

Num sentido bastante amplo, uma onda é qualquer **sinal** que se transmite de um ponto a outro de um meio com velocidade definida. Em geral fala-se de onda quando esta transmissão não envolve o transporte do meio (ar, corda, mola, etc) de um ponto a outro⁹⁸. Nos casos que veremos com mais detalhes (corda e gás), é a perturbação que é transportada ao longo do meio, e não os elementos de massa.

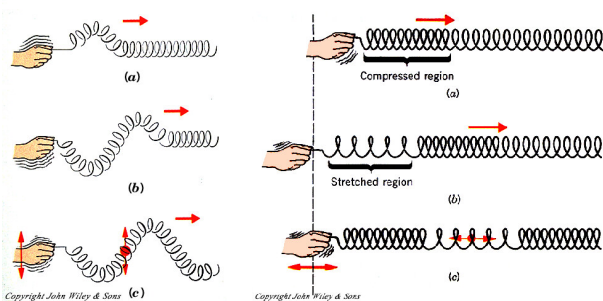
Tipos de ondas que vamos discutir:

- **ondas mecânicas:** necessitam de um meio material. Ex.: ondas na água, ondas sonoras, ondas sísmicas, etc;
- **ondas eletromagnéticas:** não precisam de um meio material e todas viajam no vácuo com a mesma velocidade ($c = 299792.458 \text{ m/s}$). Ex.: luz visível, microondas, etc;

Existem outros tipos de ondas, como as **ondas de matéria**⁹⁹: elétrons, prótons, etc viajam como ondas, ou as **ondas gravitacionais**, quando o próprio espaço-tempo oscila.

Ondas Transversais e Longitudinais

Quando o movimento de cada elemento oscilatório é **perpendicular** à direção do movimento da onda, esta é dita uma onda **transversal**. Como exemplo, podemos citar o caso de uma onda em uma corda. Uma onda mecânica transversal exige que o meio seja elástico (como um sólido), havendo forças restauradoras que devolvem o meio à sua forma original. Isto não ocorre em gases e líquidos (com exceção de ondas superficiais, onde a tensão superficial desempenha um papel importante na formação da onda).



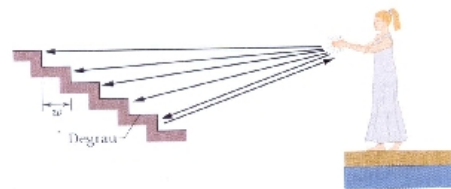
Quando se imprime um pequeno deslocamento a uma corda sob tensão, sua forma se altera de maneira regular ao longo do tempo. Tal deformação, que se desloca ao longo da corda e possui uma extensão limitada, é um **pulso ondulatório**. Isto é, uma perturbação, uma distorção em relação à sua forma usual, ou de equilíbrio. Tal pulso se desloca ao longo da corda com uma velocidade que depende da corda e da tensão.

O pulso tende a se alargar com o tempo, o que é conhecido como **dispersão**. Isto acontece com todas as ondas, exceto com as eletromagnéticas no vácuo. Porém, em muitos casos podemos desprezar esta dispersão.

Ondas longitudinais são associadas à deformações volumétricas (e, portanto, da densidade) do meio, podendo se propagar tanto em sólidos quanto em líquidos e gases. Uma onda sonora é deste tipo. O movimento dos elementos do ar é paralelo à direção da onda, e esta é dita **longitudinal**.

Existem ondas mais complicadas que são misturas de ondas transversais e longitudinais, como as ondas no mar e as ondas sísmicas.

Exemplo 43: O som de bater de palmas em um teatro produz ondas que são espalhadas por degraus de largura $w = 0.75 \text{ m}$. O som retorna ao palco como uma série regular de pulsos, que soa como uma nota musical. Supondo que todos os raios sejam horizontais, com que frequência os pulsos chegam ao palco?



O intervalo de tempo entre dois pulsos é o tempo para percorrer a largura de um degrau (e voltar):

$$\Delta t = \frac{2w}{v}$$

Logo, a frequência é

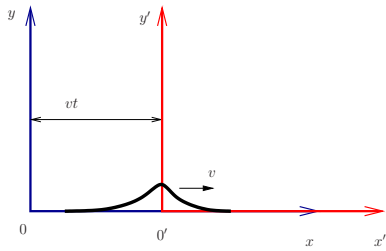
$$f = \frac{v}{2w} \simeq 229 \text{ Hz.}$$

Ondas Progressivas

No instante $t = 0$, a forma do pulso é dada por $y = f(x)$. Supondo que a onda não altera sua forma (não há dispersão), no instante t :

⁹⁸No caso de grandes perturbações, ocorre um pequeno transporte de matéria, devido à natureza não linear das vibrações das partículas do meio.

⁹⁹Obviamente aqui há transporte de matéria, mas esta é a própria onda, e não o meio de propagação.



Introduzimos um novo sistema de coordenadas com origem em O' que se move com a mesma velocidade v do pulso, ou seja, está fixo no pulso. Neste novo sistema: $y' = f(x')$. A relação entre os dois sistemas é

$$y = y' \quad \text{e} \quad x = x' + vt$$

Então:

$$y' = f(x') \implies \boxed{y = f(x - vt)} \quad (67)$$

para um pulso que se move para a direita ($x - vt = \text{cte}$, então x aumenta com t) e

$$\boxed{y = f(x + vt)} \quad (68)$$

para um que se move para a esquerda ($x + vt = \text{cte}$ então x diminui com t).

Numa corda ainda podemos ter ondas andando nos dois sentidos, a onda sendo então representada por

$$y(x, t) = f(x - vt) + g(x + vt). \quad (69)$$

A função $y = f(x - vt)$ é a **função de onda**: fornece o deslocamento vertical da corda no ponto x no instante t (é uma função de duas variáveis). Analogamente, no caso de uma onda sonora teríamos, para a pressão, $P(x - vt)$. A Eq. (69) é também a solução geral da equação diferencial parcial que descreve de modo geral o comportamento das ondas (por isso chamada de a “Equação da Onda”):

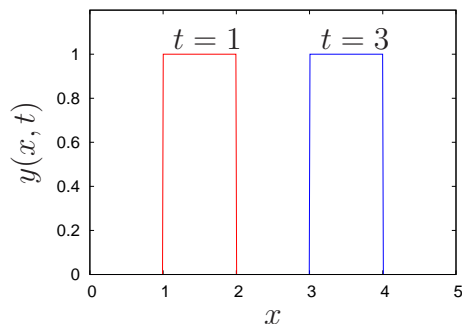
$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}.$$

Notem que para uma onda ser progressiva deve depender de (x, t) somente na forma $x - vt$. Assim, uma onda $y = 2 \cos[k(x - vt)]$ representa uma onda progressiva ao passo que $y = 2 \sin(kx) \cos(kvt)$ não.

Exemplo 44: Considere a seguinte função:

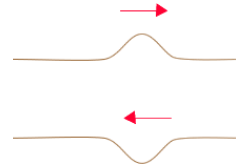
$$f(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } 0 \leq x \leq 1 \\ 0, & \text{se } x < 0 \text{ ou } x > 1 \end{cases}$$

Faça o gráfico da função $f(x - t)$ para diversos valores de t .



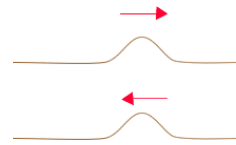
Reflexão

Se a corda estiver fixa num suporte rígido, o pulso será **refletido** e retornará invertido. À medida que o pulso se propaga, os pontos da corda sobem. Quando chega à parede, a corda exerce uma força sobre esta, e por **ação-reação**, esta exerce uma força para baixo sobre a corda, invertendo o pulso:



Se, por outro lado, o suporte não for rígido, uma parte do pulso será absorvida.

No caso em que a extremidade da corda é livre, não há um corpo para fazer a reação, e esta retorna sem ser invertida:



Uma onda também pode ser refletida quando se move de um meio para outro, como por exemplo, uma corda ligada a uma outra com densidade diferente. Quando o pulso de ondas atinge a fronteira entre meios com diferentes velocidades de onda, uma porção da onda é refletida e outra é transmitida. Quando o pulso viaja do meio A para o B, e a velocidade do meio A é maior do que a do B (corda mais densa e $v \sim 1/\sqrt{\mu}$), a parte refletida é invertida. Caso contrário (corda mais leve), não há inversão. Se a segunda corda for muito mais leve, a extremidade está essencialmente livre e não há transmissão.

