

Física: Ondas

TÓPICO 11: Oscilações em cordas e ondas planas

No prosseguimento dos estudos sobre oscilações, esta aula descreve os conceitos básicos sobre ondas em cordas e superfícies líquidas, bem como a sua interação com barreiras físicas. O estudo das ondas em cordas é fundamental para o desenvolvimento de instrumentos musicais, enquanto as ondas planas em líquidos representam um dos modelos mais simples para o estudo de ondas em duas dimensões.

1 Ondas

Ondas representam um dos fenômenos mais importantes da física. Tópicos complexos da natureza, como ondas gravitacionais e a mecânica quântica, e o desenvolvimento de tecnologias, como a internet e painéis solares, são descritos com base nas propriedades da ondulatória. No contexto geral, *uma onda é a transmissão de um sinal entre dois pontos do espaço sem que haja o transporte de matéria*. Nesta aula serão investigadas as propriedades básicas das ondas mecânicas, como uma corda oscilando e gerando ondas longitudinais ou transversais, conforme descrito pela figura 1. Um exemplo típico de cordas vibrantes é a produção de instrumentos musicais de corda como violão, guitarra elétrica etc. Ondas longitudinais são aquelas em que a direção de vibração é a mesma de propagação da onda e ondas transversais são aquelas em que a direção de vibração é transversal (perpendicular) à direção de propagação da onda.

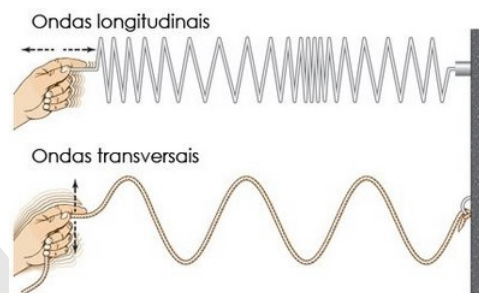


Figura 1: Produção de ondas longitudinais (cima) e transversais (baixo) (Figura retirada de Explicatorium: Características das ondas 2020).

transversal da figura 2. A velocidade de propagação de uma onda pode ser calculada com a equação:

$$v = \lambda f \quad (1)$$

em que f é a frequência da onda. No caso de uma onda eletromagnética (luz), a velocidade de propagação é constante e vale aproximadamente 3×10^8 m/s no vácuo. A velocidade de propagação de uma onda em uma corda é calculada com a equação:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (2)$$

em que T é a tensão aplicada na corda e $\mu = m/L$ a densidade linear de massa, com m e L representando a massa e o comprimento da corda, respectivamente.

2 Ondas progressivas

Independente do tipo da onda, todas apresentam quatro características básicas: frequência, amplitude, comprimento de onda e velocidade de propagação. As duas primeiras propriedades já foram abordadas na aula Oscilações. O comprimento de onda λ é a distância entre dois picos, conforme mostra a onda

Portanto, a onda só é gerada quando a corda está tensionada. Além da onda senoidal, é possível também emitir uma onda no formato de um pulso, como mostra a figura 3. Tanto as ondas transversais quanto as longitudinais são chamadas de ondas progressivas, pois se propagam de um lugar para o outro.

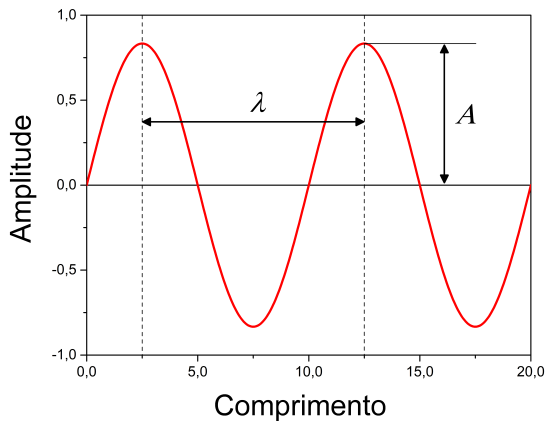


Figura 2: Propriedades de uma onda transversal.

Exercício 1

(UFPR) Um rádio transmissor emite ondas eletromagnéticas com frequência de x MHz. Qual é o comprimento de onda, em metros, da onda transmitida?

RESOLUÇÃO: A solução é dada diretamente pela equação 1:

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

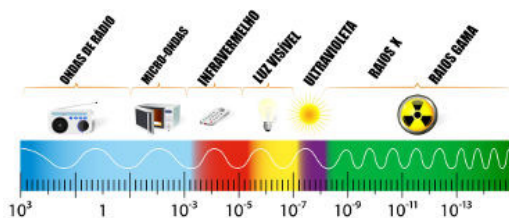
em que $v = 3 \times 10^8$ m/s é a velocidade da luz no vácuo e $f = x$ a frequência da radiação:

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{x}$$

Se uma estação de rádio FM é localizada em 100 MHz, a frequência da onda eletromagnética emitida pelo transmissor é:

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{100 \times 10^6} = 3 \text{ m}$$

que compreende a região das ondas de rádio no espectro eletromagnético, conforme mostra a figura (a escala horizontal representa comprimento de onda em metros).



Obs.: a figura foi retirada de Brasil Escola: O que é espectro eletromagnético? 2020

Problema 1

(ACAFE) A velocidade escalar de uma onda transversal que se propaga num fio é de 100 m/s. Quando essa onda passa para um outro fio, constituído do mesmo material, porém com 1/4 do diâmetro do primeiro, a velocidade de propagação da onda, em m/s, muda para:

- (a) 80
- (b) 600
- (c) 25
- (d) 1600
- (e) 400

RESOLUÇÃO: Este problema está exemplificado na figura 8. O enunciado deixa claro que o material é o mesmo após a onda ser refratada para o fio mais fino. Isso significa que a densidade volumétrica do material da corda é o mesmo. A velocidade da onda na corda espessa é dada pela equação 2:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} = \sqrt{\frac{T}{m/L}} \quad (3)$$

em que m é a massa da corda e L o seu comprimento. A massa m pode ser também escrita como:

$$m = \rho V$$

em que ρ representa a densidade volumétrica da corda e V o seu volume. Considerando que a corda pode ser representada por um cilindro, o volume é escrito como $V = AL = (\pi d^2/4)L$, com A representando a área da seção reta da corda e d o seu diâmetro.

Substituindo estas relações na equação 3, a velocidade é dada pela equação:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\rho V/L}} = \sqrt{\frac{4T}{\pi \rho d^2}} \quad (4)$$

Como a corda mais fina possui diâmetro 1/4 menor, a velocidade da onda é dada pela equação 4:

$$v = \sqrt{\frac{4T}{\pi \rho (d/4)^2}} = 4 \sqrt{\frac{4T}{\pi \rho d^2}} \quad (5)$$

indicando que a redução do diâmetro em quatro vezes, quadruplica a velocidade. Assim, se a velocidade na corda espessa é 100 m/s, a equação 5 mostra que a velocidade na corda mais fina vale:

$$v = 4 \sqrt{\frac{4T}{\pi \rho d^2}} = 4(100) = 400 \text{ m/s} \quad (6)$$

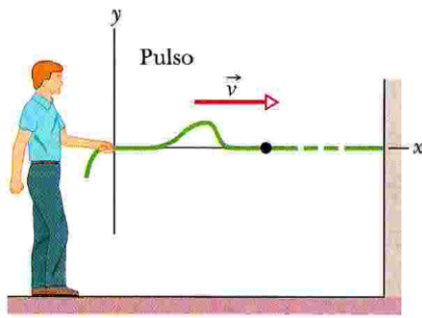


Figura 3: Um pulso isolado é produzido em uma corda esticada. Um elemento típico da corda (assinalado com um ponto) se desloca para cima e depois para baixo quando o pulso passa por ele. Como o movimento do elemento é perpendicular à direção de propagação da onda, o pulso é uma onda transversal (Figura retirada de Halliday, Resnick e Walker, 2009).

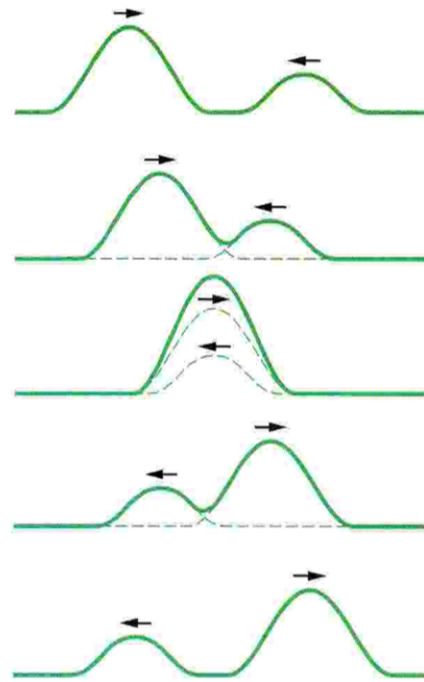


Figura 4: Uma série de instantâneos que mostra dois pulsos se propagando em sentidos opostos em uma corda esticada. O princípio da superposição se aplica quando os pulsos passam um pelo outro (Figura retirada de Halliday, Resnick e Walker, 2009).

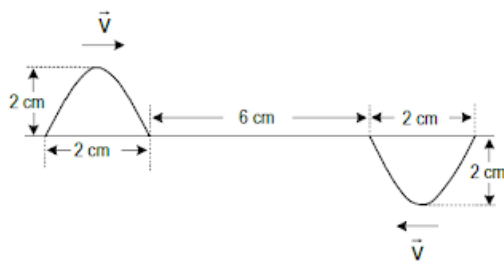
sendo, portanto, o item (e) a alternativa correta.

3 Interferência

Se duas ou mais ondas se propagam na corda, haverá a interferência que produzirá um sinal construtivo (soma das amplitudes) ou destrutivo (subtração das amplitudes). A figura 4 ilustra dois pulsos em sentidos opostos sobre uma corda, e quando passam um pelo outro, é realizada a soma das amplitudes.

Problema 2

(UFSC) A figura representa dois pulsos de onda, inicialmente separados por 6,0 cm, propagando-se em um meio com velocidades iguais a 2,0 cm/s, em sentidos opostos.



Considerando a situação descrita, assinale a(s) proposição(ões) **correta(s)**:

- 01. Inicialmente as amplitudes dos pulsos são idênticas e iguais a 2,0 cm.
- 02. Decorridos 8,0 segundos, os pulsos continuarão com a mesma velocidade e forma de onda, independentemente um do outro.

04. Decorridos 2,0 segundos, haverá sobreposição dos pulsos e a amplitude será nula nesse instante.

08. Decorridos 2,0 segundos, haverá sobreposição dos pulsos e a amplitude será máxima nesse instante e igual a 2,0 cm.

16. Quando os pulsos se encontrarem, haverá interferência de um sobre o outro e não mais haverá propagação dos mesmos.

RESOLUÇÃO:

01. Correta. A amplitude de 2,0 cm é identificada como a altura dos pulsos.

02. Correta. O pulso com a amplitude positiva possui velocidade constante de 2,0 cm/s para direita. Considerando que o pico do pulso está 1,0 cm da origem (assumindo o lado esquerdo do pulso como a origem do sistema de coordenadas), sua posição em função do tempo é dada pelo MRU:

$$x_1 = x_{01} + v_1 t$$

em que x_1 é a posição final do pico, $x_{01} = 1,0$

cm e $v_1 = 2,0$ cm/s:

$$x_1 = 1,0 + (2,0)t \quad (7)$$

Similarmente para o pulso com amplitude negativa:

$$x_2 = 9,0 - (2,0)t \quad (8)$$

Quando os picos dos pulsos tiverem a mesma coordenada x , haverá interferência destrutiva. Para determinar o instante em que isso ocorre, basta igualar $x_1 = x_2$ nas equações 7 e 8:

$$1,0 + (2,0)t = 9,0 - (2,0)t \quad \therefore t = 2,0 \text{ s}$$

indicando que os pulsos estão em aproximação antes de 2,0 s e em afastamento após 2,0 s. Logo, as ondas possuem a mesma velocidade e forma de onda em 8,0 s. A interferência em 2,0 s não afeta as propriedades das ondas individuais.

04. Correta. Demonstrado no item anterior.

08. Incorreta. Demonstrado no item 02.

16. Incorreta. A interferência não afeta as propriedades das ondas individuais.

Portanto, a soma dos itens corretos é 7.

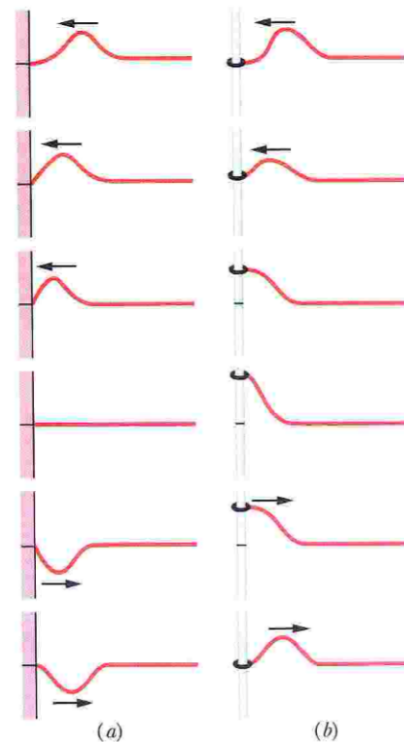


Figura 5: (a) Um pulso proveniente da direita é refletido na extremidade esquerda da corda, que está amarrada em uma parede. (b) A extremidade esquerda da corda está amarrada em um anel que pode deslizar sem atrito ao longo de uma barra, e o pulso não é invertido após a reflexão (Figura retirada de Halliday, Resnick e Walker, 2009).

4 Reflexão

Se uma das extremidades está fixa, conforme mostra a figura 5(a), o pulso é refletido e sofre inversão. Se uma extremidade está presa em um anel que pode deslizar sem atrito para cima e para baixo em uma barra, conforme mostra a figura 5(b), o pulso é refletido sem inversão.

FIQUE LIGADO

A velocidade, comprimento de onda e frequência não mudam após a reflexão, e o ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência.

A reflexão também pode ocorrer com ondas planas, como mostra a figura 6. Um exemplo são ondas geradas na superfície de um líquido, cujas frentes de onda são planos paralelos entre si e perpendiculares à direção da velocidade de propagação, *i.e.*, são ondas transversais. A figura 6 mostra uma onda plana com direção de propagação R , velocidade inicial v e comprimento de onda λ . Cada linha representa uma frente da onda ou o pico de máximo da função seno da figura 2, pois a distância entre dois planos representa o comprimento de onda λ . Cada plano forma um ângulo

de incidência i com a horizontal. Após reflexão com a superfície, os planos passam a se propagarem com um ângulo $r = i$ em relação à superfície responsável de contato e direção de propagação R' . As demais propriedades são conservadas.

Problema 3

(UFC) A figura mostra duas fotografias de um mesmo pulso que se propaga em uma corda de 15 m de comprimento e densidade linear uniforme, tensionada ao longo da direção x . As

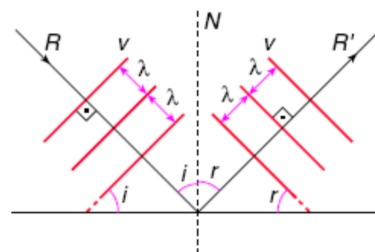
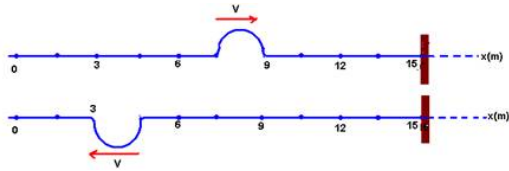


Figura 6: Reflexão de ondas planas (Figura retirada de Professor Nelson Luiz Reyes Marques: Tópicos de física 2 2020).

fotografias foram tiradas em dois instantes de tempo, separados de 1,5 s. Durante esse intervalo de tempo, o pulso sofreu uma reflexão na extremidade da corda que está fixa na parede P.



Observando as fotografias, verificamos que a velocidade de propagação do pulso na corda, suposta constante é:

- (a) 4 m/s
- (b) 6 m/s
- (c) 8 m/s
- (d) 10 m/s
- (e) 12 m/s

RESOLUÇÃO: Na figura superior, o início do pulso está localizado em 9 m. Considerando que o movimento é um MRU, o tempo que a onda leva para atingir a parede é dada por:

$$x^{ida} = x_0^{ida} + vt^{ida}$$

em que $x_0^{ida} = 9 \text{ m}$ e $x^{ida} = 15 \text{ m}$:

$$15 = 9 + vt^{ida}$$

$$t^{ida} = \frac{6}{v}$$

Similarmente, o tempo que este ponto leva para ir da parede até a coordenada 3 m é dado por:

$$3 = 15 - vt^{volta}$$

$$t^{volta} = \frac{12}{v}$$

O enunciado diz que o intervalo entre as duas posições equivale 1,5 s; portanto:

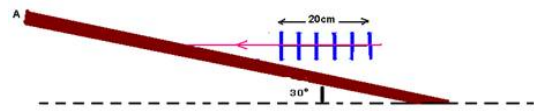
$$t^{ida} + t^{volta} = \frac{6}{v} + \frac{12}{v} = 1,5 \text{ s}$$

$$\frac{18}{v} = 1,5 \quad \therefore v = 12 \text{ m/s}$$

sendo, portanto, o item (e) a alternativa correta. Note que na ida e volta, o módulo da velocidade do pulso é a mesma; entretanto, há inversão do sinal após a reflexão.

Problema 4

(UFB) As frentes de ondas sucessivas emitidas por uma fonte F, possuem velocidade de 10 m/s, incidem no anteparo A da figura, onde está representado o raio de onda incidente, e são refletidas.



- (a) Determine o comprimento de onda das ondas refletidas.
- (b) Qual é a frequência das ondas refletidas?
- (c) Represente numa figura, o raio de onda refletido, os ângulos de incidência e de reflexão e as frentes de ondas refletidas.

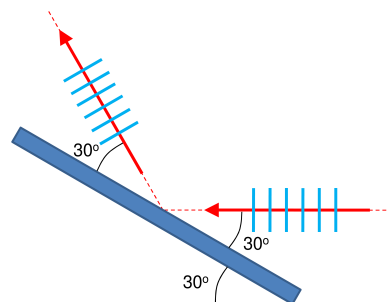
RESOLUÇÃO:

(a) As ondas incidentes e refletidas possuem o mesmo comprimento de onda. A figura mostra 5 ondas dentro dos 20 cm. Assim, cada onda possui $20/5 = 4,0 \text{ cm}$ de comprimento.

(b) As ondas incidentes e refletidas possuem a mesma frequência. Como a velocidade de propagação vale 10 m/s antes e após a reflexão, a frequência é dada pela equação 1:

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{10}{4,0} = 2,5 \text{ Hz}$$

(c) A figura é apresentada a seguir. Os ângulos de incidência e reflexão, em relação à superfície que interage com a onda, são os mesmos.



5 Refração

A refração ocorre quando o pulso se propaga de um meio para o outro. Para ondas em cordas, este fenômeno está presente, por exemplo, na mudança da composição da corda em algum ponto, conforme

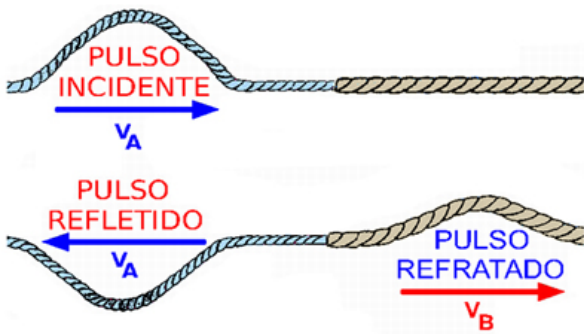


Figura 7: Pulso se propagando da corda fina para a corda espessa (Figura retirada de Alunos Online: Refração de ondas em uma corda 2020). Neste caso, $v_A > v_B$.

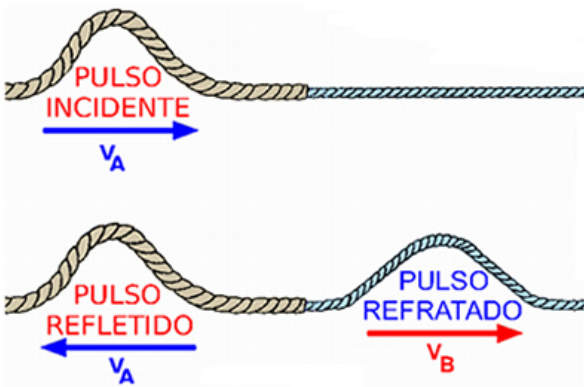


Figura 8: Pulso se propagando da corda espessa para a corda fina (Figura retirada de Alunos Online: Refração de ondas em uma corda 2020). Neste caso, $v_B > v_A$.

mostra a figura 7. Um pulso se propaga para direita por meio de uma corda mais fina. Ao atingir a união com uma corda mais espessa, parte do pulso é refletida e a outra é refratada. Sempre que um pulso se propaga de uma corda mais fina para uma mais grossa, o pulso refletido é invertido. Quando o pulso propaga da corda mais espessa para a mais fina, não há inversão dos pulsos, conforme mostra a figura 8. Após o pulso refletido atingir o nó que une as cordas, ocorre a mudança de velocidade do pulso refratado.

A refração de ondas planas é ilustrada na figura 9. Uma onda com comprimento de onda λ_1 , velocidade v_1 e direção de propagação R sofre refração na interface entre os meios 1 e 2. O feixe refratado adquire comprimento de onda λ_2 , velocidade v_2 e direção de propagação R' . As frentes de onda incidentes formam um ângulo i_1 com a horizontal e após a refração adquirem ângulo i_2 . No mar, por exemplo, as ondas podem sofrer refração ao se movimentarem de um meio mais fundo para um meio mais raso. A relação entre as grandezas nos meios 1 e 2 é descrita pela lei de Snell:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (9)$$

Como $v = \lambda f$, a segunda igualdade da equação 9

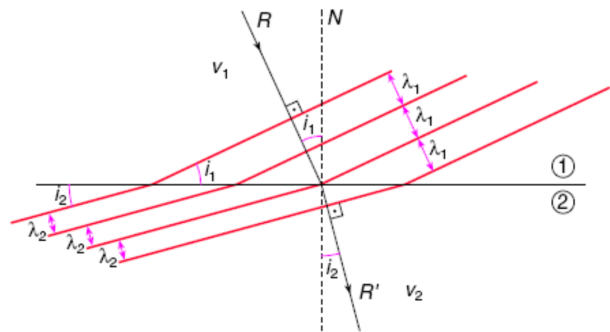


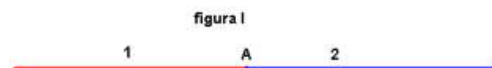
Figura 9: Refração de ondas planas (Figura retirada de Professor Nelson Luiz Reyes Marques: Tópicos de física 2 2020).

mostra que a frequência da onda permanece constante após a refração:

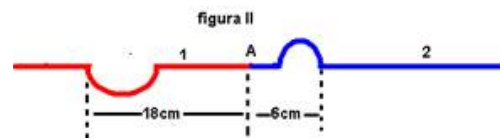
$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1 f}{\lambda_2 f} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

Problema 5

(UFB) Considere as duas cordas 1 e 2 (figura I), de densidades lineares diferentes onde o ponto A é a junção dessas duas cordas.



Um pulso incidente é gerado em uma delas e, ao atingir A, gera outros dois, cujo perfil das ondas é mostrado na figura II, 2 s após o pulso incidente ter atingido A.



Pede-se:

- Copie a figura I, esboce o pulso e justifique sua resposta.
- Calcule a intensidade da força de tração T nas duas cordas sabendo que a densidade linear de massa da corda 1 é $\mu_1 = 0,1 \text{ g/cm}$.
- Calcule a densidade linear de massa da corda 2.

RESOLUÇÃO:

- Os pulsos antes e após a refração estão representados na figura 7.

(b) Com 2 s após o pulso incidente ter atingido o ponto A, a frente do pulso refratado está 6 cm do ponto A, enquanto a frente do pulso do pulso refletido está 18 cm do ponto A. Como a velocidade de propagação é constante, a velocidade destes pulsos é, respectivamente:

$$v_{\text{refratado}} = \frac{0,06}{2} = 0,03 \text{ m/s}$$

$$v_{\text{refletido}} = \frac{0,18}{2} = 0,09 \text{ m/s}$$

A tração é a mesma nas duas cordas e a velocidade de propagação muda apenas porque existe mudança na densidade linear da corda. Como o enunciado fornece a densidade da corda 1, a tração pode ser calculada pela equação 2:

$$T = \mu_1 v_{\text{refletido}}^2$$

$$T = (0,01)(0,09)^2 = 81 \mu\text{N}$$

em que $\mu_1 = 0,1 \text{ g/cm} = 0,01 \text{ kg/m}$.

(c) Para isso, basta aplicar a equação 2 considerando a velocidade do pulso refratado:

$$\mu_2 = \frac{T}{v_{\text{refratado}}^2} = \frac{81 \times 10^{-6}}{(0,03)^2} = 0,09 \text{ kg/m}$$

que também representa 0,9 g/cm.

Problema 6

(UNIRIO) Um vibrador produz ondas planas na superfície de um líquido com frequência $f = 10 \text{ Hz}$ e comprimento de onda $\lambda = 28 \text{ cm}$. Ao passarem do meio I para o meio II, como mostra a figura, foi verificada uma mudança na direção de propagação das ondas.

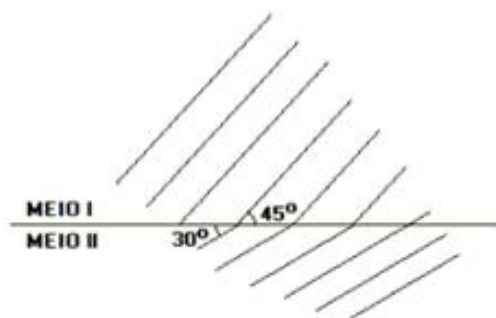
Dados:

$$\sin 30^\circ = \cos 60^\circ = 1/2$$

$$\sin 60^\circ = \cos 30^\circ = \sqrt{3}/2$$

$$\sin 45^\circ = \cos 45^\circ = \sqrt{2}/2$$

Considere $\sqrt{2} = 1,4$



No meio II, os valores da frequência e do

comprimento de onda serão, respectivamente, iguais a:

- (a) 10 Hz; 14 cm
- (b) 10 Hz; 20 cm
- (c) 10 Hz; 25 cm
- (d) 15 Hz; 14 cm
- (e) 15 Hz; 25 cm

RESOLUÇÃO: A frequência permanece constante mediante a refração (10 Hz). Isso indica que a alternativa correta está entre os itens (a), (b) e (c). O novo comprimento de onda é dado pela equação 9:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

em que $i_1 = 45^\circ$, $i_2 = 30^\circ$ e $\lambda_1 = 28 \text{ cm}$:

$$\frac{\sin 45^\circ}{\sin 30^\circ} = \frac{28}{\lambda_2}$$

que fornece $\lambda_2 = 20 \text{ cm}$. Portanto, a alternativa correta é o item (b).

6 Polarização

Além da interferência, reflexão e refração, a onda pode também sofrer polarização. Este fenômeno ocorre quando uma onda transversal tem uma de suas direções de vibração impedidas de oscilar após passar por um polarizador. A figura 10 ilustra uma onda passando por dois polarizadores. No primeiro caso, a direção do polarizador é paralela à direção de oscilação da corda e a onda não sofre alterações. No segundo caso, a direção de polarização é perpendicular à direção de oscilação da corda e a onda não passa pela fenda. Ondas longitudinais não podem ser polarizadas (figura 11).

Exercício 2

(ACAFE) A luz é formada por ondas transversais. O fenômeno que comprova esta afirmação denomina-se:

- (a) Reflexão
- (b) Interferência
- (c) Polarização
- (d) Difração
- (e) Refração

RESOLUÇÃO: Para detectar se uma onda é ou não transversal, deve-se medir a intensidade da onda com e sem polarizador. Se for observada

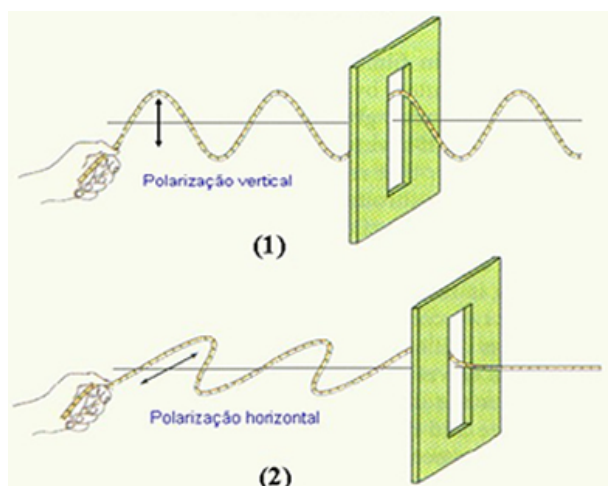


Figura 10: Na situação 1, a onda polarizada no plano vertical passa através da fenda. Na situação 2, a onda polarizada no plano horizontal não passa através da fenda (Figura retirada de Brasil Escola: Polarização de ondas 2020).

a diferença entre os sinais, a onda é classificada como transversal; caso contrário, é longitudinal. Neste caso, a alternativa correta é o item (c): Polarização.

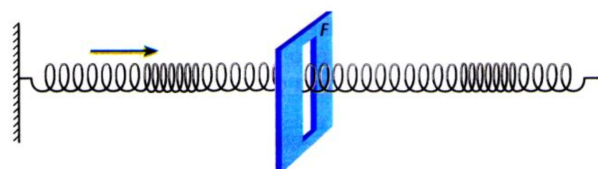


Figura 11: Ondas longitudinais não sofrem polarização (Figura retirada de Professor Nelson Luiz Reyes Marques: Tópicos de física 2 2020).

RESOLUÇÃO:

I. Incorreta. A polarização ocorre apenas com ondas transversais.

II. Incorreta. Ocorrem com ondas transversais e longitudinais.

III. Incorreta. Embora ondas eletromagnéticas não sejam descritas nesta aula, elas são ondas transversais.

IV. Incorreta. Em qualquer situação, a onda polarizada tem a mesma direção do polarizador.

Portanto, a alternativa correta é o item (a).

Problema 7

(ITA) Considere as afirmativas:

I. Os fenômenos de interferência, difração e polarização ocorrem com todos os tipos de onda.

II. Os fenômenos de interferência e difração ocorrem apenas com ondas transversais.

III. As ondas eletromagnéticas apresentam o fenômeno de polarização, pois são ondas longitudinais.

IV. Um polarizador transmite as componentes da luz incidente não polarizadas, cujo vetor campo elétrico E é perpendicular à direção de transmissão do polarizador.

Está(ão) correta(s):

- (a) nenhuma das afirmativas.
- (b) apenas a afirmativa I.
- (c) apenas a afirmativa II.
- (d) apenas as afirmativas I e II.
- (e) apenas as afirmativas I e IV.

7 Difração

Difração é o desvio sofrido por uma onda quando ela passa por um obstáculo. Este fenômeno obedece o chamado princípio de Huygens, que estabelece que cada ponto de uma frente de onda se comporta como uma fonte secundária de ondas. A figura 12 ilustra uma fonte primária gerando ondas circulares (imagine uma pedra caindo na superfície de um lago). A frente de onda no instante t_1 mostra vários pontos que se comportam como novas fontes de ondas circulares, onde a frente de onda no instante t_2 é formada pela soma de todas as pequenas frentes de ondas produzidas no instante t_1 .

Se uma fenda é colocada na frente de onda, apenas alguns pontos poderão seguir o caminho linear enquanto os demais serão refletidos, conforme mostra a figura 13. Desta forma, o sinal que passa pela fenda possui geometria circular; entretanto, este padrão é observado apenas quando a espessura da fenda é da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda. Conforme a largura vai aumentando, em relação ao comprimento de onda, a onda mantém o mesmo padrão antes do contato com a fenda, como mostra a figura 14.

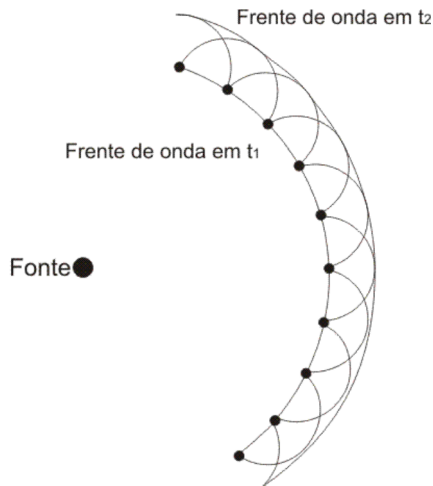


Figura 12: Princípio de Huygens (Figura retirada de Só Física: Princípio de Huygens 2020).

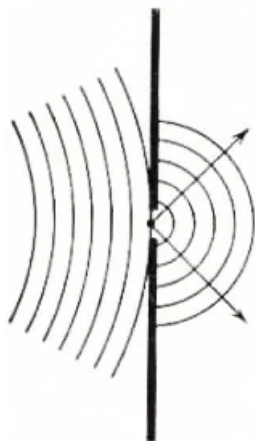


Figura 13: Difração em uma fenda (Figura retirada de Blog do ENEM: Fenômenos Ondulatórios – Física para vestibular e Enem 2020).

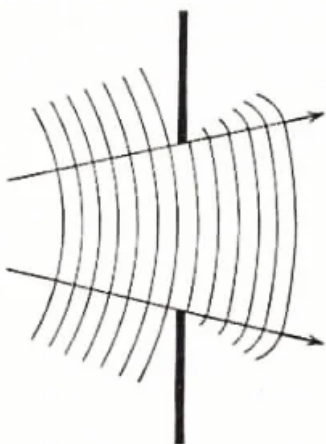
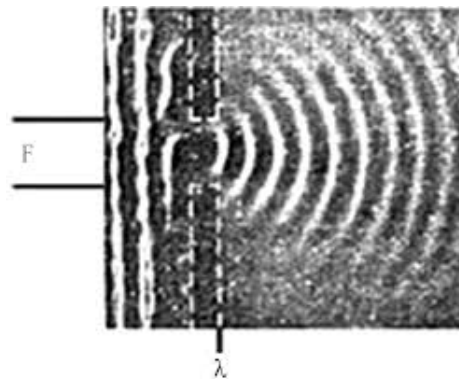


Figura 14: Difração em uma fenda larga (Figura retirada de Blog do ENEM: Fenômenos Ondulatórios – Física para vestibular e Enem 2020).

Exercício 3

(UFRGS) Um trem de ondas planas de comprimento de onda, que se propaga para a direita em uma cuba com água, incide em um obstáculo que apresenta uma fenda de largura F . Ao passar pela fenda, o trem de ondas muda sua forma, como se vê na fotografia abaixo. Qual é o fenômeno físico que ocorre com a onda quando ela passa pela fenda?



- (a) Difração
- (b) Dispersão
- (c) Interferência
- (d) Reflexão
- (e) Refração

RESOLUÇÃO: Conforme descrito na seção, é a difração. Portanto, a alternativa correta é o item (a).

8 Ondas estacionárias

Quando duas ondas com mesma frequência, comprimento de onda, amplitude e sentidos contrários se superpõem, ocorre a formação de uma figura de interferência chamada *onda estacionária*. A figura 15(a) ilustra uma onda progressiva para esquerda e a figura 15(b) uma onda progressiva para direita. A soma das ondas é ilustrada na figura 15(c). O resultado é uma onda estacionária, *i.e.*, ela não se move para esquerda ou direita. Existe apenas o movimento horizontal dos picos, chamados de **antinós**. Os quatro pontos apresentados na onda resultante são chamados de **nós** e a principal característica destes pontos é que eles são imóveis.

A situação cotidiana mais simples de uma onda estacionária é a vibração da corda de um violão: as ondas produzidas numa extremidade da corda se superpõem com as ondas refletidas da outra extremidade. Para certas frequências a interferência produz uma onda estacionária (ou modo de oscilação) com nós e antinós. Uma onda estacionária é gerada

sempre que ela oscila na frequência de ressonância. Se a corda é excitada em qualquer outra frequência, não é formada uma onda estacionária e não há emissão de som (esse tema será discutido na próxima aula).

Para determinar a frequência de ressonância, considere uma corda presa em duas extremidades separadas por uma distância L . No caso mais simples de ressonância, deve existir apenas dois nós, sendo um em cada presilha, e um antinó, conforme mostra a figura 16(a). Neste caso, o comprimento L representa meio comprimento de onda, *i.e.*, $L = \lambda/2$. Na figura 16(b) existem três nós e dois antinós, e $L = \lambda$. Na figura 16(c) existem quatro nós e três antinós, e $L = 3\lambda/2$. Note que em cada situação foi adicionado meio comprimento de onda. Se continuarmos essa adição por n vezes, o comprimento L pode ser escrito como:

$$L = n \frac{\lambda}{2} \text{ com } n = 1, 2, 3, \dots \quad (10)$$

Como a onda estacionária é produzida pela soma de duas ondas progressivas, a frequência pode ser calculada com a equação 1:

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

em que v é a velocidade das ondas progressivas e λ é dado pela equação 10:

$$f = n \frac{v}{2L} \text{ com } n = 1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

A equação 11 mostra que as frequências de ressonância são múltiplos inteiros da menor frequência de ressonância ($n = 1$). O modo de oscilação nesta condição é chamada de *modo fundamental* ou *primeiro harmônico*. O *segundo harmônico* é o modo de oscilação com $n = 2$, o *terceiro harmônico* é o modo com $n = 3$ e assim por diante. O conjunto de todos os modos de oscilação é chamado de **série harmônica** em que n é chamado de **número harmônico** do n -ésimo harmônico (Halliday, Resnick e Walker, 2009).

FIQUE LIGADO

Ressonância é um fenômeno onde a amplitude de algum sistema em oscilação aumenta de forma descontrolada. Se um sistema massa-mola oscilar nesta condição, chegará o instante em que a mola sofrerá deformação plástica e perderá sua funcionalidade. Em ondas estacionárias, a amplitude possui um valor máximo já que a corda está presa nas duas extremidades. Durante as frequências de ressonância dadas pela equação 11, a corda oscila com esta amplitude.

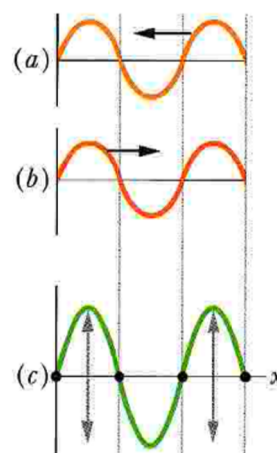


Figura 15: Onda se propagando para (a) esquerda, (b) direita e (c) a soma das anteriores para formação de uma onda estacionária (Halliday, Resnick e Walker, 2009).

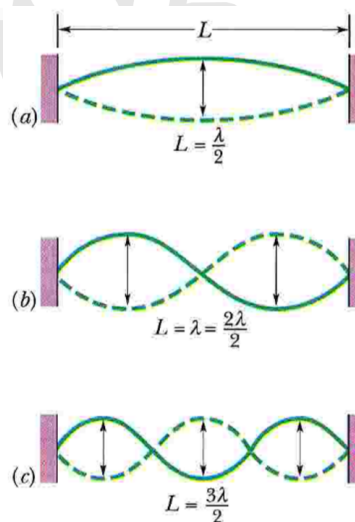
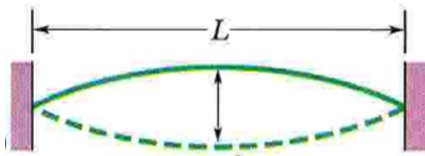


Figura 16: Onda estacionária com oscilação no (a) primeiro ($n = 1$), (b) segundo ($n = 2$) e (c) terceiro ($n = 3$) harmônico (Halliday, Resnick e Walker, 2009).

Exercício 4

(SUPRA) Música é pura física. Quando você percutir as cordas de um violão, provoca vibrações de várias frequências, que se propagam através do ar chegando ao ouvido, que transforma estas oscilações em impulsos elétricos recebidos pelo cérebro, causando sensação agradável. A corda de um violão vibra conforme indicado na figura.



O comprimento de onda da onda que está se propagando na corda, em termos do comprimento L , é:

- (a) $L/4$
- (b) $2L$
- (c) L
- (d) $L/2$
- (e) $4L$

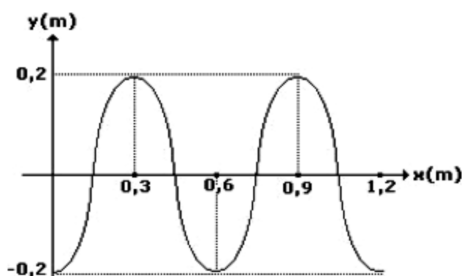
RESOLUÇÃO: A figura apresenta o primeiro harmônico. A resposta é obtida de forma direta considerando $n = 1$ na equação 10:

$$L = n \frac{\lambda}{2} \therefore \lambda = 2L$$

sendo, portanto, o item (b) a alternativa correta.

Problema 8

(UCS) Um dispositivo oscila com frequência de 60 Hz e produz, numa corda, uma onda estacionária como a do gráfico abaixo. Com base nessas informações e observando o gráfico, é correto afirmar que a velocidade de propagação da onda na corda vale:



- (a) 46 m/s
- (b) 26 m/s
- (c) 36 m/s
- (d) 16 m/s

- (e) 56 m/s

RESOLUÇÃO: A figura mostra duas ondas em um comprimento $L = 1,2$ m. Isso indica que essa onda está no quarto harmônico ($n = 4$). Com a equação 10 o comprimento de onda é dado por:

$$\lambda = \frac{2L}{n} = \frac{2(1,2)}{4} = 0,6 \text{ m}$$

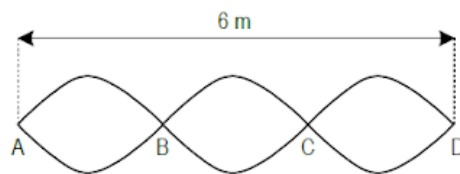
que está em acordo com o valor lido diretamente no gráfico. Como a frequência da onda vale 60 Hz, a velocidade é calculada com a equação 1:

$$v = \lambda f = (0,6)(60) = 36 \text{ m/s}$$

sendo, portanto, o item (c) a alternativa correta. Este valor poderia ser calculado também pela equação 10.

Problema 9

(UFRGS) A figura mostra uma onda estacionária em uma corda. Os pontos A, B, C e D são nodos e a distância entre os nodos A e D é de 6 m. A velocidade de propagação das ondas que resultam na onda estacionária, nesta corda, é de 10 m/s.



A frequência da onda estacionária vale, em hertz:

- (a) 10
- (b) 5
- (c) 2,5
- (d) 1,66
- (e) 1,25

RESOLUÇÃO: A distância entre os nodos A e D representam o comprimento L . A distância entre os nodos A e C representam um comprimento de onda e a distância entre os nodos C e D representam meio comprimento de onda, totalizando uma onda e meia para $L = 6$ m. Desta forma, a onda estacionária está no terceiro harmônico ($n = 3$). Com a equação 11, a frequência de oscilação é dada por:

$$f = n \frac{v}{2L} = 3 \frac{10}{2(6)} = 2,5 \text{ Hz}$$

sendo, portanto, o item (c) a alternativa correta.

COLABORADORES DESTA AULA

- **Texto:**
Diego Alexandre Duarte
- **Diagramação:**
Diego Alexandre Duarte
- **Revisão:**
Maria Simone Kugeratski Souza

Referências Bibliográficas

- Alunos Online: Refração de ondas em uma corda* (2020). URL: <https://alunosonline.uol.com.br/fisica/refracao-ondas-uma-corda.html> (acesso em 11/06/2020).
- Blog do ENEM: Fenômenos Ondulatórios – Física para vestibular e Enem* (2020). URL: <https://blogdoenem.com.br/fenomenos-ondulatorios-fisica-enem/> (acesso em 19/06/2020).
- Brasil Escola: O que é espectro eletromagnético?* (2020). URL: <https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-espectro-eletromagnetico.htm> (acesso em 11/06/2020).
- Brasil Escola: Polarização de ondas* (2020). URL: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/polarizacao-ondas.htm> (acesso em 11/06/2020).
- Explicatorium: Características das ondas* (2020). URL: <http://www.explicatorium.com/cfq-8/caracteristicas-das-ondas.html> (acesso em 11/06/2020).
- Halliday, D., R. Resnick e J. Walker (2009). *Fundamentos de Física 2 (Gravitação, Ondas e Termodinâmica)*. Vol. 2. Rio de Janeiro: LTC.
- Professor Nelson Luiz Reyes Marques: Tópicos de física 2* (2020). URL: <https://nelsonreyes.com.br> (acesso em 11/06/2020).
- Só Física: Princípio de Huygens* (2020). URL: <https://www.sofisica.com.br/conteudos/Ondulatoria/Ondas/principiodehuygens.php> (acesso em 19/06/2020).

9 Lista de Problemas

1. (FAMECA) Para diagnosticar uma lesão em determinado tecido humano, é usado um ultrassonógrafo cujas ondas vibram com frequência de 10^{15} kHz. Essas ondas percorrem 1,0 cm de tecido em $0,1 \mu\text{s}$. O comprimento de onda dessas ondas é, em Å, da ordem de (1 angstrom = $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$).

- (a) 10^{-5}
- (b) 10^{-3}
- (c) 10^{-1}
- (d) 10
- (e) 10^5

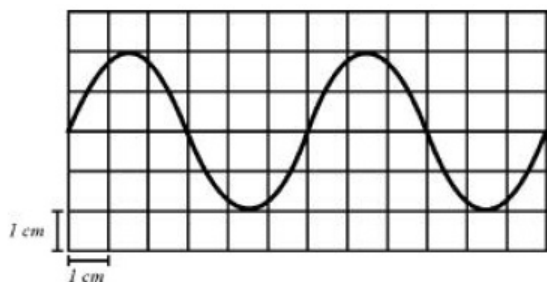
2. (UFU) Sabe-se que a velocidade v de propagação de uma onda em uma corda é dada por $v = F/\mu$, em que F é a tensão na corda e μ , a densidade linear de massa da corda (massa por unidade de comprimento).

Uma corda grossa tem uma de suas extremidades unidas à extremidade de uma corda fina. A outra extremidade da corda está amarrada a uma árvore. Clara segura a extremidade livre da corda grossa.

Fazendo oscilar a extremidade da corda quatro vezes por segundo, Clara produz uma onda que se propaga em direção à corda fina. Na sua brincadeira, ela mantém constante a tensão na corda. A densidade linear da corda grossa é quatro vezes maior que a da corda fina. Considere que as duas cordas são muito longas.

Com base nessas informações:

- (a) determine a razão entre as frequências das ondas nas duas cordas e justifique sua resposta;
 - (b) determine a razão entre os comprimentos de onda das ondas nas duas cordas.
3. (SUPRA) Os surfistas conseguem se deslocar porque navegam transversalmente ao sentido de propagação das ondas do mar que os empurra para a praia. Esta propagação ondulatória está associada ao movimento periódico das partículas do meio onde ela se propaga. A característica do movimento ondulatório é:
 - (a) Transportar energia apenas em determinada faixa de temperatura.
 - (b) O transporte de matéria sem o transporte de energia.
 - (c) O transporte de matéria e de energia.
 - (d) Não transportar nem matéria nem energia.
 - (e) O transporte de energia sem o transporte de matéria.
 4. (UFPB) Em um dado instante, a forma de uma corda por onde se propaga uma onda é indicada na figura abaixo:



Com base nos dados obtidos da figura e sabendo-se que a velocidade de propagação da onda é de 120 cm/s, pode-se concluir que seu comprimento de onda e frequência são dados, respectivamente, por:

- (a) 6 cm e 40 Hz
 - (b) 3 cm e 40 Hz
 - (c) 9 cm e 10 Hz
 - (d) 6 cm e 20 Hz
 - (e) 3 cm 20 Hz
5. (UFSC) Na Lagoa da Conceição, em Florianópolis, em um determinado dia, o vento produz ondas periódicas na água, de comprimento igual a 10 m, que se propagam com velocidade de 2,0 m/s. Um barco de 3,0 m de comprimento, inicialmente ancorado e, após certo tempo, navegando, é atingido pelas ondas que o fazem oscilar periodicamente.

Assinale a(s) proposição(ões) **CORRETA(S)**.

- 01. Estando o barco ancorado ele é atingido por uma crista de onda e oscila uma vez a cada 5,0 segundos.
- 02. Estando o barco ancorado, ele oscila 5 vezes em cada segundo.
- 04. Estando o barco navegando com velocidade de 3,0 m/s na direção de propagação das ondas mas em sentido contrário a elas, ele oscila uma vez a cada 2,0 segundos.
- 08. A frequência de oscilação do barco não depende da sua velocidade de navegação, mas somente da velocidade de propagação das ondas.
- 16. Se o barco tivesse um comprimento um pouco menor, a frequência da oscilação seria maior.
- 32. A frequência de oscilação do barco não depende do comprimento das ondas, mas somente da velocidade das mesmas e do barco.
- 64. Estando o barco navegando com velocidade de 3,0 m/s na direção de propagação das ondas e no mesmo sentido delas, ele oscila a cada 10

segundos.

6. (UNICAMP) Quando um recipiente aberto contendo um líquido é sujeito a vibrações, observa-se um movimento ondulatório na superfície do líquido. Para pequenos comprimentos de onda λ , a velocidade de propagação v de uma onda na superfície livre do líquido está relacionada à tensão superficial σ conforme a equação:

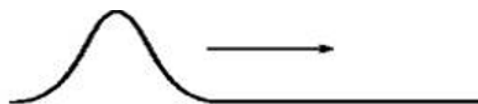
$$v = \sqrt{\frac{2\pi\sigma}{\rho\lambda}}$$

onde ρ é a densidade do líquido. Esta equação pode ser utilizada para determinar a tensão superficial introduzindo-se na superfície do líquido um movimento ondulatório com uma frequência f fornecida e medindo-se o comprimento de onda λ .

- (a) Quais são as unidades de tensão superficial σ no Sistema Internacional de Unidades?
- (b) Determine a tensão superficial da água, sabendo que para uma frequência de 250 Hz observou-se a formação de ondas superficiais com comprimento de onda $\lambda = 2,0$ mm. Aproxime $\rho \approx 3 \text{ kg/m}^3$.

7. (ACAFE) A velocidade escalar de uma onda transversal que se propaga num fio é de 100 m/s. Quando essa onda passa para um outro fio, constituído do mesmo material, porém com 1/4 do diâmetro do primeiro, a velocidade de propagação da onda, em m/s, muda para:
- (a) 80
 - (b) 600
 - (c) 25
 - (d) 1600
 - (e) 400

8. (UNIFESP) A figura representa um pulso se propagando em uma corda.



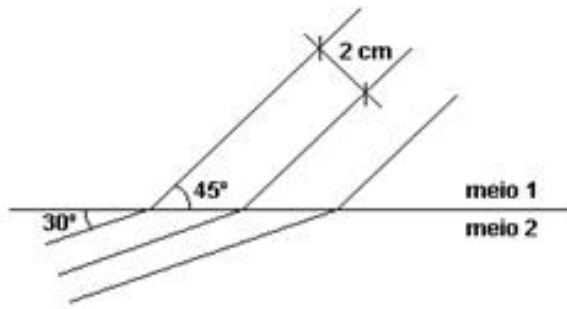
Pode-se afirmar que, ao atingir a extremidade dessa corda, o pulso se reflete:

- (a) se a extremidade for fixa e se extingue se a extremidade for livre.
- (b) se a extremidade for livre e se extingue se a extremidade for fixa.
- (c) com inversão de fase se a extremidade for livre e com a mesma fase se a extremidade for fixa.

(d) com inversão de fase se a extremidade for fixa e com a mesma fase se a extremidade for livre.

(e) com mesma fase, seja a extremidade livre ou fixa.

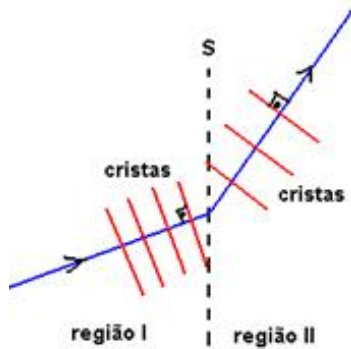
9. (UFRRJ) A figura mostra frentes de uma onda, correspondendo a máximos sucessivos, passando de um certo meio 1 para um certo meio 2. A distância entre os máximos sucessivos no meio 1 é de 2,0 cm. No meio 1, esta distância é percorrida pelas frentes de onda em 0,5 s.



Calcule:

- (a) A frequência da onda.
 (b) A velocidade da onda no meio 2.

10. (UFBA) A figura mostra, esquematicamente, as frentes de ondas planas, geradas em uma cuba de ondas, em que duas regiões, nas quais a água tem profundidades diferentes, são separadas pela superfície imaginária S. As ondas são geradas na região I, com frequência de 4 Hz, e se deslocam em direção à região II. Os valores medidos, no experimento, para distâncias entre duas cristas consecutivas nas regiões I e II valem, respectivamente, 1,25 cm e 2,00 cm.



Com base nessas informações e na análise da figura, dê a soma dos números das afirmativas corretas:

01. O experimento ilustra o fenômeno da difração de ondas.

02. A frequência da onda na região II vale 4 Hz.

04. O comprimento de onda, nas regiões I e II, valem, respectivamente, 2,30 cm e 4,00 cm.

08. A velocidade da onda, na região II, é maior do que na região I.

16 Seria correto esperar-se que o comprimento de onda fosse menor nas duas regiões, caso a onda gerada tivesse frequência maior do que 4 Hz.

11. (PUC) O comprimento de uma corda de guitarra é 64,0 cm. Esta corda é afinada para produzir uma nota com frequência igual a 246 Hz quando estiver vibrando no modo fundamental. Se o comprimento da corda for reduzido à metade, a nova frequência fundamental do som emitido será:

- (a) 123 Hz
 (b) 246 Hz
 (c) 310 Hz
 (d) 369 Hz
 (e) 492 Hz

12. (UFGRS) Em cada uma das imagens abaixo, um trem de ondas planas move-se a partir da esquerda.

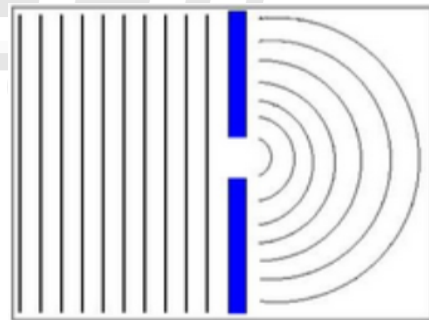


Figura 1

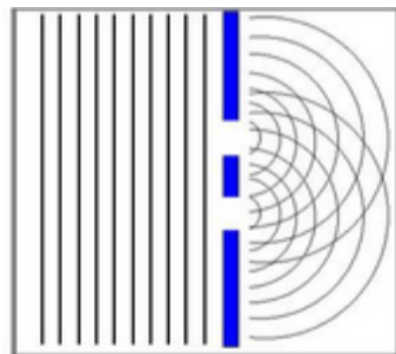


Figura 2

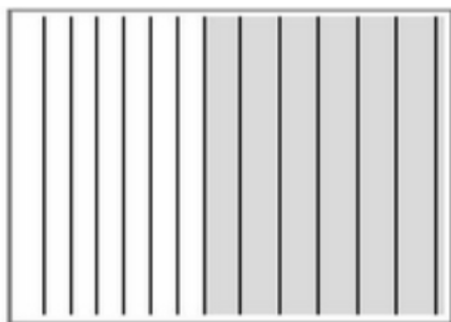
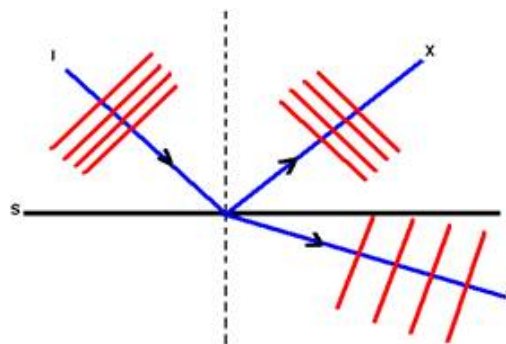


Figura 3



Os fenômenos ondulatórios apresentados nas figuras 1, 2 e 3 são, respectivamente,

- (a) refração – interferência – difração.
- (b) difração – interferência – refração.
- (c) interferência – difração – refração.
- (d) difração – refração – interferência.
- (e) interferência – refração – difração.

13. (UPF 2011/2) Sobre as ondas mecânicas são feitas as afirmações a seguir:

I. As ondas mecânicas necessitam de um meio material para a sua propagação; assim sendo, o som não se propaga no vácuo.

II. As ondas mecânicas podem ser transversais ou longitudinais.

III. Uma onda mecânica é transversal quando a direção da vibração é a mesma na qual se efetua a propagação da onda.

IV. A polarização é um fenômeno que pode ocorrer exclusivamente com as ondas transversais.

Dessas afirmações são corretas:

- (a) I e II
- (b) I, II e III
- (c) I, II e IV
- (d) II, III e IV
- (e) Todas são corretas

14. (UNESP) A figura representa uma onda periódica I que atinge a superfície de separação S entre dois meios. Representa também outros dois trens de ondas, X e Y, a serem identificados, e a linha pontilhada representa a normal à superfície de separação S.

Os dois trens de ondas X e Y correspondem, respectivamente, a ondas:

- (a) refletida e refratada
- (b) refletida e difratada
- (c) refratada e refletida
- (d) difratada e refratada
- (e) refletida e polarizada

15. (VUNESP) A figura representa um padrão de ondas estacionárias geradas numa corda fixas extremidades A e B.



Sendo a distância $AB = 1,20$ m, o comprimento de onda dessa corda que dá origem a essas ondas estacionárias, em metros, é de:

- (a) 1,20
- (b) 1,00
- (c) 0,80
- (d) 0,60
- (e) 0,40

10 Gabarito

1. Item (b): 10^{-3} .
2. (a) 1. (b) $\lambda_1/\lambda_2 = 1/2$.
3. Item (e): O transporte de energia sem o transporte de matéria.
4. Item (d): 6 cm e 20 Hz.
5. Soma dos itens corretos: 69. Item 01: Correta. Item 02: Incorreta. Item 04: Correta. Item 08: Incorreta. Item 16: Incorreta. Item 32: Incorreta. Item 64: Correta.
6. (a) kg/s^2 . (b) $\sigma = 8,3 \times 10^{-2} \text{ kg/s}^2$.

7. Item (e): 400 m/s.
8. Item (d): com inversão de fase se a extremidade for fixa e com a mesma fase se a extremidade for livre.
9. (a) 2 Hz. (b) $4\sqrt{2}$ cm/s.
10. A soma dos itens corretos é 26. Item 01: Incorreta. Item 02: Correta. Item 04: Incorreta. Item 08: Correta. Item 16: Correta.
11. Item (e): 492 Hz.
12. Item (a) refração – interferência – difração.
13. Item (c): I, II e IV.
14. Item (a): refletida e refratada.
15. Item (c): 0,8.

