

Produto Educacional

Uso de um simulador como ferramenta Pedagógica para facilitar o ensino de Difração
no Ensino Médio

Aldo Alberto



Autor: Aldo Alberto Câmara Marques

Orientador: Jerias Alves Batista

Capa: <https://kuadro.com.br/>

Apresentação

Prezado(a) professor(a)

O presente material tem por objetivo fornecer ao professor da Educação Básica um material complementar ao livro-texto com uma descrição mais adequada sobre o assunto difração. Neste material, o aluno encontrará uma breve descrição sobre o contexto histórico e observações que levaram à descoberta desse fenômeno, e também a trajetória que cada cientista percorreu para elaboração de suas teorias.

Por meio deste Produto Educacional, o educador terá acesso a uma abordagem mais aprofundada do que a normalmente encontrada nos livros-textos sobre como o fenômeno da difração está presente no nosso cotidiano, devidamente contextualizado. Por meio deste material, o professor verá como a difração é fundamental para o funcionamento de muitos produtos tecnológicos e como sua descoberta deu um salto muito grande no avanço da humanidade. Este Produto Educacional se baseia em uma metodologia na qual o aluno tem autonomia, e pode colocar em prática o conhecimento adquirido durante as aulas.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	6
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	9
2.1 Descrição Física do Problema.....	9
2.1.1 As Ondas e o Ambiente de Propagação.....	9
2.1.1.1 Ondas Mecânicas	11
2.1.1.2 Ondas Eletromagnéticas.....	12
2.1.2 As Ondas e os Entes Oscilatórios	15
2.1.2.1 Ondas Transversais	16
2.1.2.2 Ondas Longitudinais	17
2.2 Descrição Matemática do Problema	19
2.2.1 Ondas Mecânicas e Eletromagnéticas.....	22
2.3 O Fenômeno da Difração de Ondas	24
2.3.2 A Difração à Luz do Princípio de Huygens-Fresnel.....	33
2.3.3 Intensidade das Ondas Difradas.....	37
2.4 Uso do Software <i>Ripple Tank Simulation</i> Como Mediador para o Ensino da Difração.....	42
2.4.1 Instruções básicas sobre a operação do RTS	44
2.4.2 Aplicações do RTS	46
3 Sequencia Didática Construtivista.....	51
3.1 Desenvolvimento das Etapas do Produto Educacional.....	54
Referências.....	60

1 Introdução

Sabe-se que o modelo utilizado para o ensino de Física no Brasil não tem alcançado o nível satisfatório, haja vista os resultados observados nas últimas avaliações do Programa Internacional de Avaliação de Estudantes (PISA), um programa da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE). É fácil comprovar isto a partir da comparação do rendimento escolar dos estudantes brasileiros com o rendimento de estudantes de dezenas de países de todos os continentes, a partir de uma rápida investigação nos resultados da avaliação de 2018. Uma das possíveis razões para este baixo rendimento está no fato de que os conteúdos da área de Física não são vistos com uma abordagem apropriada para o seu entendimento ou, em grande parte, não são trabalhados ao longo do ensino médio.

Neste Produto Educacional será desenvolvida uma proposta de ensino para facilitar o aprendizado do conteúdo da difração e ondas. Este assunto deveria ser explorado de forma mais consistente para que o público do Ensino Médio pudesse ver sua importância e, conseqüentemente, ter mais interesse pela Física no dia a dia. Quase sempre ela é vista como uma disciplina difícil, estressante, e muitas vezes até confundida com a Matemática, pelo fato de os professores ministrarem seus conteúdos apenas usando fórmulas.

A Física não é trabalhada de forma que a fenomenologia seja bem entendida. Seus conceitos são vistos de maneira muito superficial e abstrata, não sendo possível a seu aprendizado mecanicista se conectar aos subsunçores dos estudantes e, portanto, não levando a uma aprendizagem significativa. Assim como no ensino geral da Física, os conceitos de difração são pouco explorados ou, quando muito, repassados de forma resumida e superficial, tal como se encontram nos livros didáticos. Diante dessa problemática, o presente Produto Educacional tem como objetivo elaborar uma metodologia facilitadora da compreensão do conteúdo da difração utilizando um simulador virtual que reproduz cenários relevantes sobre difração.

Em geral as aulas sobre ondas e suas aplicações são ministradas de maneira expositiva, com ênfase em fórmulas matemáticas, e a resolução de exercícios usando apenas a substituição de letras por números. A aferição do conhecimento nas avaliações é feita de forma mecânica, geralmente abordando questões iguais às já resolvidas em sala de aula. Esta metodologia de ensino é ineficaz à medida em que não forma um estudante com capacidades de investigação crítica de sua realidade. Por meio de uma sequência didática investigativa, neste Produto Educacional serão trabalhados alguns conteúdos na parte de ondulatória que são necessários para a compreensão do assunto difração. Como elemento de motivação, será utilizado o simulador virtual de ondas planas denominado *riper tank simulacion*.

A escolha do assunto difração para a elaboração deste Produto Educacional partiu do pressuposto de que o assunto é pouco explorado nas escolas de ensino médio. Embora seja um conteúdo abstrato para o estudante, ele é a base para muitas explicações e aplicações no cotidiano, de modo que é um tema fundamental da Física a serem ensinados e aprendidos. Em geral, os professores encontram dificuldades na execução e transmissão deste conteúdo quando usam apenas o livro texto e o quadro em sala de aula. Entretanto, historicamente este tem sido o método mais utilizado no processo de ensino. Uma matéria da importância da Física - que está presente em quase todos os fenômenos naturais e que nos transmite uma descrição completa do funcionamento do Universo, deveria ser abordada de forma mais contextualizada. Segundo Moreira:

A Física permeia a vida de todos os seres humanos. Ela está na base das Tecnologias de informação e comunicação, da engenharia das técnicas de diagnósticos e tratamentos usados na Medicina. A Física tem modelos e teorias que explicam grande parte do mundo físico que vivemos. Biologia, Química, neurociências e outras áreas científicas usam conceitos, princípios, modelos e teorias derivados da Física. Então, aprender física é um direito humano. (Moreira. 2017)

Desta forma, vemos que a Física é a base de muitas outras áreas do conhecimento. Porém, o que vemos é que os conteúdos da área Física são transmitidos de maneira muito superficial e meramente explicativos, seguindo apenas um roteiro. Podemos ver que o método utilizado para ensinar a Física está pautado em apenas repassar os conteúdos, não tem muito a finalidade de que o aluno aprenda de fato; é meramente com o intuito que ele passe de ano, é um ensino mecanizado, baseado apenas na resolução de problemas, somente o prepara para provas e exames. O aluno apenas coleta aquela informação e ela é processada, o professor apenas leva aquela carga de conteúdo ao aluno. Para Moreira:

Contudo, “mais Física” não significa mais conteúdo a serem decorados, memorizados mecanicamente. É preciso pensar como ensinar esses conteúdos. É preciso dar atenção didática específica, à transferência didática, a como abordar a Física de modo a despertar o interesse, a intencionalidade, a predisposição dos alunos, os sem os quais a aprendizagem não será significativa, apenas mecânica para “passar”. (MOREIRA. 2017)

O professor deve estar nesta busca constante para desenvolver práticas de ensino que estimulem a participação mais ativa dos alunos, deve desenvolver metodologias de ensino mais eficazes que tornem as aulas mais dinâmicas e prazerosas.

Segundo Libâneo (2017), a pedagogia tradicional caracteriza as concepções de educação onde sobressai a educação massificada, repetição, o acúmulo de conhecimentos, e o que importa é a transmissão do saber passado de geração a geração como se fossem verdades absolutas. O professor

é o detentor do saber e o aluno é um ser passivo. Diante dessa problemática, este Produto Educacional tem como propósito levar uma nova perspectiva ao ensino de Física.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Com o objetivo de subsidiar as discussões sobre o fenômeno da difração de ondas, inicialmente será feita uma análise pormenorizada acerca dos principais conceitos associados aos fenômenos ondulatórios e oscilatórios. De modo geral, pode-se dizer que estes fenômenos são inerentes à natureza e, como tal, se manifestam no nosso cotidiano, do universo macroscópico das galáxias e estrelas até a escala microscópica das partículas subatômicas. Alguns exemplos serão mencionados apenas para demonstrar a grande abrangência destes. Um carro se movendo em uma pista irregular apresenta pequenas oscilações; um barco ao navegar em alto mar oscila lentamente em razão das ondas que o atingem; o som que ouvimos chega aos nossos ouvidos como um padrão ondulatório que se propaga no ar, cujas moléculas oscilam na direção da propagação da onda; terremotos são o resultado de oscilações das camadas de rochas da crosta terrestre.

Do mesmo modo, a informação compartilhada entre dois *smartphones* ocorre via ondas viajantes que são formadas pelas oscilações de campos elétrico e magnético que permeiam todo o Universo. O mesmo ocorre com sinais de TV, rádio, Wi-Fi, radar, etc. Segundo a teoria física denominada Modelo Padrão, as próprias partículas elementares que formam toda a matéria ordinária, tais como elétrons, *quarks up* e *quarks down* (estes últimos formadores de prótons e nêutrons), são oscilações nos campos elétrico e magnético. Sendo assim, fenômenos como a fusão nuclear, que alimenta o brilho das estrelas, e a fissão nuclear, que controla os decaimentos radioativos nos átomos, são todos fenômenos ondulatórios.

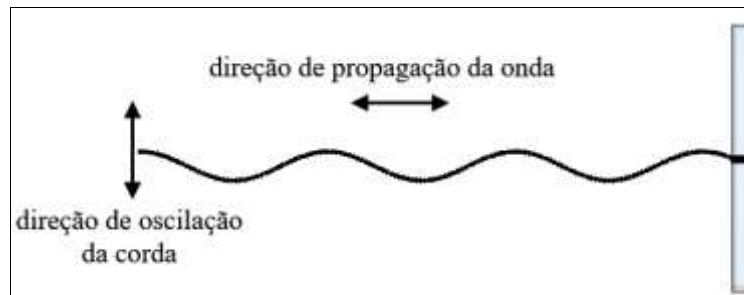
Como se pode verificar, são muitos exemplos da ocorrência de ondas no nosso cotidiano. As ondas também são muito importantes para o desenvolvimento da tecnologia. Através delas foi possível o aperfeiçoamento de muitos aparatos tecnológicos e, graças a essa maravilha da natureza, podemos nos comunicar com pessoas a grandes distâncias quase instantaneamente.

Ficou evidente nos parágrafos acima a importância das ondas e os cenários nos quais elas se manifestam com mais evidência. Entretanto, ainda não foi dada uma definição precisa acerca do que seja uma onda. Mediante uma pesquisa nos livros didáticos aprovados no PNLD podem-se achar vários conceitos, que juntos definem o que é uma onda. Onda é uma perturbação que se propaga no espaço contendo matéria ou não. Elas transportam energia e quantidade de movimento, sem que haja o transporte de matéria propriamente.

A Figura 1 ilustra uma onda que se propaga em uma corda na direção horizontal que se encontra presa à um obstáculo na sua extremidade direita. Esta onda causa apenas movimento oscilatório vertical nos elementos da corda, de modo que estes não se movem na direção de propagação da onda. No caso desta ilustração, a corda oscila verticalmente apenas. As ondas podem ser classificadas em vários tipos, dependendo do meio no qual eles se propagam e da maneira como as oscilações das

partículas do meio ocorrem. Nas próximas seções será feita uma breve discussão sobre os aspectos físicos e matemáticos das ondas.

Figura 1 – Propagação de ondas em uma corda esticada.



Fonte: Próprio autor.

2.1 Descrição Física do Problema

Uma possível maneira de se conhecer um fenômeno que possui um grau de complexidade é mediante a identificação de um grupo de propriedades que sejam comuns dentro de determinados cenários. Com esta proposta, os fenômenos ondulatórios podem ser descritos em conexão com o tipo de ambiente no espaço dentro do qual as ondas se manifestam. Além disso, eles podem ser descritos de acordo com a forma como as oscilações que dão origem às ondas ocorrem, quando comparadas com a direção de propagação da energia da onda. Nas subseções seguintes cada caso será examinado separadamente.

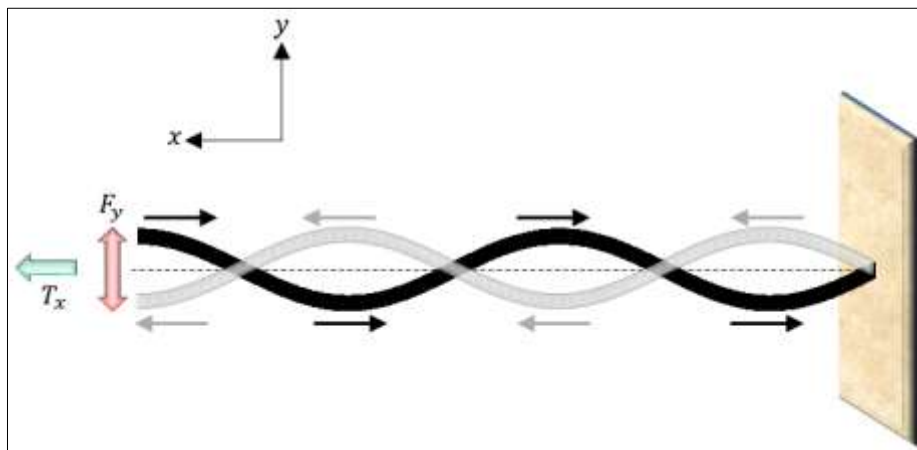
2.1.1 As Ondas e o Ambiente de Propagação

Quanto às características do espaço dentro do qual as ondas existem, elas podem ser classificadas em três grandes grupos, denominados ondas mecânicas, ondas eletromagnéticas e ondas quânticas.

2.1.1.1 Ondas Mecânicas

Ondas mecânicas são ondulações existentes em partículas que possuem massa inercial não nula, ou seja, são ondas que se propagam em meios materiais cujas partes se movem coletivamente. Essas ondas são facilmente encontradas na natureza e, portanto, familiares à nossa percepção. Ondas do mar, ondas sonoras e ondas sísmicas mencionadas anteriormente são exemplos de ondas mecânicas. Com o objetivo de facilitar o entendimento deste tipo de onda, a Figura 2 ilustra uma corda com densidade de massa μ , esticada por uma força de tensão T_x que oscila na direção do eixo vertical y sob ação da força F_y . Enquanto a corda vibra na direção vertical, uma parte da energia fornecida por F_y se propaga para a direita, é refletida pela parede e então se propaga para a esquerda, eventualmente formando um padrão de distribuição de energia em equilíbrio dinâmico ao longo da corda, cujo perfil é conhecido como onda estacionária.

Figura 2: Ilustração para ondas mecânicas.



Fonte: Próprio autor.

Como este tipo de onda depende do movimento de partículas com massa, quanto maior a densidade de massa da corda menor é a velocidade de propagação destas ondas. Pondo na forma de uma equação tem-se:

$$v = \sqrt{\frac{T_x}{\mu}} \quad (1)$$

Observa-se que a velocidade da onda depende das propriedades do meio no qual ela viaja. Estudam-se estas ondas com a teoria de Newton para o movimento de partículas sob ação de forças.

Deve-se ressaltar que, embora a descrição acima seja mecânica, no sentido de que foi usado conceito de força newtoniana, a origem de todas essas forças que promovem a propagação contínua da energia e quantidade de movimento na forma de uma ondulação tem origem no campo eletromagnético. Entretanto, em virtude da necessidade de partículas materiais para a existência de tais ondas, a sua descrição por meio das leis do movimento de Newton é mais simples do ponto de vista intuitivo. A transmissão de energia pelo espaço sem a necessidade de partículas materiais será estudada na próxima seção, com as ondas eletromagnéticas.

2.1.1.2 Ondas Eletromagnéticas

São aquelas cujas oscilações não são produzidas pelo movimento de partículas com massa inercial, mas sim pelas mudanças nos valores de duas grandezas físicas intrínsecas ao espaço conhecidas como campo elétrico \vec{E} e campo magnético \vec{B} . Uma vez que estes campos existem em todos os locais do Universo, este tipo de onda se encontra espalhada por todo o espaço. O que denominamos de campo elétrico e magnético são, na verdade, perturbações nos campos elétricos e magnético intrínsecos que preenchem todo o espaço.

Quando as perturbações nos campos intrínsecos são criadas por uma carga elétrica estacionária ou em movimento com velocidade constante, os campos elétrico e magnético gerados são denominamos de campos estáticos. Como exemplo, temos os campos elétricos e magnéticos estudados em eletrostática e magnetostática do 3º. ano do ensino médio, respectivamente. Quando as perturbações nos campos intrínsecos são produzidas pelo movimento da energia através deles, os campos elétrico e magnético gerados são denominamos de campos oscilantes ou ondas eletromagnéticas. Estes últimos formam o que é conhecido como raios-gama e raios-x; luz ultravioleta, visível e infravermelha; ondas de TV e rádio.

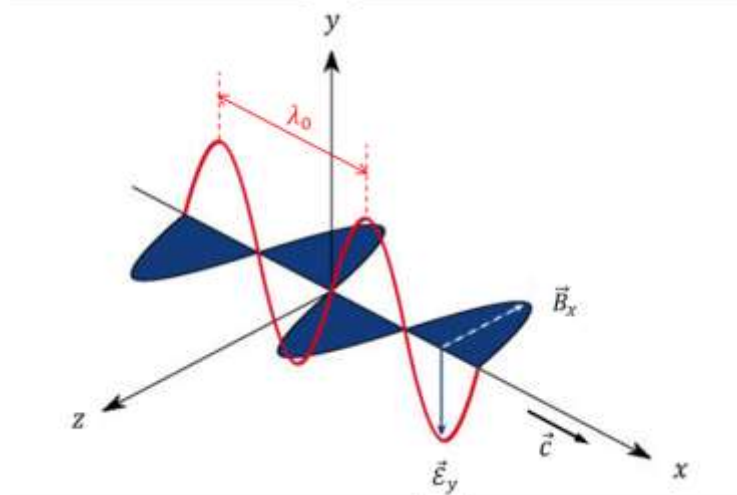
A Figura 3 ilustra como os campos elétrico \vec{E}_y , na direção do eixo y e magnético \vec{B}_z , na direção do eixo z , se combinam perpendicularmente no espaço formando o padrão conhecido como onda eletromagnética. Deve-se chamar a atenção para o que realmente se move aqui. Observe que os campos representados na figura não se movem ao longo dos eixos, mas apenas alteram seus valores em cada ponto do espaço. São as mudanças nos valores dos campos que se movem na forma de uma ondulação, na direção do eixo x , perpendicular às direções dos campos \vec{E}_y e \vec{B}_z .

Quando diferentes ondas eletromagnéticas se propagam no espaço sem que haja partículas materiais presentes suas velocidades são todas iguais (aproximadamente 300.000 km/s), o máximo valor possível para elas. Matematicamente esta velocidade pode ser expressa como $v_{m\acute{a}x} = \lambda_0 f$, onde

o símbolo λ_0 representa o comprimento de onda de uma onda no espaço vazio de matéria (vácuo), definido como a distância entre dois pontos equivalentes da mesma (veja a Figura 3 novamente), e f é a taxa de oscilação temporal (ou frequência temporal) dos campos \vec{E} e \vec{B} no mesmo ponto do espaço. Este parâmetro f representa quantas vezes uma variação no valor do campo atinge um máximo, ou outro valor equivalente, dentro de um intervalo de tempo de 1 segundo. Estas definições serão estudadas com detalhes na seção 2.2.1. No espaço vazio de matéria nem λ_0 e nem f são alterados durante a propagação da onda. A partir do início do século XX passou-se a usar a letra c (do latim *celeritas* = celeridade, ligeireza) para representar a máxima velocidade das ondas eletromagnéticas. É por esta razão que os livros-textos usam $v_{m\acute{a}x} \equiv c$, e a velocidade de propagação da onda é expressa como:

$$c = \lambda_0 f \quad (2)$$

Figura 3: Campo Magnético e campo elétrico a combinação destes vai gerar ondas eletromagnéticas.



Fonte: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/ondas.htm>

Quando diferentes ondas eletromagnéticas se propagam no espaço contendo partículas materiais suas velocidades não se mantêm mais as mesmas uma em relação às outras. Além disso, todos os valores das velocidades são reduzidos quando comparados àqueles da propagação no espaço livre de partículas. A Equação (2) deve ser adaptada para incluir a influência da matéria sobre as velocidades e sobre os comprimentos de onda. A frequência f da onda eletromagnética é uma propriedade intrínseca dos campos elétrico e magnético, sem nenhuma relação com o meio externo. Portanto, esta é a única propriedade da onda que não é afetada pela matéria dentro do espaço no qual ela se propaga. Com estas informações, a Equação (2) pode ser reescrita na forma:

$$v_{mat} = \lambda_{mat} f \quad (3)$$

sendo v_{mat} a velocidade da onda dentro da matéria e λ_{mat} o comprimento de onda alterado por ela. Dividindo a Equação (3) pela Equação (2), encontra-se

$$\frac{v_{mat}}{c} = \frac{\lambda_{mat} f}{\lambda_0 f} = \frac{\lambda_{mat}}{\lambda_0} \rightarrow v_{mat} = \frac{\lambda_{mat} c}{\lambda_0} \quad (4)$$

Quando a onda viaja no vácuo, seu comprimento de onda λ_0 é maior do que a mesma onda viajando dentro da matéria ($\lambda_0 > \lambda_{mat}$), de modo na Equação (4) temos $v_{mat} < c$. Deve-se ter claro em mente o que de fato significa esta alteração na velocidade de uma onda eletromagnética. Segundo a teoria eletromagnética de Maxwell, que resultou na descoberta de tais ondas, uma onda eletromagnética viaja com velocidade constante máxima no espaço vazio. Isto é precisamente o conteúdo da Equação (2), já que λ_0 e f não mudam. Então, o que a Equação (3) realmente significa? Que a onda luminosa é freada quando entra em uma região do espaço contendo matéria e é acelerada após atravessá-la? Que tipo de interação seria responsável pela desaceleração e posterior aceleração da onda, e como ela poderia ser quantificada?

A resposta deve ser obtida considerando que a matéria pode ser concebida como um meio contínuo na escala macroscópica, mas discreta na escala microscópica. Dito de outra forma, a superfície de um material feito de átomos mantidos a uma certa distância pode ser vista de longe como um contínuo de átomos, já que não é possível observar as pequenas distâncias entre eles na escala macroscópica. Entretanto, se essa mesma superfície fosse observada de uma distância semelhante à que separa um átomo do seu vizinho, os átomos seriam vistos afastados uns dos outros, tendo apenas o vácuo entre eles. É fato consolidado na física experimental que a velocidade de uma onda eletromagnética é reduzida quando ela penetra a matéria, de modo que vale a relação:

$$c = n v_{mat} \quad (5)$$

onde n é um número que representa a influência da matéria na redução da velocidade, conhecido como índice de refração. O termo refração, que significa inclinação, quebra, mudança de direção, vem do fato de que as ondas ao entrarem na matéria mudam a direção de seu movimento em razão da mudança de sua velocidade. No vácuo $n = 1$, dentro da matéria $n > 1$. Sem entrar em detalhes do cálculo matemático que leva à dependência do fator n com as propriedades da matéria, pode-se mostrar que [Richard Feynman, vol. 1, equação 31.19]:

$$n = 1 + \frac{Ne^2}{2\varepsilon_0 m(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (6)$$

sendo N a densidade de átomos do material e e é o valor da carga elétrica de um elétron. O símbolo ε_0 representa facilidade com que o campo elétrico intrínseco é alterado pela presença da onda, denominado de permissividade elétrica do vácuo. m é a massa do elétron, ω_0 é a frequência angular com que os elétrons estão se movendo dentro dos átomos, denominada de frequência de ressonância, e ω é a frequência angular das oscilações dos campos da onda eletromagnética. Das Equações (5) e (6) obtemos a expressão da velocidade da onda na matéria v_{mat} em função das propriedades do material e da onda no vácuo:

$$v_{mat} = c \left(1 + \frac{Ne^2}{2\varepsilon_0 m(\omega_0^2 - \omega^2)} \right)^{-1} \quad (7)$$

Observa-se que sem a presença da matéria ($N = 0$), v_{mat} torna-se igual a c .

A discussão feita até aqui mostrou apenas o fator de redução da velocidade da onda eletromagnética na matéria, mas não ficou claro como isto acontece. Classicamente, esta redução na velocidade pode ser explicada de forma relativamente simples. Quando o campo elétrico oscilante da onda eletromagnética interage com os elétrons mais externos dos átomos (elétrons de valência) estes são impulsionados a oscilarem na mesma frequência, perpendicularmente à direção de propagação da onda, ou seja, na mesma direção de seu campo elétrico. Os elétrons oscilantes juntamente com o restante do átomo formam um dipolo elétrico induzido que, por sua vez, emitem uma onda eletromagnética perpendicular ao seu eixo de polarização. Ou seja, a direção da onda emitida pelo dipolo coincide com a direção de propagação onda original que o criou. Em razão da massa inercial dos dipolos, a onda produzida por estes é emitida com certo atraso, ou seja, defasada em relação àquela que os induziu, e se propaga com velocidade menor, v_d .

Como resultado da superposição espacial destas ondas temos o fenômeno do batimento, o que leva à percepção pelo observador de uma terceira onda (formada pela mistura das duas ondas) que viaja no mesmo sentido das duas ondas originais, com velocidade v_{total} cujo valor é a média aritmética das velocidades das duas ondas, ou seja, $v_{total} = (c + v_d)/2$. O resultado da superposição é que se percebe uma onda que viaja com velocidade v_{total} inferior à velocidade da luz no vácuo e maior do que a velocidade da onda emitida pelos dipolos.

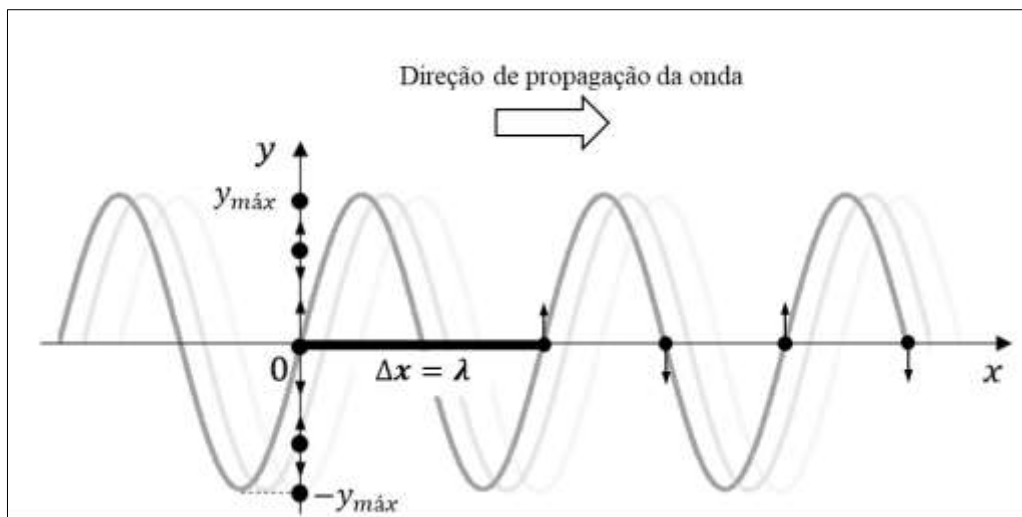
2.1.2 As Ondas e os Entes Oscilatórios

É possível fazer outra análise acerca das ondas observando-se a direção do movimento oscilatório de alguma grandeza em relação à direção de propagação da própria onda. Elas podem ser:

2.1.2.1 Ondas Transversais

São aquelas em que a direção das oscilações é perpendicular à direção de propagação da onda. A Figura 4 ilustra uma onda transversal em uma corda. Enquanto um ponto fixo na corda oscila apenas ao longo do eixo y , dentro do intervalo $\pm y_{m\acute{a}x}$, a onda se desloca na direção positiva do eixo x , sendo que a cada distância $\Delta x = \lambda$ a partícula se encontra na mesma posição e se movendo ou tendendo a se mover no mesmo sentido. Esta foi precisamente a definição de comprimento de onda, conforme descrito na seção 2.1.1.2. As ondas eletromagnéticas ilustradas na Figura 3 também são longitudinais. Os campos elétrico e magnético sempre oscilam perpendicularmente ao eixo de propagação da onda.

Figura 4: Ilustração para uma onda do tipo transversal em uma corda.

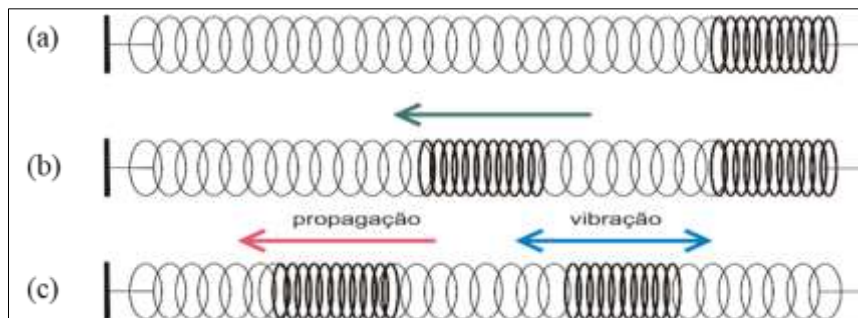


Fonte: Próprio autor.

2.1.2.2 Ondas Longitudinais

São aquelas em que a direção de oscilação ocorre na mesma direção do movimento. A Figura 5 ilustra uma onda longitudinal em uma mola. Um impulso é dado na extremidade direita da mola ao longo de seu eixo fazendo-a comprimir-se localmente (Figura 5a). Ao se descomprimir, este setor da mola comprime a região vizinha mais à esquerda e isso se repete até à extremidade esquerda da mola (Figuras 5b e 5c). Esse movimento regular de compressão e descompressão dos setores da mola é o que se denomina onda longitudinal. Não existe um nome especial para este tipo de onda mecânica, sendo denominada apenas onda de pressão. Este mesmo efeito ocorre nas rochas, sendo popularmente denominado de terremoto.

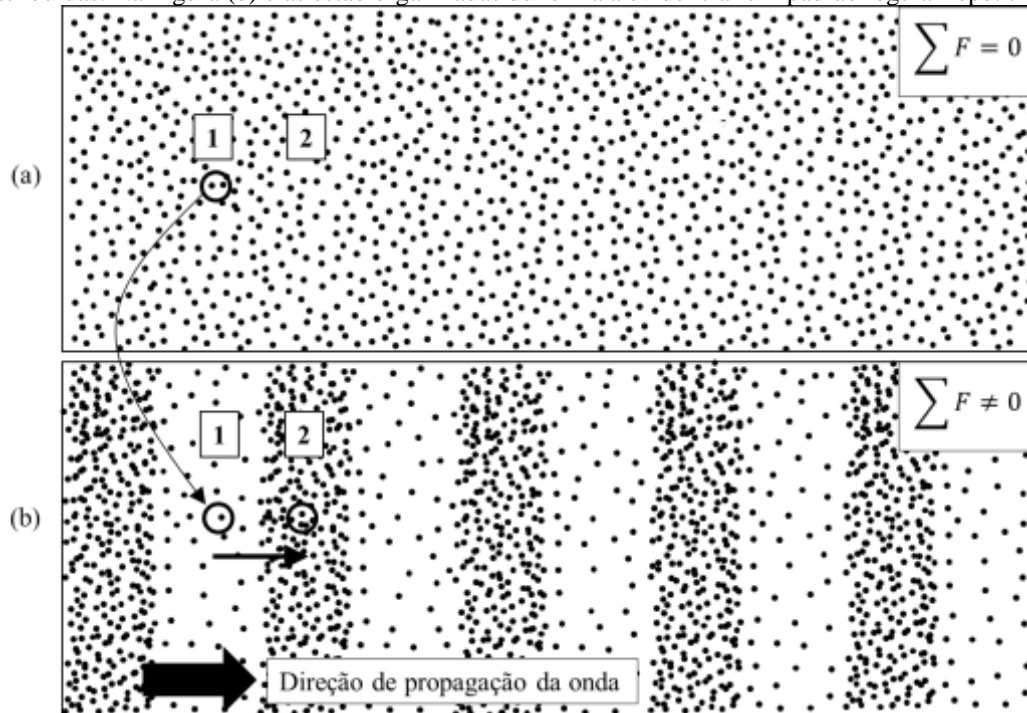
Figura 5: Ilustração para uma onda do tipo longitudinal em uma mola.



Fonte:<http://3.bp.blogspot.com>

Movimento semelhante pode ser observado com as partículas do ar. Neste caso, a onda recebe um nome especial de som. A Figura 6a ilustra uma região do espaço na qual as moléculas estão dispostas na sua configuração de equilíbrio dinâmico, mantendo distâncias regulares. A densidade de moléculas nas regiões 1 e 2 destacadas na figura são iguais. Não há um estímulo para que elas se movam para longe de suas posições, mas por conta da agitação térmica elas apenas oscilam no entorno de posições fixas. Existem forças sobre cada molécula devido à agitação térmica; mas por estarem todas com a mesma energia as forças se cancelam mutuamente.

Figura 6: Ilustração para uma onda do tipo longitudinal no ar. Na Figura (a) as moléculas estão uniformemente distribuídas. Na Figura (b) elas estão organizadas de forma a evidenciar um padrão regular repetitivo.



Fonte: Próprio autor.

Acompanhe o caso da molécula destacada pelo círculo na região 1 na Figura 6a. A Figura 6b ilustra o cenário no qual uma onda sonora é transportada por estas moléculas de ar, da esquerda para a direita. Veja que sob uma força impulsiva as moléculas que se encontravam na região 1 são deslocadas para a região 2. A região 1 fica com poucas moléculas e menor pressão (choques entre as moléculas), enquanto a região 2 fica com excesso de moléculas e maior pressão. Por estarem ligadas umas às outras, as moléculas na região 2 reagem com uma força contrária, na tentativa restaurar a configuração de equilíbrio anterior que havia no cenário da Figura 6a. Sob ação desta força restauradora, e por conta da inércia das moléculas, estas ultrapassam o ponto de equilíbrio para o lado direito e provocam o mesmo efeito nas moléculas à sua direita. Este processo continua indefinidamente, e o pulso de energia vai se deslocando através do ar. Para o caso das ondas longitudinais, a variável dinâmica é a pressão do meio, que aumenta e diminui conforme se dá o ajuntamento ou a separação das partículas.

Deve-se analisar a Figura 6 com cuidado, pois se trata de um equilíbrio dinâmico. Ele ocorre quando a força impulsiva externa se mantém atuando sobre as moléculas da esquerda da figura (não mostrada). O que vemos na Figura 6b é uma representação de como estariam distribuídas as moléculas após um certo instante de tempo. Esta distribuição não é estática, mas oscila com o tempo, segundo a passagem do pulso de energia para a direita.

2.2 Descrição Matemática do Problema

Nas seções anteriores fizemos uma descrição física sobre as ondas considerando apenas seus aspectos qualitativos. Entretanto, para um entendimento mais aprofundado do assunto é necessário obter-se previsões quantitativas que possam ser comparadas com a observação da natureza. Isto será feito a partir da derivação da equação das ondas e posterior análise de sua solução.

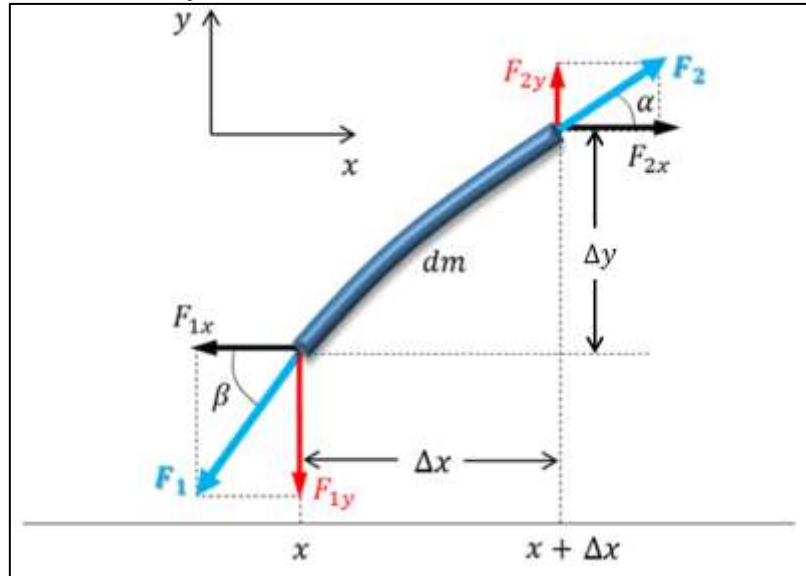
2.2.1 Ondas Mecânicas

Por motivos de simplicidade matemática, uma corda esticada (tensionada) será usada como cenário para o estudo das ondas mecânicas e eletromagnéticas. Não há restrição na demonstração que será feita visto que as ondas mecânicas e eletromagnéticas possuem uma estrutura matemática semelhante, sendo a única diferença entre elas a entidade que está oscilando no tempo e no espaço – o deslocamento de uma partícula ou valores dos campos elétrico e magnético.

A Figura 7 mostra um pequeno setor de uma corda que se encontra sobre o eixo x , na qual uma onda viaja com velocidade v_x da esquerda para a direita. O setor da corda ilustrado está sob a ação das forças de tensão F_1 e F_2 em suas extremidades. Ambas são forças tangentes ao setor da corda nos seus pontos de aplicação. No momento em que o pulso de energia passa pelo elemento da corda ele se move perpendicularmente à direção de propagação do pulso, ou seja, na direção do eixo y . Utilizando a segunda lei de Newton pode-se encontrar a equação geral para a onda. As componentes F_x das forças se cancelam, pois não há movimento da corda nesta direção ($F_{1x} = F_{2x} = F_x$). A partir da geometria da figura pode-se encontrar a força F_y :

$$F_y = F_{2y} - F_{1y} \quad (8)$$

Figura 7 – Elemento de uma corda com massa dm na qual uma onda se propaga. As forças sobre os elementos da corda estão mostradas.



Fonte: Próprio autor.

As componentes F_{1y} e F_{2y} podem ser relacionadas às componentes F_{1x} e F_{2x} pelos ângulos α e β mostrados na figura, cujos valores absolutos podem ser escritos como:

$$tg\beta = \frac{F_{1y}}{F_{1x}} \equiv \left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)_x \quad \text{e} \quad tg\alpha = \frac{F_{2y}}{F_{2x}} \equiv \left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)_{x+\Delta x} \quad (9)$$

O símbolo Δ é usado em Matemática para representar a variação no valor de uma grandeza. Neste caso, $y = f(x, t)$. Como exemplo, $\Delta y/\Delta x$, significa a variação da grandeza y em relação à grandeza x . Geometricamente, o símbolo $\Delta y/\Delta x$ representa a inclinação da curva y em torno de um certo valor de x . Geometricamente, $\Delta y/\Delta x$ é representado pela tangente do ângulo. Substituindo estas definições na equação (8), e considerando a diferença entre os ângulos $tg\beta - tg\alpha$, encontramos:

$$F_y = F_x \left[\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)_{x+\Delta x} - \left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)_x \right] \quad (10)$$

Considerando que a massa do elemento Δx da corda seja $\Delta m = \mu\Delta x$, sendo μ a densidade linear de massa da corda, da segunda lei de Newton para a força F_y ($F_y = \Delta m \cdot a_y$), tem-se:

$$F_y = \mu\Delta x \frac{\Delta v_y}{\Delta t} = \mu\Delta x \frac{\Delta}{\Delta t}(v_y) = \mu\Delta x \frac{\Delta}{\Delta t} \left(\frac{\Delta y}{\Delta t}\right) = \mu\Delta x \frac{\Delta^2 y}{\Delta t^2} \quad (11)$$

Igualando as Equações (10) e (11),

$$F_x \left[\left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right)_{x+\Delta x} - \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right)_x \right] = \mu \Delta x \frac{\Delta^2 y}{\Delta t^2} \quad (12)$$

Dividindo os dois membros da Equação (12) por $F_x \Delta x$:

$$\frac{\left[\left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right)_{x+\Delta x} - \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right)_x \right]}{\Delta x} = \frac{\mu}{F_x} \frac{\Delta^2 y}{\Delta t^2} \quad (13)$$

Podemos ver que o termo do lado esquerdo da Equação (13) representa a diferença ou variação $\frac{\Delta y}{\Delta x}$ dentro da distância Δx , de modo que podemos escrevê-la como:

$$\frac{\Delta \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right)}{\Delta x} = \frac{\Delta(\Delta y)}{\Delta x \Delta x} = \frac{\Delta^2 y}{\Delta x^2}$$

Substituindo este resultado na Equação (13), temos:

$$\frac{\Delta^2 y}{\Delta x^2} = \frac{\mu}{F_x} \frac{\Delta^2 y}{\Delta t^2} \quad (14)$$

Fazendo uma rápida análise dimensional verificamos que μ/F_x tem dimensão $(kg/m)/(kg \cdot m/s^2) = (s/m)^2$. Portanto, o coeficiente μ/F_x equivale ao inverso do quadrado da velocidade. Como a força que aparece no coeficiente está na direção do eixo x , concluímos que esta velocidade também estará nesta mesma direção, e será interpretada como a velocidade da própria onda:

$$\frac{\mu}{F_x} = \frac{1}{v_x^2} \quad (15)$$

Substituindo a Equação (15) na Equação (14) encontramos a equação da onda na seguinte forma:

$$\frac{\Delta^2 y(x, t)}{\Delta x^2} = \frac{1}{v_x^2} \frac{\Delta^2 y(x, t)}{\Delta t^2} \quad \text{ou} \quad \frac{\Delta^2 y(x, t)}{\Delta t^2} = v_x^2 \frac{\Delta^2 y(x, t)}{\Delta x^2} \quad (16)$$

Podemos interpretar o termo $\Delta^2 y / \Delta t^2$ como a mudança na velocidade de y à medida que ele sobe e desce. À medida que este valor se desloca para cima e para baixo, os valores de x são afetados e se deslocam para a direita com velocidade constante v_x . Essa conexão entre x e y provém do gradiente de energia, que aqui está na direção positiva do eixo x . A Equação (16) representa todos os tipos de ondas mecânicas.

2.2.2 Ondas Eletromagnéticas

A adaptação para o caso de ondas eletromagnéticas é imediata. Basta substituir a posição vertical y de oscilação das partículas do meio pelos valores dos campos elétrico e magnético na mesma posição do espaço. Além disso, v_x deve ser substituído por c , símbolo utilizado para a velocidade da luz no vácuo.

$$\frac{\Delta^2 \mathcal{E}(x, t)}{\Delta x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\Delta^2 \mathcal{E}(x, t)}{\Delta t^2} \quad \text{e} \quad \frac{\Delta^2 B(x, t)}{\Delta x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\Delta^2 B(x, t)}{\Delta t^2} \quad (17)$$

As ondas eletromagnéticas são diferentes das ondas mecânicas no que tange àquilo que oscila para dar origem às ondas. Enquanto nas ondas mecânicas o parâmetro de oscilação é o deslocamento y da partícula, no caso das ondas eletromagnéticas temos dois entes oscilantes, o campo elétrico \mathcal{E} e magnético B . A variação do campo \mathcal{E} ao longo do espaço em virtude do movimento do pulso de energia dá origem à variação do campo B no tempo, e vice-versa. Esta é a razão de precisarmos de duas equações para descrever completamente uma onda eletromagnética, conforme demonstrado pelas Equações (17). A origem física por trás da interdependência entre a variação espacial de \mathcal{E} e a variação temporal de B provém do fato de que B é um efeito relativístico de \mathcal{E} . Em outras palavras, se um observador em um sistema de referência inercial enxerga \mathcal{E} , um observador em outro sistema de referência inercial em movimento relativo vai enxergar B . Mas não vamos entrar em detalhes acerca deste assunto neste texto.

Como as Equações (16) e (17) descrevem fenômenos oscilatórios, suas soluções devem ser representadas por funções matemáticas oscilatórias no tempo e no espaço. Sem entrar nos detalhes da matemática, pode-se encontrar a forma das soluções com argumentos relativamente simples. Para facilitar, considere a onda ilustrada na Figura 4. A função que representa esta onda pode ser escrita como:

$$y(x') = y_{\text{máx}} \text{sen}(kx') \quad (18)$$

O símbolo $y_{m\acute{a}x}$ é o máximo valor para a função $y(x')$, denominado de amplitude da onda. x' representa qualquer ponto da onda. A constante k foi inserida dentro da função seno porque, por definição, esta não deve ter unidade física, uma vez que o seno corresponde à razão entre duas componentes de uma mesma grandeza. A constante k é conhecida na literatura como o número de propagação, e é definida considerando-se que a cada distância $\Delta x = \lambda$ a função volta a representar a mesma configuração física. Como isto ocorre a cada 2π radianos, pode-se definir $k\lambda = 2\pi$, de onde obtemos $k = 2\pi/\lambda$. Baseado neste resultado, k é interpretado como o número de comprimento de ondas que cabem dentro da distância 2π radianos.

A Equação (18) não está completa, pois ela ainda não representa uma onda se movendo para a direita, conforme indicado na Figura 5. Veja que a velocidade não está presente na equação. Mas ela pode ser interpretada como uma fotografia da onda em um determinado instante de tempo. Para um referencial S estático em relação à onda, a posição x de um ponto dela se encontra a uma distância $x = x' + vt$ da sua origem, após um instante de tempo t . Assim, do ponto de vista do referencial S' , que se move juntamente com a onda, esta mesma posição se encontra em $x' = x - vt$. Portanto, substituindo este valor de x' na Equação (18) temos:

$$y(x, t) = y_{m\acute{a}x} \text{sen}[k(x - vt)] = y_{m\acute{a}x} \text{sen}[kx - kv t] \quad (19)$$

A Equação (19) mostra que um observador no referencial S' observa um padrão periódico espacial, definido pela condição $k\lambda = 2\pi$. Do ponto de vista de um observador no referencial S em relação ao qual a onda se move, este verá um padrão periódico temporal, porquanto um ponto específico da onda se afasta dele para a direita. Após um intervalo de tempo $t = \tau$ a onda terá se deslocado do valor igual ao comprimento de onda λ . Como isto ocorre a cada 2π radianos, podemos definir $kv\tau = 2\pi$, de onde obtemos $(2\pi/\lambda_0)v\tau = 2\pi$ e $\tau = \lambda_0/v$. Daqui fica fácil ver que τ representa o tempo para um comprimento λ_0 passar por um ponto fixo no espaço, e por isso é denominado de período temporal, ou apenas período. A quantidade de comprimentos de onda que passam por este ponto fixo no intervalo de tempo τ é denominada de frequência temporal, definida por $f = 1/\tau$. Usando este resultado e a definição do período, $1/f = \lambda_0/v$, encontramos a equação para a velocidade da onda definida pela Equação (2): $v = \lambda_0 f$.

É comum encontrarmos na literatura a correlação entre o movimento retilíneo e uniforme de uma onda com o movimento circular e uniforme de uma partícula. Olhando para o movimento circular podemos definir a velocidade angular ou frequência angular, escrita na forma $\omega = 2\pi/\tau = kv = 2\pi f$, cuja unidade é rad/s . Com esta definição para a frequência angular, a Equação (19) pode ser escrita na forma mais familiar:

$$y(x, t) = y_{m\acute{a}x} \text{sen}(kx - \omega t) \quad (20)$$

para ondas mecânicas, e

$$E(x, t) = E_{m\acute{a}x} \text{sen}(kx - \omega t) \quad \text{e} \quad B(x, t) = B_{m\acute{a}x} \text{sen}(kx - \omega t) \quad (21)$$

para ondas eletromagnéticas. Quando escritas neste formato as equações para os valores das grandezas da onda se tornam mais fáceis de serem analisadas. Agora fica fácil de ver porque k representa uma frequência espacial, enquanto ω representa uma frequência temporal.

2.3 O Fenômeno da Difração de Ondas

Nas seções anteriores fizemos uma descrição detalhado acerca das ondas, como forma de dar suporte ao tema principal deste Produto Educacional, que é o desenvolvimento de uma estratégia para ensinar o fenômeno da difração para estudantes de Ensino Médio. A motivação para este tema está na sua importância, tanto do ponto de vista científico quanto tecnológico. A difração é de grande importância para a explicação de vários fenômenos da natureza. Como exemplo, temos as luzes coloridas que são observadas na superfície de um CD ou DVD quando iluminados com luz branca; o avermelhado na cor da atmosfera nos períodos do início da manhã e final do entardecer; a formação de sombras de contornos não nítidos; iluminação das áreas atrás de portas entreabertas etc. Além disso, a difração é de fundamental importância em muitas aplicações de grande relevância na tecnologia atual. Ela é utilizada na formação de imagens holográficas tridimensionais e na construção de equipamentos denominados espectrômetros, utilizados em dezenas de diferentes técnicas de laboratórios na indústria e centros de pesquisa.

É sabido que as principais metodologias disponíveis para a observação da natureza em pequena escala usam as ondas como sua principal ferramenta. E é exatamente por este motivo que o estudo da difração se torna tão importante neste cenário, pois ela tanto pode ser positiva, como no processo de separação de luzes com diferentes cores em um feixe policromático, quanto negativa, enquanto limitadora do tamanho da região a ser observada. A difração desempenha papel fundamental no poder de resolução de todos os instrumentos ópticos, como câmeras, binóculos, microscópios, telescópios, e até o próprio olho humano.

Técnicas que fazem uso de ondas eletromagnéticas, como a microscopia óptica na região do infravermelho, visível, ultravioleta, a difração de raios-x e raios-gama, assim como as técnicas que

usam as ondas sonoras, como os ultrassons em hospitais e indústrias, possuem suas aplicações limitadas pela difração das ondas.

Do ponto de vista conceitual, a difração está associada à mudança na direção de propagação das ondas quando elas encontram obstáculos em sua trajetória que bloqueiam apenas parte dela, ou permitem a passagem de apenas parte dela. Esse espalhamento observado tem origem nos fenômenos da interferência construtiva e destrutiva. Por esta razão, é conveniente o estudo da interferência antes do estudo da difração.

2.3.1 Interferência de Ondas

A interferência é um dos fenômenos ondulatórios mais intrigantes e de maior relevância, não apenas porque ele leva ao entendimento de vários outros fenômenos ondulatórios, mas porque ela é fundamental em muitas aplicações tecnológicas. Expressando de uma forma simples, a interferência diz respeito ao efeito da superposição de duas ou mais ondas no mesmo local do espaço e no mesmo instante de tempo. Quando se trata de partículas materiais estáveis, ao se adicionarem duas delas a um recipiente vazio tem-se no final duas partículas, sendo impossível uma anular a existência da outra. Esse resultado é tão óbvio que faz parte do sendo comum. Entretanto, o número de partículas é uma grandeza escalar positiva, de modo que a soma de várias parcelas sempre resulta em um valor maior do que qualquer uma das parcelas isoladas.

Quando se trata de grandezas vetoriais, como deslocamentos e campos eletromagnéticos, a realidade pode ser bem diferente. Entende-se como onda a propagação de perturbações em um sistema de partículas que interagem entre si ou em um campo eletromagnético. Nesse cenário, a superposição de duas ondas com amplitudes A_1 e A_2 no mesmo local do espaço resulta na observação de apenas uma única onda cuja amplitude pode variar de $A_1 - A_2$ a $A_1 + A_2$.

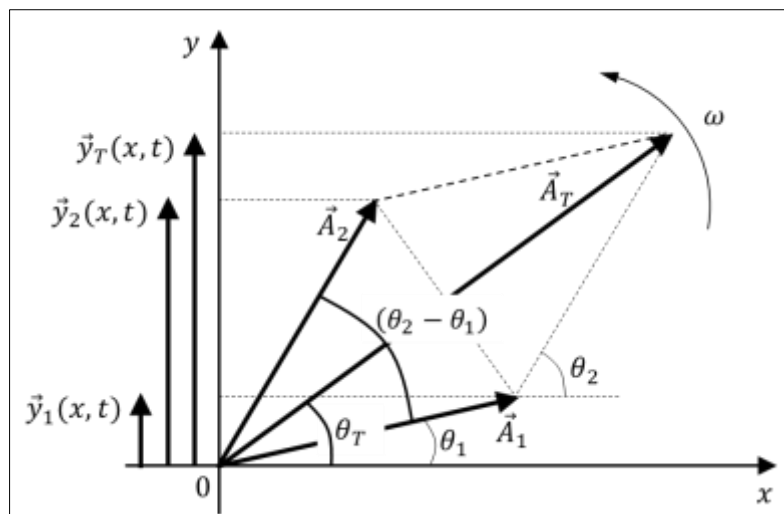
Do ponto de vista qualitativo, a superposição de duas ondas pode ser facilmente entendida geometricamente. A Figura 8 ilustra dois vetores \vec{A}_1 e \vec{A}_2 e suas projeções sobre o eixo y , \vec{y}_1 e \vec{y}_2 . Os valores absolutos dos vetores \vec{A}_1 e \vec{A}_2 representam as amplitudes das duas ondas. Estes vetores não estão fixos, mas giram no sentido anti-horário, ambos com a mesma velocidade ω . No momento observado ($t = 0$), os vetores formam ângulos θ_1 e θ_2 em relação ao eixo x , de modo que o ângulo entre eles é $\theta_2 - \theta_1$ constante. Usando a regra do paralelogramo, encontramos diretamente:

$$A_T^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\theta_2 - \theta_1) \quad (22)$$

Em geral, em vez de descrever uma onda pela sua amplitude, como na Equação (22), é mais útil descrevê-la em função de sua intensidade I , que representa a quantidade de energia por unidade de área e tempo, ou seja, é a potência por unidade da área atingida pela onda. Por definição, a intensidade é descrita como o quadrado da amplitude da onda, $I = A^2$. Assim, a Equação (22) se pode ser escrita na forma:

$$I_T = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\theta_2 - \theta_1) \quad (23)$$

Figura 8 – Ilustração para a soma de dois vetores girando com velocidades constantes.



Fonte: Próprio autor.

A soma dos dois efeitos tem a intensidade I_1 que se obteria com apenas um deles, mais a intensidade I_2 que se teria com apenas o outro, mais um termo de correção, proporcional a $\sqrt{I_1 I_2}$. Essa correção é chamada de interferência. Este termo é denominado interferência quer ele seja positivo ou negativo, diferentemente da conotação deste termo no cotidiano. Se o termo de interferência é positivo ($\theta_2 - \theta_1 < \pi/2$) ele é denominado interferência construtiva. É o que ocorre quando duas ondas se reforçam numa região do espaço. O caso oposto é denominado de interferência destrutiva ($\theta_2 - \theta_1 > \pi/2$), que ocorre quando uma onda anula parcialmente o efeito causada pela outra. No cenário em que $\theta_2 = \theta_1$, $\cos(\theta_2 - \theta_1) = 1$, as ondas estão em fase e a interferência será a máxima possível e $I_T = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$. Quando $\cos(\theta_2 - \theta_1) = -1$, as ondas estão totalmente fora de fase, e a interferência será mínima e $I_T = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$.

Um caso particular de grande importância ocorre quando as duas ondas possuem a mesma amplitude ($A_1 = A_2 = A$). Os ângulos entre os vetores \vec{A}_T, \vec{A}_1 e \vec{A}_2 da Figura 8 são iguais a $(\theta_2 - \theta_1)/2$. Assim, a amplitude total equivale à soma das duas projeções dos vetores \vec{A}_1 e \vec{A}_2 na direção do vetor \vec{A}_T . Tomando apenas o módulo da soma, temos:

$$A_T = 2A \cos\left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2}\right) \quad (24)$$

Considerando as amplitudes das duas ondas iguais ($I_1 = I_2 = I_0$), a equação (23) pode ser reescrita na forma:

$$I_T = 2I_0[1 + \cos(\theta_2 - \theta_1)] = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2}\right) \quad (25)$$

Observe que a Equação (25) é equivalente ao quadrado da Equação (24). Uma análise direta mostra que apenas a fase relativa $(\theta_2 - \theta_1)$ entre as ondas é determinante para a amplitude ou intensidade da onda resultante. Quando as ondas estão em fase ($\theta_2 = \theta_1$) a onda resultante tem a maior amplitude possível, igual a $2A$, o que equivale a uma intensidade quatro vezes maior, $I_T = 4I_0$. Tomando o valor médio da Equação (25) sobre todas as diferenças de fase $(\theta_2 - \theta_1)$ possíveis o resultado é $I_T = 4I_0 \times \frac{1}{2} = 2I_0$, como era esperado. A energia total contida nas duas ondas originais não é alterada pelo efeito da interferência, mas apenas a sua redistribuição no espaço. Esse é um resultado bastante interessante, e será explorado na demonstração do aplicativo sobre interferência e difração.

Quando a diferença entre as fases for de 180° ($\theta_2 = \theta_1 + 180^\circ$) a intensidade resultante será nula. Isto significa que a interferência é totalmente destrutiva, e o resultado é equivalente ao de não ter ondas presentes. Quando se trata de uma superposição de dois feixes luminosos de mesma intensidade, incidindo os dois numa tela pode resultar em completa escuridão, ou seja, um feixe de luz anula completamente o efeito causado pelo outro sobre o observador. Este comportamento é muito diferente do que se espera para partículas.

A Equação (24) não apresenta uma descrição completa da superposição, pois ela contém apenas a amplitude da onda resultante. Para achar o termo oscilante no tempo usamos o método algébrico. Para facilitar os cálculos, considere duas ondas com mesma amplitude, mesma frequência angular, se movendo no mesmo sentido positivo do eixo x , e defasadas no espaço por um valor Δx ($\theta_2 - \theta_1 \equiv k\Delta x$):

$$y_1(x, t) = A \sin(kx - \omega t) \text{ e } y_2(x, t) = A \sin(k(x + \Delta x) - \omega t) \quad (26)$$

A operação de soma algébrica é direta:

$$y_T(x, t) = A \sin(kx - \omega t) + A \sin(kx + \varphi - \omega t) \quad (27)$$

Usando a relação trigonométrica $\sin A + \sin B = 2 \sin \frac{1}{2}(A + B) \cos \frac{1}{2}(A - B)$ e fazendo os cálculos necessários, encontramos:

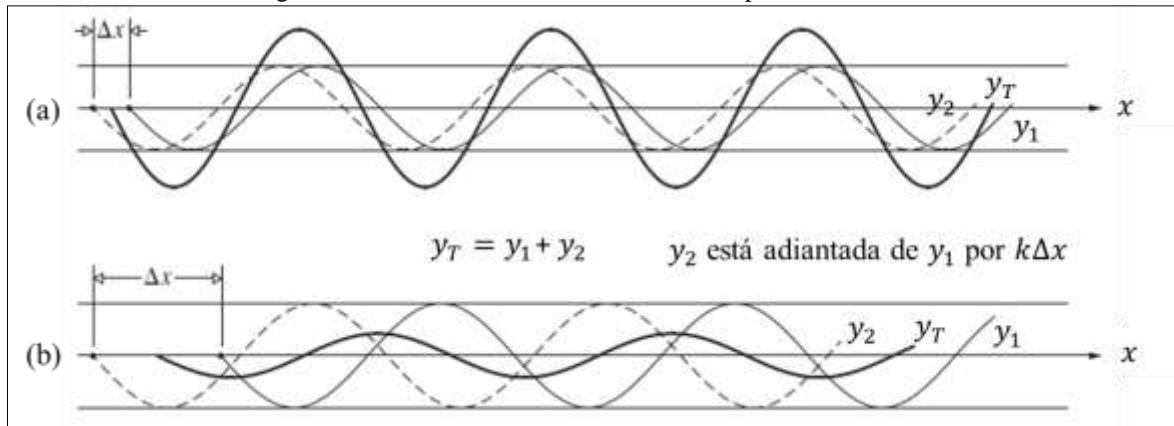
$$y_T(x, t) = \left\{ 2A \cos \left(\frac{k\Delta x}{2} \right) \right\} \sin \left[(kx - \omega t) + \frac{k\Delta x}{2} \right] \quad (28)$$

e a intensidade da onda resultante em qualquer posição x e instante de tempo t dada por:

$$I_T(x, t) = \left\{ 4I_0 \cos^2 \left(\frac{k\Delta x}{2} \right) \right\} \sin^2 \left[(kx - \omega t) + \frac{k\Delta x}{2} \right] \quad (29)$$

A Equação (29) descreve completamente a onda resultante da superposição, e mostra que ela possui a mesma frequência das ondas originárias, mas tem fase diferente por uma quantidade $k\Delta x/2$. O termo entre chaves é a intensidade da onda resultante, conforme demonstrado pela Equação (25). Ele também depende da diferença de caminho Δx , um parâmetro facilmente controlado quando se quer produzir ondas com maior ou menor intensidade em aplicações tecnológicas. Além disso, o modelo é adequado para descobrir a defasagem de ondas, a partir da intensidade da onda resultante, em muitos processos físicos. Como $k = 2\pi/\lambda$, do argumento da função cosseno temos $k\Delta x/2 = \pi\Delta x/\lambda$. Para $\Delta x \ll \lambda$, a amplitude resultante é aproximadamente igual a $2A$; se $\Delta x = 0, \pm\lambda, \pm2\lambda, \pm3\lambda, \dots$, a amplitude terá valor absoluto igual a $2A$ e a interferência é construtiva. Para $\Delta x = \pm\lambda/2, \pm3\lambda/2, \pm5\lambda/2, \dots$, a amplitude é zero e a interferência será destrutiva. Este fato será melhor discutido adiante.

A Figura 9 é uma representação das Equações (30) e (32) ao longo do eixo x . Ela ilustra como a fase relativa entre as ondas $k\Delta x$ controla o comportamento da onda resultante. Compatível com a descrição do texto acima, para $\Delta x \ll \lambda$ a interferência é construtiva (maior amplitude), enquanto que para distâncias $\Delta x \approx \lambda/2$ a interferência se torna destrutiva (menor amplitude).

Figura 9 – Interferência de ondas fora de fase por $k\Delta x$ radianos.

Fonte: Eugene Hetch.

Todos os resultados discutidos nesta seção foram feitos considerando que os dois vetores da Figura 8 giram com a mesma velocidade angular ω . Em outras palavras, a diferença de fase $\theta_2 - \theta_1 \equiv k\Delta x$ entre as duas ondas permanece constante com o tempo. Quando este é o caso, dizemos que as ondas são coerentes. Isso ocorre com fontes de luz monocromática, ou com luz do tipo laser. A consequência disso é que o padrão de interferência permanece por um tempo muito longo a ponto de parecer infinito à percepção humana, sendo facilmente observado. Entretanto, muitas fontes emitem ondas cujas diferenças de fases mudam rapidamente com o tempo; assim, o termo $k\Delta x$ oscila muito rápido.

Para fontes de luz comuns, como lâmpadas, chamas, ou mesmo a luz do Sol, o tempo de coerência é de apenas $10^{-8} s$ (10 ns). Quando observadas em instantes superiores estes as ondas já estão defasadas (incoerentes), e a interferência não pode ser mais observada diretamente com o olho humano, mas apenas com equipamentos muito rápidos. Matematicamente, isso pode ser entendido a partir da equação (23) da seguinte forma. Quando todas as ondas possuem o mesmo valor de $\theta_2 - \theta_1$, o valor médio do termo $2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\theta_2 - \theta_1)$ é igual a ele próprio e, portanto, diferente de zero. Mas quando o termo $(\theta_2 - \theta_1)$ é diferente para cada par de ondas, podendo variar de 0 a 360° , o valor médio de $\cos(\theta_2 - \theta_1)$ passa a ser nulo. Nesse caso, apenas os termos $I_1 + I_2$ permanecem não nulos. Essa é a razão porque não se vê manchas claras e escuras nas paredes de uma sala quando uma lâmpada é acesa no seu teto, mas sim uma iluminação uniforme em todo o ambiente.

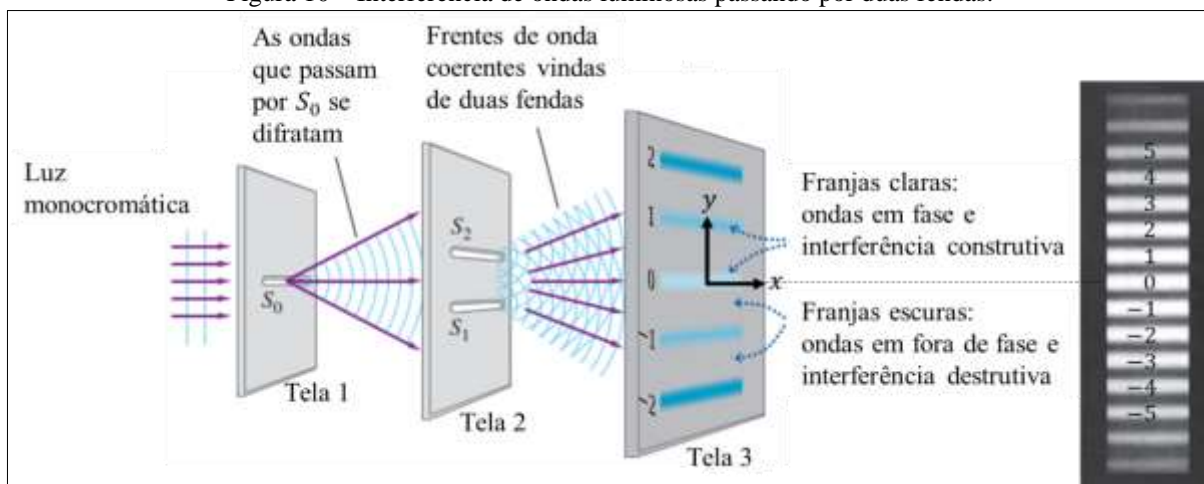
A análise da interferência feita até aqui se concentrou no efeito da superposição de duas ondas que se supôs coerentes. Quando se trata de ondas mecânicas, como ondas na água ou ondas sonoras, é fácil produzir ondas coerentes, pois as dimensões das fontes podem ser muito menores do que os comprimentos de onda destas. No entanto, quando se trata de ondas eletromagnéticas a situação é bem diferente. Nas fontes de luz comuns, os átomos ganham um excesso de energia por causa da

agitação térmica e também do impacto com elétrons acelerados. Uma vez energizado estes átomos começam a irradiar energia até perdê-la completamente, em geral em um intervalo de tempo da ordem de $10^{-8}s$. Esse é o tempo de coerência mencionado no parágrafo anterior. Os muitos átomos existentes em uma fonte macroscópica irradiam de modo não sincronizado, e as fases relativas $\theta_2 - \theta_1$ não são mais constantes.

Entretanto, a luz proveniente de uma única fonte macroscópica pode ser dividida de modo que suas partes sejam emergentes de duas ou mais regiões do espaço, formando duas ou mais fontes secundárias. Com isso, qualquer variação de fase da fonte afeta igualmente essas fontes secundárias e isso não altera suas fases relativas. Esse princípio deu origem a uma das experiências mais importantes da história da ciência, haja vista ter sido por intermédio dela que a luz passou a ser considerada uma onda. Trata-se da experiência da dupla fenda, realizada pelo físico inglês Thomas Young nos primeiros anos de 1800.

A Figura 10 ilustra o famoso experimento da dupla fenda. Uma frente de ondas planas monocromáticas atinge a primeira tela contendo uma abertura (ou fenda) estreita, S_0 . Devido à pequenez da fenda, a luz que emerge dela se origina de apenas uma pequena região da fonte. Portanto, a fenda S_0 se comporta quase como se fosse uma fonte ideal ou pontual. Conforme será explicado na próxima seção, frentes das ondas se espalham (difratam) e atingem a segunda tela, contendo duas aberturas também estreitas, S_1 e S_2 . As frentes de ondas que chegam a essas aberturas estão em fase porque percorrem as mesmas distâncias de S_0 . As ondas que emergem delas também estão em fase, de modo que S_1 e S_2 são fontes coerentes. Se houver alguma alteração na fase da luz emitida pela fonte antes da Tela 1, esta manifestará igualmente nestas duas ondas emergentes da Tela 2, de modo que mesmo assim as ondas emergentes permanecem coerentes. As experiências modernas usam lasers, dispositivos que produzem luz monocromática e coerente, em substituição à fenda S_0 .

Figura 10 – Interferência de ondas luminosas passando por duas fendas.



Fonte: Sears/Zemanski,

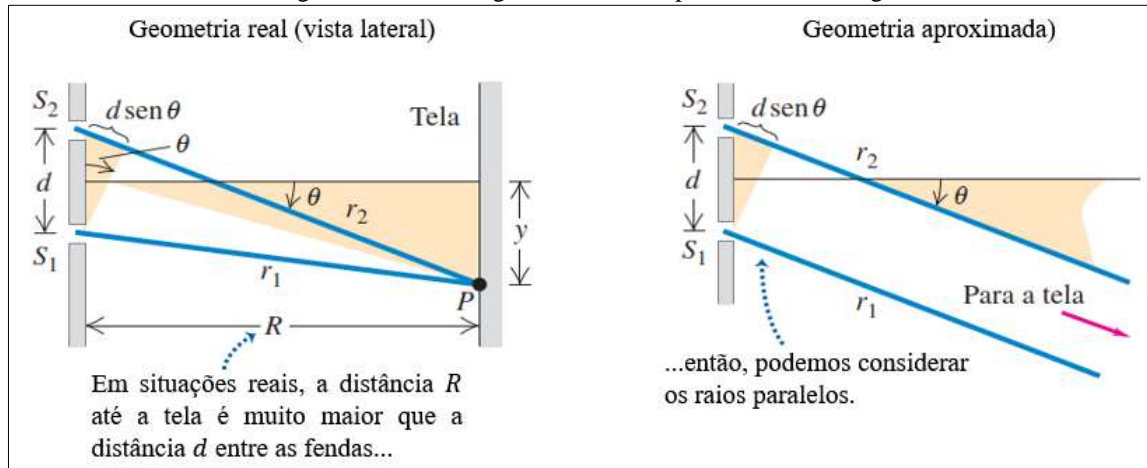
As duas ondas emergentes das aberturas S_1 e S_2 na Tela 2 difratam e se superpõem, produzindo um padrão de máximos e mínimos (interferência). Entretanto, este efeito só pode ser visualizado se houver uma tela sobre a qual as ondas incidam e sejam refletidas (Tela 3). A tela será mais fortemente iluminada nas regiões onde as ondas provenientes das fendas interferem construtivamente, representadas pelos números $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, denominados ordem de difração; por outro lado, a tela será mais escura nos pontos onde a interferência é destrutiva. À direita da figura está mostrada uma fotografia com um padrão de interferência na qual se vê, nitidamente, faixas claras e escuras.

Na Figura 11 (esquerda), a tela de projeção está relativamente próxima às fendas, de modo que os raios que conectam as duas fendas a um ponto da tela não podem ser considerados paralelos. Essa situação é conhecida como difração de campo próximo ou difração de Fresnel. Na Figura 11 (direita) a tela de projeção está longe o suficiente para que os dois raios sejam considerados paralelos, e esse cenário é conhecido como difração de Fraunhofer. As discussões feitas aqui serão restritas ao caso da difração de Fraunhofer, em geral mais fácil de analisar detalhadamente que a difração de Fresnel. Com essas ponderações, para simplificar a análise matemática da experiência de Young, considere a geometria ilustrada na Figura 11, na qual a distância R entre o plano das fendas e a tela de projeção é muito maior que a distância d entre as fendas. Com essa aproximação, as linhas que ligam as fendas ao ponto P são aproximadamente paralelas, como indica a figura à direita. Portanto, a diferença de caminho é dada por:

$$r_2 - r_1 = d \sin \theta \quad (30)$$

sendo r_1 e r_2 as distâncias entre as fendas e o ponto de superposição das ondas na tela; θ é o ângulo de inclinação das frentes de onda.

Figura 11 – Análise geométrica da experiência de Young.



Fonte: Sears/Zemanski.

Conforme já foi dito, a interferência construtiva ocorre nos pontos da tela em que a diferença de caminho das duas frentes de onda é igual a um número inteiro de comprimentos de onda, $m\lambda$, onde $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$. Portanto, as regiões brilhantes sobre a tela ocorrem para os ângulos θ que satisfazem a relação:

$$d \sin \theta = m\lambda \quad (31)$$

Do mesmo modo, a interferência destrutiva, com a formação de regiões escuras sobre a tela, ocorre nos pontos em que a diferença de caminho é igual a um número semi-inteiro de comprimentos de onda, $(m + \lambda/2, \dots)$. Assim,

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda \quad (32)$$

As Equações (31) e (32) mostram os critérios para se ter interferência construtiva e destrutiva. Mas elas não mostram em que local da tela isso ocorre. A dedução de uma expressão para localizar as posições dos centros das franjas brilhantes é bem simples. Na Figura 10 a distância vertical das franjas y é medida a partir do centro da figura de interferência, que corresponde à projeção da fenda S_0 sobre a Tela 3. Seja y_m a distância a partir do centro da figura de interferência ($\theta = 0$) até o centro da franja brilhante de ordem m . Seja θ_m valor correspondente de θ para este y . Então,

$$y_m = R \tan \theta_m \quad (33)$$

Para o caso particular em que $y_m \ll R$, θ_m é muito pequeno e $\tan\theta_m \approx \text{sen}\theta_m$. A Equação (33) pode ser reescrita como:

$$y_m = R \text{sen}\theta_m \quad (34)$$

Combinando as Equações (31) e (34) encontramos a expressão que mostra a posição das franjas claras:

$$y_m = R \frac{m}{d} \lambda, m = \pm 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (35)$$

Este resultado mostra que os centros das franjas claras aparecem a distâncias $y_1 = R\lambda/d$, $y_2 = 2R\lambda/d$, $y_3 = 3R\lambda/d$, ..., a partir da região central entre as fendas ($m = 0$), onde se localiza uma franja clara também. Lembre-se que o ponto central da tela de projeção se encontra à mesma distância das fendas. Neste tipo de experimento os valores de R , d e y_m são facilmente medidos. Portanto, temos por meio dele o comprimento de onda λ da luz. A experiência de Young foi a primeira medida direta do comprimento de onda da luz. Por outro lado, se conhecemos o comprimento de onda da luz podemos determinar a distância d entre as fendas. Por fim, controlando-se os valores de R e d podemos escolher em que região do espaço a interferência será construtiva ou não. Observe que a distância entre duas franjas brilhantes adjacentes na figura de interferência ($\Delta y = y_{m+1} - y_m = R\lambda/d$) é inversamente proporcional à distância d entre as fendas. Quanto mais próximas as duas fendas estão, maior é o espaçamento entre as franjas na tela iluminada. Quando a distância entre as fendas é muito grande as franjas ficam muito próximas, e será observada apenas uma distribuição uniforme de intensidade.

2.3.2 A Difração à Luz do Princípio de Huygens-Fresnel

Uma vez que os principais conceitos básicos relativos às ondas e ao fenômeno da interferência já foram apresentados, faremos agora uma breve discussão sobre os aspectos físicos da difração, evidenciando como este conceito pode ser usado para explicar vários fenômenos observados na natureza e como ele pode ser usado em aplicações tecnológicas. A difração pode ser imaginada como sendo o fenômeno da interferência de uma grande quantidade de ondas, e que se manifesta apenas quando as ondas viajantes encontram um obstáculo que impede parcialmente a sua passagem. Este fenômeno foi originalmente estudado pelo padre jesuíta Francesco Maria Grimaldi, na década de

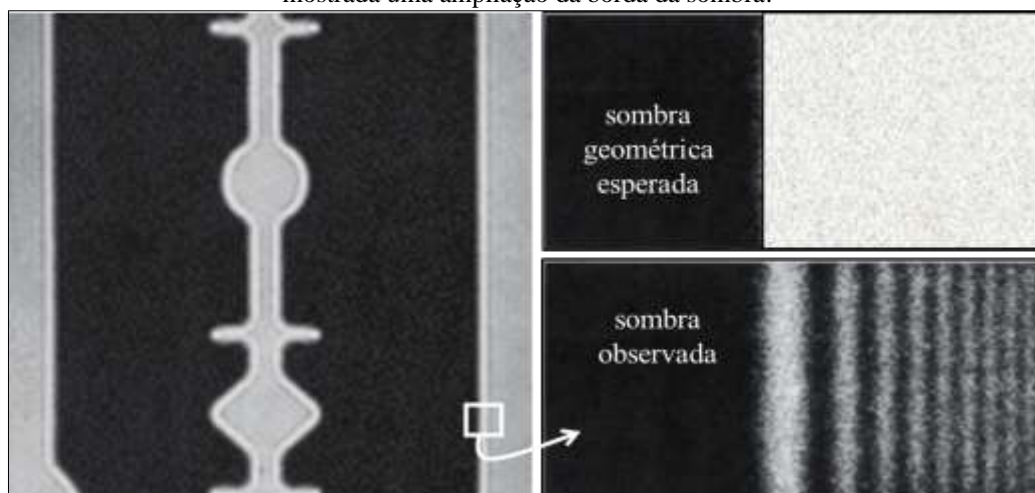
1650, sendo o primeiro a denominá-lo difração. Por meio de seus estudos, Grimaldi demonstrou que o efeito da difração da luz não podia ser conciliado com a versão de que esta fosse formada de partículas que se moviam em linha reta. Esta foi uma das primeiras indicações de que a luz era uma onda.

O fenômeno da difração está presente no cotidiano e muitas vezes as pessoas não se dão conta dele. O som da sirene de uma ambulância que se encontra em uma rua fora do alcance da visão é ouvido essencialmente por causa da difração do som em casas, carros, árvores etc. Do mesmo modo, quando duas pessoas conversam de costas uma para a outra, elas se ouvem por causa da difração do som. Uma pessoa atenta, observará que as sombras dos objetos nunca têm contornos bem definidos, pelo contrário, a quantidade de luz aumenta gradativamente à medida que se sai da sombra em direção à claridade. Estes efeitos, quando devidamente entendidos, podem ser reproduzidos intencionalmente para a construção de dispositivos de grande importância para a tecnologia atual.

A Figura 12 mostra a fotografia de uma lâmina de barbear, iluminada com luz monocromática a partir de uma pequena abertura para que se obtivesse uma fonte pontual. Percebe-se que a imagem não possui contornos bem definidos, mesmo quando observada de longe. A Figura inserida à direita é uma fotografia ampliada dos limites da sombra. Quando vista de perto, fica claro que a sombra apresenta um padrão de máximos e mínimos, característico da difração (interferência).

Em geral, na vida cotidiana não se observa difração nas sombras dos objetos. A razão desta ausência provém do fato de que as fontes de luz não são monocromáticas nem puntiformes. Se na fotografia da Figura 12 tivesse sido usada luz branca, proveniente de uma lâmpada fluorescente, como exemplo, comprimentos de onda diferentes provenientes da luz de diferentes pontos da lâmpada produziriam suas próprias difrações, e a superposição destas anularia o efeito global.

Figura 12 – Fotografia de uma lâmina de barbear (esquerda) mostrando a difração nos seus contornos. À direita está mostrada uma ampliação da borda da sombra.



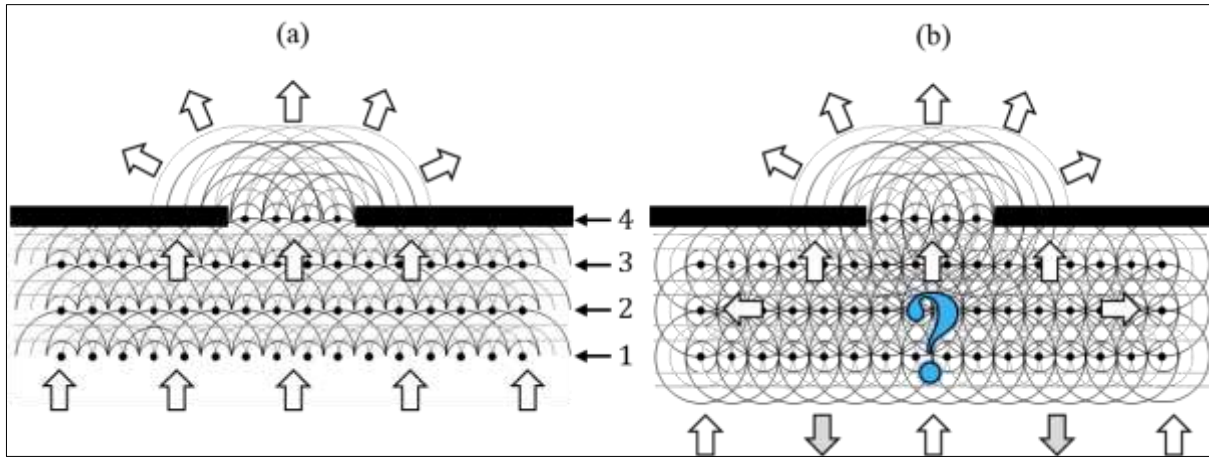
Fonte: Sears/Zemanski.

A interferência observada na borda da sombra da Figura 12 pode ser explicada evocando-se o denominado princípio de Huygens, segundo o qual cada ponto não obstruído de uma frente de onda (plana ou não) atua como se fosse uma fonte de ondas esféricas secundárias. Dizendo de outra forma, cada ponto do espaço alcançado por uma onda age como se fosse uma fonte luminosa pontual que emite luz em todas as direções, na mesma frequência da onda que o atinge. Embora muito utilizado na literatura para explicar a difração, este princípio apresenta sérias limitações, sendo incorporado à explicação como uma espécie de postulado, ou seja, uma conjectura sem explicações fundamentais, a não ser a de que se adequa à observação experimental.

A Figura 13 ilustra uma onda plana se deslocando na direção vertical, de baixo para cima, conforme indicado pelas setas grandes. Os pequenos pontinhos representam fontes de ondas esféricas, ou seja, fontes pontuais. A primeira limitação do princípio de Huygens está no fato de que ele só leva em consideração a envoltória (superposição) das frentes de ondas, provenientes das infinitas fontes pontuais (destacadas na Figura 13a pelas linhas numeradas 1, 2 e 3), que se propaga na direção da onda original (diretamente para cima), não levando em conta o que acontece com o restante das frentes de ondas que se propagam nas outras direções do espaço, inclusive na direção oposta à da onda original, conforme ilustrado na Figura 13b.

Baseado na ideia de Huygens, não é possível explicar por que após a fenda a envoltória das infinitas ondas não viaja mais apenas na direção da onda original, mas se espalha em todas as direções, conforme ilustrado na parte superior da Figura 14. Em outras palavras, o princípio não explica porque as ondas se difratam. Além disso, o princípio de Huygens não leva em conta o comprimento de onda das ondas. Isto significa que o padrão das frentes de ondas é o mesmo para todos os tipos de ondas. Mas não é isso o que se observa na natureza. O som da buzina de um carro se difrata facilmente em uma árvore entre o carro e uma pessoa, não projetando nesta a sua “sombra”. Entretanto, a luz proveniente dos faróis possui um padrão de frentes de onda diferente, e a sombra da árvore é projetada na pessoa.

Figura 13 – Ilustração para o princípio de Huygens.

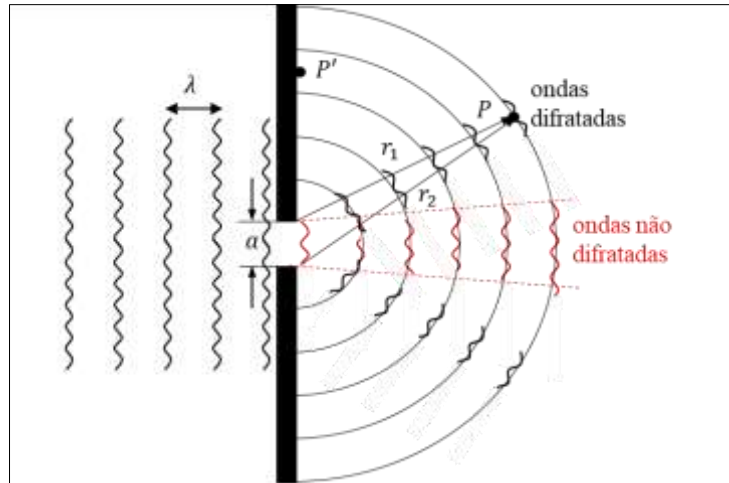


Fonte: Próprio Autor.

Estas dificuldades foram superadas parcialmente por Augustin-Jean Fresnel, na década de 1830, com a adição do efeito de interferência, conceito desenvolvido por Thomas Young durante suas famosas experiências nos primeiros anos de 1800. Um dos grandes achados de Fresnel foi demonstrar matematicamente que a soma de duas funções senoidais de mesma frequência e fases diferentes tem efeito semelhante ao de somar duas forças em diferentes direções. Neste sentido, Fresnel mostrou que duas ondas de mesma amplitude e frequência, defasadas de 180 graus no mesmo local do espaço, é fisicamente equivalente a não ter nenhuma onda presente, assim como ter duas forças de mesmo valor e sentidos contrários atuando sobre uma partícula resulta no mesmo efeito de não ter nenhuma força presente.

Com o auxílio do princípio Huygens-Fresnel podemos fornecer uma explicação qualitativa para o fenômeno da difração. A Figura 14 ilustra uma versão simplificada uma onda plana que atravessa a fenda de diâmetro a em uma tela e é difratada. Apenas a envoltória das frentes de ondas é mostrada. Considere uma envoltória que atinge o ponto P . A diferença entre os caminhos ópticos, descritos pelos raios r_1 e r_2 que partem das bordas da fenda, é dado por $\delta = |r_2 - r_1|$. Se cada ponto não obstruído da onda atua como uma fonte coerente de novas ondas, a maior valor para δ ocorre quando as fontes se encontram exatamente sobre as bordas da fenda, como mostrado na figura. Para este caso temos $\delta_{m\acute{a}x} \leq a$.

Figura 14 – Ilustração para a difração usando o princípio de Huygens-Fresnel.



Fonte: Próprio Autor.

No caso particular em que o ponto P está em qualquer local sobre a tela, ilustrado pelo ponto P' , tem-se $\delta_{m\acute{a}x} = a$. Se $\lambda > a$, então $\lambda > \delta_{m\acute{a}x}$, e como as ondas partem em fase da abertura, elas vão se interferir construtivamente, independentemente de onde esteja o ponto P . Portanto, se o comprimento de onda da onda é muito maior do que o tamanho da abertura da fenda, as frentes de onda se espalharão para todas as regiões (grandes ângulos) após a fenda. Por outro lado, se o comprimento de onda da onda for muito menor do que a abertura da fenda, as ondas não se difratam, e continuam sua trajetória sem desvio, conforme indicado na parte central da Figura 14. Para um dado comprimento de onda, quando menor a abertura, mais circular se torna a onda difratada. Dito de outra forma, o princípio de Huygens-Fresnel mostra que a difração é uma manifestação da interferência construtiva. Este resultado está em pleno acordo com a Equação (29) e as discussões que se seguiram à esta.

2.3.3 Intensidade das Ondas Difratadas

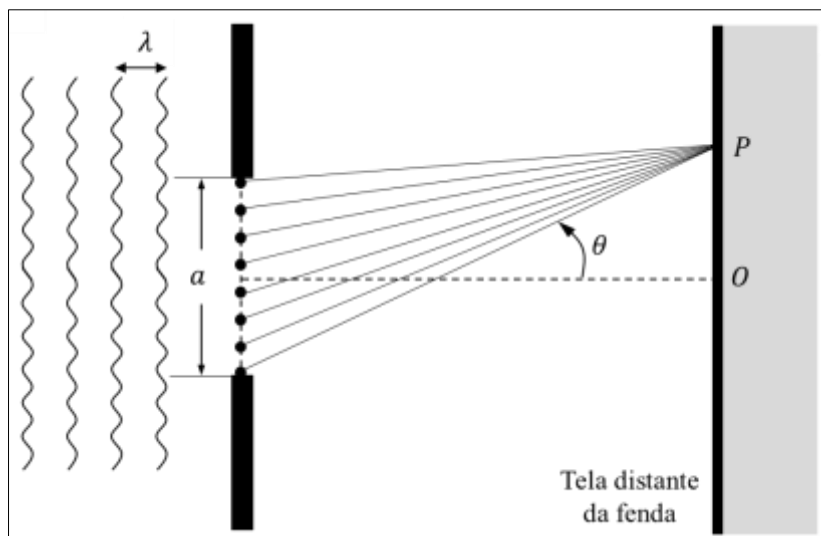
Na seção 2.3.1 discutimos como as ondas se superpõem em um ponto P do espaço sem, contudo, levar em conta de onde estas ondas vieram, ou qual a distribuição espacial resultante no entorno de P . A Equação (29) mostra apenas as características da onda resultante da superposição de duas ondas que chegaram ao ponto P atrasadas por um intervalo de tempo equivalente a $\Delta t = \Delta x/c$, conforme mostrado na Figura 9. Mas a análise da difração requer que se conheça os detalhes da distribuição espacial da intensidade resultante em todas as regiões em volta do ponto P . Uma descrição qualitativa desta distribuição foi feita na seção 2.3.2, culminando com os comentários da

Figura 14. Na presente seção, a distribuição de intensidades será demonstrada de forma quantitativa usando uma ferramenta matemática simples, porém muito poderosa.

O método mais simples para se deduzir uma expressão para a distribuição da intensidade na difração produzida por uma fenda única é o da soma de vetores. Como esses vetores representam ondas, eles são chamados de fasores. Um fasor é um vetor cujo comprimento representa a amplitude da onda, e cuja direção, em relação a uma direção escolhida, representa o ângulo de fase da onda. Na representação de fasores, quando a amplitude da onda varia no tempo, sua variação pode ser expressa pela rotação do fasor. Os fasores já foram usados na Figura 8 para demonstrar a intensidade total da superposição, resumida na Equação (29).

A Figura 15 ilustra uma onda plana que se desloca para a direita e encontra uma fenda com abertura a . Evocando o princípio de Huygens-Fresnel, considere que a frente de onda plana possa ser representada por 8 fontes pontuais, alinhadas com a fenda (representadas pelos pontos dentro da fenda). Elas emitem ondas secundárias que se superpõem sobre toda a tela, que se encontra a grande distância da fenda, para satisfazer o critério de Fraunhofer. Para fins de demonstração, considere as frentes de ondas (representadas pelas linhas) que se dirigem para o ponto P . Embora não pareça claro na figura, como a tela está muito distante da fenda, todos os ângulos θ_i entre as frentes de onda e a linha tracejada (referência no centro da fenda) são considerados iguais a θ . O objetivo é encontrar um padrão para a distribuição da intensidade das ondas superpostas na tela em função dos parâmetros geométricos a , λ e θ mostrados na Figura 15, já que todo são facilmente obtidos experimentalmente.

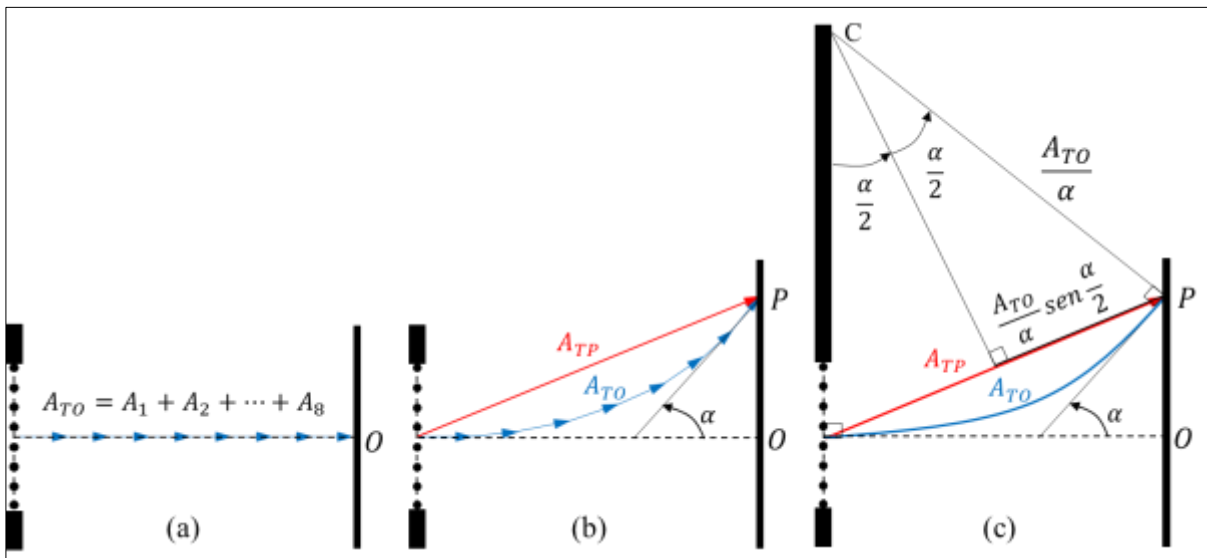
Figura 15 – Ilustração para a difração no limite de Fraunhofer.



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 16 ilustra o que ocorre com as ondas da Figura 15, do ponto de vista de fasores. Agora, em vez de linhas, cada onda é representada por um fasor de magnitude A_i e ângulo de fase α_i . O módulo da soma vetorial dos fasores em cada ponto da tela é A_T . Quando se observa o ponto O da tela (Figura 16a), a soma das amplitudes das ondas é $A_{TO} = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_8$. Como o ponto O é simétrico em relação ao centro da fenda, todos os fasores estão em fase (possuem a mesma direção e o mesmo sentido). Observando-se o ponto P da tela (Figura 16b), a amplitude das ondas que chegam a este ponto da tela é A_{TP} . Como P não é simétrico em relação à fenda, os fasores que chegam a ele estão defasados por um ângulo α em razão das diferentes distâncias às fontes.

Figura 16 – Ilustração para a soma de fasores.



Fonte: Próprio Autor.

A soma vetorial dos fasores é indicada pelo perímetro de um setor circular poligonal de 8 lados, associados às 8 fontes. A amplitude A_{TP} é dada pelo comprimento da reta que une as extremidades do setor poligonal. Baseado no princípio de Huygens-Fresnel, temos de fato muitas ondas (conceitualmente infinitas delas) dentro da fenda e isso está ilustrado na Figura 16c. Neste limite, a linha poligonal de fasores transforma-se em um arco de circunferência, cujo comprimento é igual a A_{TO} . Traçando-se perpendiculares às extremidades do arco encontramos o centro de curvatura, C . Da definição de setor circular, $s = R\theta$, encontramos o raio do círculo, $R = A_{TO}/\alpha$. Associando a amplitude das ondas superpostas ao comprimento A_{TP} , da Figura 16c, temos:

$$A_{TP} = A_{TO} \frac{\text{sen}(\alpha/2)}{\alpha/2} \quad (36)$$

A Equação (36) fornece a amplitude das ondas superpostas em todos pontos da tela. Lembrando que a intensidade de uma onda é proporcional ao quadrado de sua amplitude, a equação acima se torna:

$$I(\alpha) = I_0 \left[\frac{\text{sen}(\alpha/2)}{\alpha/2} \right]^2 \quad (37)$$

onde $I(\alpha) = A_{TP}^2$ e $I_0 = A_{TO}^2$.

A Equação (37) não é muito útil do ponto de vista prático porque o ângulo α não faz parte dos parâmetros do aparato experimental (Figura 15). Entretanto, pode-se reescrevê-la facilmente em função de a , λ e θ . Adaptando o resultado da Equação 29 para o contexto da Figura 15, a diferença entre as distâncias percorridas pelas ondas é $r_2 - r_1 \equiv \Delta x = a \text{sen}\theta$. Por outro lado, a diferença de fase pode ser escrita como $\theta_2 - \theta_1 \equiv \alpha = k\Delta x$. Daqui,

$$\alpha = k a \text{sen}\theta = \frac{2\pi}{\lambda} a \text{sen}\theta \quad (38)$$

Substituindo este último resultado na Equação (37), temos o resultado desejado:

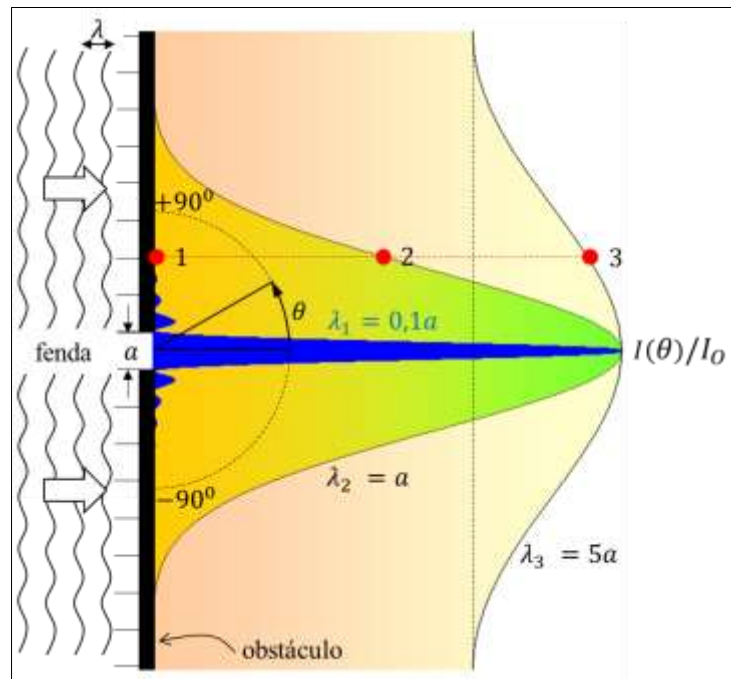
$$I(\theta) = I_0 \left[\frac{\text{sen}[\pi a (\text{sen}\theta)/\lambda]}{\pi a (\text{sen}\theta)/\lambda} \right]^2 \quad (39)$$

Existem três maneiras de apresentar o conteúdo discutido até aqui sobre a intensidade da onda difratada a um grupo de estudantes do Ensino Médio. A primeira e mais abstrata é por meio da Equação (39). Apenas observando essa equação é muito difícil um estudante ter noção clara sobre como a energia transportada por uma onda que atravessa a fenda se distribui no espaço após a fenda. Mas é precisamente o que mostra essa equação. A segunda maneira é por meio do desenho da função $I(\theta)$ para diferentes direções θ após a fenda, mantendo o comprimento de onda λ e a largura a da fenda constantes. A terceira forma é a partir de simulações computacionais, conforme será discutido na seção 2.4.

A Figura 17 representa três formas diferentes de expressar a Equação (39). Ela fornece o padrão da intensidade normalizada da onda na região após a fenda. Inicialmente, ondas planas se movem da esquerda para a direita, conforme indicado na figura. Para descrever a primeira forma, considere que a estas ondas tenham comprimento de onda $\lambda_1 = a/10$, ou seja, um comprimento de onda muito

menor do que a abertura da fenda. Neste caso, a Equação (39) mostra que as frentes de onda que atravessam a fenda não se espalham muito (difratam), e essencialmente seguem seu sentido normal de propagação.

Figura 17 – Distribuição de intensidade para ondas difratadas.



Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 14 essa ideia foi representada desenhando as ondas diretamente no alinhamento da fenda. Aqui temos a intensidade das ondas após a fenda. Isso pode ser visto pelo pico azul estreito que se encontra na frente da fenda. Como o comprimento de onda é muito pequeno, a envoltória difratada revela a inversão na direção da oscilação das ondas difratadas e os pequenos picos de amplitude negativa são observados. Pelo fato de $I(\theta)$ ser proporcional ao quadrado da amplitude, os pequenos picos aparecem para cima (para a direita, na figura).

Para entender isso melhor, imagine que um detector de luz gire ao longo da linha circular pontilhada, começando em $\theta = +90^\circ$ e indo até $\theta = -90^\circ$. A leitura desse detector seria zero, com exceção na região na frente da fenda. Esta é a razão porque se afirmou que a luz não se espalhou após atravessar a fenda. Tão logo o detector sai da frente da fenda, a intensidade cai rapidamente a zero. Para tornar isso mais claro, imagine que estas ondas sejam do tipo sonora e estejam dentro do limite de audição humana. Se a fenda representa a porta de uma sala com 1 m de largura, uma pessoa junto à parede a 2 m de distância da porta (representada pelo ponto 1 na figura) não ouviria o som proveniente de dentro da sala.

Considere agora que as ondas tenham comprimento de onda $\lambda_2 = a$. Isso está representado na figura pelo segundo pico esverdeado mais largo. O sinal do detector seria não nulo em toda extensão do círculo de um raio até aproximadamente 6 vezes a largura da fenda, a partir de seu centro. Retornando ao caso das ondas sonoras, a pessoa junto à parede a 2 m da porta (representada pelo ponto 2 na figura) ouviria sem muitas dificuldades o som proveniente da sala. Para $\lambda \geq a$ não ocorre a inversão de fase nas ondas difratadas, e os picos laterais não são mais observados.

Como último cenário, considere agora que as ondas tenham comprimento de onda $\lambda_3 = 5a$, muito maior do que a largura da fenda. Neste caso, as ondas se espalham em todas as direções com muito mais facilidade após a fenda, ou seja, a interferência é construtiva em uma região muito maior do que nos casos anteriores. Em outras palavras, o pico central se alarga de modo a tomar toda a região após a fenda. Pela Figura 17, observa-se que a intensidade das ondas difratadas a uma distância de 8 vezes larguras da fenda sobre a parede do obstáculo tem intensidade que corresponde a cerca de 70% da intensidade na frente da fenda. Considerando novamente o caso das ondas sonoras, a pessoa junto à parede a 2 m da porta (representada pelo ponto 3 na figura), ouviria muito melhor o som proveniente da sala.

Resumindo, a Figura 17 mostra como a energia da onda se distribui após a fenda. Para $\lambda \ll a$, toda energia que passa pela fenda se concentra à sua frente em um feixe da largura da própria fenda. No outro limite, para $\lambda \gg a$, a energia que passa pela fenda se espalha em uma grande região atrás dela. Devemos deixar claro que a interferência apenas redistribui a energia no espaço. Se duas ondas possuem energia total E_T , quando separadas espacialmente, esta quantidade de energia permanecerá a mesma, independente da forma que o padrão de interferência possa vir a ter, quer exista ou não difração.

2.4 Uso do Software *Ripple Tank Simulation* Como Mediador para o Ensino da Difração

Uma vez que o fenômeno da difração foi discutido por meio de argumentos qualitativos e quantitativos, é importante que ele seja mostrado também na forma imagens, seja via experimentos em laboratório ou virtuais, por meio de simulações computacionais. Tem sido amplamente mostrado na literatura que este tipo de intervenção facilita a obtenção de conceitos que, via de regra, estão embutidos em equações matemáticas abstratas. Com este propósito, agora será feito uso do programa de computador *Ripple Tank Simulation* (RTS), uma versão em WebGL escrito em *Java Script*, uma linguagem de programação que permite a execução do software diretamente da página da internet.

A escolha deste programa se deu em função da sua simplicidade operacional, por estar disponível *on-line* (<https://www.falstad.com/ripple/>) e ainda por ser gratuito. Existem outros

programas de simulação disponíveis *on-line*, como exemplo o conhecido *Physics Education Technology – PhET*, da Universidade do Colorado, EUA (https://phet.colorado.edu/pt_BR/), que possui simulações em quase todas as áreas da ciência. O programa RTS foi escolhido porque ele apresenta grande quantidade de simulações especificamente voltadas para o estudo da interferência e difração, evitando que o estudante divague por outras áreas que não são foco do estudo durante as atividades em sala de aula.

Um dos objetivos centrais dessa aplicação é fazer o professor focar sua atenção em representações mentais alternativas com a finalidade de melhorar o grau de aprendizado dos conceitos. Em geral, os estudantes possuem conhecimentos antes de se envolverem com discussões sobre novos conteúdos em sala de aula e também aprendem novos saberes durante essas discussões. Entretanto, por causa do senso comum ou por equívocos conceituais, nem sempre o que é aprendido corresponde ao que o professor realmente quis ensinar.

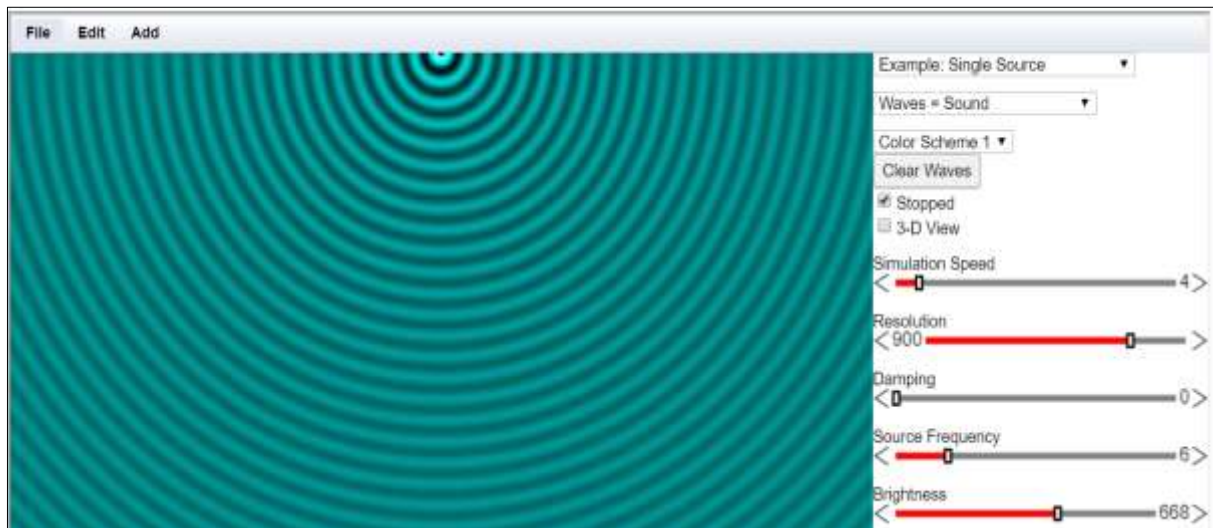
Isso ocorre sobretudo com a disciplina Física, na qual os conceitos são passados geralmente através de equações matemáticas abstratas, e os estudantes quase sempre não têm a oportunidade de visualizar esses conceitos por meio de experiências, sejam reais ou virtuais. O resultado deste modelo educacional é a falta de um aprendizado crítico, por meio do qual o estudante possa entender e transformar situações do seu cotidiano. No atual modelo educacional brasileiro, os estudantes ficam expostos à uma quantidade enorme de informações, absorvida de forma parcial e distorcida, resultando em aprendizado notadamente mecânico e, portanto, desprovido de qualquer sentido de utilidade prática.

2.4.1 Instruções básicas sobre a operação do RTS

A Figura 18 mostra a tela inicial (ou de trabalho) do programa de simulação RTS, na qual uma fonte pontual emite uma onda para dentro da região retangular de trabalho. Esta tela inicial é simples e de fácil identificação das instruções. Na aba superior existem apenas três funções: **Arquivo** (*File*), **Editar** (*Edit*) e **Adicionar** (*Add*). A Figura 19 mostra as opções dentro de cada uma destas funções. Na função **Arquivo** temos a opção de salvar as simulações e abrir os arquivos salvos. O programa não permite salvar as simulações no formato de imagens ou filmes, mas podemos salvar um arquivo no formato de texto. Ao ser aberto, o RPS automaticamente reproduz a simulação salva. A função **Editar** serve para copiar, duplicar, colar e recortar figuras de objetos que pode ser colocados na área de interação das ondas, bem como incluir fontes de ondas nesta região da tela. Estes objetos são incluídos a partir da função **Adicionar**, dentro da qual existem 20 (vinte) subfunções diferentes, cada uma explorando um aspecto da física das ondas no que diz respeito à interferência e difração. O

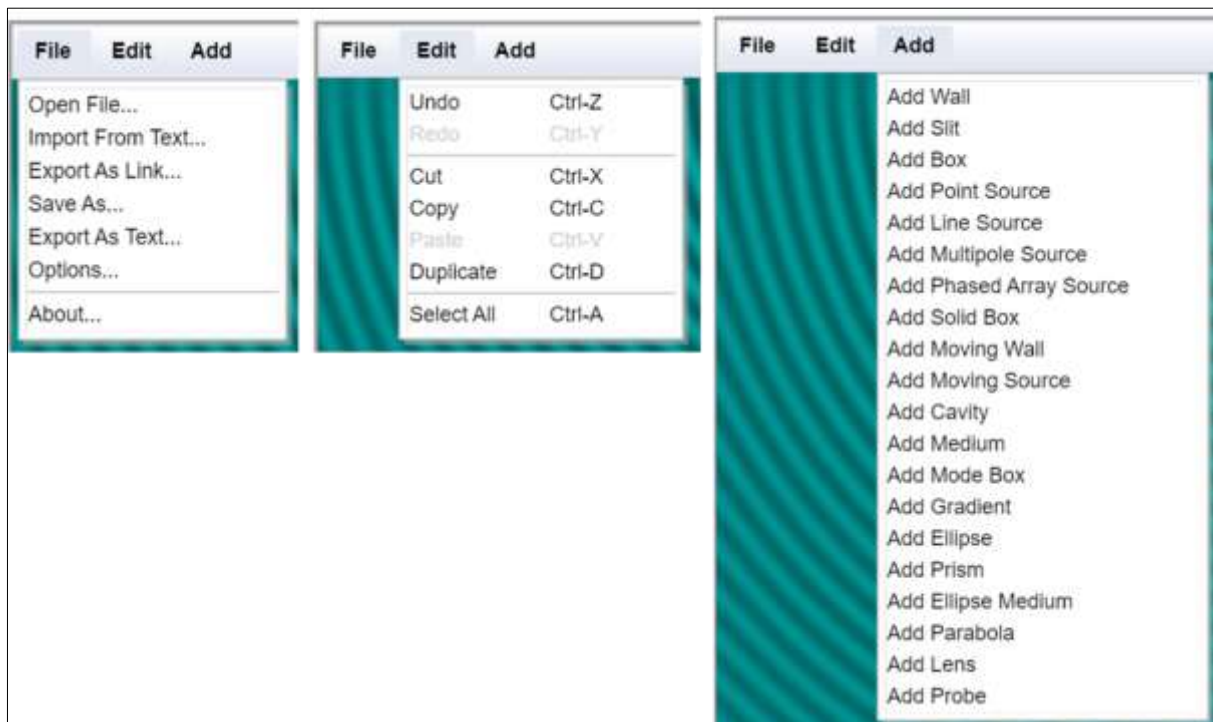
conteúdo da função **Adicionar** também pode ser acessada clicando o botão direito do mouse em qualquer local do retângulo de trabalho.

Figura 18 – Tela de trabalho do programa *Ripple Tank Simulation*.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 19 – Conteúdo das funções Arquivo, Editar e Adicionar.

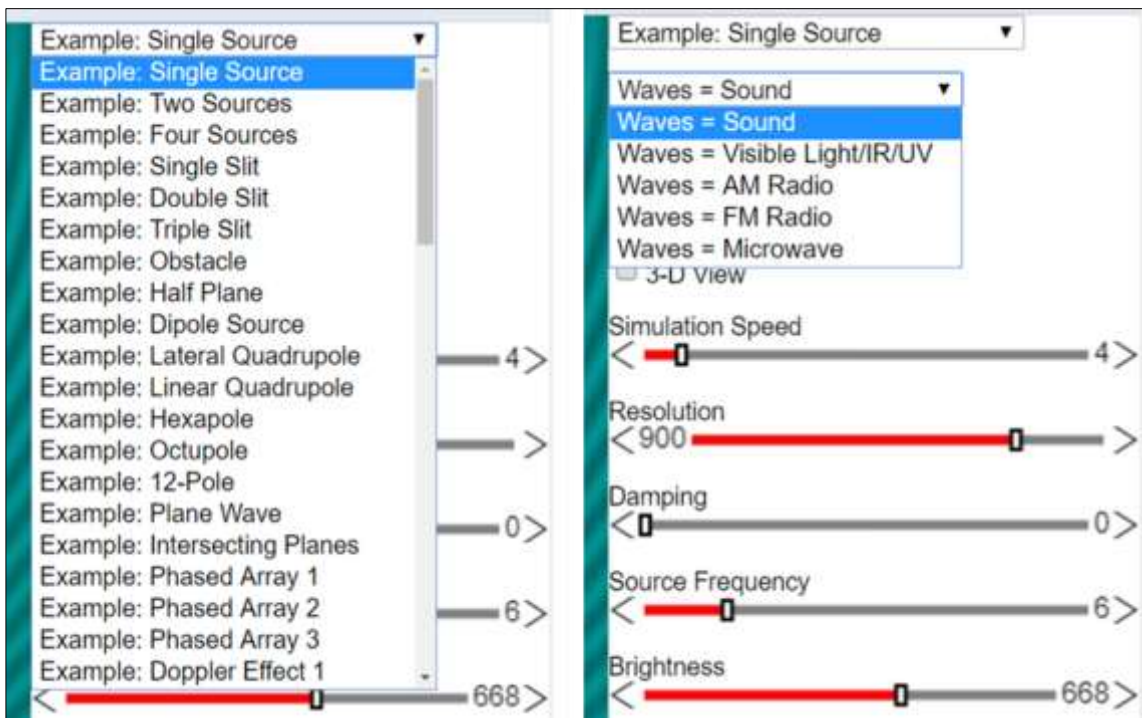


Fonte: Próprio Autor.

O lado direito da tela de trabalho do RTS (Figura 18) apresenta opções para escolher o tipo de fonte das ondas (aproximadamente 70 cenários diferentes), opção entre ondas mecânicas ou eletromagnéticas, opção de apresentação da simulação em duas ou três dimensões. Além disso, permite o controle de alguns parâmetros da simulação, como a velocidade da simulação, a resolução da imagem, frequência e a intensidade (brilho) das ondas, e alguns padrões de cores das imagens. Também fornece a opção de parar a simulação para uma análise mais detalhada dos padrões de interferência obtidos. Lembrando que cada ponto da imagem é obtido a partir de um cálculo computacional, a escolha de uma resolução muito elevada implica em uma grande quantidade de cálculos, o que pode comprometer a velocidade da simulação, dependendo da capacidade de processamento da máquina em uso e da qualidade da rede de internet.

Para fins de ilustração, a Figura 20 (lado esquerdo) mostra algumas fontes de ondas disponíveis, bem como obstáculos que podem ser incluídos. Como exemplo, pode-se ter apenas uma fonte pontual (usada na Figura 18) ou várias, que podem ser colocadas em qualquer ponto da tela. Para adicionar uma fonte pontual (ou qualquer outra disponível) basta usar a função **Adicionar** na aba superior. Também pode-se usar o mouse para incluir os mesmos objetos, bastando clicar com o botão direito em qualquer ponto da tela de trabalho, e um menu com as mesmas opções estará disponível. Uma vez inserido, qualquer objeto pode ser deslocado sobre a tela de trabalho, bastando clicar com o botão esquerdo do mouse, arrastar e soltar no local desejado. Nesta tela também tem as funções **Editar** (oferece várias opções de controle sobre a fonte da onda), bem como as opções **Deletar** e **Duplicar** as fontes inseridas. Outras instruções sobre o programa RTS serão dadas diretamente aos estudantes durante as aulas presenciais.

Figura 20 – Tipos de fontes de ondas e seus ajustes.



Fonte: Próprio Autor.

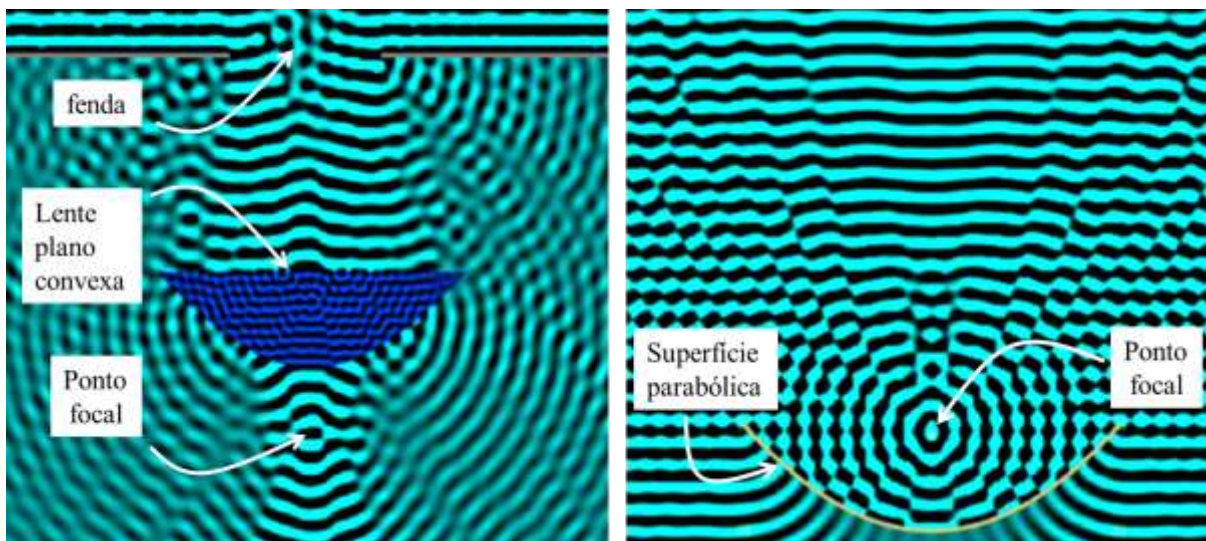
2.4.2 Aplicações do RTS

A Figura 21 ilustra como o RTS pode ser utilizado para mostrar como as ondas interagem com diferentes objetos. Na parte superior à esquerda da figura foi introduzida uma fenda com abertura muito maior do que o comprimento de onda, para evitar a difração das ondas planas incidentes sobre ela, conforme previsto pela Equação (39). Na verdade, é impossível não ter difração quando uma onda encontra um obstáculo, independente da relação entre comprimento de onda e dimensão do obstáculo. O que acontece de fato, conforme ilustrado nesta figura, é que a intensidade da onda não difratada é muito maior do que a intensidade da onda difratada. Após a fenda, foi adicionada uma lente plano convexa. Após atravessar a fenda, as frentes de onda se dirigem para a região central à frente da lente, em resposta ao fenômeno da refração. Esta simulação serve para mostrar ao estudante a existência de pontos focais de lentes e espelhos curvos.

A Figura 21 (à direita) também está ilustrado como a presença de um objeto parabólico afeta o padrão de frentes de onda planas que se movem de cima para baixo. O padrão de ondas planas acima da parábola está distorcido por causa da interferência das ondas que descem e as que são refletidas pelo objeto parabólico. Na parte inferior da parábola temos claramente o efeito de difração das ondas, enquanto acima dela temos as frentes de onda sendo dirigidas para um ponto do espaço, o foco da

parábola. Esta simulação serve para explicar vários dispositivos durante as aulas de ondulatória, sendo o foco da parábola um conceito importante a ser explorado. Seja para explicar um espelho para luz visível, seja uma antena parabólica para sinais de TV ou mesmo uma concha acústica para grandes concertos musicais, essa simulação padrão apresenta grande potencial dentro da sala de aula. E existem dezenas de outras aplicações interessantes como estas disponíveis no RTS.

Figura 21 – Ilustração para pontos focais de uma lente e de uma superfície parabólica.

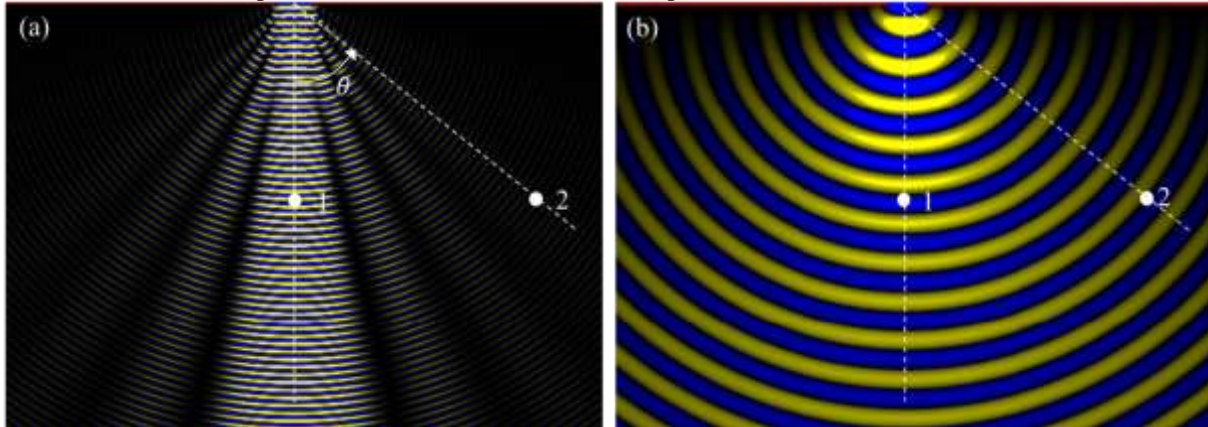


Fonte: Próprio Autor.

Para concluir, a Figura 22 ilustra como as discussões feitas na seção 2.3.3, sobre a intensidade das ondas difratadas, pode ser visualizada com o auxílio do programa RTS. A intensidade da difração já foi mostrada algebricamente por meio da Equação (39) e graficamente por meio da Figura 17. Cada um desses métodos possui informações próprias, e o estudante deve combiná-las para ter um entendimento completo do fenômeno. Contudo, por mais que as explicações sejam didáticas e as palavras bem articuladas, o entendimento desses conceitos exige certa capacidade de abstração que a maioria dos estudantes de Ensino Médio ainda não possui.

Provavelmente, a maneira mais apropriada de discutir tais conteúdos com um grupo de estudantes fosse através de filmes didáticos, cujas imagens pudessem ser repetidas de várias maneiras diferentes, com velocidades diversas, com tipos de ondas e fendas diferentes. Todas essas informações estão contidas na Equação (39), mas de forma escondida e abstrata, o que torna o entendimento difícil. O objetivo do uso do RTS na próxima simulação é mostrar método alternativo aos dois já mostrados para discutir a forma como a intensidade das ondas se distribui após uma fenda.

Figura 22 – Ilustração para a difração usando o princípio de Huygens-Fresnel para uma fenda com 500 nm. (a) comprimento de onda de 100 nm. (b) comprimento de onda de 1000 nm.



Fonte: Próprio Autor.

Nas duas simulações da Figura 22 temos uma onda plana atingindo uma fenda com abertura de 500 nm, sendo o comprimento de onda igual a 100 nm (Figura 22a) e 1000 nm (Figura 22b). Isto foi feito assim para comparar com os resultados mostrados na Figura 17 para $\lambda_1 = 0,1a$ e $\lambda_2 = a$. Conforme evidenciado nas discussões da Figura 17, para $\lambda < a$ a fase das ondas difratadas se inverte e as amplitudes se tornam negativas. Isso pode ser observado claramente na Figura 22a, na qual a faixa de intensidade central é ladeada por faixas laterais menos intensas, entre as quais a amplitude é zero.

Conforme foi discutido no contexto da Equação (39), quando a onda encontra uma fenda (ou objeto) cujas dimensões sejam maiores do que seu comprimento de onda, os efeitos da difração são pequenos. Caso contrário, o efeito da difração é determinante. Embora não seja tão direto, isso pode ser observado diretamente da Equação (39), que será reproduzida aqui:

$$I(\theta) = I_0 \left[\frac{\text{sen}[\pi a (\text{sen}\theta)/\lambda]}{\pi a (\text{sen}\theta)/\lambda} \right]^2 \quad (39)$$

Considere primeiro o que acontece na região à frente da fenda (θ é pequeno). Para pequenos valores de θ , a função $\text{sen}\theta \approx \theta$. O símbolo \approx significa ‘aproximadamente igual a’. Neste caso, a Equação (39) se torna:

$$I(\theta) \approx I_0 \left[\frac{\text{sen} \left[\frac{\pi a \theta}{\lambda} \right]}{\frac{\pi a \theta}{\lambda}} \right]^2 \approx I_0 \left[\frac{\frac{\pi a \theta}{\lambda}}{\frac{\pi a \theta}{\lambda}} \right]^2 \approx I_0 \quad (40)$$

Este resultado mostra que independente das características da fenda e da onda, na região do espaço à frente da fenda (pontos 1 nas Figuras 22a,b) a interferência sempre será construtiva e terá seu máximo valor. Considere agora o que acontece na região lateral à fenda, atrás do obstáculo. Para θ grande, a função $\text{sen}(\theta) \approx 1$. Neste caso, a Equação (39) se torna:

$$I(\theta) \approx I_0 \left[\frac{\text{sen}[\pi a/\lambda]}{\pi a/\lambda} \right]^2 \quad (41)$$

Considere agora que uma relação entre o comprimento de onda e a largura da fenda seja dada por $\lambda = Na$, onde N é um número que diz quantas vezes λ é menor ($N < 1$) ou maior ($N > 1$) do que a . Substituindo na Equação (41), tem-se:

$$I(\theta) \approx I_0 \left[\frac{\text{sen}[\pi a/Na]}{\pi a/Na} \right]^2 \approx I_0 \left[\frac{\text{sen}[\pi/N]}{\pi/N} \right]^2 \quad (42)$$

Agora considere $N \ll 1$. O numerador desta fração $\text{sen}[\pi/N]$ varia entre 0 e 1, dependendo do valor de N , mas nunca é superior a 1. Já o denominador π/N se torna um número muito grande. Portanto, a divisão de um número inferior ou igual a 1 por outro muito maior do que 1 resulta em um valor muito pequeno, e assim $I(\theta) \rightarrow 0$. Isto está mostrado com o ponto 2 na Figura 22a. A seta " \rightarrow " significa 'se aproxima de' ou 'tende a'. Isto está de acordo com o pico estreito da Figura 14 para $\lambda_1 = 0,1a$. Finalmente, considere o caso $N \gg 1$. O termo π/N é muito pequeno e $\text{sen}(\pi/N) \approx \pi/N$. Logo, a Equação (42) se reduz a:

$$I(\theta) \approx I_0 \left[\frac{\pi/N}{\pi/N} \right]^2 \approx I_0 \quad (43)$$

Esse resultado está de acordo com as discussões para $\lambda_3 = 5a$ na Figura 17, e está ilustrado com o ponto 2 na Figura 22b. Para valores intermediários de θ , a intensidade das ondas difratadas $I(\theta)$ varia entre 0 e I_0 , dependendo do valor de N .

Do ponto de vista de um estudante do Ensino Médio, que tem pouca capacidade de abstração, um cenário de aprendizagem é aquele encontrado nas equações abstratas e na fala igualmente abstrata do professor, quando estas estão desconectadas da observação real ou virtual de um fenômeno. Um outro cenário diferente é aquele em que, associado aos conceitos explicados pelo professor, o estudante tem diante de si a oportunidade de manipular, visualizar, e ele mesmo ter o controle dos parâmetros da simulação, como se estivesse em um ambiente real de laboratório, somando-se às

explicações do professor. Certamente esse hipotético segundo cenário é mais consistente com aquele no qual se espera uma aprendizagem muito mais significativa dos conceitos ensinados.

Sequência Didática Construtivista

Na presente seção iremos apresentar a metodologia usado para o desenvolvimento do Produto Educacional por meio de uma Sequência Didática Construtivista, uma estratégia educacional que tem como principal objetivo solucionar as principais dificuldades encontradas pelos alunos em um determinado assunto.

Professor: Aldo Alberto Câmara Marques
Componente curricular: Física
Número de Sequências didáticas: 01 Número de encontros: 08 Período de aplicação: novembro e dezembro de 2020
Tema gerador: ondas
Subtema: difração
<p>✓ O que o aluno pode aprender com estas intervenções? (metas)</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Consultar, analisar e interpretar textos e comunicações de ciência e tecnologia veiculadas por diferentes meios. ✓ Elaborar comunicações orais ou escritas para relatar, analisar e sistematizar eventos, fenômenos, experimentos, questões, entrevistas, visitas e correspondências. ✓ Analisar, argumentar e posicionar-se criticamente em relação a temas de ciência e tecnologia. ✓ Identificar, em dada situação-problema, as informações ou variáveis relevantes e possíveis estratégias para entendê-las. ✓ Identificar a classificação das ondas. ✓ Diferenciar os processos físicos relacionados com as ondas. ✓ Aplicar os conteúdos de ondas ao cotidiano.
<p>Conhecimentos prévios trabalhados pelo professor (identificação de subsunçores dos estudantes)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Levantar conceitos e definições sobre ondas. 2. Instigar hipóteses, questionamentos e críticas sobre a história, definição e aplicação das ondas. 3. Explicação de possíveis indagações provenientes das discussões durante as aulas. 4. Explicação de possíveis dúvidas sobre as equações matemáticas e exercícios sobre os fenômenos ondulatórios e da difração. <p>Entender o significado da difração.</p>

Estratégias e recursos da aula:

- Data show;
- Livro didático;
- Pesquisa na internet.
- Quadro branco;
- Pincéis e apagador;
- Softwares

Recursos complementares:

Demonstração de simulações sobre experimentos envolvendo ondas.

Formas de avaliação:

1º momento (04 aulas): Esta é a etapa da construção do conhecimento do estudante. O professor vai ministrar aulas sobre o conteúdo de ondas.

Nesta etapa da aplicação do Produto Educacional será ministrado o conteúdo sobre ondulatória. Nesta fase será trabalhado o conteúdo com o qual os alunos precisam saber para poder assimilar o assunto difração. Esta fase de aplicação será trabalhada de forma teórica, por meio de aula expositiva e dialogada da forma tradicional, mas também será utilizado mapas conceituais para auxiliar na aprendizagem do conteúdo. A avaliação será por meio de uma lista de questões sobre o assunto de ondas, a qual tem o intuito de verificar a aprendizagem dos alunos, para que estes assimilem esses conceitos iniciais. Nessa avaliação terão apenas questões fundamentais sobre o conteúdo de ondas, pois eles serão muito úteis no momento da utilização do simulador.

2º momento (02 aulas): Aqui será apresentado o programa de simulação e os conteúdos deverão ser melhor consolidados.

A forma de avaliação será realizada da seguinte maneira: será pedido aos alunos que façam algumas simulações com ondas no programa. Cada aluno vai reproduzir algum tipo de fenômeno ondulatório utilizando o software educacional.

3º momento (01 aula) Aplicação de questionários de verificação de aprendizagem

4º momento (01 aula); Aplicação do questionário de satisfação para verificar o nível de satisfação de cada aluno, para saber se o objetivo da aprendizagem foi alcançado.

Objetivos:

Entender conceito de onda;

Compreender a classificação das ondas (mecânica e eletromagnética, transversal e longitudinal)

Compreender a propagação das ondas;

Compreender os fenômenos da refração, difração e interferência das ondas;

Realizar simulações com softwares livres para consolidar o conhecimento sobre o assunto investigado.

Identificar em quais situações a difração ocorre com mais intensidade.

Conteúdos

Ondas e suas propriedades.

Noções gerais de ondulatória

Noções gerais de onda mecânica longitudinal e transversal;

Noções gerais de onda sonora;

Noções gerais de onda eletromagnética.

Noções gerais sobre refração, difração e interferência.

Metodologia de aplicação da sequência didática:

Antes de iniciar a aula, orientar os(as) alunos(as) sobre a importância da participação coletiva durante as atividades propostas, explicando que isso conduz a uma maior integração e a um diálogo mais amplo sobre os temas abordados.

Iniciar perguntando aos alunos: “*O que é Difração?*” Partindo da pressuposição que eles não sabem a resposta, será sugerido que eles respondam o que acham que pode ser e em qual parte da Física se estuda este assunto. Em seguida será feita uma explanação sobre o que são ondas, suas características, equações e algumas aplicações. Após esta etapa, voltarão a ser questionados: “O que vem a ser difração? Qual é a ideia que devemos ter sobre esse assunto? Como podemos saber que é a difração?” Sempre partindo do empirismo dos discentes quanto ao assunto e aos questionamentos levantados. Em seguida, a partir da prévia discussão, serão demonstrados os princípios básicos, as ideias centrais e como surgiu o conceito de difração e como identificá-la no cotidiano.

Desenvolvimento do Produto Educacional

»» Primeiro momento pedagógico

No primeiro momento foi desenvolvido entre os dias 23 de novembro de 2020 a 11 de dezembro de 2020. Logo no início desta fase de aplicação do produto educacional foi feita uma sondagem com os alunos acerca dos seus conhecimentos prévios (subsunçores), com os conteúdos que são a base para um bom entendimento do assunto. Foram ministradas aulas sobre ondas, conceitos fundamentais, natureza, propagação e vibração, e também fenômenos ondulatórios: refração, reflexão e difração. Formam necessárias 4 aulas para aplicação desse conteúdo. Logo após, na quinta aula, foi iniciado o assunto chave para desenvolvimento do Produto Educacional. Em seguida os alunos tiveram a oportunidade de ter contato com o programa computacional RIPPER TANK SIMULATION. Lembrando que toda essa fase de desenvolvimento desta proposta educacional foi feita de forma remota. Na figura abaixo temos o registro do momento no qual a aula foi desenvolvida, ministrada por meio do programa Google Meet.

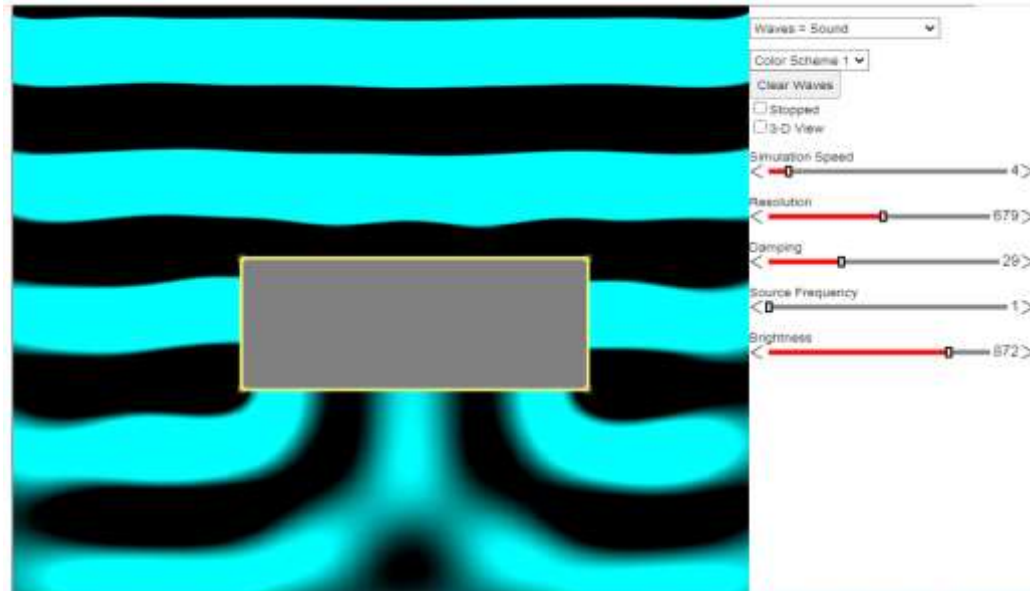
»» Segundo momento pedagógico

Após ter sido trabalhado todo o conteúdo necessário para a compreensão do fenômeno da difração, passamos a usar o simulador. Nesta fase de aplicação do produto foram demonstradas simulações referentes à propagação de ondas, mais especificamente ao acontecimento da difração. Nesta aula foram feitas simulações com ondas, cuja finalidade era que cada aluno pudesse entender onde estão presentes os fenômenos ondulatórios e, dessa maneira, poder acompanhar de forma detalhada como e por que a difração ocorre, em quais caso ela ocorrerá de forma mais intensa e também quando será muito pouco perceptível. Foi demonstrado também o experimento da fenda dupla. Os alunos ficaram ambientados ao simulador RIPPLE TANK SIMULATION, e com o auxílio desde software puderam acompanhar os fenômenos ondulatórios de uma forma mais concreta. Eles conseguiram, através desta aplicação educacional, reproduzir diversos acontecimentos ondulatórios e visualizaram a forma na qual ocorrem esses acontecimentos e suas causas.

Para comprovar nossas explicações da Difração, foi pedido para os alunos produzirem duas simulações utilizando o RIPPER TANK SIMULATION. Logo após comentar em quais casos ela ocorre com mais intensidade, fizemos duas simulações com ondas sonoras, e ambas com obstáculo. Na Figura 1 temos uma simulação de uma onda sonora com um comprimento de onda grande e frequência bem baixa, com um obstáculo à sua frente. Esta onda conseguiu atingir o espaço atrás do obstáculo. Podemos observar. Na simulação da figura 2, na qual o comprimento de onda é pequeno e a frequência é bem mais alta, podemos ver que o espaço na direção do obstáculo quase não foi preenchido, a onda não contornou o obstáculo e não foi espalhada. Em outras palavras, não se difratou, evidenciando assim o que mostra na teoria dos estudos da Difração. O uso do simulador foi

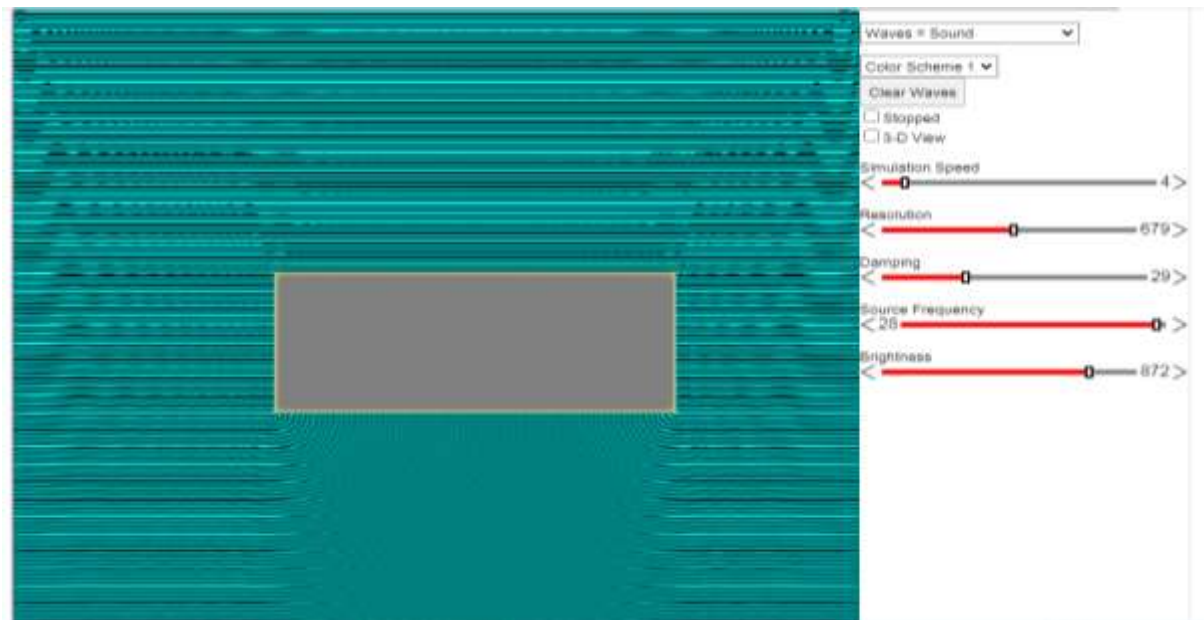
essencial para visualização e comportamento das ondas em cada caso específico, dessa forma o conteúdo não ficou de forma abstrata e sim bem assimilado pelos alunos as aulas ficaram mais interativas e interessantes na opinião dos alunos.

Figura 1: Simulação do RTS com uma onda de baixa frequência



Fonte: Dados da pesquisa 2020

Figura 2: Simulação do RTS com uma onda de alta frequência



Fonte: Dados da pesquisa 2020.

»»»Terceiro momento pedagógico

Nesta fase, após os alunos terem visto todo o conteúdo de ondas de forma didática e também se familiarizarem com os acontecimentos ondulatórios e poderem observá-los de forma concreta, eles

foram submetidos a dois questionários para verificação de aprendizagem. Esse questionário contém somente perguntas referentes aos assuntos debatidos durante a aplicação do Produto Educacional. Um dos questionários possui perguntas objetivas de múltipla escolha, do qual foi analisado o percentual de erros e acertos de cada aluno ao responder cada pergunta.

»» Quarto momento pedagógico

Esta fase foi destinada apenas para a apresentação dos resultados da aplicação do Produto Educacional. Foram analisados nesta seção os resultados dos dois questionários do momento pedagógico anterior.

Anexo I

Atividade para verificação de aprendizagem
CEM anexo São Cristóvão anexo III /São Bernardo

Nome: _____

- 1) Conceitue difração e dê exemplos de sua ocorrência no dia a dia.
- 2) Thomas Young (1773-1829) fez a luz de uma fonte passar por duas fendas paralelas antes de atingir um obstáculo e observou no anteparo o surgimento de regiões claras e escuras. O que representam essas regiões?
- 3) Numa difração em fenda única, após a onda passar pela fenda, que característica que será alterada?
- 4) Faça um desenho de uma figura de difração em uma fenda única (a) quando o seu comprimento de onda é aproximadamente igual ao tamanho a largura da fenda e (b) quando o comprimento de onda é bem menor do que a largura da fenda.
- 5) Quando um feixe de luz incide na superfície de um CD, observamos a formação de cores na parte gravada, e reflete as cores correspondentes ao espectro da referida luz. Explique este fenômeno.

Anexo II

Atividade para verificação de aprendizagem
CEM anexo São Cristóvão anexo III /São Bernardo

Nome: _____

- 1) Quais destas definições é de uma onda mecânica
 - a) é uma onda que precisa de um meio para se propagar.
 - b) é uma onda que não precisa de um meio para se propagar.
 - c) é um movimento retilíneo.
 - d) é um corpo eletrizado.

- 2) Em relação ao seu comprimento de onda, o efeito da difração será mais perceptível quando:
 - a) o comprimento de onda for muito maior do que a largura da fenda.
 - b) o comprimento de onda for muito menor do que a largura da fenda.
 - c) o comprimento de onda for aproximadamente do tamanho da largura da fenda.
 - d) o comprimento de onda for nulo.

- 3) Quanto à direção de vibração uma onda em uma mola é:
 - a) longitudinal
 - b) transversal
 - c) gravitacional
 - d) mecânica

- 4) Qual nome do famoso experimento feito por Thomas Young que revelou o efeito da difração
 - a) queda livre
 - b) inércia
 - c) lei de ohm
 - d) fenda dupla

REFERÊNCIAS

Ana Fukui - Madson de Melo Molina - Venerando Santiago Oliveira|Marca: Ser Protagonista - Física 2º Ano - Ensino Médio - 2ª Ed. 2015 Edições Sm (Brasil)

Alberto Gaspar - compreendendo a física, Ondas, Óptica e Termodinâmica-Física 2º ano -3.ed São Paulo,2017

BENIGNO BARRETO, CLAUDIO XAVIER, Física aula por aula, Termologia-Óptica-Ondulatória, 2ºano,3º edição, São Paulo 2016

BONJORNO CLITON, EDUARDO PRADO, Física ótica, termologia e ondulatória, 2º ano—3º Ed -São Paulo: FTD 2016- coleção física.

FOWLES, GRANT R, introduction to modern option, Reprint Originally Published, 2 nd, New York: Holt, Rineheart and Winston, 1975

•GASPAR ALBERTO. Compreendo física – volume 2: Ondas, óptica, termodinâmica, 3º --São Paulo :Ática 2016

GONÇALVES FILHO, A. TOSCANO, C. – Física Interação e tecnologia. Ed. Leya, 2013.

•HALLIDAY, David, RESNICK, Robert, WALKER, Jearl, **Fundamentos de Física –Ótica e Física Moderna**, Volume 4, 9ª Edição, LTC, Rio de Janeiro, 2009

LIBANEO, Jose Carlos **didática**, são Paulo: Cortez, 2017

TREFIL, HAZEN, R.M. Física viva. Uma introdução a física conceitual.V3.Rio de Janeiro: LTC, 2006.

•SEARS, Francis Weston; ZEMANSKY, Mark Waldo; YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física IV Ótica e Física Moderna**. Vol 4, 12.ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2008.

SEARWAY , R. A; JEWETT,J,W. Princípios de Física.volume 3.São Paulo:Thomsom e Learning , 2002

WITTER, Geraldina Porto. Psicologia da Aprendizagem /Geraldina Porto Witter, Jose Fernando Bitencourt Lomânco .--- São Paulo:EPU, 1984 (Temas básicos de Psicologia:v.9)

YAMAMOTO, KAZUITO. Física para o Ensino Médio, volume 2, ondas e termodinâmica / Kazuito Yamamoto, 4 ed—São Paulo: Saraiva 2016. 58