Física: Fenômenos ondulatórios

Dr. Rafael da Silva

Criado: 29 de julho de 2025 Atualizado: 5 de agosto de 2025

Introdução

Este capítulo serve como uma porta de entrada para o fascinante mundo das ondas, um fenômeno físico onipresente em nosso cotidiano e de fundamental importância para a compreensão de diversos aspectos do universo. Abordaremos a natureza essencial das ondas, suas características distintivas e as diversas formas pelas quais podem ser classificadas, preparando o terreno para um estudo mais aprofundado de suas propriedades e comportamentos.

As ondas são perturbações que se propagam por um meio ou pelo espaço, transferindo energia sem, no entanto, transportar matéria. Essa é uma característica fundamental que as distingue de outros tipos de movimento. Para ilustrar esse conceito, considere o exemplo de uma "ola" em um estádio de futebol.

Embora pareça que uma grande massa de pessoas se move de um lado para o outro, na realidade, cada torcedor se levanta e se senta em sua própria posição, transmitindo apenas o "sinal" ou a perturbação. O que se desloca é a energia da onda, não os torcedores individualmente. Este conceito é essencial: **ondas propagam energia, não matéria**. Vamos compreendê-lo com mais detalhes por meio do exemplo da "ola".

A "ola" em um estádio é um exemplo prático que nos fornece um ponto de partida para entender a natureza das ondas. Todavia, não é uma onda no sentido físico estrito, é apenas um construção visual.

Quando os torcedores realizam a ola, eles se levantam e erguem os braços, e em seguida se sentam. Essa ação é coordenada e sequencial, criando a ilusão de um movimento contínuo de uma "onda" humana ao redor do estádio. No entanto, é fundamental observar que cada torcedor permanece em sua própria cadeira; ele não se desloca fisicamente de um ponto a outro do estádio acompanhando a "ola". O que realmente se propaga é a **perturbação** (o ato de levantar-se e sentar-se) e, consequentemente. Assim, "ola" viaja pelo estádio, mas a matéria (os torcedores) permanece em suas posições.

Outros exemplos cotidianos da presença de ondas incluem o som que ouvimos (ondas sonoras), a luz que vemos (ondas eletromagnéticas), os sinais de rádio e televisão, as micro-ondas utilizadas em fornos e os raios X empregados na medicina. Em todos esses casos, a essência é a mesma: uma perturbação que se propaga, levando consigo energia.

1 Tipos e Classificações das Ondas

As ondas podem ser classificadas de diversas maneiras, dependendo de suas características e do modo como se propagam. As classificações mais comuns são baseadas na sua natureza, na direção de vibração e no número de dimensões em que se propagam.

1.1 Classificação Quanto à Natureza

Quanto à sua natureza, as ondas são divididas em três tipos principais, são elas: ondas mecânicas, ondas eletromagnéticas e ondas de matéria. Vamos discutir apenas os dois primeiros, pois o terceiro caso foge do escopo deste livro[1].

1.1.1 Ondas Mecânicas

As **ondas mecânicas** são aquelas que necessitam de um meio material (sólido, líquido ou gasoso) para se propagar. Mas não transportam matétia.

Elas resultam de deformações provocadas em meios elásticos, transportando apenas energia mecânica. A propagação do movimento oscilatório ocorre pela interação entre as partículas que constituem o meio. Um exemplo clássico é o som: quando tocamos um sino, a vibração do sino é transmitida através do ar, fazendo com que as partículas do ar vibrem e transfiram essa energia até nossos ouvidos. Outros exemplos incluem ondas em cordas e ondas na superfície da água.

É importante ressaltar que *ondas mecânicas não se propagam no vácuo*.

1.1.2 Ondas Eletromagnéticas

Ao contrário das ondas mecânicas, as **ondas eletromagnéticas** não necessitam de um meio material para se propagar. Elas consistem em campos elétricos e magnéticos que se propagam perpendicularmente entre si e também são perpendiculares à direção de propagação da onda.

Essas ondas podem viajar pelo vácuo, onde sua velocidade é constante e igual à velocidade da luz no vácuo, aproximadamente 3×10^8 m/s. Exemplos de ondas eletro-

[1] Embora essas ondas sejam estudadas nos laboratórios, provavelmente o leitor não está familiarizado com elas. Estão associadas a elétrons, prótons e outras partículas elementares e mesmo a átomos e moléculas. São chamadas de ondas de matéria porque normalmente pensamos nas partículas como elementos de matéria.

magnéticas incluem a luz visível, ondas de rádio, micro-ondas e raios X. O sinal que traz o som e a imagem para a televisão, por exemplo, é uma onda eletromagnética.

Fato Curioso

Sabe que aqueles filmes de ficção científica com guerras espaciais, então, eles estão te enganando: como o som é uma onda mecânica, ele precisa de um meio material para se propagar – no vácuo do espaço, portanto, você não ouviria nenhum disparo ou explosão. No entanto, se os cineastas seguissem a física à risca durante nossos momentos de lazer, provavelmente sairíamos entediados do cinema.

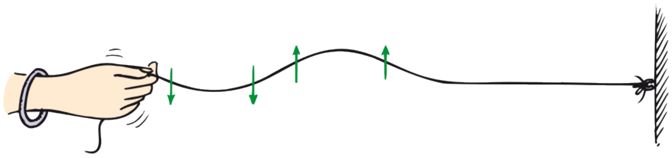
1.2 Classificação Quanto à Direção de Vibração

Esta classificação se refere à relação entre a direção do movimento vibratório das partículas do meio e a direção de propagação da onda. Há três classificações: as ondas transversais, as ondas longitudinais e as ondas mistas[2]. Discutiremos aqui apenas as duas primeiras.

1.2.1 Ondas Transversais

Em ondas transversais, a direção do movimento vibratório das partículas do meio é **perpendicular** à direção de propagação da onda.

A "ola" em um estádio, mencionada anteriormente, é um exemplo de onda transversal, pois os torcedores se movem verticalmente (vibração) enquanto a "ola" se propaga horizontalmente. Ondas em cordas também são exemplos de ondas transversais, onde a corda oscila para cima e para baixo, mas a perturbação se move ao longo do comprimento da corda, conforme ilustra a figura abaixo.



1.2.2 Ondas Longitudinais

[2]As ondas mistas (ou complexa) possuem componentes transversais e longitudinais. Exemplos destas ondas são: ondas em líquidos e ondas sísmicas.

Em ondas longitudinais, a direção do movimento vibratório das partículas do meio **coincide** com a direção de propagação da onda. O exemplo mais comum de onda longitudinal é a onda sonora no ar. Quando o som se propaga, as partículas do ar vibram para frente e para trás na mesma direção em que o som está viajando, criando regiões de compressão e rarefação. Como ilustrado na figura ao lado.

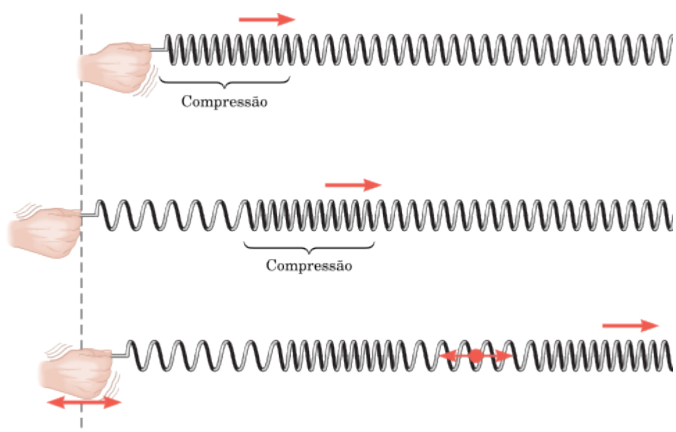
Um fato interessante sobre as ondas sonoras é que elas são tridimensionais – falaremos mais sobre isso adiante. Podemos perceber essa característica observando uma situação cotidiana: se uma pessoa à sua frente, mas de costas para você, falar, é possível que você a escute perfeitamente, dependendo da distância entre vocês. Isso indica que o som não se propaga apenas para frente, mas também para trás e para todos os lados. Ou seja, a onda sonora se espalha em todas as direções ao redor da fonte emissora, evidenciando sua natureza tridimensional.

1.3 Classificação Quanto à Dimensão

Esta classificação descreve o espaço em que a energia da onda se espalha.

1.3.1 Ondas Unidimensionais

São ondas cuja energia se propaga linearmente, ou seja, em apenas uma direção. Um exemplo típico é a onda que se propaga em um brinquedo conhecido popularmente como “mola maluca”. Observe a figura abaixo, na qual temos tal brinquedo. Ao empurrarmos a ponta da mola, ela se comprime e essa compressão viaja na direção horizontal.



Outro exemplo clássico é a onda em uma corda esticada, como quando você move uma das extremidades de uma corda presa, gerando uma perturbação que se propaga ao longo de uma única direção (o comprimento da corda).

1.3.2 Ondas Bidimensionais

Nessas ondas, a energia se propaga superficialmente, em duas dimensões. O exemplo mais comum são as ondas formadas na superfície da água quando uma pedra é jogada, criando círculos concêntricos que se expandem.

1.3.3 Ondas Tridimensionais

São ondas cuja energia se propaga em todas as direções do espaço, ou seja, em três dimensões. As ondas sonoras e as ondas luminosas são exemplos clássicos de ondas tridimensionais, espalhando-se esfericamente a partir de sua fonte.

Exemplo

Classifique os seguintes tipos de ondas quanto à sua natureza, direção de vibração e número de dimensões de propagação:
a) Ondas em uma corda de violão.
b) Ondas de rádio.
c) Ondas sonoras no ar.
d) Ondas na superfície de um lago.

Resolução:
a) Ondas em uma corda de violão:

- **Natureza:** Mecânica (necessita da corda para se propagar).
- **Direção de Vibração:** Transversal (a corda vibra perpendicularmente à direção de propagação da onda ao longo da corda).
- **Dimensões de Propagação:** Unidimensional (a energia se propaga linearmente ao longo da corda).

b) Ondas de rádio:

- **Natureza:** Eletromagnética (não necessita de meio material, pode se propagar no vácuo).
- **Direção de Vibração:** Transversal (os campos elétricos e magnéticos vibram perpendicularmente à direção de propagação).
- **Dimensões de Propagação:** Tridimensional (a energia se espalha em todas as direções do espaço).

c) Ondas sonoras no ar:

- **Natureza:** Mecânica (necessita do ar para se propagar).
- **Direção de Vibração:** Longitudinal (as partículas do ar vibram paralela-

mente à direção de propagação do som).
- **Dimensões de Propagação:** Tridimensional (a energia se espalha em todas as direções do espaço).

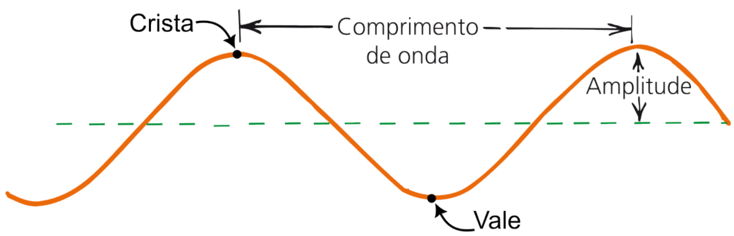
d) Ondas na superfície de um lago:
- **Natureza:** Mecânica (necessita da água para se propagar).
- **Direção de Vibração:** Mista (possuem componentes transversais e longitudinais, resultando em movimento circular das partículas).
- **Dimensões de Propagação:** Bidimensional (a energia se propaga na superfície da água).

2 Características das Ondas

Para descrever e analisar o comportamento das ondas, é essencial compreender suas características fundamentais, como **velocidade**, **comprimento de onda**, **período** e **frequência**. Além disso, a função de onda nos permite descrever matematicamente a perturbação em qualquer ponto do espaço e em qualquer instante de tempo.

Uma onda é denominada **periódica** quando se repete em intervalos regulares no tempo e/ou no espaço. Em outras palavras, seu perfil ou forma é reproduzido ciclicamente. Durante a propagação de uma onda periódica, observa-se um padrão repetitivo tanto no espaço quanto no tempo. Para caracterizar esse padrão, empregamos algumas grandezas físicas fundamentais.

Tomemos como exemplo uma corda que oscila para cima e para baixo, de modo que forme ondas periódicas nela. A imagem que se forma é semelhante (no caso ideal idêntica) ao do gráfico da função seno ou cosseno. Por isso tais ondas também são chamadas de **senoidais**. A figura abaixo ilustra a onda e algumas grandezas relacionadas à ela que iremos apresentar.



2.1 Crista, Vale e Amplitude

A **crista da onda** é o ponto de máxima elevação (ou máxima perturbação positiva) em relação à posição de equilíbrio do meio. O **vale da onda** é o ponto de máxima depressão (ou máxima perturbação negativa) em relação à posição de equilíbrio.

O termo **amplitude** (A) se refere à distância entre o ponto médio da vibração e a crista (ou vale) da onda. Portanto, a amplitude é igual ao máximo afastamento em relação ao equilíbrio.

2.2 Comprimento de Onda

O **comprimento de onda** (λ) é definido como a menor distância entre dois pontos consecutivos da onda que estão em concordância de fase. Isso significa que são pontos que se encontram na mesma "etapa" do ciclo de vibração, como duas cristas consecutivas, dois vales consecutivos, ou quaisquer dois pontos que executam simultaneamente o mesmo movimento harmônico simples (MHS).

2.2.1 Período e Frequência

O **período** (T) de uma onda é o tempo necessário para que um ciclo completo da onda passe por um determinado ponto do meio, ou o tempo que a fonte leva para produzir um ciclo completo. A **frequência** (f) é o número de ciclos completos que a onda realiza por unidade de tempo. Período e frequência são grandezas inversas, ou seja,

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

2.2.2 Equação Fundamental das Ondas

A relação entre a velocidade de propagação (v), o comprimento de onda (λ) e a frequência (f) é dada pela **equação fundamental das ondas**:

$$v = \lambda f$$

Esta equação é universalmente válida para todos os tipos de ondas, sejam elas mecânicas ou eletromagnéticas. Em um dado meio homogêneo, a velocidade de propagação da onda é constante e não depende da amplitude ou da frequência da onda. A amplitude está relacionada com a quantidade de energia transportada, enquanto a frequência é determinada pela fonte que gera a onda. No vácuo, a velocidade das ondas eletromagnéticas é a velocidade da luz, $c \approx 3 \times 10^8$ m/s.

Exemplo

Uma onda tem frequência de 8 Hz e propaga-se com velocidade de 200 m/s. Qual é o seu comprimento de onda?

Resolução:

Utilizamos a equação fundamental das ondas: $v = \lambda f$.

Dados:

- Frequência $(f) = 8$ Hz;
- Velocidade $(v) = 200$ m/s.

Queremos encontrar o comprimento de onda (λ). Rearranjando a fórmula, temos:

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

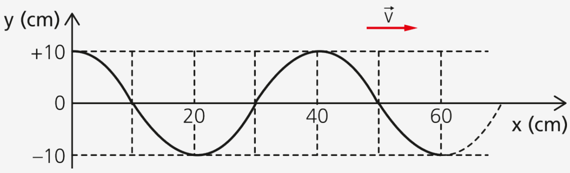
Substituindo os valores:

$$\lambda = \frac{200 \text{ m/s}}{8 \text{ Hz}} = 25 \text{ m}$$

Portanto, o comprimento de onda da onda é de 25 metros.

Exemplo

A figura a seguir representa, num certo instante, o perfil de uma corda por onde está se propagando, da esquerda para a direita, uma onda.



Em $x = 20$ cm, o mínimo intervalo de tempo gasto pelo ponto para ir da posição -10 cm (vale da onda) até $+10$ cm (crista da onda) é de 0,4 s. Nessas condições, calcule:

a) a frequência da onda;

b) a velocidade de propagação da onda.

Resolução:

a) **Cálculo da frequência da onda:**

Observando a figura, podemos identificar que a distância entre duas cristas consecutivas (por exemplo, em $x = 0$ e $x = 40$ cm) é o comprimento de onda. Assim, $\lambda = 40$ cm.

O problema informa que o ponto em $x = 20$ cm leva 0,4 s para ir do vale (-10 cm) até a crista ($+10$ cm). Este movimento corresponde a meio ciclo de oscilação. Portanto, o tempo de 0,4 s é igual a meio período:

$$\frac{T}{2} = 0{,}4 \text{ s} \Rightarrow T = 0{,}8 \text{ s}.$$

A frequência (f) é o inverso do período (T):

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0{,}8 \text{ s}} = 1{,}25 \text{ Hz}$$

b) **Cálculo da velocidade de propagação da onda:**

Agora que temos o comprimento de onda ($\lambda = 40$ cm $= 0{,}4$ m) e a frequência ($f = 1{,}25$ Hz), podemos usar a equação fundamental das ondas:

$$\begin{aligned} v &= \lambda f \\ &= 0{,}4 \text{ m} \cdot 1{,}25 \text{ Hz} = 0{,}5 \text{ m/s}. \end{aligned}$$

Portanto, a frequência da onda é de 1,25 Hz e sua velocidade de propagação é de 0.5 m/s.

Aqui !!!

3 Função de Onda

A função de onda é uma expressão matemática que descreve a posição (elongação) de qualquer ponto do meio em que a onda se propaga, em função de sua posição espacial (x) e do tempo (t). Para uma onda harmônica simples que se propaga ao longo do eixo x, a função de onda pode ser expressa como:

$$y(x,t) = A\cos(kx \mp \omega t + \phi_0)$$

Onde: - $y(x,t)$ é a elongação (deslocamento) do ponto do meio na posição x no instante t. - A é a amplitude da onda, que é a máxima elongação do meio a partir da posição de equilíbrio. - k é o número de onda angular, dado por $k = 2\pi/\lambda$. - ω é a frequência angular, dado por $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$. - ϕ_0 é a fase inicial da onda. - O sinal $\mp$ indica a direção de propagação: $-$ para ondas que se propagam no sentido positivo de x, e $+$ para ondas que se propagam no sentido negativo de x.

Uma forma comum de representar a função de onda, especialmente para ondas que se propagam no sentido positivo de x e com fase inicial nula, é:

$$y(x,t) = A\cos\left(2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right)$$

Esta função nos permite determinar a configuração da onda em qualquer instante ou o movimento harmônico simples de um ponto específico do meio.

Exemplo Resolvido: Análise de Função de Onda

Problema (Baseado em ER5 do kaz.pdf): A função de uma onda é dada por: $y = 10 \cdot \cos\left(2\pi\left(2t - \frac{x}{5}\right)\right)$, em que y e x são medidos em centímetros e t em segundos. Determine:

a) a amplitude da onda; b) o período da onda; c) o comprimento de onda; d) a velocidade de propagação da onda.

Resolução:

Vamos comparar a expressão dada com a forma genérica da função de onda: $y = A\cos\left(2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right)$.

Dada a função: $y = 10 \cdot \cos\left(2\pi\left(2t - \frac{x}{5}\right)\right)$

Podemos reescrever o termo dentro do parêntese para que se assemelhe à forma genérica:

$2t - \frac{x}{5} = \frac{t}{1/2} - \frac{x}{5}$

Comparando termo a termo:

a) **Amplitude (A):** A amplitude é o coeficiente que multiplica a função cosseno.

$$A = 10 \text{ cm}$$

b) **Período (T):** O termo que multiplica t dentro do parêntese é $1/T$. Comparando, temos:

$$\frac{1}{T} = 2 \implies T = \frac{1}{2} \text{ s} = 0.5 \text{ s}$$

c) **Comprimento de Onda (λ):** O termo que multiplica x dentro do parêntese é $1/\lambda$. Comparando, temos:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{5} \implies \lambda = 5 \text{ cm}$$

d) **Velocidade de Propagação (v):** Podemos usar a equação fundamental das ondas: $v = \lambda \cdot f$, ou $v = \lambda/T$.

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{5 \text{ cm}}{0.5 \text{ s}}$$

$$v = 10 \text{ cm/s}$$

4 Fenômenos Ondulatórios

As ondas, ao interagirem com o meio em que se propagam ou com outros obstáculos, podem exibir uma série de comportamentos característicos, conhecidos como fenômenos ondulatórios. A compreensão desses fenômenos é crucial para explicar uma vasta gama de ocorrências naturais e aplicações tecnológicas. Os principais fenômenos ondulatórios incluem reflexão, refração, difração, polarização e interferência.

4.1 Visão Geral dos Fenômenos

4.1.1 Reflexão

A **reflexão** ocorre quando uma onda incide sobre um obstáculo e retorna ao meio original de propagação. A onda refletida mantém todas as características (velocidade, frequência, comprimento de onda) da onda incidente, podendo haver ou não inversão de fase, dependendo das condições do obstáculo. Um exemplo comum é o eco, onde ondas sonoras refletem em uma superfície e retornam ao ouvinte.

4.1.2 Refração

A **refração** é o fenômeno que acontece quando uma onda passa de um meio para outro, ou de uma região de um meio para outra com propriedades diferentes, resultando em uma variação na sua velocidade de propagação. A onda refratada mantém a frequência da onda incidente, mas seu comprimento de onda e direção de propagação podem mudar. A visão de um objeto submerso na água parecer distorcida é um exemplo de refração da luz.

4.1.3 Difração

A **difração** é a capacidade que uma onda tem de contornar obstáculos ou de se espalhar ao passar por uma abertura. A intensidade desse fenômeno depende da relação entre o comprimento de onda e as dimensões do obstáculo ou abertura. Quanto mais próximas forem essas dimensões, mais pronunciada será a difração. É por isso que podemos ouvir o som de alguém falando atrás de um muro, mas não podemos vê-la, pois o comprimento de onda do som é comparável ao tamanho do muro, enquanto o da luz é muito menor.

4.1.4 Polarização

A **polarização** é um fenômeno exclusivo das ondas transversais. Ocorre quando uma onda que vibra em múltiplas direções transversais passa a vibrar em apenas uma direção específica, após interagir com um polarizador. Óculos de sol polarizados, por exemplo, utilizam esse princípio para reduzir o brilho excessivo da luz refletida.

4.1.5 Interferência

Por fim, a **interferência** é o fenômeno que resulta da superposição de duas ou mais ondas que se encontram no mesmo ponto do espaço. A amplitude da onda resultante nesse ponto é a soma algébrica das amplitudes das ondas individuais, podendo levar a um reforço (interferência construtiva) ou a um cancelamento (interferência destrutiva).

5 Princípios Fundamentais

A compreensão dos fenômenos ondulatórios é sustentada por alguns princípios fundamentais da ondulatória:

5.0.1 Princípio da Superposição

O **Princípio da Superposição** afirma que, quando duas ou mais ondas se encontram em um ponto do espaço, a perturbação resultante nesse ponto é a soma algébrica das perturbações individuais de cada onda. Isso significa que as ondas se somam ou se subtraem, dependendo de suas fases relativas.

5.0.2 Princípio da Independência das Ondas

O **Princípio da Independência das Ondas** estabelece que, após a interação (superposição), cada onda continua a se propagar como se nada tivesse ocorrido, mantendo suas características originais. Elas não são alteradas permanentemente pelo encontro.

5.0.3 Princípio de Huygens

O **Princípio de Huygens** é uma ferramenta poderosa para entender a propagação de ondas e explicar fenômenos como a difração e a reflexão. Ele postula que cada ponto de uma frente de onda pode ser considerado uma fonte secundária de ondas esféricas (ou circulares, em duas dimensões), e a nova frente de onda em um instante posterior é a envoltória (superfície tangente) de todas essas ondas secundárias.

6 Ondas Unidimensionais

As ondas unidimensionais são aquelas que se propagam ao longo de uma única direção, como as ondas em uma corda esticada. O estudo dessas ondas é fundamental para compreender os princípios básicos da propagação ondulatória e os fenômenos associados a ela de forma simplificada. Nesta seção, exploraremos a velocidade de propagação em cordas, bem como os fenômenos de reflexão, refração, polarização e interferência aplicados a esse contexto.

6.1 Fórmula de Taylor

A velocidade de propagação de um pulso ou onda em uma corda tensionada é um conceito crucial no estudo das ondas unidimensionais. Essa velocidade não depende da amplitude ou da frequência da onda, mas sim das propriedades físicas da corda e da tensão a que ela está submetida. A relação que descreve essa velocidade é conhecida como **Fórmula de Taylor**:

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

Onde: - v é a velocidade de propagação da onda na corda (m/s). - T é a intensidade da força de tração (tensão) na corda (N). - μ (mi) é a densidade linear da corda (kg/m).

A **densidade linear (μ)** é uma propriedade da corda que representa a sua massa por unidade de comprimento. Ela é calculada como a razão entre a massa (m) da corda e o seu comprimento (L):

$$\mu = \frac{m}{L}$$

A unidade de densidade linear no Sistema Internacional (SI) é o quilograma por metro (kg/m). Essa grandeza indica como a massa da corda está distribuída ao longo do seu comprimento.

Exemplo Resolvido: Cálculo de Velocidade e Tração em uma Corda

Problema (Baseado em ER7 do kaz.pdf): Tem-se uma corda de massa 400 g e de comprimento 5 m. Sabendo-se que está tracionada de 288 N, determine:

a) a velocidade de propagação de um pulso nessas condições; b) a intensidade da força de tração nessa corda, para que um pulso se propague com velocidade de 15 m/s.

Resolução:

Primeiro, vamos converter a massa da corda para quilogramas: $m = 400\text{ g} = 0.4\text{ kg}$.

Agora, calculamos a densidade linear (μ) da corda:

$$\mu = \frac{m}{L} = \frac{0.4\text{ kg}}{5\text{ m}} = 0.08\text{ kg/m}$$

a) **Cálculo da velocidade de propagação:**

Utilizamos a Fórmula de Taylor: $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$.

Dados: - Tração (T) = 288 N - Densidade linear (μ) = 0.08 kg/m

$$v = \sqrt{\frac{288\text{ N}}{0.08\text{ kg/m}}} = \sqrt{3600\text{ m}^2/\text{s}^2}$$
$$v = 60\text{ m/s}$$

Portanto, a velocidade de propagação do pulso na corda é de 60 m/s.

b) **Cálculo da força de tração para uma velocidade específica:**

Queremos que a velocidade seja $v = 15$ m/s. Usamos novamente a Fórmula de Taylor, mas agora isolando T:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \implies v^2 = \frac{T}{\mu} \implies T = v^2 \cdot \mu$$

Dados: - Velocidade (v) = 15 m/s - Densidade linear (μ) = 0.08 kg/m

$$T = (15\text{ m/s})^2 \cdot 0.08\text{ kg/m}$$
$$T = 225 \cdot 0.08\text{ N}$$
$$T = 18\text{ N}$$

Para que um pulso se propague com velocidade de 15 m/s, a força de tração na corda deve ser de 18 N.

6.2 Reflexão em Ondas Unidimensionais

A reflexão ocorre quando um pulso ou onda, propagando-se ao longo de uma corda, atinge uma extremidade e retorna ao meio original de propagação. O comportamento do pulso refletido (com ou sem inversão de fase) depende das condições da extremidade onde a reflexão ocorre.

6.2.1 Extremidade Fixa

Quando a extremidade da corda está fixa a um obstáculo (por exemplo, uma parede), o pulso incidente sofre **inversão de fase** ao ser refletido. Isso significa que um pulso que chega pela parte superior da corda (crista) retorna pela parte inferior (vale), e vice-versa. A extremidade fixa atua como um ponto de apoio que exerce uma força de reação sobre a corda, invertendo a perturbação.

6.2.2 Extremidade Livre

Se a extremidade da corda é livre para se mover (por exemplo, presa a um anel que desliza sem atrito em uma haste vertical), o pulso incidente **não sofre inversão de fase** ao ser refletido. Um pulso que chega pela parte superior da corda (crista) retorna também pela parte superior (crista). A extremidade livre não oferece resistência à perturbação, permitindo que ela se reflita sem inversão.

Em ambos os casos, o pulso refletido possui a mesma velocidade (em módulo) do pulso incidente.

Exemplo

Exemplo Resolvido: Análise Qualitativa de Reflexão
Problema: Um pulso triangular se propaga em uma corda e atinge uma extremidade. Desenhe o pulso refletido para os seguintes casos:
a) A extremidade da corda está firmemente presa a uma parede. b) A extremidade da corda está presa a um anel que pode deslizar livremente em uma haste vertical.
Resolução:
a) **Extremidade firmemente presa (fixa):** Neste caso, a reflexão ocorre com inversão de fase. Se o pulso incidente é uma crista (para cima), o pulso refletido será um vale (para baixo). A forma do pulso é mantida, mas invertida verticalmente.
b) **Extremidade presa a um anel livre (livre):** Neste caso, a reflexão ocorre sem inversão de fase. Se o pulso incidente é uma crista (para cima), o pulso refletido também será uma crista (para cima). A forma do pulso é mantida, sem inversão vertical.

6.3 Refração em Ondas Unidimensionais

A refração em ondas unidimensionais ocorre quando um pulso passa de uma corda para outra com uma densidade linear diferente, estando as cordas associadas em série. Este fenômeno é sempre acompanhado de reflexão no ponto de junção das cordas.

O pulso refratado (aquele que passa para a segunda corda) não sofre inversão de fase. No entanto, o pulso refletido (aquele que retorna para a primeira corda) pode ou não sofrer inversão de fase, dependendo das densidades lineares das duas cordas.

- Se a primeira corda tiver menor densidade linear (mais leve) que a segunda (mais pesada), o pulso refletido terá fase invertida. A junção se comporta como uma extremidade fixa para o pulso incidente. - Se a primeira corda tiver maior densidade linear (mais pesada) que a segunda (mais leve), o pulso refletido não sofrerá inversão de fase. A junção se comporta como uma extremidade livre para o pulso incidente.

É importante notar que, na refração, a **frequência da onda permanece constante**. No entanto, a velocidade de propagação e o comprimento de onda mudam, pois a velocidade depende da densidade linear do meio. A relação entre as velocidades e os comprimentos de onda nas duas cordas é dada por:

$$\frac{v_1}{\lambda_1} = \frac{v_2}{\lambda_2} \quad \text{ou} \quad f_1 = f_2$$

Onde v_1 e λ_1 são a velocidade e o comprimento de onda na primeira corda, e v_2 e λ_2 são na segunda corda.

Exemplo

Exemplo Resolvido: Associação de Cordas
Problema (Baseado em ER8 do kaz.pdf): A figura representa um trem de ondas periódicas propagando-se com velocidade de 10 m/s, em uma corda AC, de densidade linear $2 \cdot 10^{-1}$ kg/m. Essa corda está associada a uma outra, CB, na qual a velocidade de propagação do trem de ondas passa a ser de 20 m/s. Calcule:
a) a intensidade da força que traciona a associação de cordas; b) a densidade linear da corda CB; c) a frequência da onda; d) o comprimento de onda na corda CB.
Resolução:
a) **Intensidade da força de tração (T):**
A força de tração é a mesma em toda a associação de cordas. Podemos calculá-la usando a Fórmula de Taylor para a corda AC:

$$v_1 = \sqrt{\frac{T}{\mu_1}} \implies v_1^2 = \frac{T}{\mu_1} \implies T = v_1^2 \cdot \mu_1$$

Dados para a corda AC: - Velocidade (v_1) = 10 m/s - Densidade linear (μ_1) = $2 \cdot 10^{-1}$ kg/m = 0.2 kg/m

$$T = (10 \text{ m/s})^2 \cdot 0.2 \text{ kg/m}$$

$$T = 100 \cdot 0.2 \text{ N}$$

$$T = 20 \text{ N}$$

A intensidade da força que traciona a associação de cordas é de 20 N.
b) **Densidade linear da corda CB (μ_2):**
Agora usamos a Fórmula de Taylor para a corda CB, com a tração que acabamos de calcular:

$$v_2 = \sqrt{\frac{T}{\mu_2}} \implies v_2^2 = \frac{T}{\mu_2} \implies \mu_2 = \frac{T}{v_2^2}$$

Dados para a corda CB: - Velocidade (v_2) = 20 m/s - Tração (T) = 20 N

$$\mu_2 = \frac{20 \text{ N}}{(20 \text{ m/s})^2} = \frac{20}{400} \text{ kg/m}$$

$$\mu_2 = 0.05 \text{ kg/m}$$

A densidade linear da corda CB é de 0.05 kg/m.
c) **Frequência da onda (f):**
Na refração, a frequência da onda permanece constante. Podemos calculá-la usando os dados da corda AC e a equação fundamental das ondas ($v = \lambda \cdot f$). No entanto, não temos o comprimento de onda na corda AC. Vamos usar a informação de que a onda se propaga e que a frequência é a mesma em ambas as cordas. Se a figura mostra um comprimento de onda de 1m na corda AC, então:

$$f = \frac{v_1}{\lambda_1} = \frac{10 \text{ m/s}}{1 \text{ m}}$$

$$f = 10 \text{ Hz}$$

A frequência da onda é de 10 Hz.
d) **Comprimento de onda na corda CB (λ_2):**
Agora que temos a frequência e a velocidade na corda CB, podemos calcular o comprimento de onda na corda CB:

$$v_2 = \lambda_2 \cdot f \implies \lambda_2 = \frac{v_2}{f}$$

Dados para a corda CB: - Velocidade (v_2) = 20 m/s - Frequência (f) = 10 Hz

$$\lambda_2 = \frac{20 \text{ m/s}}{10 \text{ Hz}}$$

$$\lambda_2 = 2 \text{ m}$$

O comprimento de onda na corda CB é de 2 metros.

6.4 Polarização em Ondas Unidimensionais

A polarização é um fenômeno que se manifesta apenas em ondas transversais. Em uma onda transversal não polarizada, as vibrações podem ocorrer em múltiplas direções perpendiculares à direção de propagação. A polarização consiste em restringir essas vibrações a uma única direção ou plano.

Em uma corda, por exemplo, se a vibração é inicialmente em vários planos, ao passar por uma fenda estreita (um polarizador), a corda será forçada a vibrar apenas no plano da fenda. Este fenômeno não ocorre com ondas longitudinais, pois suas vibrações já são paralelas à direção de propagação.

6.5 Interferência em Ondas Unidimensionais

A interferência ocorre quando duas ou mais ondas se encontram e se superpõem no mesmo meio. Em ondas unidimensionais, como pulsos em uma corda, a interferência é um exemplo claro da aplicação dos Princípios da Superposição e da Independência das Ondas.

Quando dois pulsos se propagam em sentidos opostos na mesma corda e se encontram, a elongação resultante em cada ponto da corda, no instante do encontro, é a soma algébrica das elongações dos pulsos componentes (Princípio da Superposição). Após o encontro, cada pulso continua a se propagar como se nada tivesse ocorrido, mantendo suas características originais (Princípio da Independência das Ondas).

6.5.1 Interferência Construtiva

A interferência é **construtiva** quando os pulsos se encontram em concordância de fase, ou seja, crista com crista ou vale com vale. Nesse caso, as amplitudes se somam, resultando em um pulso de maior amplitude.

6.5.2 Interferência Destrutiva

A interferência é **destrutiva** quando os pulsos se encontram em oposição de fase, ou seja, crista com vale. Nesse caso, as amplitudes se subtraem. Se as amplitudes forem iguais, o resultado pode ser um cancelamento total, com a amplitude resultante sendo nula no ponto de encontro.

Exemplo

Exemplo Resolvido: Análise de Interferência de Pulsos
Problema: Dois pulsos idênticos, um com amplitude de +A e outro com amplitude de -A, propagam-se em sentidos opostos em uma corda. Descreva o que acontece quando eles se encontram e o que ocorre após o encontro.
Resolução:
Quando os dois pulsos se encontram, ocorre o fenômeno da interferência. De acordo com o Princípio da Superposição, a elongação resultante em cada ponto da corda, no instante do encontro, é a soma algébrica das elongações dos pulsos individuais. Como um pulso tem amplitude +A (crista) e o outro tem amplitude -A (vale), e eles são idênticos em forma, suas amplitudes se cancelam mutuamente no ponto de superposição.
Isso resulta em uma **interferência destrutiva total**, onde a corda, no ponto de encontro, momentaneamente assume a posição de equilíbrio (amplitude nula). A energia dos pulsos não é destruída, apenas redistribuída. Após o encontro, de acordo com o Princípio da Independência das Ondas, cada pulso continua a se propagar em sua direção original, com sua forma e amplitude inalteradas, como se nunca tivessem se encontrado. Eles simplesmente "passam um pelo outro".

7 Ondas Estacionárias

As ondas estacionárias são um tipo especial de padrão de onda que surge da superposição de duas ondas idênticas que se propagam em sentidos opostos no mesmo meio. Diferentemente das ondas progressivas, as ondas estacionárias não transportam energia ao longo do meio, mas sim confinam a energia em regiões específicas, criando pontos de máxima e mínima vibração. Este capítulo explorará a formação, as características e as aplicações das ondas estacionárias.

7.1 Formação de Ondas Estacionárias

As ondas estacionárias são o resultado da combinação de dois fenômenos ondulatórios: a reflexão e a interferência. Quando uma onda progressiva incide sobre uma extremidade de um meio (como uma corda ou um tubo sonoro) e é refletida, ela se superpõe à onda incidente. Se as condições forem adequadas (frequência e amplitude idênticas, propagação em sentidos opostos), essa superposição resulta na formação de uma onda estacionária.

Para visualizar isso, imagine uma corda esticada com uma extremidade fixa e a outra conectada a um vibrador que gera ondas periódicas. As ondas viajam pela corda, atingem a extremidade fixa e são refletidas, retornando em sentido oposto. A interferência contínua entre as ondas incidentes e refletidas, sob certas frequências de vibração, cria um padrão estacionário na corda.

7.2 Características das Ondas Estacionárias

As ondas estacionárias são caracterizadas pela presença de pontos específicos onde a amplitude de vibração é máxima ou nula:

7.2.1 Nós (N)

Os **nós** são os pontos da onda estacionária onde a amplitude de vibração é permanentemente nula. Nesses pontos, ocorre uma interferência destrutiva contínua entre as ondas incidente e refletida, resultando em nenhum deslocamento do meio. Os nós não permitem a transferência de energia ao longo da corda.

7.2.2 Ventres (V)

Os **ventres** são os pontos da onda estacionária onde a amplitude de vibração é máxima. Nesses pontos, ocorre uma interferência construtiva contínua, e o meio oscila com a amplitude máxima possível (que é o dobro da amplitude das ondas componentes, $A_{máx} = 2A$). A energia fica confinada nos ventres, que executam MHS com a mesma frequência da fonte.

7.2.3 Distâncias Características

Em uma onda estacionária, as distâncias entre nós e ventres seguem um padrão regular relacionado ao comprimento de onda (λ) das ondas componentes:

- A distância entre dois nós consecutivos é $\lambda/2$. - A distância entre dois ventres consecutivos é $\lambda/2$. - A distância entre um nó e um ventre consecutivo é $\lambda/4$.

É importante ressaltar que o comprimento de onda da onda estacionária é igual ao comprimento de onda das ondas progressivas que a formam.

Exemplo

Exemplo Resolvido: Análise de Onda Estacionária
Problema (Baseado em ER9 do kaz.pdf): Uma corda vibra no estado estacionário, representado na figura, com frequência de 20 Hz. Determine:

a) o comprimento de onda; b) a velocidade de propagação.

Resolução:

a) **Comprimento de onda (λ):**

Pela figura, observamos que a distância entre dois nós consecutivos é de 50 cm. Sabemos que a distância entre dois nós consecutivos em uma onda estacionária é igual a $\lambda/2$.

$$\frac{\lambda}{2} = 50 \text{ cm}$$

$$\lambda = 100 \text{ cm} = 1 \text{ m}$$

Portanto, o comprimento de onda da onda é de 1 metro.

b) **Velocidade de propagação (v):**

Agora que temos o comprimento de onda ($\lambda = 1$ m) e a frequência ($f = 20$ Hz), podemos usar a equação fundamental das ondas: $v = \lambda \cdot f$.

$$v = 1 \text{ m} \cdot 20 \text{ Hz}$$

$$v = 20 \text{ m/s}$$

A velocidade de propagação da onda é de 20 m/s.

Exemplo

Exemplo Resolvido: Corda Vibrante

Problema (Baseado em ER10 do kaz.pdf): Uma corda, de massa $m = 240$ g e de comprimento $L = 1.2$ m, vibra com frequência de 150 Hz, no estado estacionário esquematizado na figura. Determine a velocidade de propagação da onda e a força tensora na corda.

Resolução:

Primeiro, vamos converter a massa para quilogramas: $m = 240 \text{ g} = 0.24 \text{ kg}$.

1. Determinação do comprimento de onda (λ):

Pela figura, observamos que a corda está vibrando com três "barrigas"(ventres) e quatro nós. O comprimento total da corda (L) corresponde a 3 meios comprimentos de onda ($\lambda/2$).

$$L = 3 \cdot \frac{\lambda}{2}$$

$$1.2 \text{ m} = 3 \cdot \frac{\lambda}{2}$$

$$\lambda = \frac{2 \cdot 1.2}{3} = \frac{2.4}{3} = 0.8 \text{ m}$$

2. Determinação da velocidade de propagação (v):
Com o comprimento de onda ($\lambda = 0.8$ m) e a frequência ($f = 150$ Hz), podemos calcular a velocidade usando a equação fundamental das ondas:

$$v = \lambda \cdot f$$

$$v = 0.8 \text{ m} \cdot 150 \text{ Hz}$$

$$v = 120 \text{ m/s}$$

3. Determinação da força tensora (T):
Para encontrar a força tensora, precisamos da densidade linear (μ) da corda. A densidade linear é dada por $\mu = m/L$.

$$\mu = \frac{0.24 \text{ kg}}{1.2 \text{ m}} = 0.2 \text{ kg/m}$$

Agora, usamos a Fórmula de Taylor: $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \implies T = v^2 \cdot \mu$.

$$T = (120 \text{ m/s})^2 \cdot 0.2 \text{ kg/m}$$

$$T = 14400 \cdot 0.2 \text{ N}$$

$$T = 2880 \text{ N}$$

A velocidade de propagação da onda na corda é de 120 m/s e a força tensora é de 2880 N.

8 Ondas Bidimensionais

As ondas bidimensionais são aquelas que se propagam em uma superfície, como as ondas na superfície da água. O estudo dessas ondas é fundamental para compreender fenômenos como a reflexão, refração, difração e interferência em um contexto de duas dimensões. O Princípio de Huygens, já introduzido, é particularmente útil para analisar o comportamento dessas ondas.

8.1 Frente de Onda e Princípio de Huygens

No estudo das ondas bidimensionais, o conceito de **frente de onda** é central. Uma frente de onda, em um determinado instante, é o conjunto de todos os pontos mais distantes da fonte que estão sendo atingidos pela perturbação. Para uma fonte pontual, as frentes de onda são circulares; para uma fonte extensa, são retilíneas.

As **linhas de onda** são circunferências concêntricas ou segmentos paralelos que estão em concordância de fase com os pontos da frente de onda, separados entre si por um comprimento de onda (λ). O **raio de onda** é um segmento de reta que parte da fonte e é perpendicular à frente de onda, indicando a direção de propagação da energia.

O **Princípio de Huygens** afirma que cada ponto de uma frente de onda pode ser considerado uma fonte secundária de ondas esféricas (ou circulares, em duas dimensões), e a nova frente de onda em um instante posterior é a envoltória (superfície tangente) de todas essas ondas secundárias. Este princípio é essencial para explicar como as ondas se propagam e interagem com obstáculos e aberturas.

Exemplo

Exemplo Resolvido: Aplicação do Princípio de Huygens
Problema: Utilize o Princípio de Huygens para explicar como uma onda plana se propaga através de uma pequena abertura em uma barreira.
Resolução:
Quando uma onda plana incide sobre uma barreira com uma pequena abertura, cada ponto da frente de onda que atinge a abertura atua como uma fonte secundária de ondas circulares, de acordo com o Princípio de Huygens. Essas ondas secundárias se espalham a partir da abertura. A superposição dessas ondas secundárias resulta em uma nova frente de onda que se curva ao passar pela abertura, espalhando-se para a região atrás da barreira. Este é o fenômeno da difração. Se a abertura for muito pequena (comparável ao comprimento de onda), as ondas secundárias se espalharão quase esfericamente a partir da abertura, fazendo com que a onda se propague em todas as direções após passar pela fenda. Se a abertura for maior, o efeito de difração será menos pronunciado, e a onda continuará a se propagar predominantemente em linha reta, mas com as bordas curvadas.

8.2 Reflexão em Ondas Bidimensionais

Quando uma frente de onda bidimensional incide sobre um obstáculo, ela sofre reflexão, retornando ao meio original. A reflexão em ondas bidimensionais obedece à **Lei da Reflexão**, que estabelece que o ângulo de incidência (i) é igual ao ângulo de reflexão (r). Assim como na óptica geométrica, onde raios de luz são usados, aqui trabalhamos com raios de onda, que são perpendiculares às frentes de onda.

Exemplo

Exemplo Resolvido: Cálculo de Ângulos de Reflexão
Problema: Uma frente de onda plana incide sobre uma superfície refletora com um ângulo de 30 graus em relação à normal. Qual será o ângulo de reflexão?
Resolução:
De acordo com a Lei da Reflexão, o ângulo de incidência (i) é igual ao ângulo de reflexão (r).
Dado: - Ângulo de incidência (i) = 30 graus
Então:

$$r = i$$

$$r = 30 \text{ graus}$$

O ângulo de reflexão será de 30 graus.

8.3 Refração em Ondas Bidimensionais

A refração em ondas bidimensionais ocorre quando uma onda passa de uma região para outra com diferentes propriedades, como a profundidade em um líquido. Para ondas mecânicas na água, a velocidade de propagação depende da profundidade. Assim, quando uma onda passa de uma região mais profunda para uma mais rasa (ou vice-versa), ela sofre refração.

Nesse processo, a frequência da onda permanece constante, mas sua velocidade e comprimento de onda mudam. A relação entre os ângulos de incidência e refração, e as velocidades de propagação nos dois meios, é dada pela **Lei de Snell-Descartes**:

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

Onde: - i é o ângulo de incidência. - r é o ângulo de refração. - v_1 é a velocidade de propagação no meio 1. - v_2 é a velocidade de propagação no meio 2.

É importante notar que a velocidade de propagação da onda é maior em regiões mais profundas do que em regiões mais rasas.

Exemplo

Exemplo Resolvido: Refração de Ondas na Água
Problema: Ondas planas se propagam em uma região profunda de um tanque

de água com velocidade de 0.5 m/s. Elas incidem em uma região rasa, onde a velocidade de propagação é de 0.3 m/s, com um ângulo de incidência de 45 graus. Calcule o ângulo de refração.
Resolução:
Utilizamos a Lei de Snell-Descartes: $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}$.
Dados: - Velocidade no meio 1 (profundo), $v_1 = 0.5$ m/s - Velocidade no meio 2 (raso), $v_2 = 0.3$ m/s - Ângulo de incidência, $i = 45$ graus
Queremos encontrar o ângulo de refração (r). Rearranjando a fórmula:

$$\sin r = \frac{v_2}{v_1} \cdot \sin i$$

$$\sin r = \frac{0.3 \text{ m/s}}{0.5 \text{ m/s}} \cdot \sin(45°)$$

$$\sin r = 0.6 \cdot 0.707$$

$$\sin r \approx 0.4242$$

Para encontrar r, usamos a função arco seno:

$$r = \arcsin(0.4242)$$

$$r \approx 25.1 \text{ graus}$$

O ângulo de refração é de aproximadamente 25.1 graus.

8.4 Difração em Ondas Bidimensionais

A difração, a capacidade de uma onda contornar obstáculos ou se espalhar ao passar por aberturas, é um fenômeno particularmente visível em ondas bidimensionais. Como discutido anteriormente, a difração é mais pronunciada quando as dimensões do obstáculo ou da abertura são comparáveis ao comprimento de onda da onda incidente.

O Princípio de Huygens é fundamental para explicar a difração. Cada ponto da abertura se torna uma fonte secundária de ondas, e a superposição dessas ondas secundárias resulta na curvatura da frente de onda ao passar pela abertura, permitindo que a energia se espalhe para regiões que não seriam atingidas por uma propagação retilínea.

Exemplo

Exemplo Resolvido: Análise de Difração
Problema: Por que o som de uma conversa pode ser ouvido ao redor de um canto de uma parede, mas a luz da mesma conversa não pode ser vista?

Resolução:
Este é um exemplo clássico que ilustra a importância da relação entre o comprimento de onda e a dimensão do obstáculo para a ocorrência da difração. O som possui comprimentos de onda que são tipicamente da ordem de metros ou centímetros, o que é comparável às dimensões de uma parede ou de um canto. Quando as ondas sonoras encontram o canto da parede, elas conseguem contorná-lo (difratar), permitindo que o som seja ouvido na região "sombreada"atrás da parede.
Por outro lado, a luz visível possui comprimentos de onda extremamente pequenos, da ordem de nanômetros (10^{-9} m). As dimensões de uma parede são muitas ordens de magnitude maiores do que o comprimento de onda da luz. Consequentemente, a difração da luz ao redor de um canto de parede é desprezível para a percepção humana, e a luz se propaga em linha reta, formando uma sombra nítida. Para que a luz sofra difração perceptível, ela precisaria passar por aberturas ou encontrar obstáculos com dimensões comparáveis ao seu comprimento de onda, como fendas muito estreitas ou redes de difração.

8.5 Interferência em Ondas Bidimensionais

A interferência em ondas bidimensionais é um fenômeno fascinante que ocorre quando duas ou mais ondas se superpõem em uma superfície, criando padrões complexos de reforço e cancelamento. Um exemplo comum é o padrão de interferência gerado por duas fontes pontuais coerentes (com a mesma frequência e fase constante) vibrando na superfície da água.

Nesses padrões, observam-se regiões de **interferência construtiva** (onde cristas se encontram com cristas, ou vales com vales, resultando em amplitudes máximas) e regiões de **interferência destrutiva** (onde cristas se encontram com vales, resultando em amplitudes mínimas ou nulas). Essas regiões formam linhas ou curvas características no padrão de interferência.

Exemplo

Exemplo Resolvido: Análise de Padrão de Interferência
Problema: Duas fontes pontuais idênticas e coerentes geram ondas na superfície da água. Descreva as condições para que ocorra interferência construtiva e destrutiva em um ponto P qualquer na superfície.
Resolução:
Considere duas fontes, S_1 e S_2, e um ponto P na superfície da água. As ondas de cada fonte percorrem distâncias d_1 e d_2 até o ponto P, respectivamente.

Interferência Construtiva:
A interferência construtiva ocorre em um ponto P quando as ondas chegam a esse ponto em concordância de fase, ou seja, crista com crista ou vale com vale. Isso acontece quando a diferença de caminho percorrido pelas ondas de S_1 e S_2 até P é um múltiplo inteiro do comprimento de onda (λ).

$$|d_1 - d_2| = n \cdot \lambda \quad \text{onde } n = 0, 1, 2, 3, \ldots$$

Interferência Destrutiva:
A interferência destrutiva ocorre em um ponto P quando as ondas chegam a esse ponto em oposição de fase, ou seja, crista com vale. Isso acontece quando a diferença de caminho percorrido pelas ondas de S_1 e S_2 até P é um múltiplo ímpar de meio comprimento de onda.

$$|d_1 - d_2| = \left(n + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda \quad \text{onde } n = 0, 1, 2, 3, \ldots$$

Essas condições determinam as linhas de interferência construtiva e destrutiva que formam o padrão observado na superfície da água.

9 Ondas Tridimensionais

As ondas tridimensionais são aquelas que se propagam em todas as direções do espaço, preenchendo um volume. Diferentemente das ondas unidimensionais (que se propagam em uma linha) e bidimensionais (que se propagam em uma superfície), as ondas tridimensionais se expandem esfericamente a partir de sua fonte. Este capítulo abordará as características da propagação tridimensional e a aplicação dos fenômenos ondulatórios nesse contexto.

9.1 Propagação Tridimensional

Em ondas tridimensionais, a energia se espalha por um volume cada vez maior à medida que a onda se afasta da fonte. Isso significa que a intensidade da onda (energia por unidade de área) diminui com a distância da fonte. Exemplos clássicos de ondas tridimensionais incluem as ondas sonoras no ar e as ondas luminosas (eletromagnéticas) no espaço.

Quando uma fonte sonora emite som, ele se propaga em todas as direções, atingindo os ouvidos em diferentes pontos do espaço. Da mesma forma, a luz de uma lâmpada se espalha em todas as direções, iluminando o ambiente ao redor. A representação esquemática da propagação de ondas tridimensionais geralmente mostra frentes de onda esféricas se expandindo a partir da fonte.

9.2 Fenômenos em Ondas Tridimensionais

Os fenômenos ondulatórios discutidos nos capítulos anteriores (reflexão, refração, difração, polarização e interferência) também ocorrem com ondas tridimensionais, embora suas manifestações possam ser mais complexas de visualizar ou analisar. Por exemplo:

- **Reflexão:** Ocorre quando ondas sonoras ou luminosas encontram uma superfície e são refletidas. O eco é um exemplo de reflexão sonora, e a imagem em um espelho é um exemplo de reflexão luminosa. - **Refração:** Acontece quando ondas sonoras ou luminosas passam de um meio para outro com diferentes velocidades de propagação. A refração da luz ao passar do ar para a água, causando a ilusão de que um objeto submerso está em uma posição diferente, é um exemplo comum. - **Difração:** Ondas sonoras podem difratar ao redor de edifícios, permitindo que o som seja ouvido mesmo que a fonte não esteja visível. A difração da luz é observada em fenômenos como a formação de halos ao redor de fontes de luz ou em padrões complexos ao passar por pequenas aberturas. - **Polarização:** A polarização é um fenômeno exclusivo de ondas transversais. Para ondas eletromagnéticas (que são transversais), a polarização é amplamente utilizada em tecnologias como óculos de sol polarizados, telas LCD e antenas de rádio. - **Interferência:** A interferência de ondas sonoras pode levar a regiões de som mais alto (construtiva) e mais baixo (destrutiva). A interferência da luz é responsável por fenômenos como as cores em bolhas de sabão ou em filmes finos de óleo na água.

Embora a análise matemática possa ser mais elaborada para ondas tridimensionais, os princípios físicos subjacentes aos fenômenos ondulatórios permanecem os mesmos, independentemente do número de dimensões da propagação.