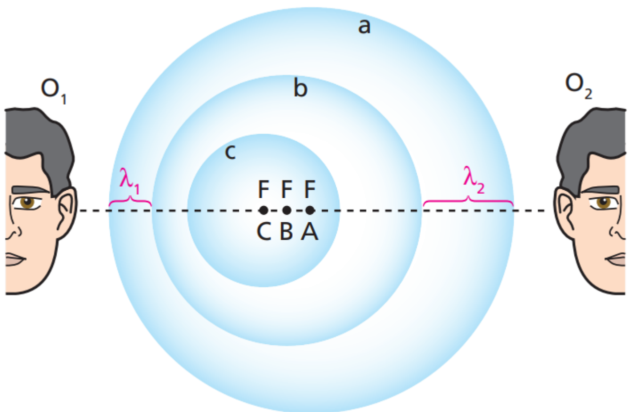
Embora se trate de um fenômeno característico de qualquer propagação ondulatória, o efeito Doppler sonoro é mais comumente percebido.

Quando um automóvel se aproxima de nós buzinando, percebemos o som da buzina mais agudo (maior frequência) do que perceberíamos se o veículo estivesse em repouso. Contudo, quando o automóvel se afasta buzinando, percebemos um som mais grave (menor frequência) do que perceberíamos se o veículos estivesse em repouso. Nos dois casos, o efeito fica mais evidente quando o automóvel está em alta velocidade. Isso também é frequentemente notado com relação ao barulho do motor dos automóveis, como é possível perceber ao assistir a uma corrida de Fórmula 1. Sirenes de ambulâncias também permitem perceber o efeito Doppler de forma bastante clara.

Nas deduções a seguir, vamos considerar o meio de propagação do som (o ar, por exemplo) em repouso em relação à Terra. Desse modo, torna-se indiferente referir a velocidade do som ao meio ou à Terra.



A fonte sonora puntiforme F emite frentes esféricas concêntricas com frequência f. Tanto a fonte F como os observadores O_1 e O_2 estão fixos. Por isso, não havendo aproximação nem afastamento entre observador e fonte, não se verifica o efeito Doppler, e tanto O_1 como O_2 percebem o mesmo comprimento de onda λ e a mesma frequência f.



Nesse caso, os observadores O_1 e O_2 estão fixos, mas a fonte F desloca-se para a esquerda, emitindo frentes esféricas com frequência f e comprimento de onda λ. O centro de cada frente de onda corresponde à posição da fonte F no momento em que ela a emitiu. Assim, as frente a, b e c foram emitidas quando F passou, respectivamente, pelos pontos A,B e C.

O movimento da fonte faz com que as frentes de onda juntem-se mais do lado esquerdo e separem-se mais do lado direito. Consequentemente, o observador O_1 recebe, num mesmo intervalo de tempo, mais frente de onda do que receberia se a fonte não se movesse. Assim, o observador O_1 percebe uma frequência f_1 maior que f e um comprimento de onda λ_1 menor que λ, enquanto O_2 percebe uma frequência f_2 menor que f e um comprimento de onda λ_2 maior que λ.

A velocidade de propagação das ondas não depende do movimento da fonte.

Cálculo de f_1:

Entre a emissão de uma frente de onda e a emissão da seguinte, a fonte percorre uma distância igual a $v_F T$, em que T é o período do som emitido pela fonte. Portanto:

$$\lambda_1 = \lambda - v_F T$$

$$\frac{v}{f_1} = \frac{v}{f} - \frac{v_F}{f}$$

$$\boxed{f_1 = \frac{fv}{v - v_F}} \tag{I}$$

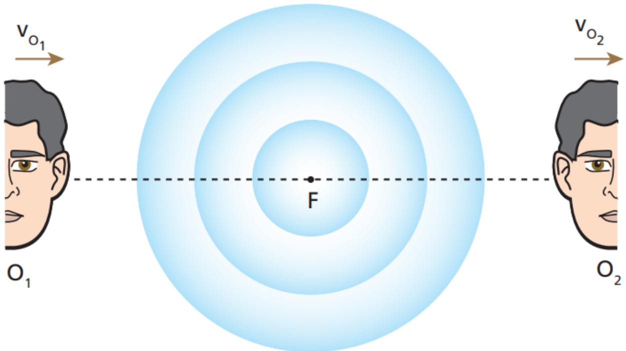
Cálculo de f_2:

$$\lambda_2 = \lambda + v_F T$$

$$\frac{v}{f_2} = \frac{v}{f} + \frac{v_F}{f}$$

$$\boxed{f_2 = \frac{fv}{v + v_F}} \tag{II}$$

Consideramos apenas o efeito Doppler causado pelo movimento da fonte. Considere, a seguir, que a fonte seja fixa, mas que os observadores estejam em movimento:



Cálculo de f_1:

Se O_1 estivesse em repouso, ele receberia, num intervalo de tempo Δt, N ondas completas, percebendo a frequência $f = \dfrac{N}{\Delta t}$, que é a frequência da fonte. Entretanto, pelo fato de estar em movimento com velocidade v_{O_1}, O_1 percorre a distância $v_{O_1}\Delta t$ durante esse intervalo de tempo. Consequentemente, esse observador recebe $\dfrac{v_{O_1 \Delta t}}{\lambda}$ vibrações além daquelas N que receberia se estivesse em repouso.

De fato, $\dfrac{v_{O_1 \Delta t}}{\lambda}$ representa o número de comprimentos de onda, ou vibrações, que cabem na distância $v_{O_1}\Delta t$ percorrida O_1. Assim, esse observador percebe uma frequência f_1 que é dada por:

$$f_1 = \frac{N + \dfrac{v_{O_1}\Delta t}{\lambda}}{\Delta t} = \frac{N}{\Delta t} + \frac{v_{O_1}}{\lambda} = f + \frac{v_{O_1} f}{v}$$

$$\boxed{f_1 = \frac{f(v + v_{O_1})}{v}} \tag{III}$$

Cálculo de f_2 :

O observador O_2 recebe $\dfrac{v_{O_2 \Delta t}}{\lambda}$ vibrações a menos do que receberia se estivesse em repouso, percebendo uma frequência f_2 dada por:

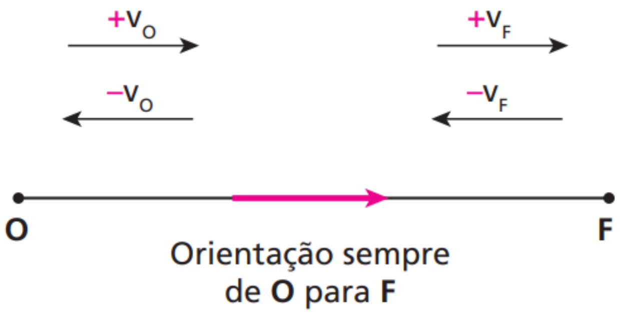
$$f_2 = \frac{N - \dfrac{v_{O_2\Delta t}}{\lambda}}{\Delta t} = \frac{N}{\Delta t} - \frac{v_{o_2}}{\lambda} = f - \frac{v_{O_2} f}{v}$$

$$\boxed{f_2 = \frac{f(v - v_{O_2})}{v}} \qquad \text{(IV)}$$

Observemos que, se v_{O_2} é igual a v, temos $f_2 = 0$. Assim, o observador não percebe vibrações, uma vez que, pelo fato de estar viajando com as ondas, permanece numa região de pressão constante. Evidentemente, tanto o observador como a fonte podem estar em movimento. Nesse caso, reunimos as expressões (I), (II), (III) e (IV), obtendo, assim, a fórmula geral para a frequência Doppler (f_D), também chamada de frequência aparente:

$$\boxed{f_D = f\frac{v \pm v_o}{v \pm v_F}}$$

Em que os sinais $\pm$ podem ser obtidos pela seguinte convenção: o segmento de reta ligando o observador O até a fonte F é orientado sempre de O para F, quaisquer que sejam as posições de O e de F.

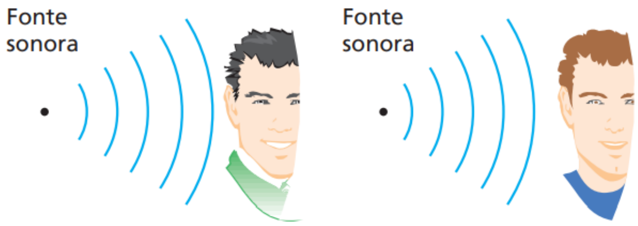


Notas:

- A frequência percebida pelo observador (f_D), que chamamos de frequência Doppler, costuma ser chamada também de frequência aparente.
- Caso as velocidades do observador e da fonte não estejam alinhadas com a reta que passa por eles, deve-se operar com as componentes dessas velocidades segundo a referida reta.

3.6 Sonoridade

Quando uma mesma onda sonora atinge duas pessoas, as sensações sonoras podem ser diferentes. É possível, até, que uma das pessoas ouça bem e a outra não perceba nenhuma sensação sonora. Estamos nos referindo, agora, à sensação sonora ou sonoridade.



Dois observadores recebendo ondas sonoras idênticas de mesma intensidade. A quantidade de energia que cada um recebe por unidade de área e por unidade de tempo é a mesma (igual intensidade), mas as sensações sonoras percebidas podem ser diferentes (sonoridades diferentes).

Para um ouvinte normal, a sonoridade aumenta quando a intensidade de determinado som também aumenta. A sonoridade depende ainda da frequência do som, pois o aparelho auditivo é mais sensíovel a algumas frequências que a outras.

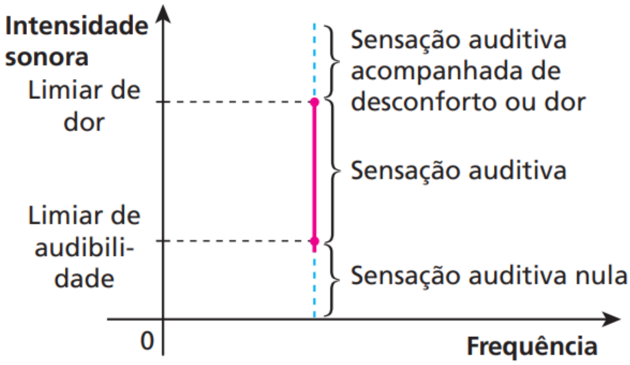
A máxima sensibilidade do aparelho auditivo é verificada para frequências entre 2 KHz e 4 KHz. Isso significa que, se um mesmo ouvinte receber dois sons de mesa intensidade, porém um de 2 kHz e o outro de 12 kHz, por exemplo, o primeiro será sentido mais fortemente (maior sonoridade) que o segundo. Podemos dizer, ainda, que se as ondas tiverem frequências infrassônicas ou ultrassônicas, a sonoridade evidentemente será nula, qualquer que seja a intensidade dessas ondas.

Weber e Fechner verificaram que as sensações sonoras (e outras) são, para cada ouvinte, aproximadamente proporcionais ao logaritmo da excitação, ou seja, da intensidade sonora. Essa conclusão é conhecida como Lei Psicofísica de Weber-Fechner.

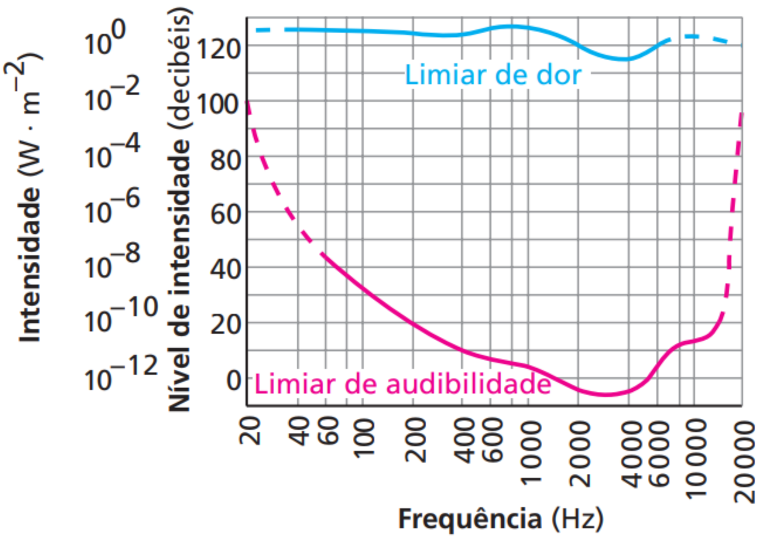
Nível relativo de intensidade

Suponha que uma pessoa receba um som de frequência constante, cuja intensidade é aumentada gradativamente a partir de zero. Enquanto não atingir uma intensidade mínima, esse som não será percebido, ainda que o ouvinte escute normalmente. A intensidade mínima que um som precisa ter, para ser ouvido, denomina-se **limiar de sensação auditiva** ou **limiar de audibilidade**. Esse limiar depende da frequência do som.

Aumentando-se a intensidade sonora a partir desse limiar, o som é percebido cada vez mais fortemente, até que, a partir de certo valor da intensidade, à sensação sonora acrescenta-se a uma sensação de desconforto ou de dor. A esse valor dá-se o nome de **limiar de sensação dolorosa** ou **limiar de dor**, que também depende, mas apenas ligeiramente, da frequência.



Os limiares variam com a frequência do som. Medidas obtidas em laboratório em toda faixa audível levaram à construção da **curva de audibilidade** ou **audiograma**. O audiograma varia de acordo com o ouvinte, mas, em média, é isso que vamos considerar.



O aparelho auditivo é mais sensível a frequências compreendidas entre 2000 Hz e 4000 Hz. Isso significa que é nesse intervalo que conseguimos ouvir os sons de menor intensidade. Em audição normal, o aparelho auditivo humano percebe sons cujas intensidades podem variar na ampla faixa de $10^{-12}\,\mathrm{W/m^2}$ a $1\,\mathrm{W/m^2}$. Esses valores em si e a faixa extremamente extensa em que comparecem contribuem para dificultar seu uso na prática. Com o incentivo dado pela Lei de Weber-Fechner, definiu-se o nível relativo de intensidade sonorar (N) pela expressão:

$$\boxed{N = k\,\log\frac{I}{I_{ref}}}$$

Em que:

- **k** é uma constante de proporcionalidade;
- **I** é a intensidade sonora de um som;
- **N** é seu nível relativo de intensidade em relação a um som de referência de intensidade I_{ref}.

O som de referência adotado tem intensidade igual a $10^{-12}\ W/m^2$ e corresponde, aproximadamente, ao limiar de sensação auditiva na frequência de 1 kHz.

Inicialmente, adotou-se k igual a 1. O nível N é medido em bels (plural de bel, símbolo B), nome dado em homenagem ao físico escocês Alexander Graham Bell (1847-1922), inventor, dentre outras coisas, do telefone. Portanto:

$$N = \log \frac{I}{I_{ref}} \text{ , em bels}$$

Pelo fato de a unidade bel ser muito grande, prefere-se utilizar, na prática, uma unidade de que corresponde a um décimo do bel, ou seja, o **decibel**.

Desse modo, temos, fazendo $k = 10$:

$$\boxed{N = 10 \log \frac{I}{I_{ref}}, \text{ em decibels (dB)}}$$

O limiar de sensação dolorosa é, igual a 120 dB, o que significa que os sons desconfortantes estão em níveis superiores a 120 dB. É importante notar que o uso do nível de intensidade sonora (N), em substituição à intensidade sonora (I), permite comparar sons lidando com números bem mais simples. Assim, em vez de falarmos num som de $10^{-9}\,\mathrm{W/m^2}$, falamos num som de 30 dB.

Valores aproximados de alguns níveis de intensidade sonora	
Respiração normal	10 dB
Respiração ofegante	30 dB
Ambiente em boas condições para dormir	35 dB
Conversação em ambiente silencioso (como numa biblioteca)	45 dB
Duas pessoas conversando a 1 m de distância	60 dB
Conversação em festa barulhenta	90 dB
Rua barulhenta	90 dB
Concerto de *rock*	120 dB
Trovão próximo	120 dB
Jato decolando a 30 m de distância*	140 dB
Grandes explosões (nas proximidades)*	200 dB

*Perigo para o aparelho auditivo.