Aula 3

ALGUNS TIPOS COMUNS DAS ONDAS MECÂNICAS

META

Apresentar aos alunos as principais características de ondas mecânicas mais comuns na natureza, exceto de ondas sonoras. Demonstrar a conexão entre velocidade das ondas e características do meio em que a onda se propaga.

OBJETIVOS

Ao final desta aula, o aluno deverá:
Caracterizar a onda que se propaga através da corda e calcular sua velocidade.
Caracterizar a onda elástica que se propaga através dos sólidos e calcular sua velocidade.
Entender as principais características das ondas sísmicas.
Descrever os movimentos envolvidos em uma onda superficial na água.

PRÉ-REQUISITO

Trigonometria básica; cálculo diferencial básico; mecânica básica.

Introdução

Essa aula tem dois principais objetivos: (1) descrever alguns tipos comuns de ondas mecânicas, e (2) mostrar ao aluno como é possível calcular a velocidade da onda e conectá-la com as características do meio de propagação. Vamos discutir as características de ondas que se propagam nos fios e cordas, ondas elásticas longitudinais que se propagam através dos sólidos, ondas sísmicas e ondas superficiais nos líquidos. Para os primeiros dois tipos de onda, vamos demonstrar explicitamente como a velocidade de propagação da onda depende das características do meio de propagação.

3.1 Ondas transversais nas cordas

Vamos começar com as ondas que se propagam através de uma corda, já mencionadas na segunda aula. Consideraremos uma corda fixa em uma das suas extremidades. Quando aplicamos uma tensão T na corda, ela se estica e fica retilínea (figura 3.1). Nessa situação qualquer ponto da corda está em equilíbrio (não se move), pois sofre ação de forças iguais, mas em sentidos contrários.

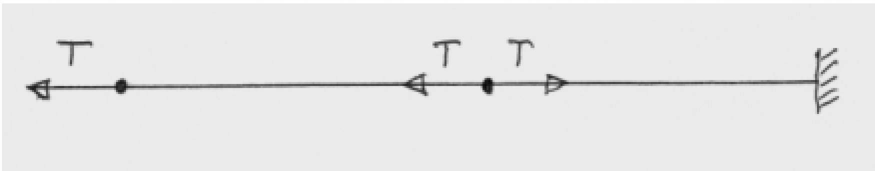

Figura 3.1 Corda fixa em uma de suas extremidades, em equilíbrio, submetida à tensão T.

Agora, deslocaremos um pedaço da corda perpendicularmente ao seu comprimento, produzindo uma perturbação (i.e. pulso) que se propaga ao longo da corda. Prestaremos atenção a um elemento da corda AB, de comprimento dx, que está deslocado transversalmente a uma distância ξ em relação a sua posição de equilíbrio (figura 3.2). O ξ descreve a elongação do pulso, que não é igual para todos os pedaços da corda (portanto depende de x), e também muda quando o pulso viaja ao longo da corda (portanto depende de t). Consequentemente, $\xi(x,t)$ caracteriza movimento da perturbação ao longo da corda, e nosso objetivo é deduzir a equação diferencial que determina esta função.

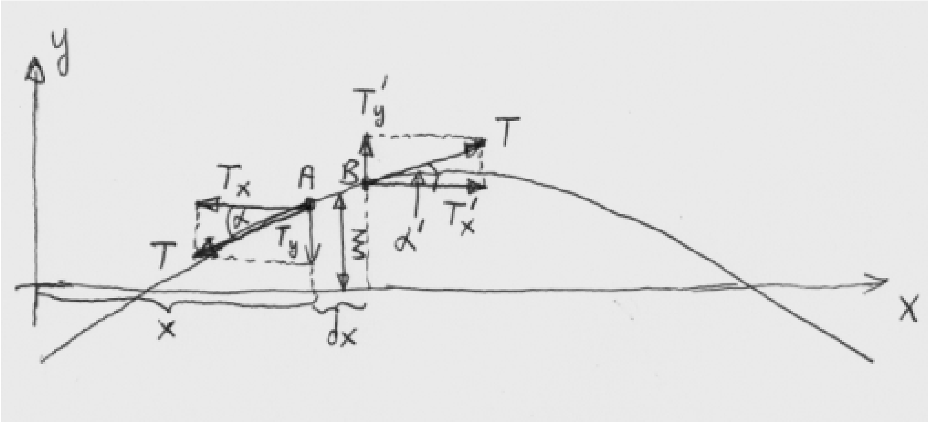

Figura 3.2 Corda perturbada transversalmente. A perturbação (pulso) se propaga para a direita através da corda.

Consideraremos os pontos A e B infinitesimalmente próximos. Nesse caso, tensões T tangenciais são praticamente iguais. Porém, por causa da curvatura da corda, os ângulos α e α' são pouco diferentes, fato que causa uma força resultante ao longo de eixo y. Utilizando-se a geometria simples apresentada na figura 3.2, vê-se que as componentes transversais da tensão nos pontos A e B são:

$$\begin{aligned} T_y' &= T \sin\alpha' \\ T_y &= -T \sin\alpha \end{aligned} \tag{3.1}$$

A força resultante que atua no elemento AB da corda é, portanto:

$$F_y = T_y' + T_y = T(\sin\alpha' - \sin\alpha) \tag{3.2}$$

Sob ação desta força, o elemento AB da corda se move para cima e para baixo! Agora, devido ao fato de que os ângulos α e α' sejam muito parecidos ($\alpha \approx \alpha'$), podemos considerar que a diferença $\sin\alpha' - \sin\alpha$ é praticamente igual ao diferencial de $\sin\alpha$:

$$F_y = T\, d(\sin\alpha) \tag{3.3}$$

Se o deslocamento da corda for pequeno, a curvatura da corda será pequena também, e, portanto, os ângulos α e α' serão pequenos. Sob estas condições, podemos considerar que $\sin\alpha \approx tg\alpha$ (pois para os ângulos α muito pequenos $\cos\alpha \approx 1$). A equação (3.3) se transforma em:

$$F_y = T \cdot d(tg\alpha) = T \cdot \frac{d}{dx}(tg\alpha)dx \tag{3.4}$$

Por outro lado, $tg\alpha$ é a inclinação da curva $\xi(x)$, i.e. $\frac{d\xi}{dx} = tg\alpha$. Colocando essa observação na equação (3.4), chegamos à expressão final para a força que causa o movimento vertical do pedaço AB da corda:

$$F_y = T\frac{d^2\xi}{dx^2}dx \tag{3.5}$$

Agora podemos aplicar a segunda lei de Newton para o pedaço AB da corda, com massa m_{AB}:

$$m_{AB} \cdot \frac{d^2\xi}{dt^2} = F_y \tag{3.6}$$

Assumindo que a massa da corda é uniformemente distribuída, podemos expressar a massa do pedaço AB como: $m_{AB} = \mu \cdot dx$, onde μ é a densidade linear da corda (massa por unidade de comprimento, i.e., massa da corda dividida pelo seu comprimento). Colocando esta expressão, junto com a (3.5), na fórmula (3.6), obtemos:

$$\mu\frac{d^2\xi}{dt^2}dx = T\frac{d^2\xi}{dx^2}dx$$

Como o deslocamento vertical ξ da corda depende tanto de x quanto de t, as derivadas totais têm que ser substituídas por derivadas parciais, e a equação acima se transforma em sua forma final:

$$\frac{\partial^2\xi}{\partial t^2} = \frac{T}{\mu}\frac{\partial^2\xi}{\partial x^2} \tag{3.7}$$

Esta é a equação diferencial que determina propagação da deformação transversal através da corda. Sua solução é a função $\xi(x,t)$. Nós não sabemos a priori se a deformação se propaga como uma onda ou não. Porém, sabemos o seguinte: para que a propagação possa ser caracterizada como ondulatória, o deslocamento tem que satisfazer a equação de onda (veja aula anterior):

$$\frac{\partial^2\xi}{\partial x^2} = v^2\frac{\partial^2\xi}{\partial x^2} \tag{3.8}$$

Comparando-se com a equação (3.8), vê-se facilmente que a equação (3.7) é uma equação de onda. Portanto, podemos concluir o seguinte: **uma perturbação transversal pequena produzida em cima de uma corda propaga-se através dela como uma onda transversal com velocidade**

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \tag{3.9}$$

Esta velocidade, deduzida através da comparação das equações (3.7) e (3.8), depende das características da corda: sua tensão e sua densidade linear!

3.2 Ondas elásticas em sólidos

Todos nós sabemos que o som se propaga não somente através dos gases (como ar, por exemplo), mas também através dos líquidos e sólidos. Fechando suas janelas você não consegue impedir a penetração do barulho da rua no seu quarto, fato que prova que o som se propaga através das suas paredes e vidros das janelas. Independentemente do tipo do meio, o som é basicamente uma onda longitudinal que perturba as partículas do meio. Na próxima aula estudaremos propagação do som através de gases (a propagação através de líquidos é descrita muito similarmente). Agora nos concentraremos no estudo de propagação do som através dos sólidos. Queremos determinar dois fatos, (1) se a propagação do som através de um sólido possui características ondulatórias, e (2) como sua velocidade depende das características do sólido.

Tentando cumprir esses objetivos, estudaremos como modelo uma deformação elástica que se propaga ao longo de uma haste maciça. Essa deformação pode ser provocada batendo uma extremidade da haste com martelo, por exemplo.

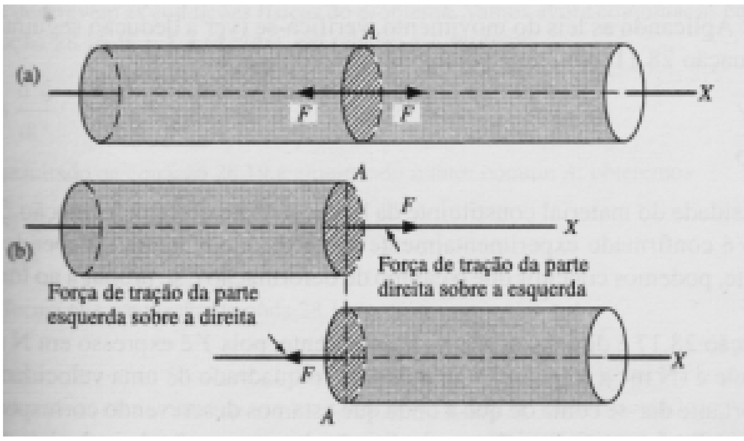

Figura 3.3 Uma haste em equilíbrio, i.e., sem qualquer deformação.

A figura 3.3 demonstra uma haste que não sofre nenhum tipo de deformação. Considerando qualquer seção transversal da haste com área A, a tensão que a parte esquerda exerce sobre a parte direita da haste é igual à tensão que a parte direita produz sobre a parte esquerda da haste. A tensão normal, ou pressão que a seção sofre, é definida por:

$$\mathrm{P} = \frac{F}{A} \qquad (3.10)$$

com a unidade $\frac{N}{m^2}$. Vamos considerar agora a situação quando a haste está deformada (figura 3.4).

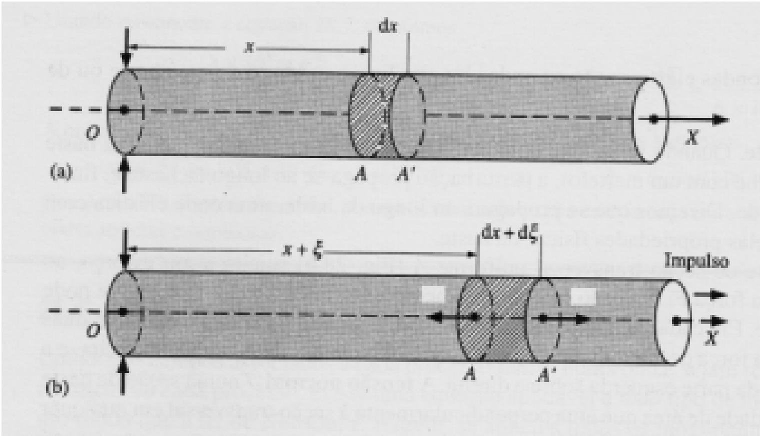

Figura 3.4 A mesma haste encontrada em duas situações: sem e com perturbação.

Vamos analisar o comportamento do volume infinitesimal da haste encontrado entre as seções arbitrárias A e A'. A seção A se encontra na distância x a partir da origem do sistema de coordenadas, o último sendo colocado na parte presa da haste. A seção A' está situada na distância $x + dx$ a partir da origem. Quando a haste é deformada, a seção A se desloca a distância ξ a partir da posição de equilíbrio, enquanto a seção A' se desloca a distância $\xi + d\xi$. Então, podemos concluir que o deslocamento ξ não é o mesmo para qualquer parte da haste, i.e., ele depende da posição x. Ele também muda durante a propagação da perturbação, então também depende de t. Portanto, $\xi(x,t)$ é a elongação e caracteriza movimento da perturbação ao longo da corda. Nosso objetivo é deduzir a equação diferencial que determina esta função.

A quantidade física que caracteriza a deformação linear da haste é definida como:

$$\varepsilon = \frac{d\xi}{dx} \tag{3.11}$$

É um numero puro (sem dimensão). O que provoca a deformação linear é a tensão normal aplicada à haste. Mas como a haste responderá à tensão depende do material de que a haste é composta: alguns materiais se deformam facilmente (como borracha, por exemplo), outros não (como ferro, por exemplo). A lei que regula a relação entre a deformação linear e a pressão aplicada aos materiais sólidos é a lei de Hooke:

$$\mathrm{P} = \Upsilon \frac{d\xi}{dx} \tag{3.12}$$

que tem validade somente para deformações pequenas. Essa lei nos diz que a deformação do material é proporcional a tensão normal aplicada, mas a relação entre eles depende da constante de proporcionalidade, Υ, que se chama módulo de elasticidade de Young. É exatamente essa constante que caracteriza o tipo de material da haste: o ferro, por exemplo, tem Υ grande, e a borracha tem Υ pequeno!

Material	*Módulo de Young Y (10^{11} Nm^{-2})*
Alumínio	0,70
Cobre	1,25
Ferro	2,06
Chumbo	0,16
Níquel	2,10
Aço	2,00

Tabela 3.1: Módulo de Young de alguns materiais.

Combinando as relações (3.10) e (3.12), a força que causa deformação, F, pode ser expressa em termos de o modulo de Young, Υ:

$$F = \Upsilon A \frac{d\xi}{dx} \tag{3.13}$$

Por outro lado, como a haste é deformada, as forças F e F' que atuam nas seções A e A' não são iguais, resultando em uma força $F - F'$ que não é zero. Devido ao fato que a deformação é pequena (senão, a lei de Hook não estaria válida), e que a distância entre A e A' é infinitesimal, podemos considerar que a força resultante que atua sobre a seção AA' também é infinitesimal:

$$F - F' = dF \tag{3.14}$$

A massa da seção AA' é:

$$dm = \rho dV = \rho A dx \tag{3.15}$$

onde a ρ é densidade do material da haste (massa por unidade de volume). A aceleração desta massa é expressa como segunda derivada temporal do deslocamento ξ. Assim, juntamos todos os ingredientes para aplicar segunda lei de Newton para o pedaço AA' da haste:

$$dF = m_{AB} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = (\rho A dx) \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

Dividindo ambas as partes da equação por dx, segue:

$$\frac{dF}{dx} = \rho A \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \tag{3.16}$$

Por outro lado, diferenciando a equação (3.13) por x, encontra-se o seguinte:

$$\frac{dF}{dx} = \Upsilon A \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \tag{3.17}$$

Igualando (3.16) e (3.17), chegamos à equação diferencial que determina a propagação da deformação ao longo da haste:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{\Upsilon}{\rho} \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \tag{3.18}$$

e de novo reconhecemos que essa equação tem a mesma estrutura da equação geral da onda. Portanto, podemos concluir que **uma deformação elástica, descrita pela função** $\xi(x,t)$**, propaga-se ao longo da haste como uma <u>onda longitudinal</u> com velocidade:**

$$v = \sqrt{\frac{\Upsilon}{\rho}} \tag{3.19}$$

que depende das características elásticas do meio e da sua densidade.

3.3 Ondas sísmicas (terremotos)

Uma **onda sísmica** é uma onda que se propaga através da Terra, geralmente como consequência de um sismo, ou devido a uma explosão. Estas ondas são geralmente conectadas com **terremotos**, i.e., com as vibrações que se movimentam pela crosta terrestre.

Tecnicamente, um caminhão grande que passa pela rua causa um mini-terremoto se você sente a sua casa tremer, mas os terremotos são eventos que são associados a uma área relativamente grande, como uma cidade inteira. Vários fatores podem causar terremotos: erupções vulcânicas, impactos de meteoros ou explosões subterrâneas (um teste nuclear subterrâneo, por exemplo). Mas a maioria dos terremotos que ocorre naturalmente é causada pelos movimentos das placas terrestres, encontradas abaixo da superfície da Terra. A partir do lugar onde ocorre esse movimento (chamado **hipocentro** de terremoto), a energia é irradiada para fora como **ondas sísmicas**, assim como a energia da perturbação provocada por uma pedra jogada na água irradia em forma de onda. O ponto na superfície da Terra radialmente acima do hipocentro, que sofre o maior impacto do terremoto, é chamado **epicentro** de terremoto.

Em cada terremoto, formam-se vários tipos diferentes de ondas sísmicas. **Ondas de corpo** se movimentam pela parte interna da Terra, enquanto as **ondas de superfície** percorrem sua parte superficial. As ondas de superfície são responsáveis pela maior parte dos danos associados aos terremotos, porque causam as vibrações mais intensas. Essas ondas, porém, originam-se das ondas de corpo que alcançam a superfície.

Existem dois tipos principais de ondas de corpo.

- **Ondas primárias**, também chamadas de **ondas P** ou ondas de compressão, são ondas longitudinais. Elas percorrem de 1,6 a 8 km por segundo, dependendo do material por onde estão se propagando. Esta velocidade é maior do que a velocidade de outras ondas, portanto as ondas P chegam primeiro na superfície, onde são registradas por sismógrafos. Elas percorrem sólidos, líquidos e gases e passam completamente pelo corpo da terra. Estas ondas chegam à superfície como um golpe abrupto.

- **Ondas secundárias**, também chamadas de **ondas S,** são ondas transversais. Elas se propagam com velocidade menor, e ficam um pouco atrás das ondas P. À medida que estas ondas se movimentam, elas deslocam partículas de rocha para fora, empurrando-as no sentido perpendicular a seu percurso. Ao contrário das ondas P, as ondas S não se movimentam por qualquer parte do interior da terra. Elas atravessam apenas os materiais em estado sólido e param na camada líquida no centro da terra.

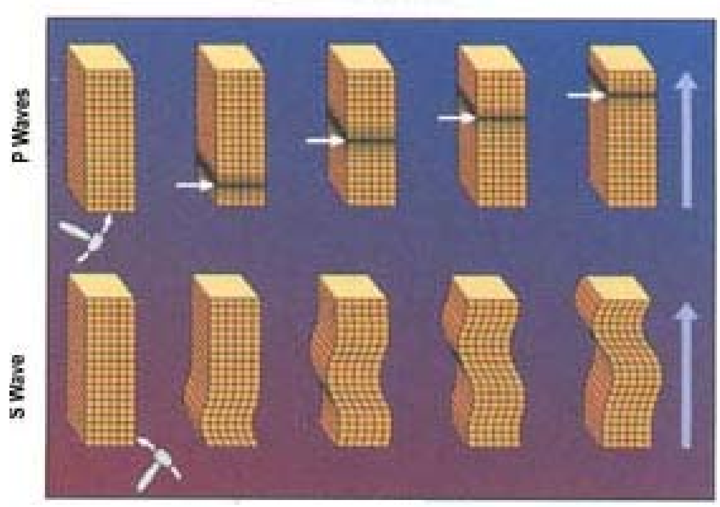

Figura 3.5: Ilustração de propagação de ondas P e S através do interior da Terra.

As ondas de corpo, em princípio, viajam ao redor da Terra e podem ser detectadas do lado oposto do planeta, a partir do ponto onde o terremoto começou. Porém, existem algumas restrições, que já foram mencionadas acima: ondas P não atravessam meios líquidos. Isso acontece porque as ondas P são ondas transversais. Ondas transversais propagam-se somente através dos materiais sólidos, pois os átomos que formam um sólido são fortemente ligados entre si. Quando um deles se desloca na direção perpendicular em relação à direção de propagação da onda, os átomos vizinhos seguem seu movimento (i.e., o primeiro átomo "puxa" os vizinhos devido às ligações fortes entre eles). Esse efeito não ocorre nos meios líquidos e gasosos, pois as moléculas que formam estes meios são fracamente ligadas entre si, então elas não podem “puxar” uma a outra, somente “empurrar”. Como consequência, nos meios líquidos e gasosos propagam-se somente ondas longitudinais, enquanto nos meios sólidos podem se propagar tanto ondas longitudinais quanto ondas transversais.

Ao chegar à superfície, as ondas sísmicas de corpo são:

1. parcialmente transmitidas ao ar na forma das ondas sonoras de baixa frequência,
2. parcialmente refletidas ao interior da Terra,
3. parcialmente espalhadas ao longo da superfície.

A parte espalhada é que cria ondas de superfície, que como as ondas em um copo de água movimentam a superfície da Terra. Isto geralmente causa o pior estrago, porque o movimento das ondas mexe com as fundações de estruturas feitas pelo homem. Usualmente formam-se dois tipos das ondas superficiais.

1. **Ondas Rayleigh**: neste tipo de onda as partículas da Terra deslocam-se verticalmente com uma forma elíptica e retrógrada.

2. **Ondas Love:** durante a passagem deste tipo da onda, as partículas vibram horizontalmente e na direção perpendicular ao sentido da propagação da vibração.

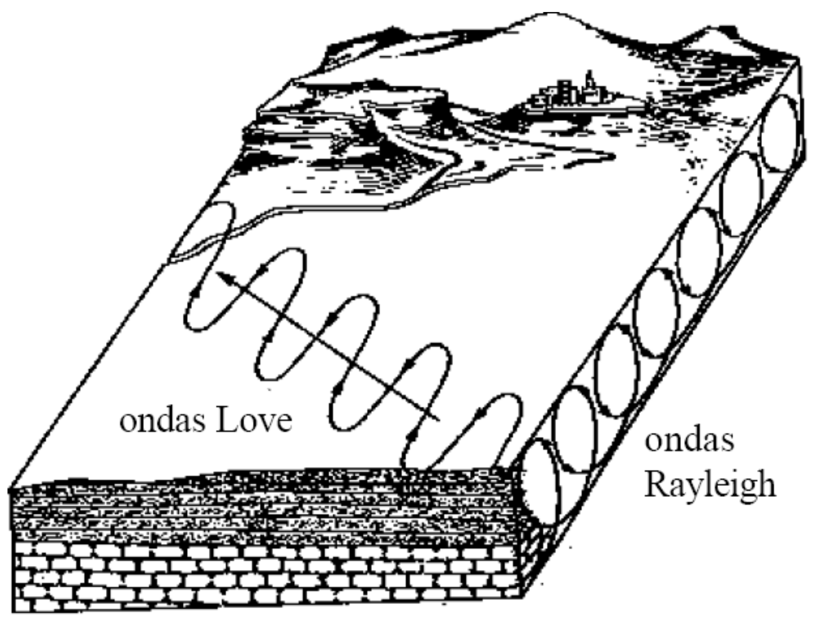

Figura 3.6: Ilustração das ondas sísmicas superficiais Rayleigh e Love.

As ondas Love são as que se movimentam mais devagar e causam maior estrago, portanto, o tremor mais intenso geralmente vem no final de um terremoto.

Porém, não pense que ondas sísmicas causam somente estragos e danos, elas também podem ser muito úteis em vários sentidos. Por exemplo, estas ondas servem para investigar a estrutura interna da Terra, de maneira similar a como os raios X são utilizados para investigar a estrutura interna dos corpos e objetos. Graças às ondas sísmicas, foi descoberto que o interior de nosso planeta consiste de vários núcleos concêntricos que são formados por materiais diferentes. Cercando o centro da Terra, existe um núcleo interno sólido formado por metais pesados. Esse núcleo é cercado por um núcleo externo líquido, e esse finalmente por um núcleo formado de rochas e mantas. Os detalhes dessa estrutura e sua investigação são estudados pelo ramo da física chamado **geofísica.**

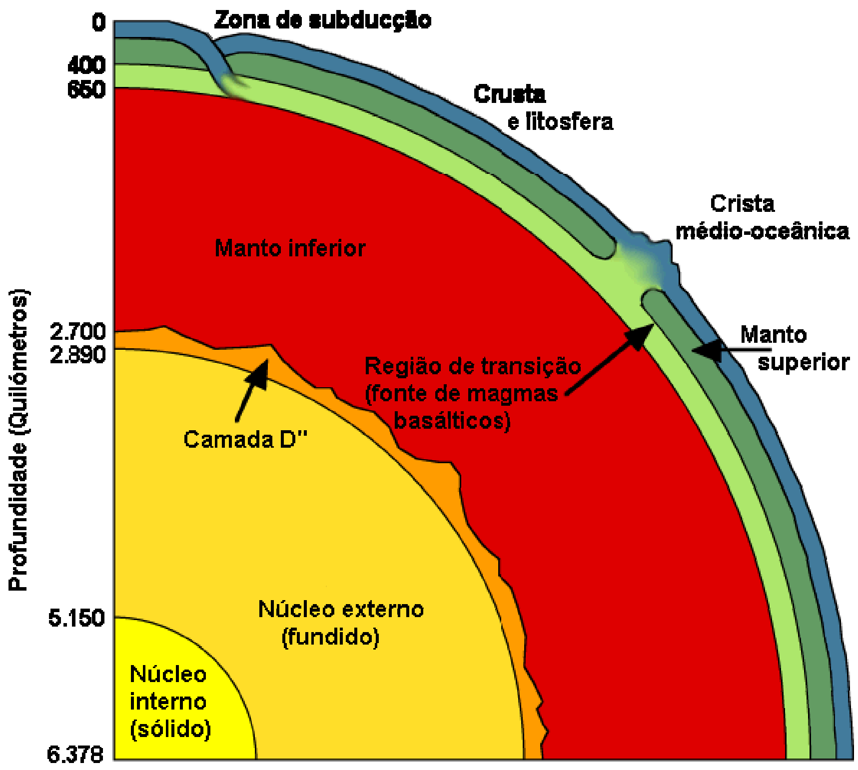

Figura 3.7: Esquema da estrutura interna da Terra, descoberta devido a análise de propagação das ondas sísmicas (http://domingos.home.sapo.pt/estruterra_4.html)

A descoberta das camadas internas da Terra foi feita a partir de dois fatos básicos. Primeiro, as ondas S não conseguem chegar a qualquer ponto da superfície da Terra, que levou a conclusão que deve existir um núcleo líquido no interior. Segundo, foi observado que as ondas P demoram um tempo diferente para chegar aos pontos diferentes na superfície da Terra, que levou a conclusão que no interior existe mais de uma camada diferente (pois materiais diferentes resultam em velocidades de propagação das ondas diferentes).

Além de investigar estrutura interna da Terra, as ondas sísmicas são usadas também na área da exploração do petróleo. Para investigar se há possibilidade de existir um campo de petróleo abaixo de superfície utilizam-se caminhões "batedores" que, através de fortes golpes, produzem ondas sísmicas de menor intensidade. Depois disso as ondas refletidas do interior da Terra são analisadas com microfones especiais com objetivo de revelar se no fundo existisse o líquido, que pode ser o petróleo.

3.4 Ondas superficiais na água

As ondas que se formam na superfície de um líquido são o tipo de ondas mais conhecido. São facilmente observadas nos rios, lagos ou oceanos. A sua descrição matemática, porém, é mais complicada do que a dos exemplos anteriores. Por causa disso, será apresentada somente uma análise descritiva desse fenômeno.

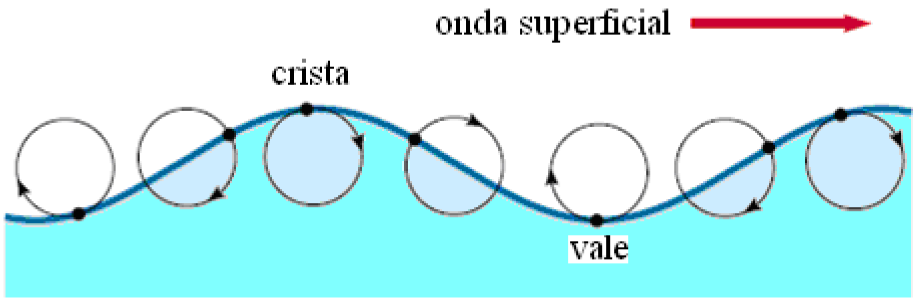

Figura 3.8: Deslocamento de moléculas do líquido resultante do movimento de uma onda superficial.

A figura 3.8 mostra o que acontece com as moléculas na superfície do líquido durante a propagação de uma onda. Elas se movem circularmente, tendo ambas as componentes longitudinal e transversal. Durante a passagem da onda, as moléculas que se encontram na crista se movem no sentido de propagação da onda, e são empurradas nesta direção. Depois do tempo que corresponde a meio período, essas moléculas se encontram no vale da onda e são empurradas para direção oposta. Então, qualquer movimento das moléculas do líquido em certa direção é cancelado pelo movimento na direção oposta no tempo posterior. Durante um ciclo ondulatório, as moléculas do líquido não mudam sua posição e não são carregadas por onda. Porém, a própria onda se propaga ao longo da superfície do líquido.

Bibliografia consultada

Alonso, M. S. e Finn, E. J., *Física*, Ed. Edgard Blucher Editora, São Paulo, 1999.

Young, H. D. e Freedman, R. A. *Física II - Termodinâmica e Ondas*, Pearson Education do Brasil (qualquer edição).

Halliday, D., Resnick, R, Walker, J *Fundamentos de Física 2- Gravitação, Ondas e Termodinâmica,* Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. (qualquer edição).

Questões

1. Por que fator você teria de aumentar a tensão em uma corda esticada a fim de dobrar a velocidade da onda?

2. A velocidade vertical de um segmento de uma corda esticada horizontal pelo qual uma onda está se deslocando depende da velocidade da onda?

Resposta

Não. A velocidade do segmento varia entre valores extremos $\pm\omega \cdot A$, onde as frequência ω e amplitude A são determinadas pela fonte da onda. Por outro lado, a velocidade de propagação da onda não depende de ω e A, mas das características da corda.

3. Uma fonte vibratória gera uma onda senoidal em uma corda sob tensão constante. Se a potência aplicada à corda for dobrada, por que fator a amplitude se modifica? A velocidade da onda se altera sob tais circunstâncias?

Resposta

Uma fonte vibratória aplicada à corda gera uma onda cujas características dependem da potência da fonte através da fórmula: $P = \frac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 v$. Como a tensão e a massa linear da corda não mudaram, a velocidade da onda não foi alterada. Duplicando a potência, a amplitude aumenta por fator $\sqrt{2}$.

4. Considere uma onda que se desloca em uma corda esticada. Qual é a diferença, se existir, entre a velocidade da onda e a velocidade de uma seção pequena da corda?

5. Se uma corda longa estiver pendurada em um teto e ondas estiverem sendo emitidas para cima na corda a partir de sua extremidade mais baixa, estas não ascendem com velocidade constante. Explique.

Resposta

Por causa do peso da própria corda.

6. Que acontece ao comprimento de onda de uma onda em uma corda quando a frequência é dobrada? Suponha que a tensão na corda permanece a mesma.

7. Que acontece à velocidade de uma onda em uma corda quando a frequência é dobrada? Suponha que a tensão na corda permanece a mesma.

Resposta

A velocidade permanece a mesma. Como $f \cdot \lambda = v$, dobrando a frequência, o comprimento de onda diminui duas vezes.

8. Quando todas as cordas de um violão são submetidas à mesma tensão, a velocidade de uma onda ao longo das cordas graves (de maior massa) será maior ou menor do que a velocidade de uma onda nas cordas mais leves?

9. Se você esticar uma mangueira de borracha e a bater, poderá observar um pulso se deslocar para cima e para baixo através da mangueira. O que acontece à velocidade se você esticar mais ainda a mangueira? E se você enchê-la com água?

Dica: esticando a mangueira, aumenta-se sua tensão; enchendo ela com água, aumenta-se sua densidade linear.

10. Um sólido pode transportar ondas longitudinais e ondas transversais, mas um fluido pode transportar somente ondas longitudinais. Por quê?

Exercícios

11. Um cabo de telefone tem 4,00 m de comprimento e massa de 0,200 kg. Um pulso ondulatório transversal é produzido dando-se um arranco em uma extremidade do cabo. O pulso faz quatro deslocamentos de ida e volta ao longo do cabo em 0,800 s. Qual é a tensão no cabo?

12. Uma corda de piano que tem uma massa por unidade de comprimento de $5{,}00 \times 10^{-3}$ kg/m está sob uma tensão de 1350 N. Encontre a velocidade com que uma onda se desloca nessa corda.

13. Um fio de aço de 30,0 m e um fio de cobre de 20,0 m, ambos com diâmetro de 1,00 mm, estão conectados por suas extremidades e esticados sob uma tensão de 150 N. Quanto tempo uma onda transversal levará para se deslocar através de todo o comprimento dos dois fios?

Resposta

O tempo procurado é: $t = \frac{s_1}{v_1} + \frac{s_2}{v_2}$, onde $\frac{s_1}{v_1}$ é o tempo que a onda precisa para atravessar o aço ($s_1 = 30\,m$), e $\frac{s_2}{v_2}$ o tempo que a onda precisa para atravessar o cobre ($s_2 = 20\,m$). As velocidades de propagação $v_1 = \sqrt{\frac{T}{\mu_1}}$ (aço) e $v_2 = \sqrt{\frac{T}{\mu_2}}$ (cobre) são diferentes e, para ser calculadas, é preciso determinar as densidades lineares μ_1 e μ_2. Qualquer uma dessas densidades pode ser calculada da seguinte maneira:

$\mu = \dfrac{m}{l} = \dfrac{\rho \cdot V}{l} = \dfrac{(\pi \cdot d/2)^2 \cdot l}{l} \cdot \rho = \dfrac{\pi d^2}{4} \cdot \rho$, onde m é a massa do fio, ρ sua densidade, V volume e d diâmetro do fio. Densidade do aço é: $\rho_{aço} = 7800 \dfrac{kg}{m^3}$, e a densidade do cobre é: $\rho_{cobre} = 8900 \dfrac{kg}{m^3}$.

14. Uma estação sismológica recebe ondas S e *P* de um terremoto, separadas 17,3 s. Suponha que as ondas se deslocaram pela mesma trajetória com velocidades de 4,50 km/s e 7,80 km/s. Encontre a distância do sismógrafo ao hipocentro do terremoto.

Resposta

Vamos denotar a distância entre o hipocentro e o sismógrafo por d. O tempo que a onda P precisa para percorrer essa distância é $t_P = \dfrac{d}{v_P}$, onde $v_P = 7{,}80 \dfrac{km}{s}$, e o tempo que a onda S necessita é $t_S = \dfrac{d}{v_S}$, onde $v_S = 4{,}50 \dfrac{km}{s}$. $\Rightarrow$ $t_S - t_P \equiv \Delta t = \dfrac{d}{v_S} - \dfrac{d}{v_P}$, onde $\Delta t = 17{,}3\,s$. Resolvendo essa equação por d segue: $d = \dfrac{\Delta t}{\dfrac{1}{v_S} - \dfrac{1}{v_P}} = 184{,}0\,km$.

Resumo da aula

Existem vários tipos das ondas mecânicas. Além das ondas sonoras, as ondas mais comuns são ondas que se propagam ao longo de uma corda (ou fio), ondas elásticas que se propagam pelos materiais sólidos, ondas sísmicas e ondas na superfície da água.

Se uma barra produzir vibrações na extremidade livre de uma corda (ou fio), será criada uma onda transversal que se propaga para o lado fixo da corda (fio). A velocidade de propagação depende das características da corda (fio), sua tensão T e massa linear μ:

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

O som se propaga através dos materiais sólidos na forma de uma onda elástica, cuja velocidade depende da densidade ρ do material e de seu módulo de elasticidade de Young Υ:

$$v = \sqrt{\frac{\Upsilon}{\rho}}$$

A **onda sísmica** é uma onda que se propaga através da Terra, geralmente causada pelos movimentos das placas terrestres, encontradas abaixo da superfície. **Ondas de corpo** se movimentam pela parte interna da Terra, enquanto as **ondas de superfície** percorrem sua parte superficial causando **terremotos**. Existem dois tipos de ondas de corpo: **ondas primárias**, que são ondas longitudinais percorrendo sólidos, líquidos e gases e passando completamente pelo corpo da Terra, e **ondas secundárias**, que são ondas transversais e percorrem somente as camadas sólidas da Terra. Usualmente se formam dois tipos de ondas superficiais: **ondas Rayleigh** e **ondas Love**. As ondas sísmicas são usadas para investigar a estrutura interna da Terra, e na procura de petróleo.

As ondas que se formam na superfície de um líquido movimentam as moléculas do líquido de maneira circular. Como resultado, as moléculas do líquido não mudam sua posição e não são carregadas pela onda.

Conclusão

Nesta aula discutimos vários tipos comuns das ondas mecânicas. Demonstramos que a velocidade de propagação das ondas não depende das condições iniciais de sua criação, mas somente das propriedades elásticas e inerciais do meio de propagação.

Informações sobre a próxima aula

A próxima aula é dedicada ao estudo das ondas mecânicas mais importantes do ponto de vista da humanidade: as ondas sonoras que se propagam através dos gases. Veremos detalhadamente como esta propagação ocorre e quais características do gás influenciam a velocidade da onda. Discutiremos a intensidade sonora e como ela é medida. Estudaremos o efeito de Doppler: por que e como a frequência do som observada pode mudar em relação à frequência emitida pela fonte sonora.