

**MNPEF**  
Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO SEMI-ÁRIDO**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA**  
**MESTRADO PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA**

**WALANCE AUGUSTO DA SILVA SOUZA**

**SEQUÊNCIA DIDÁTICA SOBRE O MOVIMENTO ONDULATÓRIO COM FOCO  
NAS ATIVIDADES EXPERIMENTAIS**

**MOSSORÓ**  
**2021**

WALANCE AUGUSTO DA SILVA SOUZA

SEQUÊNCIA DIDÁTICA SOBRE O MOVIMENTO ONDULATÓRIO COM FOCO NAS  
ATIVIDADES EXPERIMENTAIS

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal Rural do Semi-Árido no Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antonio López Ruiz.

MOSSORÓ

2021

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S719s Silva Souza, Walance Augusto da.  
Sequência didática sobre o movimento  
ondulatório com foco nas atividades experimentais  
/ Walance Augusto da Silva Souza. - 2021.  
148 f. : il.

Orientador: Carlos Antonio López Ruiz.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal  
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em  
Física, 2021.

1. Sequência didática . 2. Ondas. 3.  
Atividades experimentais . 4. Ensino médio. I.  
López Ruiz, Carlos Antonio , orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

WALANCE AUGUSTO DA SILVA SOUZA

SEQUÊNCIA DIDÁTICA SOBRE O MOVIMENTO ONDULATÓRIO COM FOCO NAS  
ATIVIDADES EXPERIMENTAIS

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal Rural do Semi-Árido no Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

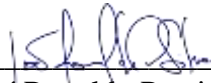
Aprovada em: 19/03/2021.

BANCA EXAMINADORA



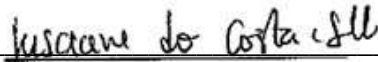
---

Prof. Dr. Carlos Antonio López Ruiz (Orientador)  
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte - UERN



---

Prof. Dr. José Ronaldo Pereira da Silva  
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte - UERN



---

Prof. Dra. Jusciane da Costa e Silva  
Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA



---

Prof. Dr. Taciano Amaral Sorrentino  
Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus, que me iluminou e continua iluminando toda minha vida, em especial nos momentos de dificuldade.

À minha mãe, Maria Dalvanira da Silva Souza, pelo apoio e compreensão durante o desenvolvimento deste mestrado.

Ao meu pai, José Augusto Pereira de Souza, quem foi também muito importante para o meu crescimento no mestrado e na vida profissional.

À minha família, mãe, pai, filhos, irmãos, tios e tias, que foram muito importantes na formação do meu caráter.

Ao meu orientador e amigo, Prof. Dr. Carlos Antonio López Ruiz, pela compreensão, apoio e coragem transmitida na orientação deste trabalho.

Aos professores e coordenadores do Mestrado Profissional, pela sabedoria, comprometimento profissional e entusiasmo. Exemplos de seres humanos.

A todos os professores do programa do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (Ufersa), pois foram importantes no meu período acadêmico.

Aos colegas do mestrado profissional, em especial, Marcelo, Aécio, Marília, Giló e Roberto, pela convivência e apoio que também contribuíram para este trabalho através de discussões e críticas construtivas.

Ao MNPEF pela oportunidade.

À Ufersa, que sempre me acolheu.

À Sociedade Brasileira de Física (SBF) pelo respaldo dado ao programa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo financiamento dos estudos por meio de bolsa concedida.

À Ufersa polo 9 pela liberdade e confiança no trabalho desenvolvido.

## RESUMO

Nesta dissertação, realizada no polo 9 (nove) do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, apresentamos uma proposta de sequência didática sobre o movimento ondulatório na qual privilegiamos o uso das atividades experimentais como recurso facilitador de aprendizagens potencialmente significativas. Ela foi concebida com o objetivo de trazer para sala de aula situações de aprendizagem, de fácil realização pelos alunos sob a orientação do professor. Na concepção da proposta levamos em consideração as abordagens da aprendizagem significativa, de Ausubel, e a teoria sociointeracionista, de Vygotsky e colaboradores, o que implicou, do ponto de vista metodológico, tomar como ponto de partida no planejamento e implementação das atividades o contexto sócio cultural dos alunos e seus conhecimentos prévios. A sequência didática, constituída de 6 encontros com duas aulas de 50 minutos cada, foi aplicada na modalidade de ensino remoto em três turmas do ensino médio da escola de ensino médio em tempo integral Cláudio Martins, localizada em Fortaleza, Ceará. Os resultados da avaliação, realizada com base na apresentação das atividades experimentais por parte dos estudantes e na aplicação de um questionário com os conteúdos sobre movimento ondulatório contemplados na sequência didática, indicam que os objetivos da proposta de intervenção, a despeito desta ter sido viabilizada por meio de aulas síncronas, foram satisfatoriamente alcançados.

**Palavras-chave:** Sequência didática. Ondas. Atividades experimentais. Ensino médio.

## ABSTRACT

In this dissertation, held at pole 9 (nine) of the National Professional Master's Degree on the Teaching of Physics, at the Semi-Arid Federal Rural University, we present a proposal for a didactic sequence on the wave movement in which we privilege the use of experimental activities as a facilitating resource for a potentially meaningful learning. It was designed with the aim of bringing to the classroom learning situations, which are easy for students to perform under the guidance of the teacher. In the conception of the proposal we took into consideration the approaches of meaningful learning, of Ausubel, and the socio-interactionist theory, of Vygotsky and collaborators, which implied, from the methodological point of view, taking as a starting point in the planning and implementing of the activities the socio-cultural context of the students and their previous knowledge. The didactic sequence, constituted of 6 meetings with two classes of 50 minutes each, was applied in the modality of remote teaching in three groups of high school level at Claudio Martins full-time high school, located in Fortaleza, Ceará. The results of the evaluation, based on the presentation of the experimental activities by the students and in the application of a questionnaire with contents on wave movement contemplated in the didactic sequence show that the aims of the intervention proposal, despite the fact that it has been performed through synchronous classes, were satisfactorily achieved.

**Keywords:** Didactic sequence. Waves. Experimental Activities. High school.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Sistema massa-mola.....	13
Figura 2	– Comparação entre as curvas da (a) posição $x(t)$ , (b) velocidade $v(t)$ e (c) aceleração em função do tempo. Todas as curvas foram determinadas considerando $\phi = 0$ .....	17
Figura 3	– (a) Um pêndulo simples. (b) As forças que agem sobre o pêndulo.....	18
Figura 4	– (a) O movimento do ponto $P'$ projetado no eixo $x$ corresponde ao movimento de $P$ . (b) Velocidade do ponto $P'$ também é projetado no eixo $x$ e corresponde à mesma forma que obtivemos no movimento harmônico simples. (c) Aceleração correspondente cuja componente horizontal também se reduz à expressão obtida para o movimento harmônico simples.....	20
Figura 5	– O deslocamento $x(t)$ para o oscilador amortecido.....	23
Figura 6	– É apresentada duas curvas da amplitude em termos da frequência da força externa para dois valores diferentes da constante de amortecimento.....	26
Figura 7	– O perfil da onda $y(x, 0)$ , para $t = 0$ .....	28
Figura 8	– Onda progressiva para direita.....	28
Figura 9	– Interferência de pulsos triangulares.....	34
Figura 10	– Pulso numa corda com extremidade fixa.....	34
Figura 11	– Modos normais de vibração. Modo fundamental até o quarto harmônico.....	37
Figura 12	– Onda plana.....	38
Figura 13	– Fenômeno da difração em ondas retas.....	41
Figura 14	– Envoltória de uma família de superfícies das ondas secundárias.....	42
Figura 15	– Frente de onda incidente.....	43
Figura 16	– Frente de onda refletida.....	44
Figura 17	– Refração de onda.....	45
Figura 18	– Apresentação 1 – <i>Slide 3</i> .....	58
Figura 19	– Demonstração do pêndulo simples.....	59
Figura 20	– Apresentação da equipe na sala virtual.....	61
Figura 21	– Fenômeno da ressonância: diapasões e taças.....	62
Figura 22	– Abertura da aula na sala virtual.....	63



Figura 23 – Mapa conceitual – <i>slide</i> 4: ondas .....	64
Figura 24 – Propagação da onda sonora.....	65
Figura 25 – Discussão sobre a relação fundamental .....	66
Figura 26 – Estudantes realizando demonstrações com a mola ao vivo na aula.....	67
Figura 27 – Apresentação de vídeo de estudantes: experimentos com pêndulos.....	68
Figura 28 – Imagem de vídeo produzido pelas estudantes: pêndulos com comprimentos distintos .....	68
Figura 29 – Demonstração ao vivo na sala virtual .....	69
Figura 30 – Discussão sobre fenômenos ondulatórios .....	70
Figura 31 – Encerramento da aula.....	71
Figura 32 – Sequência de imagens: montagem e apresentação da cuba de ondas .....	72
Figura 33 – Material das atividades experimentais do encontro 4 .....	74
Figura 34 – Imagens da cuba de ondas captadas a partir do aparelho celular.....	75
Figura 35 – Simulação virtual “Ondas numa corda” .....	75
Figura 36 – Simulação “Desvio da luz” na aula sobre refração .....	76
Figura 37 – Refração na cuba de ondas.....	77

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>CAPÍTULO 2 – MOVIMENTO ONDULATÓRIO</b> .....	<b>12</b>
<b>2.1</b>	<b>Movimento oscilatório</b> .....	<b>12</b>
<b>2.1.1</b>	<b>Movimento harmônico simples</b> .....	<b>13</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Pêndulo simples</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Movimento harmônico simples e movimento circular uniforme</b> .....	<b>19</b>
<b>2.1.4</b>	<b>Oscilações amortecidas e forçadas</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1.5</b>	<b>Oscilações amortecidas</b> .....	<b>21</b>
<b>2.1.5.1</b>	<b>Amortecimento subcrítico</b> .....	<b>22</b>
<b>2.1.6</b>	<b>Oscilações forçadas</b> .....	<b>23</b>
<b>2.1.6.1</b>	<b>Oscilações forçadas amortecidas</b> .....	<b>24</b>
<b>2.1.7</b>	<b>Ressonância</b> .....	<b>25</b>
<b>2.2</b>	<b>Ondas</b> .....	<b>26</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Conceito de onda</b> .....	<b>26</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Equação de onda</b> .....	<b>27</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Ondas harmônicas</b> .....	<b>30</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Princípio de superposição</b> .....	<b>32</b>
<b>2.2.5</b>	<b>Interferência</b> .....	<b>33</b>
<b>2.2.6</b>	<b>Reflexão</b> .....	<b>34</b>
<b>2.2.7</b>	<b>Modos normais de vibração (ondas estacionárias)</b> .....	<b>35</b>
<b>2.3</b>	<b>Fenômenos ondulatórios</b> .....	<b>38</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Ondas em mais direções</b> .....	<b>38</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Difração – Princípio de Huygens</b> .....	<b>41</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Reflexão e refração</b> .....	<b>43</b>
<b>3</b>	<b>CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>46</b>
<b>3.1</b>	<b>A aprendizagem significativa</b> .....	<b>46</b>
<b>3.2</b>	<b>A teoria sociointeracionista</b> .....	<b>51</b>
<b>4</b>	<b>CAPÍTULO 4 – DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO EDUCACIONAL</b> .....	<b>54</b>
<b>4.1</b>	<b>A escola e as turmas</b> .....	<b>54</b>
<b>4.2</b>	<b>Planejamento da sequência didática</b> .....	<b>55</b>
<b>4.3</b>	<b>O produto educacional</b> .....	<b>55</b>

<b>5</b>	<b>CAPÍTULO 5 – APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL .....</b>	<b>56</b>
<b>5.1</b>	<b>Relato do encontro 1.....</b>	<b>57</b>
<b>5.1.1</b>	<b>Aula 1, em 17 de agosto de 2020.....</b>	<b>57</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Aula 2, em 20 de agosto de 2020.....</b>	<b>60</b>
<b>5.2</b>	<b>Relato do encontro 2.....</b>	<b>62</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Aula 3, em 24 de agosto de 2020.....</b>	<b>62</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Aula 4, em 27 de agosto de 2020.....</b>	<b>64</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Aula 5, em 31 de agosto de 2020.....</b>	<b>67</b>
<b>5.3</b>	<b>Relato do encontro 3.....</b>	<b>69</b>
<b>5.3.1</b>	<b>Aula 5, em 31 de agosto de 2020.....</b>	<b>69</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Aula 6, em 3 de setembro de 2020 .....</b>	<b>71</b>
<b>5.4</b>	<b>Relato do encontro 4.....</b>	<b>73</b>
<b>5.4.1</b>	<b>Aula 7, em 14 de setembro de 2020 .....</b>	<b>73</b>
<b>5.4.2</b>	<b>Aula 8, em 17 de setembro de 2020 .....</b>	<b>75</b>
<b>5.5</b>	<b>Relato da última aula ministrada e avaliação.....</b>	<b>77</b>
<b>5.5.1</b>	<b>Aula 9, em 21 de setembro de 2020 .....</b>	<b>77</b>
<b>5.5.2</b>	<b>Avaliação .....</b>	<b>78</b>
<b>5.5.2.1</b>	<b>Análise das apresentações dos estudantes .....</b>	<b>78</b>
<b>5.5.2.2</b>	<b>Análise da avaliação somativa.....</b>	<b>79</b>
<b>6</b>	<b>CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>81</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>83</b>
	<b>APÊNDICE A – PRODUTO EDUCACIONAL.....</b>	<b>85</b>
	<b>APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO FINAL .....</b>	<b>141</b>
	<b>APÊNDICE C – VÍDEOS PROPOSTOS NO CLASSROOM.....</b>	<b>146</b>
	<b>ANEXO A – ATIVIDADES REALIZADAS PELOS ESTUDANTES .....</b>	<b>149</b>

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUÇÃO**

O ensino de Física vem sendo modificado com a busca por metodologias que envolvem o mundo vivencial mais próximo do estudante. A abordagem dos conceitos de forma prática possibilita compreender melhor os meios de comunicação e informação atualmente, como também situações específicas.

Nesta dissertação, realizada no polo 9 (nove) do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, apresentamos uma proposta de sequência didática sobre o movimento ondulatório, constituída de 6 encontros com duas aulas de 50 minutos cada, na qual privilegiamos o uso das atividades experimentais como recurso facilitador de aprendizagens potencialmente significativas. Ela foi concebida com o objetivo de trazer para sala de aula situações de aprendizagem, de fácil realização pelos alunos sob a orientação do professor.

O texto está estruturado em seis capítulos, no qual o primeiro corresponde à presente introdução, na qual apresentamos, sucintamente, a estrutura e conteúdo da dissertação.

No capítulo 2 apresentamos, em nível da disciplina de Física Geral dos cursos de licenciatura e bacharelado, os fundamentos físicos que dão sustentação conceitual aos conteúdos contemplados no produto educacional proposto. Expõem-se as grandezas físicas que descrevem o movimento oscilatório e as ondas, bem como os princípios que servem de base para a realização das atividades experimentais.

No capítulo 3, no âmbito do pluralismo metodológico, nos aprofundamos em duas abordagens teóricas: a da aprendizagem significativa, de David Ausubel e a sociointeracionista, de Lev Vygotsky e colaboradores, o que implicou, do ponto de vista metodológico, tomar como ponto de partida no planejamento e implementação das atividades o contexto sócio cultural dos alunos e seus conhecimentos prévios.

No capítulo 4 descreve-se o produto educacional desenvolvido e o planejamento das ações que levaram ao desenvolvimento e implementação da sequência didática.

No quinto capítulo é feito um relato minucioso da aplicação da proposta pedagógica, concebida para o ensino presencial, na modalidade de ensino remoto em três turmas do ensino médio da escola de ensino médio em tempo integral Cláudio Martins, localizada em Fortaleza, Ceará.

No capítulo 6 fazemos algumas considerações a fim de determinar quais objetivos foram alcançados, os pontos positivos e negativos do produto educacional desenvolvido e a importância das teorias da aprendizagem para a implementação do projeto.

## CAPÍTULO 2

### MOVIMENTO ONDULATÓRIO

No presente capítulo serão abordados, em nível da disciplina de Física Geral dos cursos de licenciatura e bacharelado, os fundamentos físicos que dão sustentação conceitual aos conteúdos contemplados no produto educacional proposto na presente dissertação.

#### 2.1 Movimento oscilatório

As oscilações são movimentos que se repetem, sendo muito comuns na natureza e no nosso cotidiano. Esses movimentos ocorrem quando o sistema é perturbado a partir de uma posição de equilíbrio estável. Em função da sua natureza, as oscilações podem ser mecânicas, eletromagnéticas e eletromecânicas. Para exemplificar, podemos citar lustres oscilantes, pêndulos de relógios que balançam para lá e para cá, barcos balançando no cais, o movimento de pistões nos motores dos carros. Outros exemplos, menos familiares, são as moléculas de ar que vibram em ondas sonoras e as oscilações das correntes elétricas em rádios, aparelhos de televisão. O estudo das oscilações nas aplicações tecnológicas possibilita equacionar tanto os seus efeitos positivos quanto os negativos.

Neste capítulo serão abordadas apenas as oscilações mecânicas, visando subsidiar o estudo do movimento ondulatório. Essas oscilações podem ser livres, quando o sistema, após ser desviado de sua posição de equilíbrio, não é submetido a forças externas. Um pêndulo desviado da sua posição de equilíbrio e depois solto fornece um exemplo de oscilações livres.

As oscilações no mundo real são amortecidas, isto é, o movimento se reduz gradualmente, transformando energia mecânica em energia térmica, pela ação das forças de atrito (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 1996). No caso em que o sistema oscilante é submetido a impulsos externos, as oscilações são denominadas de forçadas. Um exemplo dessas oscilações é o das crianças quando se balançam impulsionando o balanço.

Uma propriedade importante do movimento oscilatório é a sua *frequência*, ou número de oscilações que são completadas em cada segundo. Representa-se essa grandeza com o símbolo  $f$  e sua unidade no sistema internacional é o hertz, em que:

$$1 \text{ hertz} = 1 \text{ oscilação por segundo} = 1 \text{ s}^{-1}$$

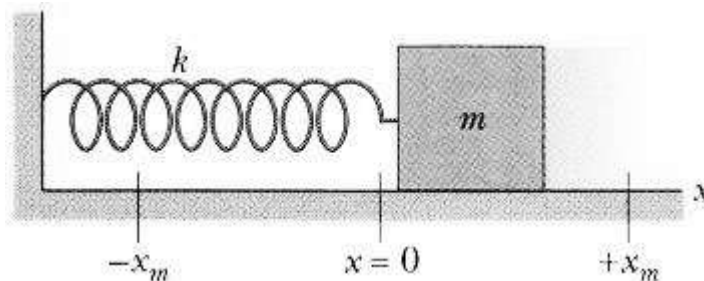
O período  $T$  do movimento, que é o tempo para completar uma oscilação, está relacionado à sua frequência por:

$$T = \frac{1}{f} \quad (2.1)$$

### 2.1.1 Movimento harmônico simples

Para estudar esse movimento, vamos considerar o sistema massa-mola, mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Sistema massa-mola



Fonte: Halliday; Resnick; Walker, (1996)

A força,  $F(x)$ , que tende puxar o corpo para a posição de equilíbrio ( $x=0$ ) se determina pela lei de Hooke:

$$F(x) = -kx. \quad (2.2)$$

Onde  $x$  é o deslocamento do corpo da posição de equilíbrio e  $k$  a constante elástica da mola.

Considerando que sobre o corpo só atua essa força, com base na segunda lei de Newton temos:

$$F(x) = ma = -kx. \quad (2.3)$$

Sendo a aceleração  $a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$ , temos:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx,$$

portanto,

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0, \quad (2.4)$$

em que se define  $\omega$  como sendo:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (2.5)$$

A equação 2.4 caracteriza o movimento harmônico simples. A sua solução, ou seja, a determinação da função  $x(t)$ , indica a posição do corpo em qualquer instante de tempo. A equação 2.4 é uma equação diferencial homogênea de segunda ordem. Portanto, podemos escrever a solução geral como:

$$x(t) = a \cos \omega t + b \sin \omega t. \quad (2.6)$$

A equação 2.6 pode ser apresentada na forma alternativa:

$$x(t) = A \cos(\omega t + \phi). \quad (2.7)$$

Aplicando a expansão do cosseno da soma na equação 2.7:

$$x(t) = A \cos \omega t \cdot \cos \phi - A \sin \omega t \cdot \sin \phi$$

e comparando com a solução dada pela equação 2.6, vemos que as equações são iguais, dado que:

$$\begin{aligned} a &= A \cos \phi \\ b &= -A \sin \phi. \end{aligned}$$

Assim, dados os valores de  $A$  e  $\phi$ , podemos determinar  $a$  e  $b$ . Da mesma forma, com os valores de  $a$  e  $b$ , podemos determinar  $A$  e  $\phi$ .

Realizando uma análise da física que está por trás da solução dada pela equação 2.7, nota-se que a posição do bloco varia entre  $+A$  e  $-A$ . Portanto, a constante  $A$  representa o valor máximo,  $x_m$ , do deslocamento do corpo da posição de equilíbrio, denominado de **amplitude da oscilação**:  $|A| = x_m$ . Assim, a equação 2.7 pode ser reescrita como:

$$x(t) = x_m \cos(\omega t + \phi). \quad (2.8)$$

A função cosseno é uma função periódica de  $t$ , o que significa que a função cosseno se repete após certo intervalo de tempo  $T$ , que chamamos de período da função. Podemos determinar o período pela condição:



$$x(t + T) = x(t),$$

ou seja,

$$x_m \cos[\omega(t + T) + \phi] = x_m \cos(\omega t + \phi)$$

As partes esquerda e direita dessa equação são iguais se os argumentos do cosseno se diferenciam apenas em  $2\pi$ , isto é:

$$\omega(t + T) + \phi = \omega t + \phi + 2\pi,$$

ou seja,

$$\omega T = 2\pi \quad \therefore \quad T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f}. \quad (2.9)$$

A grandeza  $\omega = 2\pi f$  chama-se frequência angular e se mede em ciclos por segundo ou hertz. Combinando as equações 2.5 e 2.9, podemos escrever, para o **período** do oscilador massa-mola linear da Figura 1:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (2.10)$$

Sendo uma função periódica, o argumento do cosseno,  $\theta$ , na equação 2.7:

$$\theta = \omega t + \phi,$$

chama-se fase do movimento, e  $\phi$  é de fase inicial (fase para  $t = 0$ ).

A equação 2.7 é a solução geral do oscilador harmônico. Portanto, para cada caso específico de movimento desse oscilador as duas constantes,  $x_m$  e  $\phi$ , deverão ser determinadas. Para tanto, as condições iniciais do movimento (a posição e a velocidade do corpo no momento  $t = 0$ ) precisam ser conhecidas:

$$\begin{cases} x(t = 0) = x_0 \\ \frac{dx}{dt}(0) = v(0) = v_0 \end{cases}$$

Derivando a equação 2.8, encontramos a velocidade do corpo (partícula):

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = \frac{d}{dt} [x_m \cos(\omega t + \phi)],$$

ou seja,

$$v(t) = -\omega x_m \text{sen}(\omega t + \phi). \quad (2.11)$$

Analogamente à amplitude  $x_m$  na equação 2.8 a quantidade positiva  $\omega x_m$  na equação 2.11 é denominada **amplitude de velocidade**  $v_m$ , variando entre os limites  $\pm v_m = \pm \omega x_m$ .

Aplicando as condições iniciais às equações 2.8 e 2.11, temos:

$$x(0) = x_0 = x_m \cos(0 + \phi) = x_m \cos \phi$$

e

$$v(0) = v_0 = -x_m \omega \sin(0 + \phi) = -x_m \omega \sin \phi.$$

Dessa forma, podemos determinar  $x_m$  e  $\phi$  a partir das condições iniciais, ou seja:

$$x_m = \sqrt{x_0^2 + \frac{v_0^2}{\omega^2}}$$

$$\cos \phi = \frac{x_0}{x_m}, \quad \sin \phi = -\frac{v_0}{x_m \omega}.$$

Retomando a equação 2.11, podemos reescrever a velocidade da seguinte forma:

$$v(t) = \omega x_m \cos\left(\omega t + \phi + \frac{\pi}{2}\right).$$

Comparando a equação 2.8 com a equação 2.11, vemos que existe uma defasagem de  $\frac{\pi}{2}$  entre a velocidade e a posição da partícula. Nas Figuras 2a e 2b, adiante, são mostradas as curvas de  $x(t)$  e  $v(t)$  com  $\phi = 0$ , respectivamente. Nota-se que a velocidade tem um valor máximo ( $\omega x_m$ ) quando  $x = 0$  e é nula quando  $x = |x_m|$ .

A aceleração,  $a(t)$ , determina-se, derivando a equação 2.11 da velocidade:

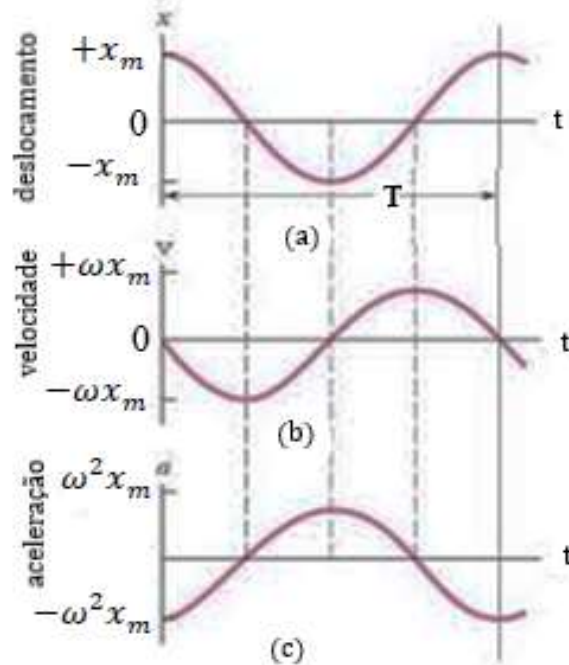
$$a(t) = -\omega^2 x_m \sin(\omega t + \phi). \quad (2.12)$$

A quantidade positiva  $\omega^2 x_m$  na equação 5 é chamada **amplitude de aceleração**  $a_m$ . Isto é, a aceleração da partícula varia entre os limites  $\pm a_m = \pm \omega^2 x_m$ . Combinando as equações 2.11 e 2.12 temos:

$$a(t) = -\omega^2 x(t),$$

A curva da aceleração é ilustrada na Figura 2c. Notamos que a força sempre aponta no sentido contrário à posição da partícula desde que no movimento harmônico a força tentar restaurar a posição de equilíbrio.

Figura 2 – Comparação entre as curvas da (a) posição  $x(t)$ , (b) velocidade  $v(t)$  e (c) aceleração em função do tempo. Todas as curvas foram determinadas considerando  $\phi = 0$

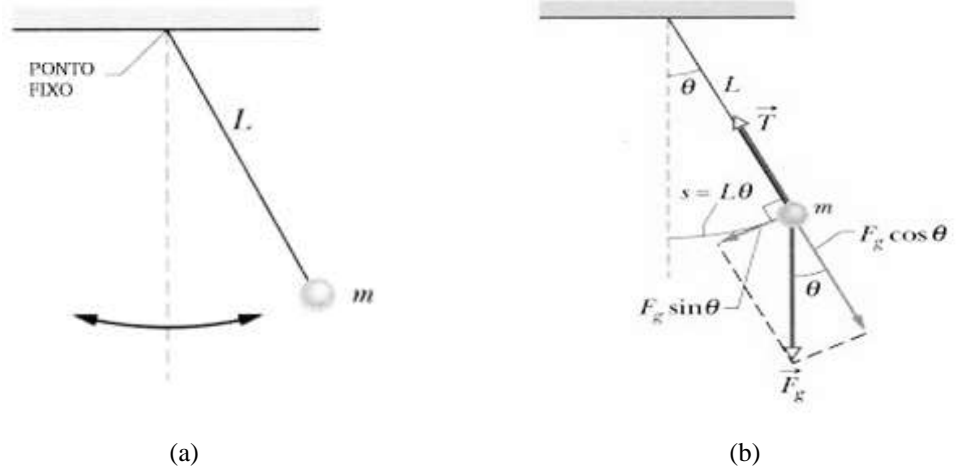


Fonte: Halliday; Resnick; Walker, (1996)

### 2.1.2 Pêndulo simples

No produto educacional, abordamos o exemplo mais elementar de pêndulo, o chamado pêndulo simples, que consiste em um corpo, de massa  $m$ , pendurado de uma das extremidades de um fio de comprimento  $L$ , enquanto a outra extremidade está localizada em um ponto fixo, conforme mostrado na Figura 3a.

Figura 3 – (a) Um pêndulo simples. (b) As forças que agem sobre o pêndulo



Fonte: (a) Elaboração própria do autor (2020). (b) Halliday; Resnick; Walker, (1996)

Para determinar o movimento do corpo em torno da posição de equilíbrio decomparamos as forças que atuam sobre ele conforme mostrado na Figura 3b: a força da gravidade  $F_g$  atuando na direção vertical e a tração do fio,  $T$ . A tração no fio é anulada pela componente  $F_g \cos \theta$  da força da gravidade, enquanto a componente perpendicular ao fio produz um torque igual a  $-F_g L \sin \theta$ , em que o sinal de menos aparece devido ao torque produzir um movimento no sentido horário, que é negativo por convenção. Assim, escrevemos:

$$\tau = -F_g L \sin \theta.$$

Considerando que o torque é igual a  $I\alpha$ , podemos escrever:

$$\alpha = -\frac{F_g L}{I} \sin \theta,$$

e como  $\alpha = \frac{d^2 \theta}{dt^2}$  e  $F_g = mg$ , temos:

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} = -\frac{mgL}{I} \sin \theta.$$

Aqui faremos uma restrição sobre o movimento do pêndulo: consideramos que o deslocamento angular em torno da posição de equilíbrio é muito pequeno ( $\theta \ll 1$ ). Neste caso, medindo o ângulo em radianos, podemos considerar que  $\sin \theta \approx \theta$ . Assim, podemos escrever:

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{mgL}{I} \theta = 0, \quad (2.13)$$

e novamente, como no caso do oscilador massa-mola, temos uma equação diferencial para um movimento harmônico simples. Reconhecendo que o coeficiente de  $\theta$  é igual ao quadrado da frequência angular, podemos escrever:

$$\omega = \sqrt{\frac{mgL}{I}},$$

e, portanto, o período do pêndulo é dado por:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgL}}.$$

Como estamos considerando um pêndulo simples, então a massa está toda localizada no corpo que está preso ao fio, que, por sua vez, tem massa desprezível. Assim, o momento de inércia é simplesmente igual a  $I = mL^2$ , logo o período pode ser escrito como:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}. \quad (2.14)$$

Por meio dessa expressão, observamos o fato de que  $T$  é independente da amplitude de oscilação (desde que esta permaneça pequena), constituindo o *isocronismo* das pequenas oscilações do pêndulo, descoberta por Galileu (NUSSENZVEIG, 2008).

### 2.1.3 Movimento harmônico simples e movimento circular uniforme

A Figura 4a mostra um ponto  $P'$  num movimento circular uniforme com velocidade angular  $\omega$ . Considerando que o raio da circunferência é igual a  $x_m$  e que o ângulo entre o raio vetor que liga o ponto  $P'$  à origem do sistema de coordenadas e a componente horizontal desta é dado por  $\omega t + \phi$ , a posição de  $P'$  neste eixo, pode ser escrita como:

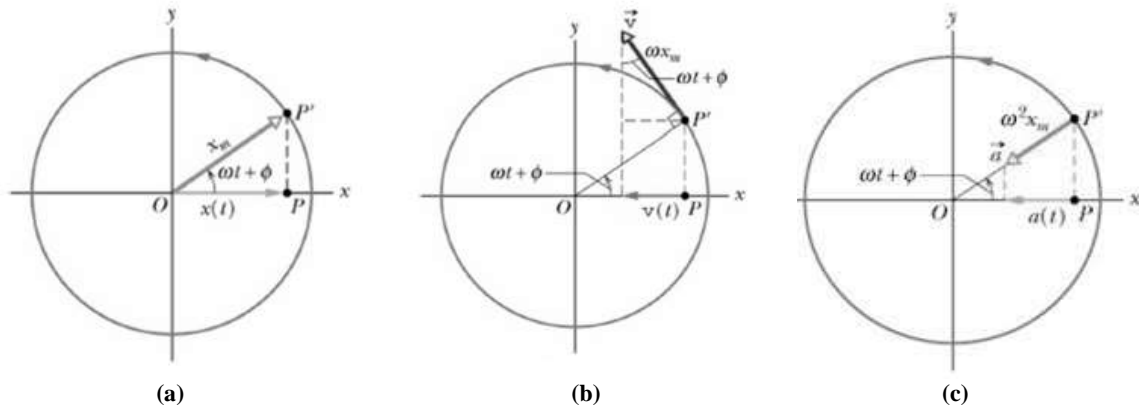
$$x(t) = x_m \cos(\omega t + \phi).$$

Essa expressão é precisamente a equação 2.8. Se a partícula de referência  $P'$  desloca-se em um movimento circular uniforme, sua “partícula de projeção”  $P$  realizará um movimento harmônico simples (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 1996).

Por meio dessa relação, podemos ter uma interpretação mais clara sobre a velocidade angular  $\omega$  do movimento harmônico simples. O termo “angular” advém da velocidade angular constante com que a partícula de referência  $P'$  se move pela

circunferência. A fase inicial  $\phi$  tem o valor determinado pela posição da partícula de referência  $P'$  em  $t = 0$ .

Figura 4 – (a) O movimento do ponto  $P'$  projetado no eixo  $x$  corresponde ao movimento de  $P$ . (b) Velocidade do ponto  $P'$  também é projetado no eixo  $x$  e corresponde à mesma forma que obtivemos no movimento harmônico simples. (c) Aceleração correspondente cuja componente horizontal também se reduz à expressão obtida para o movimento harmônico simples



Fonte: Halliday; Resnick; Walker, (1996)

A Figura 4b mostra a velocidade da partícula de referência. A magnitude do vetor velocidade é  $\omega x_m$  e sua projeção no eixo  $x$  é:

$$v(t) = -\omega x_m \text{sen}(\omega t + \phi),$$

que corresponde exatamente à equação 2.11. O sinal negativo aparece porque a componente de velocidade de  $P$  na Figura 4b aponta para a esquerda, no sentido em que  $x$  decresce.

A Figura 4c representa a aceleração da partícula de referência. A magnitude do vetor aceleração é  $\omega^2 x$  e sua projeção no eixo  $x$  é:

$$a(t) = -\omega^2 x_m \text{sen}(\omega t + \phi),$$

que é exatamente a equação 2.12. Então, se observarmos o deslocamento, a velocidade ou a aceleração, a projeção do movimento circular uniforme é realmente um movimento harmônico simples (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 1996).

#### 2.1.4 Oscilações amortecidas e forçadas

Até o momento, analisamos oscilações sem considerar forças externas dissipativas. Nesse caso, a energia do sistema permanece constante e podemos descrever o movimento oscilatório como uma transformação da energia cinética em energia potencial.

Agora, vamos considerar uma situação mais real, na qual sobre o sistema oscilante atuam forças dissipativas que provocam o amortecimento das oscilações. Tais oscilações são chamados de amortecidas. Quando a dissipação de energia presente nas oscilações amortecidas é restituída pela ação de uma força, as oscilações resultantes dessa ação são chamadas de forçadas.

### 2.1.5 Oscilações amortecidas

As oscilações harmônicas simples, vistas na seção anterior, ocorrem em sistemas conservativos. Na prática, sempre existe dissipação de energia. Assim, no caso de um pêndulo, as oscilações se amortecem devido à resistência do ar. As vibrações de um diapasão produzem um som audível porque são comunicadas ao ar, gerando ondas sonoras.

Sabemos que a resistência de um fluido, como o ar, ao deslocamento de um obstáculo é proporcional à velocidade para velocidades pequenas, o que se aplica a pequenas oscilações. Vamos considerar, portanto, uma força de amortecimento proporcional à velocidade (NUSSENZVEIG, 2008). Assim, escrevemos:

$$F_a = -bv = -b \frac{dx}{dt}, \quad (2.15)$$

em que  $b$  é uma constante de amortecimento que depende das características do meio, e o sinal negativo indica que  $F_a$  se opõe ao movimento. Na presença dessa força de resistência do meio, a força resultante que atua sobre o sistema que realiza oscilações amortecidas é:

$$\sum F = -kx - bv.$$

E, com base na segunda lei de Newton temos:

$$ma = -kx - bv$$

e como a aceleração é a segunda derivada da posição, podemos escrever:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx - b \frac{dx}{dt},$$

ou seja,

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = 0,$$

e, dividindo a equação pela massa  $m$ , podemos escrever:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{b}{m} \frac{dx}{dt} + \frac{k}{m} x = 0. \quad (2.16)$$

Aqui é conveniente definir a constante de amortecimento na forma:

$$\gamma = \frac{b}{m}, \quad (2.17)$$

seguida da definição da razão  $k/m$

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m},$$

que é a frequência angular *natural* do sistema. Diz-se natural porque esta seria a frequência com que o sistema iria oscilar se deixado livre das forças externas.

Substituindo essas definições na equação 2.18, obtemos:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \gamma \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0. \quad (2.18)$$

Da mesma forma que no caso anterior, a solução geral contém duas constantes indeterminadas, que são a amplitude e a constante de fase. A solução da equação depende dos valores de  $\gamma/2$  e  $\omega_0$ . Temos três possibilidades:  $\gamma/2 < \omega_0$ ,  $\gamma/2 = \omega_0$  e  $\gamma/2 > \omega_0$ . Estes casos particulares são denominados amortecimento subcrítico, crítico e supercrítico, respectivamente. Restringimo-nos a analisar o amortecimento subcrítico, que consta nas atividades elaboradas no produto educacional.

#### 2.1.5.1 Amortecimento subcrítico

Para o caso do amortecimento subcrítico, a solução da equação diferencial 2.18, temos:

$$x(t) = x_m e^{-(\gamma/2)t} \cos(\omega t + \phi), \quad (2.19)$$

em que:

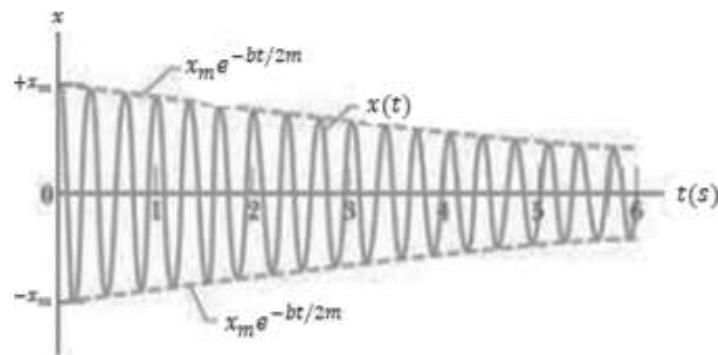
$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{b^2}{4m^2}}, \text{ válido para } \gamma/2 < \omega_0. \quad (2.20)$$



Se  $b = 0$  (não há amortecimento), então a equação 2.20 reduz-se à equação ( $\omega = \sqrt{k/m}$ ) para frequência angular de um oscilador não amortecido e a equação 2.19 reduz-se à equação 2.8 para o deslocamento de um oscilador não amortecido.

Podemos ver a equação 2.19 como uma função cosseno cuja amplitude, que é  $x_m e^{-bt/2m}$ , decresce gradualmente com o tempo, como indicado pela Figura 5:

Figura 5 – O deslocamento  $x(t)$  para o oscilador amortecido



Fonte: Halliday; Resnick; Walker, (1996)

No caso de sistemas que possuem amortecimento fraco ( $\gamma \ll \omega_0$ ), o fator  $x_m e^{-(\gamma/2)/t}$  pode ser considerado como amplitude de oscilação lentamente variável, e as curvas  $x_m e^{-bt/2m}$  definem a envoltória das oscilações (em linha interrompida na Figura 5).

### 2.1.6 Oscilações forçadas

Até o momento, consideramos um sistema oscilante na ausência de forças externas, em que o oscilador recebe uma energia inicial (através do seu deslocamento e velocidades iniciais) e depois é solto, evoluindo livremente. O período de oscilação é determinado pela própria natureza do oscilador, ou seja, por sua inércia e pelas forças restauradoras que atuam sobre ele (NUSSENZVEIG, 2008).

Vamos analisar o caso do efeito produzido sobre o oscilador por uma força externa periódica. Iremos considerar que o sistema oscila com uma força externa com frequência  $\omega$  e a frequência angular natural  $\omega_0$  do sistema, que é a frequência angular a qual ele iria oscilar se fosse deslocado e depois deixado oscilar livremente. Neste caso temos *oscilações forçadas*.

Alguns exemplos de oscilações forçadas são: as oscilações de um diafragma de um microfone, ou no tímpano do nosso ouvido sob a ação das ondas sonoras; as oscilações de

uma pessoa sentada num balanço sob ação de empurrões periódicos; as oscilações elétricas, num circuito de rádio ou televisão, sob o efeito do sinal eletromagnético captado.

### 2.1.6.1 Oscilações forçadas amortecidas

Supondo a presença de uma força dissipativa proporcional à velocidade e sendo

$$F(t) = F_0 \cos \omega t \quad (2.21)$$

a força externa, de frequência angular  $\omega$ , com base na segunda lei de Newton temos:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = F_0 \cos \omega t$$

Dividindo por  $m$ , fica:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \gamma \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \frac{1}{m} F_0 \cos \omega t \quad (2.22)$$

A solução estacionária da equação 2.22 é dada por:

$$x(t) = x_m(\omega) \cos[\omega t + \phi(\omega)], \quad (2.23)$$

em que:

$$x_m(\omega) = \frac{F_0/m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}} \quad (2.24)$$

e

$$\phi(\omega) = \tan^{-1} \left[ \frac{\gamma \omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)} \right]. \quad (2.25)$$

Portanto, a amplitude das oscilações forçadas,  $x_m(\omega)$ , depende não apenas da intensidade,  $F_0$ , com que puxamos ou empurramos o bloco do sistema massa-mola ou com que tiramos do equilíbrio o pêndulo. A frequência,  $\omega$ , com que fazemos isso desempenha um papel importante.

### 2.1.7 Ressonância

Vamos considerar o caso particular de oscilações forçadas em que o amortecimento é fraco ( $\gamma \ll \omega_0$ ). Neste caso, o sistema vai oscilar com a amplitude dependendo da força externa e da constante de amortecimento. No caso limite em que  $\gamma \rightarrow 0$ , a equação 2.24 reduz-se a:

$$x_m = \frac{F_0/m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2}}$$

À medida que a frequência  $\omega$  da força externa se aproxima da frequência  $\omega_0$  das oscilações livres, a amplitude  $x_m$  das oscilações forçadas vai crescendo. Esse crescimento da amplitude das oscilações forçadas denomina-se fenômeno da *ressonância*. Um exemplo familiar ocorre quando procuramos impulsionar uma pessoa sentada num balanço. A amplitude de oscilação aumenta fortemente quando a frequência de transmissão dos impulsos se aproxima da oscilação livre (NUSSENZVEIG, 2008).

Vamos tomar  $\omega$  suficientemente próximo de  $\omega_0$  para que se tenha:

$$|\omega - \omega_0| \ll \omega_0.$$

Neste caso,  $(\omega_0 + \omega) = 2\omega_0$  e

$$\omega_0^2 - \omega^2 = (\omega_0 + \omega)(\omega_0 - \omega) = 2\omega_0(\omega_0 - \omega)$$

e

$$\gamma\omega = \gamma(\omega_0 + \omega - \omega_0),$$

de modo que as equações 2.24 e 2.25 ficam como:

$$x_m(\omega) = \frac{F_0/m}{\sqrt{4\omega_0^2(\omega_0 - \omega)^2 + \gamma^2\omega_0^2}}, \quad \phi(\omega) = -\tan^{-1} \left[ \frac{\gamma/2}{(\omega_0 - \omega)} \right].$$

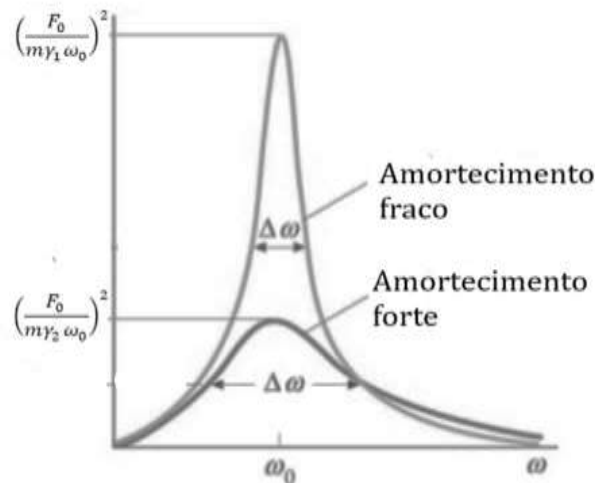
Podemos escrever o quadrado da amplitude da seguinte forma:

$$x_m^2(\omega) = (F_0^2/4\omega_0^2m^2) 1/[(\omega_0 - \omega)^2 + \frac{\gamma^2}{4}]$$

Na Figura 6, mostramos dois gráficos da equação acima para dois valores diferentes da constante de amortecimento  $\gamma_1$  e  $\gamma_2$ . Nota-se que o quadrado da amplitude tem

um máximo quando  $\omega \approx \omega_0$  para as duas curvas. Sempre quando a frequência da força externa é igual à frequência natural do sistema, a amplitude das oscilações é máxima e se diz que o sistema atingiu a condição de ressonância.

Figura 6 – É apresentada duas curvas da amplitude em termos da frequência da força externa para dois valores diferentes da constante de amortecimento



Fonte: Halliday; Resnick; Walker, (1996)

Existem muitos exemplos de ressonância. Muitas máquinas vibram porque elas possuem partes giratórias que não estão balanceadas. Todas as estruturas têm uma ou mais frequências naturais. Deve-se tomar cuidado para não submeter uma estrutura a uma força periódica externa forte, cuja frequência seja igual a uma dessas frequências. Assim, evita-se que as oscilações forçadas provocadas por essa força rompam essa estrutura (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 1996). Uma taça de cristal que tenha amortecimento fraco pode ser quebrada por uma onda sonora intensa que tenha sua frequência igual, ou quase igual, à sua frequência natural de vibração.

## 2.2 Ondas

### 2.2.1 Conceito de onda

As ondas são um tema fascinante da Física, o que torna seu estudo e ensino belos e prazerosos. Elas consistem em perturbações que se propagam em meios materiais (sólidos, líquidos e gasosos) e no vácuo, transportando energia e quantidade de movimento linear, sem haver transporte de massa. Assim, por exemplo, quando uma onda passa por um barco, a energia transportada por ela faz o barco subir e descer no mar.

O estudo das ondas tem levado a inúmeras aplicações tecnológicas presentes no nosso universo vivencial mais imediato. Os radares, utilizados na fiscalização em rodovias e nos controladores de voo dos aeroportos, e os dispositivos de controle remoto da televisão e dos portões de garagem, são exemplos de aplicações das ondas eletromagnéticas, que não precisam, necessariamente, de um meio material para se propagar.

Já as ondas mecânicas necessitam de um meio material para se propagar. O som, ondas na água, em cordas e em tubos são exemplos de ondas mecânicas. Além dessa classificação em eletromagnéticas e mecânicas, realizada com base na sua natureza, as ondas podem ser classificadas com base nas dimensões de propagação em unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais. Quando considerada a relação entre as direções de propagação e das oscilações do meio, as ondas se classificam em transversais, no caso dessas direções serem perpendiculares, e longitudinais, no caso dessas direções coincidirem.

Do ponto de vista didático é importante destacar que o tratamento matemático das ondas é o mesmo independentemente da sua natureza mecânica ou eletromagnética. Entretanto, essa generalidade no tratamento matemático das ondas não implica que as características dos fenômenos ondulatórios dispensem seu aprofundamento em cada tipo particular de onda e meios de propagação, o que não será o foco de nossa exposição. Tal aprofundamento comumente acontece em domínios específicos da Física como, por exemplo, na óptica e na acústica.

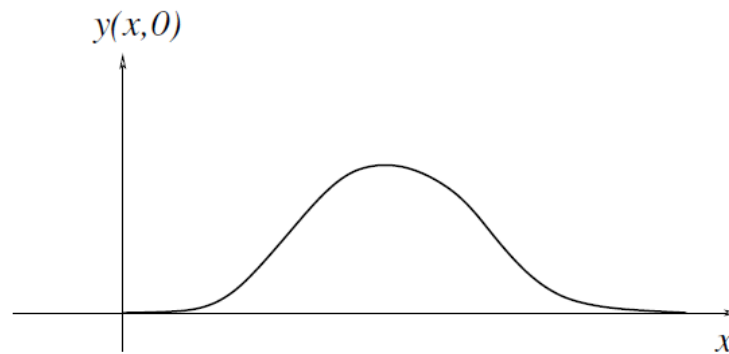
### **2.2.2 Equação de onda**

Independentemente de seu tipo e natureza, todas as ondas se constituem numa determinada solução de uma mesma equação diferencial, a equação de onda. Na sequência será ilustrada uma forma de chegar a essa equação a partir de um caso particular. As considerações e análises contidas nesta discussão tiveram como referencial teórico o volume 2 do livro *Curso de Física Básica*, de Moysés Nussenzveig (2008).

Para tanto, consideramos o caso mais simples de propagação das ondas, a unidimensional numa corda.

O perfil da onda na corda num dado instante  $t$  é a forma da corda nesse instante, que é dada pela função  $y(x, t)$ . O perfil da onda  $y(x, 0)$ , para  $t = 0$ , é representado por meio da Figura 7.

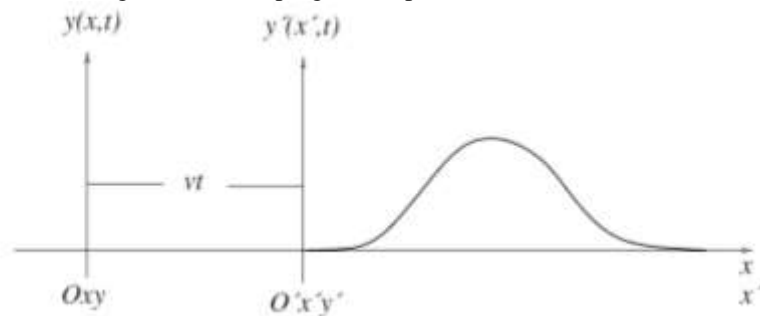
Figura 7 – O perfil da onda  $y(x, 0)$ , para  $t = 0$ .



Fonte: Elaboração própria do autor (2020).

Após um tempo  $t$ , o perfil seria  $y(x, t)$ . A perturbação é uma onda progressiva (ou onda *caminhante*), que se desloca como um todo para a direita, sem mudar de forma, com velocidade  $v$  (NUSSENZVEIG, 2008).

Figura 8 – Onda progressiva para direita.



Fonte: Elaboração própria do autor (2020).

Para um observador que se desloca na direção  $x$  com a mesma velocidade do pulso, a forma do pulso não muda com o tempo. Na Figura 8 é mostrado o referencial  $O'x'y'$  deste observador, o qual coincide com  $Oxy$  em  $t = 0$ , ou seja,

$$y'(x', t) = y'(x', 0) = f(x') \quad (2.26)$$

é uma função somente de  $x$ .

Levando em conta que  $y'(x', t) = y(x, t)$  e  $x' = x - vt$  (transformação de Galileu na direção  $x$ ), obtemos:

$$y(x; t) = f(x - vt). \quad (2.27)$$

Portanto, a onda progressiva se propagando para a direita é uma função que depende de  $x$  e  $t$  somente através de  $x' = x - vt$ , podendo ser uma função qualquer de  $x'$ . Analogamente, uma onda se propagando para a esquerda será uma função de  $x + vt$ .

Uma consequência imediata de  $y(x; t) = f(x - vt)$  é que, para associarmos uma equação de movimento com a propagação da onda, devemos calcular a aceleração num dado ponto  $x$ . A velocidade e a aceleração em  $x$  se obtêm fixando  $x$  e derivando em relação ao tempo. Assim, temos:

$$v = \frac{\partial}{\partial t} y(x, t); \quad a = \frac{\partial^2}{\partial t^2} y(x, t).$$

Pela equação 2.27,  $y$  só depende de  $t$  através da variável  $x' = x - vt$ , de modo que as derivadas se calculam pela regra da cadeia:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{df}{dx'} \frac{\partial x'}{\partial t} = -v \frac{df}{dx'}. \quad (2.28)$$

Analogamente:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -v \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{df}{dx'} \right) = -v \frac{d}{dx'} \left( \frac{df}{dx'} \right) \frac{\partial x'}{\partial t},$$

ou seja,

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = v^2 \frac{d^2 f}{dx'^2}. \quad (2.29)$$

Por outro lado, como  $\partial x' / \partial x = \frac{\partial}{\partial x} (x - vt) = 1$ , temos:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{df}{dx'} \frac{\partial x'}{\partial x} = \frac{df}{dx'} \quad \therefore \quad \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{d^2 f}{dx'^2} \frac{\partial x'}{\partial x} = \frac{d^2 f}{dx'^2}. \quad (2.30)$$

Comparando as equações 2.29 e 2.30, vemos que  $y(x, t)$  satisfaz a equação:

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0, \quad (2.31)$$

que se chama *equação de ondas unidimensionais*, sendo uma das equações fundamentais da física.

Considerando as condições iniciais de posição e de velocidade dadas por:

$$\begin{cases} y(x, 0) = y_0(x) \\ \frac{\partial y}{\partial x}(x, 0) = y_1(x) \end{cases}$$

em que  $y_0(x)$  e  $y_1(x)$  são duas funções arbitrárias  $f$  e  $g$ , logo se deve representar a solução geral por:

$$y(x; t) = f(x - vt) + g(x + vt), \quad (2.32)$$

ou seja, a solução da equação de onda unidimensional é a superposição de ondas progressivas (para a direita e para a esquerda). A equação 2.32 é a solução geral de D'Alembert.

A velocidade de propagação na equação 2.31 vai depender da natureza da onda. Assim, por exemplo, se consideramos a propagação de uma onda elástica no ar, concebido como um gás ideal, no qual os processos de compressão e dilatação são adiabáticos, a velocidade de propagação corresponde à do som. Pode-se demonstrar que a velocidade do som no ar é independente da pressão, dependendo da temperatura de acordo com a expressão:  $v = \sqrt{\gamma RT/M}$ . Logo, a velocidade do som no ar é proporcional à raiz quadrada do produto da constante universal dos gases,  $R$ , do coeficiente adiabático,  $\gamma$ , e da temperatura,  $T$ , do ar, e inversamente proporcional à raiz quadrada da massa molecular,  $M$ , do ar (NUSSENZVEIG, 2008).

### 2.2.3 Ondas harmônicas

Um caso particular é o de ondas harmônicas, assim chamadas porque a perturbação, num dado ponto  $x$ , corresponde a uma oscilação harmônica simples (NUSSENZVEIG, 2008). Essas ondas possuem soluções particulares de interesse bastante geral, ditas soluções harmônicas da forma:

$$y(x, t) = R[Ae^{i(kx - \omega t + \delta)}], \quad (2.33)$$

em que  $k$ ,  $\omega$  e  $\delta$  são constantes reais,  $i = \sqrt{-1}$  e  $R$  denota a parte real do número complexo entre colchetes. A constante real  $A$  é a amplitude da onda. Segundo a fórmula de Euler, temos que:

$$y(x, t) = R[A \cos(kx - \omega t + \delta) + iA \sin(kx - \omega t + \delta)] = A \cos(kx - \omega t + \delta) \quad (2.34)$$

Nota-se que deve existir uma relação entre  $\omega$  e  $k$  para que a equação 2.33 seja, de fato uma solução da equação de onda. Substituindo a equação 2.33 na 2.31, obtemos:

$$\omega = kv. \quad (2.35)$$



Portanto, em uma dada posição do espaço ( $x$  fixo), o valor da função  $y(x, t)$  em 2.34 se repete após um intervalo de tempo igual a  $2\pi/\omega$ . Esse intervalo de tempo é denominado *período*

$$T = \frac{2\pi}{\omega}.$$

Analogamente, em um dado instante de tempo ( $t$  fixo), o valor da função  $y(x, t)$  em 2.34 se repete após um intervalo de distância igual a  $2\pi/k$ . Esse intervalo é denominado *comprimento de onda*:

$$\gamma = \frac{2\pi}{k}.$$

Usando essas relações, podemos reescrever a equação 2.35 como:

$$v = \frac{\gamma}{T} = \gamma f, \quad (2.36)$$

em que  $f = \frac{1}{T}$  é a frequência da onda.

As grandezas  $k$  e  $\omega$  são denominadas número de onda e frequência angular, respectivamente. A grandeza

$$\varphi(x, t) = kx - \omega t + \delta$$

é a fase da onda, sendo que  $\delta$  é a constante de fase. Se acompanharmos um ponto tal que a fase seja constante, isto é,  $\varphi(x, t) = \varphi_0 = \text{constante}$ , teremos:

$$\frac{d\varphi}{dt} = k \frac{dx}{dt} - \omega = 0,$$

ou seja,

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{k} = v.$$

Portanto, um ponto de fase constante se desloca com a velocidade da onda.

### 2.2.4 Princípio de superposição

A equação 2.4 do movimento oscilatório é uma equação diferencial linear, ou seja, só contém termos lineares na função incógnita e suas derivadas. Além disso, a 2.4 é uma

equação homogênea (NUSSENZVEIG, 2008). Qualquer equação diferencial linear de 2ª ordem homogênea tem as seguintes propriedades fundamentais:

I) Se  $y_1(t)$  e  $y_2(t)$  são soluções,  $y_1(t) + y_2(t)$  também é.

II) Se  $y(t)$  é solução,  $ay(t)$  ( $a = \text{constante}$ ) também é.

Suponha que  $y_1(x, t)$  e  $y_2(x, t)$  sejam duas soluções quaisquer da equação de onda 2.31, ou seja:

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y_1}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 y_1}{\partial x^2} = 0,$$

e

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y_2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 y_2}{\partial x^2} = 0,$$

então, combinando I e II, vemos que qualquer combinação linear

$$y(x, t) = ay_1(x, t) + by_2(x, t),$$

com  $a$  e  $b$  constantes, também é solução da equação de onda. Esse resultado é denominado *princípio de superposição*, o que é uma consequência direta da linearidade da equação de ondas, tendo aplicação em diversos outros ramos da física.

Portanto, o princípio de superposição resulta ser um resultado teórico, e não um postulado introduzido *a priori* na teoria. Consequentemente ele tem limites de validade, não se cumprindo para sistemas físicos cuja descrição implica a utilização de equações diferenciais não lineares.

Assim, por exemplo, como as equações de Maxwell são lineares, na eletrodinâmica clássica o princípio de superposição é utilizado para calcular a intensidade do campo eletrostático de um sistema de partículas carregadas eletricamente, como sendo a soma das intensidades do campo de cada uma dessas partículas, desconsiderando a existência das outras. Outro exemplo da linearidade das equações de Maxwell é o fato da não interação dos raios luminosos entre si. No caso de campos eletromagnéticos intensos, como acontece em *lasers* de alta potência, o princípio de superposição não se cumpre, tendo lugar a interação dos feixes de luz.

### 2.2.5 Interferência

Um exemplo de aplicação do princípio de superposição é o efeito resultante da adição de ondas que possuem a mesma frequência e conseqüentemente o mesmo número de onda. Nesse caso, as duas ondas componentes são:

$$y_1(x, t) = R[A_1 e^{i(kx - \omega t + \delta)}] = A_1 \cos(kx - \omega t + \delta_1)$$

$$y_2(x, t) = R[A_2 e^{i(kx + \omega t + \delta)}] = A_2 \cos(kx + \omega t + \delta_2).$$

Quando essas duas ondas coincidem no espaço, suas perturbações se sobrepõem, somando-se algebricamente para criar uma onda resultante. No caso que estamos analisando, a onda  $y_1$  se está propagando para a direita e  $y_2$  para a esquerda. Considerando o caso mais simples, em que  $\delta_1 = \delta_2 = 0$  e  $A_1 = A_2$ , a onda resultante será:

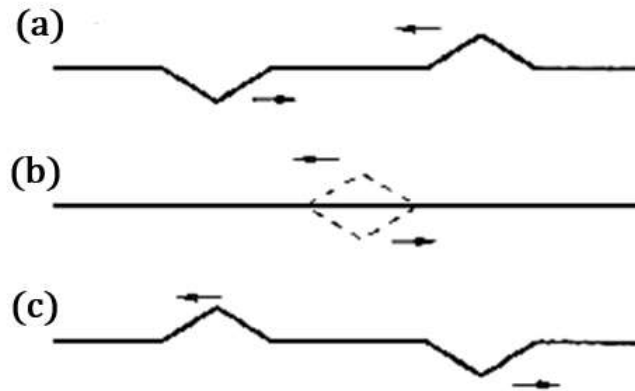
$$y = y_1 + y_2 = A[\cos(kx - \omega t) + \cos(kx + \omega t)] = 2A \cos(kx) \cos(\omega t). \quad (2.37)$$

Essa relação mostra que a superposição dessas duas ondas resulta em outra onda que não se propaga, chamada de estacionária, em cada ponto da qual acontecem oscilações, de amplitudes dependentes da função  $2A \cos(kx)$ , com a mesma frequência,  $\omega$ , das ondas que se superpõem. Portanto, nessa onda estacionária há pontos, nos quais  $\cos(2\pi x/\lambda) = 0$ , em que a amplitude das oscilações é nula, e pontos em que a amplitude das oscilações é igual a  $2A$  [ $\cos(2\pi x/\lambda) = 1$ ].

O fenômeno de duas ou mais ondas de mesma frequência, ou de frequências quase iguais, sobrepondo-se para produzir um padrão observável é chamado de *interferência*. Nos pontos em que a amplitude da onda resultante é igual a  $2A$  a interferência é chamada de construtiva e nos quais a amplitude é zero de destrutiva.

As Figuras 9(a), 9(b) 9(c) ilustram outros exemplos de aplicação do princípio de superposição. A Figura 9(a) mostra dois pulsos triangulares iguais se propagando em sentidos opostos. Em (b), os dois pulsos estão superpostos e se cancelam mutuamente: o perfil da corda coincide com a posição de equilíbrio. Em (c), um pulso ultrapassou o outro, prosseguindo como se nada tivesse acontecido (NUSSENZVEIG, 2008). A situação em (b) é um exemplo de interferência destrutiva.

Figura 9 – Interferência destrutiva de pulsos triangulares.



Fonte: Nussenzveig (2008, p. 107).

### 2.2.6 Reflexão

Consideremos uma onda se propagando para a esquerda em uma corda fixa em  $x = 0$ , como ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Pulso numa corda com extremidade fixa



Fonte: Nussenzveig (2008, p. 112).

Temos agora uma situação tal que, pela primeira vez, o problema envolve informação sobre a extremidade da corda. Esse tipo de informação denomina-se *condição de contorno*. Matematicamente a solução da equação de onda é:

$$y(x, t) = g(x + vt). \quad (2.37)$$

A condição de que a extremidade  $x = 0$  permaneça sempre fixa se exprime por:

$$y(0, t) = 0 \quad \text{para qualquer } t. \quad (2.38)$$

A solução geral da equação de ondas é dada pela equação 2.32:

$$y(x; t) = f(x - vt) + g(x + vt),$$

em que, pela equação 2.37,  $f = 0$  antes que a extremidade seja atingida, e  $g$  é o pulso dado. Substituindo a equação 2.32 em 2.38, obtemos a seguinte relação entre a função conhecida  $f$  e a desconhecida  $g$ :

$$f(-vt) = -g(vt).$$

Como o tempo,  $t$  é qualquer; essa condição determina completamente a função  $f$ :

$$f(x - vt) = -g(-x + vt). \quad (2.39)$$

Fazendo a substituição da equação 2.39 em 2.32, obtemos a solução:

$$y(x, t) = -g(-x + vt) + g(x + vt). \quad (2.40)$$

Isso resolve completamente o problema, visto que a função  $g$  é conhecida.

Matematicamente a solução 2.40 representa dois pulsos se propagando em sentidos opostos. Isso inclui um pulso vindo da esquerda para a direita, na região  $x < 0$ , antes da chegada em  $x = 0$ . Quando os dois pulsos se encontram, em  $x = 0$ , temos  $y(0, t) = 0$ . Posteriormente o pulso da direita para a esquerda “continua” se propagando para a região  $x < 0$  e o pulso da esquerda para a direita continua seu trajeto para a direita. Naturalmente, dada a situação que estamos analisando da corda fixa em  $x = 0$ , a região para a qual  $x < 0$  não tem sentido físico.

O fato do pulso refletivo se deslocar na direção oposta do pulso incidente está em concordância com a terceira lei de Newton: o suporte que está fixando a corda em  $x = 0$  exerce uma força de reação à força que a corda exerce sobre ele.

### **2.2.7 Modos normais de vibração (ondas estacionárias)**

De acordo com a proposta de produto educacional, vamos retomar a discussão da onda estacionária que se estabelece em uma corda fixa em suas extremidades. Se fixarmos uma extremidade de uma corda flexível esticada e movimentarmos a outra extremidade, para cima e para baixo, num movimento harmônico simples, descobrimos que, para certas frequências, padrões de onda estacionária são produzidos (TIPLER; MOSCA, 2008).

Para cada padrão produzido na corda está relacionada uma frequência, dita *frequência de ressonância*. Cada uma dessas frequências, com sua correspondente função de onda, caracteriza um *modo de vibração* da corda. O conjunto de todas as frequências de ressonância é chamado *espectro de ressonância* da corda.

A menor frequência de ressonância é a frequência fundamental, que corresponde ao *modo fundamental* de vibração, ou *primeiro harmônico*. A segunda menor frequência, ou segundo modo de vibração, tem frequência igual a duas vezes a frequência fundamental e é chamada de segundo harmônico. A terceira menor frequência é igual a três vezes a frequência fundamental e produz o padrão do terceiro harmônico.

A condição de que as duas extremidades da corda estejam fixas se exprime pela condição de contorno:

$$y(0, t) = y(l, t) = 0 \text{ para qualquer } t. \quad (2.41)$$

Temos que todos os elementos da corda oscilam com a mesma frequência  $\omega$  e mesma constante de fase  $\delta$ , ou seja, têm a mesma dependência temporal, da forma  $\cos(\omega t + \delta)$ . Cada ponto  $x$  oscila com amplitude  $A(x)$  característica do modo, ou seja,  $y$  é o produto de uma função de  $x$  por uma de  $t$ :

$$y(x, t) = A(x) \cos(\omega t + \delta). \quad (2.42)$$

Como  $y(x, t)$  deve ser solução da equação de ondas 2.31, substituindo a 2.42, obtemos:

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\frac{\omega^2}{v^2} A(x) \cos(\omega t + \delta) = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} \cos(\omega t + \delta), \quad (2.43)$$

ou seja,

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + k^2 A = 0 ; \quad k = \frac{\omega}{v}. \quad (2.44)$$

A solução geral da equação 2.44 é da forma:

$$A(x) = a \cos(kx) + b \sin(kx). \quad (2.45)$$

Entretanto, para que a equação 2.42 satisfaça as condições de contorno 2.41, é preciso que se tenha:

$$A(0) = A(l) = 0.$$

Pela equação 2.45, a primeira dessas condições dá:

$$A(0) = a = 0 \quad \therefore \quad A(x) = b \sin(kx),$$

e a segunda condição nos fornece:

$$A(l) = b \sin(kl) = 0.$$

Como  $b \neq 0$  (caso contrário  $y \equiv 0$ ), essa condição só pode ser satisfeita para valores discretos de  $k_n$  da variável  $k$ , dadas por:

$$k_n = \frac{n\pi}{l}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots),$$

logo os possíveis valores de  $\omega$  são:

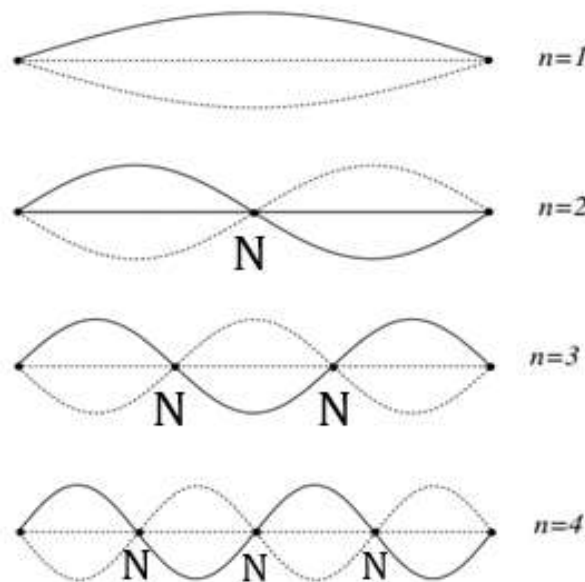
$$\omega_n = k_n v = \frac{n\pi}{l} v.$$

O comprimento de onda associado a cada modo de vibração é:

$$\lambda_n = \frac{2\pi}{k_n} = \frac{2l}{n}.$$

Há, portanto, uma relação entre o comprimento de onda de cada modo e o comprimento da corda. Por exemplo, o modo normal  $n = 1$ , modo fundamental, possui um comprimento de onda igual ao dobro do comprimento da corda. Na Figura 11, são mostradas as configurações da corda correspondentes aos quatro primeiros modos.

Figura 11 – Modos normais de vibração. Modo fundamental até o quarto harmônico



Fonte: Nussenzveig (2008, p. 116).

Os pontos marcados N, na Figura 11, permanecem sempre em repouso e chamam-se *nodos*. Nos pontos a meio caminho dos nodos, que se chamam *ventres* ou *antinodos*, a

amplitude de oscilação é máxima. Os nodos subdividem a corda numa série de segmentos, que oscilam separadamente.

A onda estacionária, por ser um fenômeno ondulatório, tem lugar não apenas em meios elásticos, mas também no vácuo, no caso das ondas eletromagnéticas.

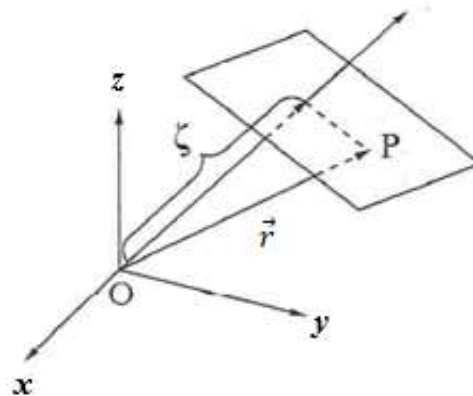
## 2.3 Fenômenos ondulatórios

### 2.3.1 Ondas em mais de uma dimensão

Vamos realizar agora uma análise dos conceitos e aspectos matemáticos sobre ondas em mais de uma dimensão mediante consulta ao volume 2 do livro *Curso de Física básica*, de Moysés Nussenzveig (2008).

Até o presente momento, consideramos apenas exemplos de ondas que se propagam em uma única direção. Vamos realizar uma análise de ondas planas em três dimensões; para tanto, determinamos uma linha reta orientada ao longo de uma direção qualquer, no sistema de coordenadas cartesianas, não necessariamente coincidente com as direções  $x$ ,  $y$  ou  $z$ , e passando pela origem  $O$  do sistema (Figura 12).

Figura 12 – Onda plana



Fonte: Nussenzveig (2008, p. 138).

A cada ponto desta reta podemos associar um número  $\zeta$ . Podemos então considerar a propagação de uma onda ao longo da direção definida por esta reta de tal forma que uma onda harmônica terá a forma:

$$\varphi(x, y, z, t) = A \cos(k\zeta - \omega t + \delta). \quad (2.46)$$

A equação acima descreve uma onda que se propaga em uma única direção do espaço, mas esta direção agora é qualquer. Deve-se assumir que todas as direções do espaço



são equivalentes, ou seja, a isotropia do espaço. Em geral, um vetor unitário  $\hat{\zeta}$ , orientado ao longo da direção de propagação, no sentido crescente de  $\zeta$ , define essa direção qualquer de propagação.

Os pontos do espaço de mesma fase, ou seja, aqueles para os quais  $k\zeta - \omega t + \delta$  tem o mesmo valor, estão todos no plano perpendicular à direção  $\hat{\zeta}$ . Descrevendo um ponto P qualquer desse plano pelo vetor  $\vec{r}$ , conforme a Figura 12, vemos que o número  $\zeta$  é a projeção geométrica de  $\vec{r}$  ao longo de  $\hat{\zeta}$ . Ou seja:

$$\zeta = \vec{r} \cdot \hat{\zeta}. \quad (2.47)$$

Substituindo a equação 2.47 em 2.46, vemos que ela pode ser escrita:

$$\varphi(\vec{r}, t) = A \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \delta),$$

em que:

$$\vec{K} = k \hat{\zeta} = \frac{\omega}{v} \hat{\zeta} \quad (2.48)$$

denomina-se o vetor de onda. A magnitude de  $\vec{K}$  corresponde ao número de onda  $k$ , sendo sua direção a mesma da propagação da onda.

A fase da onda é o argumento do cosseno na equação 2.46, ou seja,  $kr - \omega t + \delta = k\zeta - \omega t + \delta$ . Chama-se superfície de onda ou frente de onda o lugar geométrico dos pontos de fase constante num dado instante (NUSSENZVEIG, 2008).

Nos pontos de fase constante, ( $\vec{k} \cdot \vec{r} = \text{constante}$ ), define-se um plano cuja equação é:

$$k_x x + k_y y + k_z z = \text{constante}, \quad (2.49)$$

em que as componentes  $k_x, k_y, k_z$  e o valor da constante determinam completamente o plano. Esse plano chama-se frente de onda. Temos, assim, uma onda plana se propagando em todo o espaço.

Se

$$r = (x, y, z); \quad k = (k_x, k_y, k_z),$$

em que:

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k^2 = \frac{\omega^2}{v^2}, \quad (2.50)$$

substituindo a equação 2.49 na 2.46:

$$\varphi(x, y, z, t) = A \cos(k_x x + k_y y + k_z z - \omega t + \delta), \quad (2.51)$$

derivando duas vezes a 2.51 em relação a  $x$  ou a  $t$ , obtemos, respectivamente:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = -k_x^2 \varphi$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\omega^2 \varphi,$$

de modo que a 2.50 implica:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}. \quad (2.52)$$

A soma das segundas derivadas parciais  $\varphi$  em função das coordenadas se denomina operador de Laplace, ou simplesmente laplaciano. Em função da simetria do sistema em que a onda se propaga, ele pode ser escrito indistintamente em coordenadas retangulares, cilíndricas e esféricas. A equação 2.52 pode ser escrita utilizando o laplaciano da seguinte forma:

$$\nabla^2 \varphi(x, y, z, t) = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \varphi(x, y, z, t)}{\partial t^2}$$

A análise das equações de Maxwell, para o caso do vácuo, leva à equação de onda e consequentemente à suposição da existência das ondas eletromagnéticas, experimentalmente obtidas por Hertz. As equações de ondas eletromagnéticas para este caso são representadas por:

$$\begin{cases} \nabla^2 \vec{E}(x, y, z, t) = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}(x, y, z, t)}{\partial t^2} \\ \nabla^2 \vec{B}(x, y, z, t) = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}(x, y, z, t)}{\partial t^2} \end{cases}'$$

em que:

$$v = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

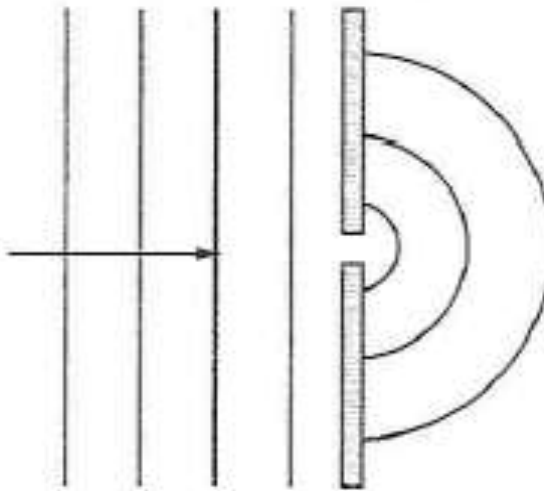
A velocidade dessa onda coincide com a da luz no vácuo, fato fundamental na teoria eletromagnética da luz. Nota-se na relação acima a dependência dessa velocidade com as constantes elétrica e magnética.

### 2.3.2 Difração – Princípio de Huygens

O fenômeno da difração ocorre quando uma frente de onda é parcialmente bloqueada por um obstáculo, em que a parte não bloqueada da onda desvia-se, passando a se propagar atrás do obstáculo. Para que aconteça a difração, a parte da frente de onda deve passar a poucos comprimentos de ondas do obstáculo. Para as partes da frente de onda que passam a uma distância maior que alguns comprimentos de onda, a difração é desprezível e a onda propaga-se em linha reta.

A Figura 13 ilustra o fenômeno da difração, em que um trem de ondas retas, quando atinge uma barreira com uma pequena abertura de dimensões muito menores que o comprimento de onda  $\lambda$ , gera do outro lado da barreira ondas circulares com centro na abertura (NUSSENZVEIG, 2008):

Figura 13 – Fenômeno da difração em ondas retas.



Fonte: Nussenzveig (2008, p. 141).

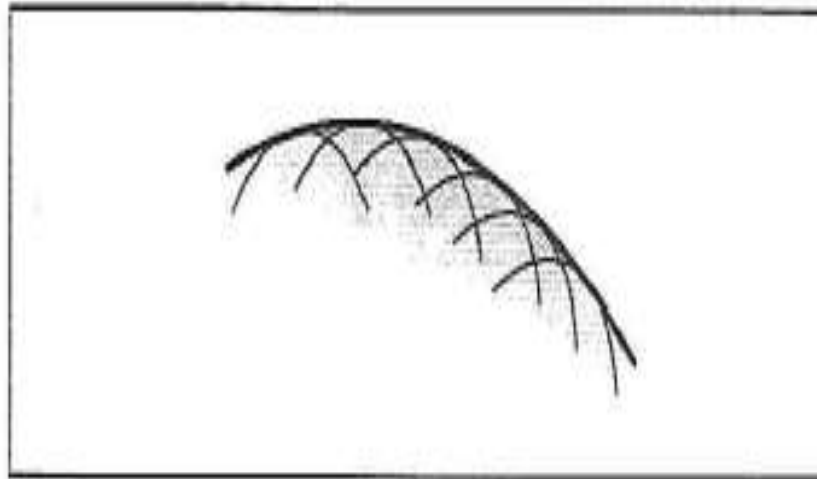
A descrição do fenômeno da difração apoia-se na ideia básica do Princípio de Huygens. Tal formulação foi realizada por Christian Huygens em 1678. Huygens tinha em vista a teoria ondulatória da luz, que expôs em seu *Tratado sobre a luz*, mas o princípio se aplica de uma forma geral para ondas em duas ou mais dimensões (NUSSENZVEIG, 2008). O princípio foi reformulado de forma mais completa por Fresnel no início do século XIX. O

princípio de Huygens-Fresnel é um método de análise que permite tratar quantitativamente a propagação de ondas em situações bem gerais.

O Princípio de Huygens diz que cada ponto de uma frente de onda comporta-se como uma fonte pontual de novas ondas, denominadas ondas secundárias. De acordo com Huygens, dada uma frente de onda inicial, consideram-se todas as ondas secundárias, emanadas dos diferentes pontos dessa frente, propagando-se no meio considerado. A frente de onda num instante posterior é a envoltória das frentes das ondas secundárias, que se superpõem para formar a nova frente de onda.

A envoltória é a superfície que tangencia as superfícies das ondas secundárias. A Figura 14 exemplifica a envoltória de uma família de superfícies. A ideia de Huygens era de que cada onda secundária isoladamente é muito fraca, mas seus efeitos se reforçam ao longo da envoltória (NUSSENZVEIG, 2008).

Figura 14 – Envoltória de uma família de superfícies das ondas secundárias.



Fonte: Nussenzveig (2008, p. 141).

Apesar de ondas que passam por uma fenda sofrerem algum grau de desvio, ou de difração, a condição para ocorrer a difração é a relação entre o comprimento de onda e a largura do obstáculo, ou fenda. Para uma abertura de largura  $d \ll \lambda$ , em que  $\lambda$  é o comprimento de onda, de acordo com o princípio de Huygens, a fenda se comporta como fonte puntiforme e as ondas transmitidas se propagam em todas as direções, sem formação de sombra alguma (NUSSENZVEIG, 2008). Os efeitos de difração são maiores quanto maior for  $\lambda/d$ .

O comprimento de onda do som audível varia numa faixa entre  $1,7\text{cm} \leq \lambda \leq 17\text{ m}$ , causando efeitos de difração em objetos macroscópicos, como portas, janelas, paredes.

Para a luz visível, os comprimentos de onda são da ordem de  $\leq 1\mu\text{m} = 10^{-3}\text{mm}$ , tendo efeitos de difração extremamente pequenos usualmente.

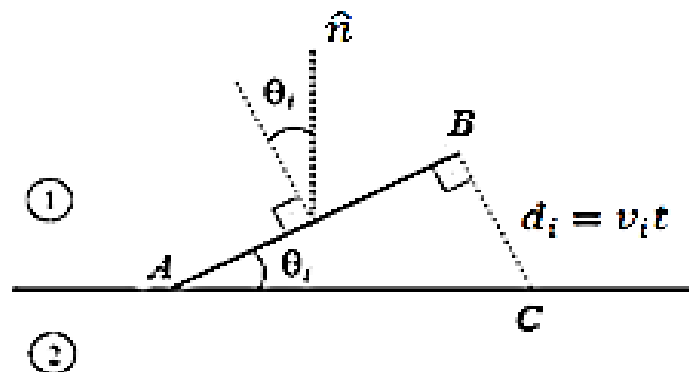
A reformulação do princípio de Huygens, realizada por Fresnel, tratava do cálculo quantitativo dos efeitos de difração, combinando-o com o princípio da interferência, indicando que não há diferença entre os fenômenos da interferência e da difração. Essa diferenciação responde a considerações históricas de como denominar o fenômeno envolvendo um número finito de fontes espacialmente separadas (interferência) e colocadas de maneira contínua (difração). Assim, fala-se de interferência de duas fontes pontuais e de difração numa fenda e num orifício.

### 2.3.3 Reflexão e refração

A reflexão de onda ocorre quando a onda atinge uma superfície refletora ou uma interface entre dois meios de propagação e retorna propagando-se no mesmo meio, sendo um fenômeno inerente a todos os tipos de onda.

Na Figura 15, a reta  $\overline{AB}$  representa uma frente de onda plana incidindo numa interface entre dois meios, representada pela linha horizontal. As velocidades de propagação nos meios 1 e 2 são, respectivamente,  $v_1$  e  $v_2$ . Através da figura, podemos ver o ângulo de incidência  $\theta_i$ , formado entre a reta normal  $\hat{n}$  e o raio de onda.

Figura 15 – Frente de onda incidente



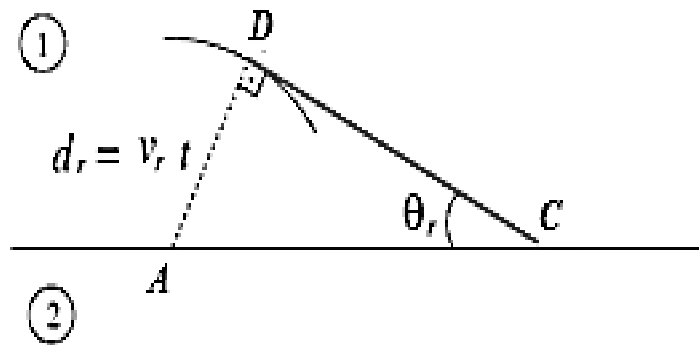
Fonte: Elaboração própria do autor (2020).

Segundo o princípio de Huygens, todos os pontos da frente de onda  $\overline{AB}$  são como uma fonte de ondas secundárias. Após um tempo  $t$ , todas as ondas secundárias esféricas entre

A e B terão atingido a interface entre os dois meios e a onda esférica emitida em B terá percorrido uma distância  $d_i = v_i t$ .

A Figura 16 mostra a construção de Huygens para a frente de onda totalmente refletida. Após o tempo  $t$ , a onda secundária emanada do ponto A é uma esfera de raio  $d_r = v_r t$  e a frente de onda refletida (envoltória)  $\overline{DC}$  é tangente à esfera em D (NUSSENZVEIG, 2008). Nota-se que a reflexão se dá no mesmo plano de incidência. Esta importante propriedade é conhecida como *primeira lei da reflexão*.

Figura 16 – Frente de onda refletida.



Fonte: Elaboração própria do autor (2020).

Analisando a figura acima, nota-se a forma da frente de onda refletida. Como

$$d_r = v_r t$$

e

$$v_r = v_i = v_1,$$

logo:

$$d_r = d_i.$$

Considerando-se que  $\overline{AC} \sin \theta_r = d_r = d_i = \overline{AC} \sin \theta_i$ , temos que:

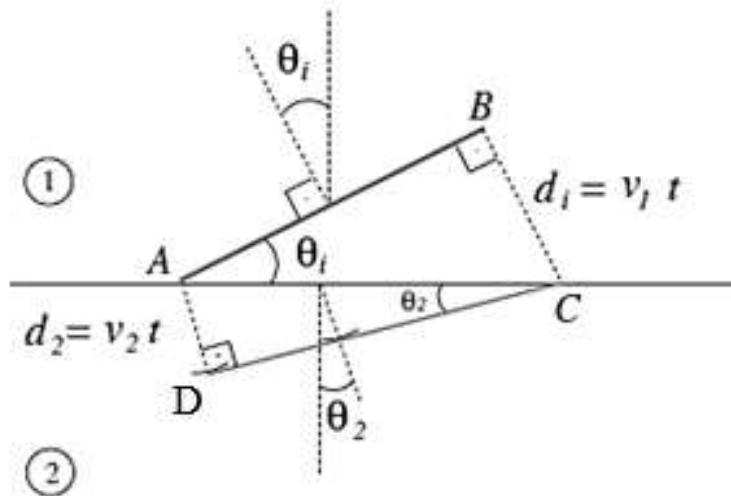
$$\theta_r = \theta_i.$$

O ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão, que corresponde à *segunda lei da reflexão*.

No caso da luz, as leis da reflexão resultam das condições de fronteira que cumprem as componentes, tangencial e normal, do vetor intensidade do campo elétrico da onda eletromagnética na superfície de separação de dois meios.

Quando a onda é transmitida do meio 1 para o meio 2, ocorre o fenômeno da refração. Considerando a velocidade no meio 1 maior que no meio 2, ou seja,  $v_1 > v_2$ , temos a construção de Huygens representada por meio da figura 18. Nela vemos a frente de onda refratada, o ângulo de incidência e o ângulo de refração, que será representado pelo índice 2.

Figura 17 – Refração de onda



Fonte: Elaboração própria do autor (2020).

Os triângulos retângulos ABC e ADC dão:

$$d_1 = v_1 t = \overline{AC} \sin \theta_i; \quad d_2 = v_2 t = \overline{AC} \sin \theta_2,$$

o que dá, dividindo membro a membro:

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = n_{12},$$

que é a lei da refração, ou Lei de Snell. O índice de refração  $n_{12}$  é, portanto, igual à razão das velocidades de fase nos dois meios (NUSSENZVEIG, 2008).

## **CAPÍTULO 3**

### **FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

O planejamento e a implementação do produto educacional, cujo relato apresentamos nesta dissertação, foram baseados no princípio do pluralismo teórico metodológico, contemplando diferentes teorias do processo de ensino aprendizagem e documentos do Ministério da Educação do Brasil nos quais essas teorias estão, implícita e/ou explicitamente, presentes.

No âmbito desse pluralismo teórico metodológico foram considerados pressupostos teóricos tais como: o papel determinante do contexto histórico sócio cultural na formação da mente, a indissociabilidade da relação entre pensamento e linguagem, o papel mediador do professor e a importância da escola no processo de ensino-aprendizagem, os conhecimentos prévios dos estudantes, a indissociabilidade da teoria e da prática na concepção das situações de aprendizagem, contemplando recursos didáticos diversificados, tais como: atividades experimentais, simulações e analogias, modelos didáticos e jogos, entre outros.

Na sequência vamos nos aprofundar em duas abordagens teóricas, nas quais esses pressupostos teóricos são, de maneira complementar, destacados: a da aprendizagem significativa e a sociointeracionista.

#### **3.1 A aprendizagem significativa**

A ideia de uma metodologia de ensino-aprendizagem baseada nos conhecimentos prévios do aprendiz está presente em diversas teorias da aprendizagem, dentre as quais destaca-se a da aprendizagem significativa, desenvolvida por David Ausubel. Ele disse que, *“Se tivesse que reduzir toda a psicologia educacional a um só princípio, diria o seguinte: o fator isolado mais importante que influencia a aprendizagem é aquilo que o aprendiz já sabe. Averigue isso e ensine-o de acordo”* (AUSUBEL, 1978, p. 4)

Para Ausubel (1978), existem três tipos de aprendizagem: cognitiva, afetiva e psicomotora. Na aprendizagem cognitiva, estabelece-se um complexo organizado de informações, chamado de estrutura cognitiva, resultado de todo o que foi aprendido pelo indivíduo. A afetiva ocorre por meio de sinais internos ao indivíduo, em que experiências afetivas acompanham a aprendizagem cognitiva. A aprendizagem psicomotora se relaciona



com habilidades, que implicam o desenvolvimento de movimentos corporais inerentes, por exemplo, a determinados tipos de esporte e/ou tocar instrumentos musicais.

Ausubel (1978) dá ênfase à aprendizagem cognitiva, destacando o processo de aquisição, armazenamento, hierarquização e organização das ideias e conceitos na estrutura cognitiva, a qual tem pontos de ancoragem, em que os novos conceitos vão se ligando. Nesse entendimento, a aprendizagem consiste na ampliação e/ou reconfiguração da estrutura cognitiva por meio da incorporação de novas ideias, e conceitos.

A aprendizagem ocorre de duas maneiras, dependendo do tipo de relacionamento entre as ideias já existentes nessa estrutura e as novas informações: a significativa e a mecânica.

A aprendizagem significativa é o processo em que uma nova informação vai se relacionar com algum aspecto relevante da estrutura cognitiva do indivíduo, denominado *subsunçor*. Assim, essa relação não é arbitrária, atendendo a uma lógica contextual que facilita a capacidade do aprendiz de explicar com suas próprias palavras o que foi aprendido.

Na aprendizagem mecânica não há subsunçor na estrutura cognitiva do aprendiz. A nova informação não interage com aquela já existente na estrutura cognitiva, pouco ou nada contribuindo para sua elaboração e diferenciação (MOREIRA, 2006a).

Deve-se ressaltar que essas formas de aprendizagem não representam uma dicotomia. Para Ausubel (1978), existe uma espécie de *continuum*, em que uma forma dá suporte à outra, coexistindo em tempos distintos. Por exemplo, para ocorrer à aprendizagem significativa, em determinadas situações, a aprendizagem mecânica se faz necessária. A simples memorização de fórmulas se situaria em um dos extremos desse *continuum* (o da aprendizagem mecânica), enquanto a aprendizagem de relações entre conceitos poderia estar no outro extremo (o da aprendizagem significativa) (MOREIRA, 2006b).

Ausubel distingue dois tipos de aprendizagem: por recepção significativa e por descoberta. Na aprendizagem por recepção significativa, tudo aquilo que pode ser aprendido é apresentado ao aprendiz de maneira verbal e completamente elaborado, enquanto na aprendizagem por descoberta o conteúdo a ser aprendido deverá ser descoberto pelo aprendiz de forma independente. Vale ressaltar que, a aprendizagem por recepção significativa não implica na passividade do aprendiz, que ao receber as informações pode relacioná-las com conceitos relevantes, subsunçores, presentes na sua estrutura cognitiva.

A aprendizagem por recepção significativa proposta por Ausubel (1978) foi concebida como resposta crítica ao chamado modelo de ensino-aprendizagem por descoberta,

paradigmático em propostas de melhoria do ensino de ciências, nos anos 1960, em países como Estados Unidos e Inglaterra.

Na ausência de subsunçores Ausubel (1978) propõe a utilização de organizadores prévios, concebidos como materiais introdutórios que são apresentados ao aprendiz antes do conteúdo a ser ensinado, visando à criação de novos subsunçores.

Segundo Ausubel (1978, p. 41 *apud* MOREIRA, 2006, p. 19):

A essência do processo de aprendizagem significativa é que ideias simbolicamente expressas sejam relacionadas, de maneira substantiva (não literal), e não arbitrária, ao que o aprendiz já sabe, ou seja, a algum aspecto da estrutura cognitiva especificamente relevante (isto é, um subsunçor) que pode ser, por exemplo, uma imagem, um símbolo, um conceito ou uma proposição já significativos.

Dessa forma, uma das condições para ocorrer à aprendizagem significativa é que o material a ser aprendido seja relacionável à estrutura cognitiva do aprendiz. Um material com essas características é dito potencialmente significativo (MOREIRA, 2006). Uma segunda condição para ocorrer aprendizagem significativa é a disposição do aprendiz para relacionar o novo material à sua estrutura cognitiva. Essa condição indica que, se o aprendiz não tem disposição para relacionar os novos conceitos aos subsunçores, ou seja, se sua intenção for simplesmente memorizar aquela ideia, é provável que ocorra somente aprendizagem mecânica.

Dadas essas condições, do ponto de vista avaliativo é importante dispor de evidências de que a aprendizagem significativa realmente aconteceu. Nesse sentido, para Ausubel (1978), o aprendiz deverá ser capaz de expressar claramente o significado do conteúdo ensinado, mostrando competência para utilizá-lo em outros contextos de aprendizagem.

Diante disso, discute-se acerca dos tipos de aprendizagem significativa. Ausubel (1978) distingue três tipos de aprendizagem significativa: representacional, conceitual e proposicional. A aprendizagem significativa representacional envolve atribuição de significados, verbalmente expressados, a símbolos, cujos referentes podem ser objetos e/ou situações. Por exemplo, depois de muito contato com o objeto e a palavra que representa este objeto, o indivíduo lembra-se do objeto mediado pela palavra. Os símbolos passam a significar para o indivíduo aquilo que seu referente significa.

Na aprendizagem conceitual objetos, eventos, situações, propriedades, que têm atributos de critérios comuns são mediados por símbolos. Distinguem-se dois processos de aquisição de conceitos: por formação e assimilação. Na formação de conceitos, os atributos dos conceitos são adquiridos pela experiência direta, por meio de sucessivas etapas de

formulação e testagem de hipóteses e generalização (MOREIRA, 2006). Na assimilação de conceitos, o conceito se produz na medida em que se amplia o vocabulário do aprendiz.

Na aprendizagem proposicional, a tarefa do aprendiz é aprender o significado de ideias em forma de proposição, isto é, a combinação e relação de várias palavras de forma a produzir uma proposição, que representa um conceito. Uma proposição contém tanto o significado conotativo como o denotativo de um conceito, existindo uma interação destes com ideias relevantes, presentes na estrutura cognitiva.

Junto com os tipos de aprendizagem, Ausubel (1978) propõe o conceito de assimilação. A teoria da assimilação proposta retrata a questão da interação entre os conceitos novos e os conceitos preexistentes com o objetivo de deixar mais claro e preciso o processo de aquisição e organização dos significados e conceitos na estrutura cognitiva. É importante destacar que a aprendizagem significativa não indica que a nova informação vai formar uma ligação simples com elementos preexistentes na estrutura cognitiva (AUSUBEL; NOVAK; HANESIAN, 1968).

A assimilação é um processo que ocorre quando um conceito ou proposição potencialmente significativo é assimilado sob uma ideia ou conceito subsunçor mais inclusivo, mais amplo. A relação dessas informações gera um produto interacional, ou seja, um subsunçor modificado. Na assimilação, a nova informação e o subsunçor relacionam-se e se alteram.

De modo concomitante ao processo de assimilação, ocorre outro processo, chamado assimilação obliteradora. Obliterar quer dizer desaparecer pouco a pouco. Segundo a perspectiva de Ausubel (1978), as novas informações tornam-se espontâneas e progressivamente menos dissociáveis dos seus subsunçores, até que não sejam mais reproduzíveis como entidades separadas. A nova informação que se incorporou a um subsunçor existente na estrutura cognitiva gradativamente não poderá ser separada, dissociada. O cerne da “teoria da assimilação” está na ideia de que novos significados são aprendidos pela interação do novo conhecimento com conceitos e proposições previamente aprendidas (MOREIRA, 2006).

Partindo desse enfoque, faz-se uma reflexão acerca das formas de aprendizagem significativa. A nova informação vai adquirir um novo significado, conforme se relaciona com o conceito subsunçor, consistindo em uma forma de aprender. A primeira forma é a aprendizagem subordinada, em que o novo material que foi aprendido mantém uma relação de subordinação com o subsunçor, ou seja, a nova informação se relaciona com um conceito preexistente mais abrangente, hierarquicamente superior. Esse processo ocorre tanto na

aprendizagem de conceitos quanto na aprendizagem proposicional. Reflete-se, em ambos os casos, uma relação de subordinação, existindo uma subsunção de conceitos e proposições potencialmente significativos sob conceitos mais amplos e inclusivos, existentes na estrutura cognitiva (AUSUBEL, 1978).

A aprendizagem superordenada acontece quando a nova informação é mais ampla e inclusiva que o conteúdo existente na estrutura cognitiva. Assim sendo, o conceito novo assimila os conceitos subsunçores, que passam a ser concebidos como instâncias específicas dessa nova ideia. A informação superordenada é definida por atributos que contemplam os das ideias subordinadas. A obtenção de significados superordenados sobrevém de maneira mais comum na aprendizagem de conceitos do que na proposicional.

Quando a nova informação não é capaz de ser assimilada por subordinação nem por superordenação tem lugar à aprendizagem combinatória. Ela acontece quando novos conceitos, considerados potencialmente significativos, relacionam-se de maneira não arbitrária com ideias que foram previamente aprendidas e que podem ser vinculadas a outras ideias e/ou representações de caráter mais geral presentes na estrutura cognitiva. Esta relação é possível quando há semelhanças entre as novas ideias e o que poderia ser considerado um fundo de ideias de caráter muito geral existente na estrutura cognitiva (AUSUBEL, 1978).

Essa forma de aprendizagem foi amplamente utilizada no planejamento e implementação do produto educacional aqui apresentado, particularmente na escolha das analogias e simulações que subsidiaram a discussão de atividades experimentais, que independentemente das suas diferenças podem ser analisadas com base em um mesmo aparato matemático.

Na aprendizagem significativa é importante destacar os conceitos de diferenciação progressiva e de reconciliação integrativa. A diferenciação progressiva ocorre na aprendizagem por subordinação, na qual o novo material interage e se ancora ao conceito subsunçor. O conceito presente na estrutura cognitiva, após a interação com a nova informação, se modifica e amplia, incorporando outras informações, diferenciando-se progressivamente e ganhando em detalhes. Esse processo está presente em quase toda a aprendizagem significativa subordinada, pois os conhecimentos prévios estão em constante elaboração, sendo modificados, adquirindo novos significados. Nesse sentido, Ausubel (1968, p. 159) destaca que:

Quando os assuntos são programados de acordo com os princípios da diferenciação progressiva, as ideias mais gerais e mais inclusivas são apresentadas em primeiro lugar. São então progressivamente diferenciadas, em termos de detalhe e

especificidade. Esta ordem de apresentação presumivelmente corresponde à sequência natural de aquisição de consciência e sofisticação cognitiva quando os seres humanos são espontaneamente expostos ou a um campo completamente desconhecido, ou a um ramo desconhecido de um corpo de conhecimento familiar.

Na aprendizagem superordenada, como também na combinatória, ocorre a reconciliação integrativa. As novas informações são adquiridas e os subsunçores podem se reorganizar e adquirir novos significados. A ideia que está na estrutura cognitiva é reconciliada com as novas informações, havendo uma recombinação de elementos previamente existentes na estrutura cognitiva. Conflitos entre novos significados podem ser resolvidos por meio de reconciliação integrativa. Trata-se de um processo cujo resultado é o explícito delineamento de diferenças e similaridades entre ideias relacionadas (MOREIRA, 2006).

### **3.2 A teoria sociointeracionista**

Na concepção e no desenvolvimento da proposta de intervenção em sala de aula que estamos apresentando a interação mútua entre os estudantes e com o professor, bem como as atividades experimentais, que pautam de maneira pujante o ensino de Física, são fatores que exerceram influência marcante na escolha da teoria sociointeracionista, de Lev Vygotsky e colaboradores, como um importante referencial teórico.

Vygotsky dá importância aos processos psicológicos superiores, em que há uma valorização da intervenção pedagógica. Esses processos psicológicos superiores são ações do pensamento tipicamente humanas, processos mentais mais sofisticados e que envolvem o controle do comportamento, a ação intencional e a liberdade do indivíduo em relação às características do momento e espaço presentes (OLIVEIRA, 1991).

Um conceito central na teoria *vygotskiana* é o de mediação. Mediação, em termos genéricos, é o processo de intervenção de um elemento intermediário numa relação; a relação deixa, então, de ser direta e passa a ser mediada por esse elemento. A relação do homem com o mundo é mediada por instrumentos e signos, não é uma relação direta.

O instrumento é um elemento interposto entre o trabalhador e o objeto do seu trabalho, ampliando as possibilidades de transformação da natureza (OLIVEIRA, 1993). Para Vygotsky, o trabalho, em que se utilizam os instrumentos, é o processo básico que vai diferenciar o homem das outras espécies. O ser humano, quando vai realizar determinada tarefa, utiliza instrumentos específicos, por exemplo, na ação de cortar determinado material, o homem faz uso de uma tesoura, ou uma faca, ou um machado.

As atividades experimentais – os equipamentos desenvolvidos nesta proposta pedagógica – são exemplos de instrumentos como mediadores do processo de ensino-aprendizagem de Física.

Os signos são formas posteriores de mediação, na qual no campo psicológico se realiza uma interposição entre o sujeito e o objeto do conhecimento. Essa forma de mediação não é concreta, como nos instrumentos. O signo é um instrumento na atividade psicológica, que é análogo ao uso de instrumentos no trabalho. As representações mentais da realidade exterior são, na verdade, os principais mediadores a serem considerados na relação do homem com o mundo.

A utilização de signos dentro do plano totalmente simbólico confere aos seres humanos uma característica peculiar: a capacidade de transitar em dimensões do simbólico. Ocorre no ser humano um processo de representação mental, em que os conteúdos mentais ocupam o lugar dos objetos, das situações e dos eventos, conferindo-lhe, assim, a liberdade em relação ao tempo e ao espaço, a capacidade de imaginar, de fazer planos, de ter intenções, de manipular mentalmente objetos mesmo na sua ausência.

Segundo Oliveira (1993), ao longo da evolução da espécie humana e do desenvolvimento individual, ocorreram mudanças qualitativas no uso dos signos. Por um lado, podemos destacar o processo de internalização de significados, em que os conceitos, as ideias, as palavras que representam mentalmente a realidade são postos para dentro do sistema psicológico. Outra mudança que se observa é o desenvolvimento de sistemas simbólicos, que vão organizar os signos em estruturas complexas e articuladas. Tanto o processo de internalização como o de desenvolvimento de sistemas simbólicos constituem evidências de que a interação social é que provoca a alteração e o desenvolvimento das funções psicológicas superiores. Os signos são construídos culturalmente; o ser humano desenvolve a capacidade de representação simbólica inserido numa cultura que lhe fornece material para o desenvolvimento do campo simbólico.

A linguagem é o sistema simbólico básico de todos os grupos humanos. O desenvolvimento da linguagem e suas relações com o pensamento têm lugar de destaque na obra de Vygotsky. Existem duas funções básicas da linguagem: a primeira é a comunicação entre os indivíduos de um grupo cultural; a segunda é o pensamento generalizante, que tem forte ligação com as práticas pedagógicas desenvolvidas neste trabalho. A linguagem fornece os conceitos e as formas de organização do real, que, desse modo, mediará às ações entre o sujeito e o objeto do conhecimento, agrupando todas as ocorrências de uma mesma classe de objetos.

Portanto, pensamento e linguagem trilham caminhos distintos ao longo do desenvolvimento, havendo uma conexão entre essas duas potencialidades, num dado momento da história da espécie e na história do indivíduo. A partir de então, pensamento e linguagem se atrelam e não se desvinculam mais. O pensamento se torna verbal e a linguagem racional, representando uma parte substancial do funcionamento psicológico humano.

Vygotsky busca compreender o desenvolvimento dos processos psicológicos ao longo da história da espécie humana e da história do indivíduo. Portanto, o desenvolvimento do ser humano depende do aprendizado ocorrido num dado grupo social. Sob esse enfoque, é que discorreremos acerca de uma das ideias mais importantes na teoria sociointeracionista, a de zona de desenvolvimento proximal.

Segundo Rego (1995), a relação entre desenvolvimento e aprendizado é vista sob dois ângulos: a relação geral desses dois aspectos; e as especificidades dessa relação no período escolar. Assim sendo, identificam-se dois níveis de desenvolvimento: um se refere ao desenvolvimento de forma retrospectiva, ou seja, refere-se a etapas já alcançadas, denominada nível de desenvolvimento real ou efetivo; e o outro se refere ao desenvolvimento potencial, em que se relacionam as capacidades em vias de serem construídas.

O nível de desenvolvimento real pode ser compreendido como aquelas conquistas já consolidadas, funções ou capacidades que o estudante já aprendeu e domina, pois já consegue realizar ou utilizar sozinho, sem assistência de outra pessoa mais experiente. O nível de desenvolvimento potencial refere-se àquilo que o aprendiz é capaz de fazer, só que mediante a ajuda de outra pessoa. Nesse caso, a criança realiza tarefas e soluciona problemas através do diálogo, da colaboração, da imitação, da experiência compartilhada e das pistas que lhe são fornecidas (REGO, 1995).

A ideia de nível de desenvolvimento potencial capta, assim, um momento do desenvolvimento que caracteriza não as etapas já alcançadas, já consolidadas, mas as etapas posteriores, nas quais a interferência de outras pessoas afeta significativamente o resultado da ação individual.

A partir da postulação da existência desses dois níveis de desenvolvimento, real e potencial, Vygotsky define a zona de desenvolvimento proximal. A zona de desenvolvimento proximal refere-se ao caminho que o indivíduo vai percorrer para desenvolver funções que estão em processo de amadurecimento e que se tornaram funções consolidadas, estabelecidas no seu nível de desenvolvimento real.

A zona de desenvolvimento potencial é, pois, um domínio psicológico em constante transformação: aquilo que uma criança é capaz de fazer com a ajuda de alguém hoje

ela conseguirá fazer sozinha amanhã. Como se o processo de desenvolvimento progredisse mais lentamente do que o aprendizado. O aprendizado desperta processos de desenvolvimento que, aos poucos, vão se tornar parte das funções psicológicas consolidadas no indivíduo.

Interferindo constantemente na zona de desenvolvimento proximal dos alunos, o professor e os discentes mais experientes contribuem para movimentar os processos de desenvolvimento dos membros imaturos da turma ou da cultura. No contexto do ensino de Física, esse aspecto da teoria de Vygotsky dialoga diretamente com o uso de atividades experimentais, sendo o professor o principal, mas não o único, mediador. Grande parte das ações do homem é mediada pela própria experiência e pela experiência vivida por outros membros do grupo social.

## **CAPÍTULO 4.**

### **DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO EDUCACIONAL**

Neste capítulo, descreve-se o planejamento da sequência didática apresentada no produto educacional. Uma breve descrição da escola, bem como das turmas que se desenvolveu este projeto, é relatada, levando-se em conta aspectos sociais, econômicos, humanos e de saúde, vigentes à época da aplicação da sequência didática.

#### **4.1 A escola e as turmas**

O produto visa o uso de atividades experimentais em aulas de ondulatória como estratégia de ensino a ser aplicado em três turmas de 2º ano da escola de ensino médio em tempo integral Cláudio Martins, localizada, em Fortaleza, Ceará, situada na Rua Demócrito Rocha, número 400, no bairro Monte Castelo. A escola conta com nove turmas de ensino médio, possui um amplo laboratório de Ciências e Matemática, uma biblioteca, uma sala de vídeo e um laboratório de informática. A escola é uma instituição pública pertencente à rede estadual de ensino, encontrando-se sob a supervisão da Secretaria da Educação do Ceará (Seduc).

As turmas de 2º ano A, B e C contam com 28, 29 e 30 estudantes, respectivamente, que permanecem na escola em tempo integral, onde têm três refeições diárias e assistem a nove aulas, sendo duas de Física como componente curricular obrigatória. Existe um bom relacionamento entre professor e as turmas, como também entre núcleo gestor. As turmas



possuem características distintas, com inúmeras peculiaridades que permitem uma abordagem dinâmica dos conteúdos.

#### **4.2 Planejamento da sequência didática**

Um dos requisitos básicos do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) é a elaboração de um produto educacional que contenha estratégias de aprendizagem de Física no contexto dos ensinos fundamental e médio. O produto educacional é o resultado de uma pesquisa em ensino física a ser implementado em sala de aula.

O processo de desenvolvimento do produto educacional teve início com a escolha do tema. A decisão pelo estudo do uso de atividades experimentais no ensino de ondulatória advém, sobretudo, do interesse profissional, mas retoma algumas inquietações pessoais da minha fase escolar de aprendizagem de Física, em que o ensino de ondulatória especificamente se resumia à memorização e à aplicação de fórmulas, muitas vezes sem conectar-se com os conceitos e ideias que dão suporte ao conhecimento científico.

De posse do tema, realizou-se uma revisão bibliográfica em revistas e periódicos nacionais voltados para o ensino de Física e Ciências. (Revista brasileira de ensino de Física, Caderno catarinense de ensino de Física, Revista do Professor de Física - UnB) Uma seleção de artigos e livros que possuem conteúdo relevante e diretamente articulado com o tema foi armazenada para análise posterior. HERMANN, LIBÂNEO, (2017); FRENCH (1971); CHAVES, EVANGELISTA (2019); DEMO (2019); GASPAR (2011). Textos que discutiam o estado da arte tiveram prioridade na análise, pois estes conteúdos são mapeamentos da produção de uma determinada área.

Por meio de análises ocorridas no cotidiano escolar, bem como por meio de perguntas e entrevistas realizadas aos discentes da escola em que se realizou a implementação do produto educacional, identificou-se e realizou-se uma série de atividades experimentais, contempladas na intervenção em sala de aula como contextos para o ensino dos conteúdos integrantes da sequência didática.

#### **4.3 O produto educacional**

O produto educacional consiste em uma sequência didática composta de seis encontros, com duas aulas de 50 minutos cada, implementados ao longo de seis semanas,

contemplando conteúdos de ondulatória por meio de aulas expositivas dialogadas e da realização de atividades práticas e experimentos demonstrativos.

Ele foi concebido, visando orientar o professor de física na realização de uma proposta de ensino como atividade investigativa utilizando situações-problema, que incentivam a curiosidade dos alunos e a reflexão sobre a importância da ondulatória. Assim, mostra-se, entre outras coisas, como se dá o desenvolvimento da ciência, destaca-se o seu papel na sociedade, e o trabalho dos cientistas.

A sequência didática é composta por uma série de atividades experimentais contemplando oscilações livres e forçadas, classificação e características das ondas, os fenômenos da reflexão, refração, difração, interferência e ressonância. Essas atividades experimentais, que podem ser realizadas em sala de aula ou no laboratório, são concebidas como contextos para atribuir significados aos conceitos físicos que caracterizam as oscilações e as ondas nos fenômenos naturais e na tecnologia.

A realização dessas atividades pressupõe a preparação prévia dos materiais utilizados, deixando-os à disposição dos estudantes para que participem da montagem. Os arranjos experimentais contemplam equipamentos simples como molas, diapasões, taças, *laser* e uma cuba de ondas, assim como equipamentos eletrônicos como mídias digitais, *softwares*, computador, projetor, simuladores digitais, dentre outros.

O produto educacional foi desenvolvido para ser aplicado na sua totalidade, entretanto, ele pode ser utilizado parcialmente, contemplando apenas os encontros que o professor considerar pertinentes em função do contexto educacional para o qual o planejamento de oscilações e ondas na disciplina de física foi concebido.

## **CAPÍTULO 5. APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL**

Neste capítulo, apresenta-se uma descrição detalhada da implementação da sequência didática proposta no produto educacional. Os encontros ocorreram por meio de reuniões em sala virtual da plataforma Google, mediante uso do aplicativo Google Meet. Devido à pandemia da COVID-19 a escola onde transcorreu a aplicação da sequência didática permaneceu fechada e as aulas na rede estadual de educação do Ceará ocorreram de forma remota. Portanto, esta descrição retrata a aplicação de uma sequência didática, originalmente planejada para ser utilizada na modalidade de ensino presencial, que foi realmente implementada na modalidade de ensino remoto.

Houve, anteriormente ao início da sequência didática propriamente dita, uma aula com os estudantes dos 2º anos A, B e C, na qual explicamos a proposta pedagógica que seria implementada, destacando que alguns aspectos como a predisposição para aprender, os conhecimentos prévios dos alunos sobre oscilações e ondas, o uso de materiais de fácil acesso na montagem e realização de experimentos seriam necessários para alcançar uma aprendizagem significativa, principal objetivo da proposta de intervenção em sala de aula. Na ocasião, ficaram decididos os meios e mídias digitais que seriam utilizados, bem como um detalhamento do planejamento das aulas e os conteúdos que seriam trabalhados durante os encontros.

As turmas de 2º ano tiveram duas aulas de 50 minutos por semana, sendo uma aula na segunda-feira e a outra na quinta-feira. As três turmas participaram das aulas de forma concomitante, sendo utilizada uma sala de reunião no aplicativo Google Meet para os encontros. O *link* da reunião foi “<http://meet.google.com/ppb-hase-usq>”, que ficou disponível na descrição do grupo de Física dos 2º anos no aplicativo WhatsApp, para que os estudantes tivessem acesso ao ambiente virtual de aprendizagem no horário da aula.

## **5.1 Relato do encontro 1**

### ***5.1.1 Aula 1, em 17 de agosto de 2020***

A primeira aula do encontro 1 da sequência didática teve início com os estudantes sendo incitados por nós a refletirem sobre o conceito de oscilações. Os instruímos que o alvo de estudo desta etapa do curso seria a ondulatória e que o estudo das oscilações se fazia necessário para que uma melhor compreensão a respeito dos conceitos da ondulatória fosse alcançada.

Por meio de uma apresentação de *slides* (Figura 18), a aula dialogada transcorreu abordando conceitos do movimento oscilatório, contextualizados no cotidiano dos alunos e em aplicações tecnológicas. Foram apresentados exemplos de oscilações: o balançar de um relógio, um barco ancorado executando um movimento de sobe e desce, o movimento do elétron em torno do núcleo atômico.

Figura 18 – Apresentação 1 – Slide 3



Fonte: Elaboração própria (2020).

Em seguida, uma demonstração foi realizada utilizando-se um pêndulo com o carregador do aparelho celular, em que um movimento oscilatório foi reproduzido. Diante da câmera do computador, realizou-se a demonstração juntamente com a discussão dos conceitos de período, frequência e amplitude. Na ocasião, os questionamentos dos alunos foram respondidos com base nessa demonstração.

Um vídeo (<https://www.youtube.com/watch?v=cy6AU-KrXI0>) com uma animação (Figura 18) foi apresentado para analisar a relação entre o movimento circular uniforme e o movimento harmônico simples. Por meio dessa animação, os educandos tiveram a oportunidade de perceber como o movimento de um corpo, preso a uma mola, sobre uma superfície lisa, pode ser concebido como a projeção, em um dos eixos de coordenadas cartesianas, da posição de um ponto que executa um movimento circular uniforme.

Na sequência discorreremos sobre o movimento harmônico simples. Comentamos que os movimentos do sistema massa-mola e do pêndulo são exemplos do movimento harmônico simples. Destacamos que a periodicidade desse movimento em torno de uma posição de equilíbrio é resultado de uma força, chamada de restauradora, que tende a trazer o corpo para a posição de equilíbrio.

O pêndulo simples e o sistema massa mola foram abordados com detalhes na discussão atinente à força restauradora. No caso do sistema massa-mola, dissemos que a força restauradora era a força elástica, relacionando-a a lei de Hook. Durante a realização da demonstração das oscilações do pêndulo simples lançamos questionamentos sobre a relação entre a tensão do fio, o peso e a força restauradora.

As seguintes questões, concebidas na suposta zona de desenvolvimento proximal dos alunos foram parte do nosso diálogo com eles: “O que é a força restauradora?”; “No caso do sistema massa-mola, qual é a força que tenta trazer a massa de volta para a posição de equilíbrio?”; “Qual a força restauradora atuante no pêndulo simples?”.

Os questionamentos demonstraram-se relevantes, pois propiciaram a interação entre os discentes e entre estes e o professor, gerando conflitos cognitivos e auxiliando o processo de formação de conceitos. Eis algumas respostas dos alunos: “[...] a força da mola”; “[...] a força no cabo. Não, professor, seria a gravidade do carregador!”; “[...] é a força da gravidade, professor!”.

Finalizamos a apresentação de *slides* expondo os conceitos e imagens relacionados às oscilações livres, oscilações forçadas e ressonância. Com auxílio do arranjo experimental feito anteriormente, realizamos demonstrações de oscilações livres e forçadas (Figura 19). Constatamos que esses experimentos demonstrativos despertaram o interesse dos alunos, contribuindo para a atribuição de significados aos conceitos que os caracterizam.

Figura 19 – Demonstração do pêndulo simples.



Fonte: Elaboração própria (2020).

Finalizamos a aula sugerindo aos estudantes uma série de três vídeos:

- Oscilador harmônico simples

[https://www.youtube.com/watch?v=Ab9OB9Q6QNw&list=PL1Dg4Oxxk\\_RI2Ppb541vQyaUbqUuXtiuJ&index=1](https://www.youtube.com/watch?v=Ab9OB9Q6QNw&list=PL1Dg4Oxxk_RI2Ppb541vQyaUbqUuXtiuJ&index=1)

- Oscilações amortecidas

[https://www.youtube.com/watch?v=h\\_JOS71dl48&list=PL1Dg4Oxxk\\_RI2Ppb541vQyaUbqUuXtiuJ&index=3](https://www.youtube.com/watch?v=h_JOS71dl48&list=PL1Dg4Oxxk_RI2Ppb541vQyaUbqUuXtiuJ&index=3)

- Pêndulos acoplados - ressonância

[https://www.youtube.com/watch?v=xetRMbo35Iw&list=PL1Dg4Oxxk\\_RI2Ppb541vQyaUbqUuXtiuJ&index=5](https://www.youtube.com/watch?v=xetRMbo35Iw&list=PL1Dg4Oxxk_RI2Ppb541vQyaUbqUuXtiuJ&index=5)

Estes vídeos mostram atividades experimentais relacionadas com os conceitos trabalhados durante a aula. Orientamos a realização, em casa, das atividades experimentais presentes nesses vídeos para a sua posterior apresentação em sala de aula. Informamos que essas apresentações seriam consideradas na avaliação do terceiro período letivo. As atividades propostas no Google classroom que constam os vídeos sugeridos, estão expostas por meio de imagens no apêndice C desta dissertação.

### **5.1.2 Aula 2, em 20 de agosto de 2020**

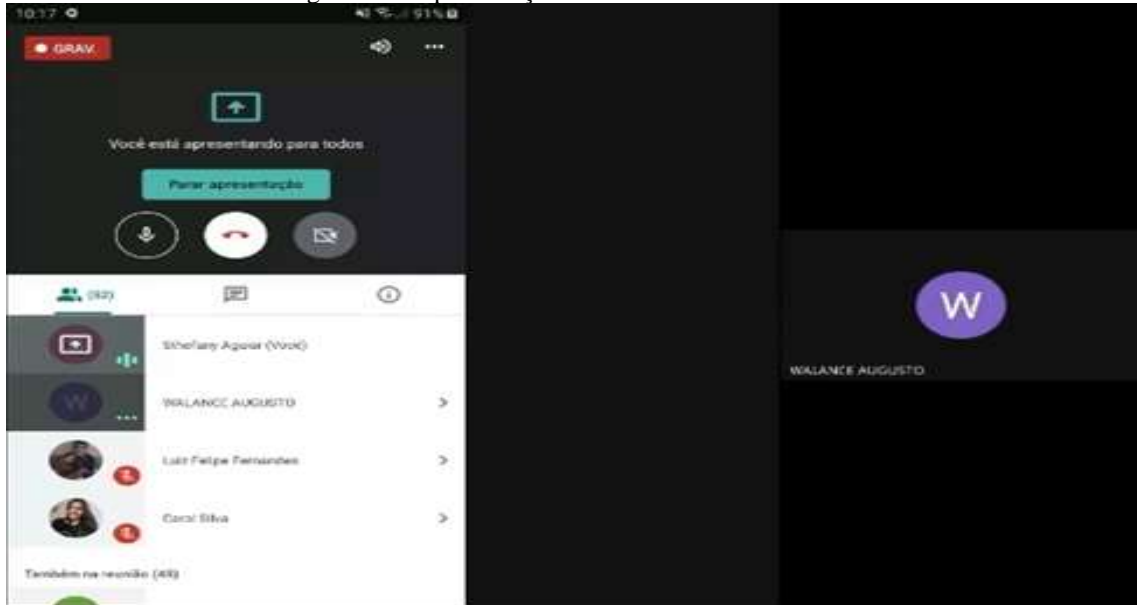
Iniciamos a segunda aula do encontro 1 dialogando com os estudantes acerca dos assuntos abordados na aula anterior. Conceitos do movimento oscilatório como vibração, período, frequência, movimento harmônico simples vieram a ser comentados. Na ocasião, explicamos que na aula anterior alguns vídeos haviam sido sugeridos para que os alunos assistissem e buscassem reproduzir as atividades experimentais realizadas nos vídeos, já que estas seriam realizadas por eles em sala de aula e no laboratório. Dissemos que tal finalidade dos vídeos seria a mesma durante nas seguintes aulas da sequência didática.

Em seguida, indagamos sobre quais dos discentes presentes haviam assistido aos vídeos. Oito alunos das três turmas de 2º ano responderam afirmativamente. Dentre eles, três interagiram de forma direta na sala de aula virtual com o professor, comentando sobre os vídeos e experimentos pesquisados.

Nesta hora, o diálogo com os estudantes transcorreu com comentários sobre as impressões deles sobre os vídeos e as atividades. Uma estudante, do 2º ano A, comentou que havia tentado realizar o experimento do pêndulo e da vela. Perguntamos aos discentes sobre os experimentos a fim de identificar quais atividades haviam sido feitas. Outra estudante, do 2º ano C, disse que ela e duas colegas, do 2º A, haviam realizado a pesquisa sobre as atividades experimentais sugeridas nos vídeos. As alunas disseram que não haviam tido tempo hábil para concluir as atividades, mas que haviam feito a pesquisa sobre os conceitos abordados na aula anterior e que tinham preparado uma apresentação de *slides*, a qual era bem

parecida com a que havíamos exposto na aula anterior. A aula prosseguiu com a explicação das discentes dos resultados da pesquisa que realizaram. A Figura 20 ilustra a apresentação das discentes para a turma.

Figura 20 – Apresentação das discentes na sala virtual



Fonte: Acervo do autor (2020).

Uma estudante iniciou a apresentação dizendo que cada discente da equipe iria comentar sobre conceitos distintos do movimento oscilatório. Complementamos, dizendo que as alunas estavam sendo avaliadas e que a avaliação formativa da turma ocorreria no decurso das aulas. Alguns diálogos das estudantes, bem como as imagens da apresentação da equipe, serão expostos na seção seguinte, que trata dos resultados da aplicação da sequência didática. Os conceitos de oscilações, ondas, movimento harmônico simples, movimento circular, oscilações livres e oscilações forçadas e ressonância foram os temas abordados pelas alunas. Constatamos que as explicações das discentes só conseguiam reproduzir superficialmente os conceitos que havíamos discutido, na aula anterior. Elas fizeram, em diversas oportunidades, referência à atividade experimental realizada por nós na aula anterior, dizendo: “[...] como o professor explicou”; “[...] do jeito que o professor fez com o pêndulo na aula passada”.

Por vezes, fazíamos intervenções na apresentação das estudantes, complementando as explicações, respondendo aos questionamentos e dando exemplos práticos da aplicação do conceito em questão. Houve uma interrupção da aula por falha de conexão, quando a estudante que discorria sobre o tema ficou sem acesso à internet temporariamente, retomando a apresentação após aproximadamente três minutos.

Durante a aula a equipe comentou algumas atividades experimentais relacionadas com o fenômeno da ressonância em diapasões e em taças de cristal que seriam realizadas no decorrer da sequência didática (Figura 21).

Figura 21 – Fenômeno da ressonância: diapasões e taças



Fonte: Acervo do autor (2020).

Encerramos a aula orientando a turma a fazer vídeos das atividades experimentais. Os vídeos seriam reproduzidos durante as aulas que se seguiriam, por meio dos quais ocorreria o processo avaliativo. Orientações sobre experimentos que estavam sendo testados pelos alunos para posterior apresentação foram repassadas, com novas sugestões de vídeos de atividades experimentais para pesquisa. Os *links* dos vídeos sugeridos foram postados pelo professor, após a aula, no Google Classroom.

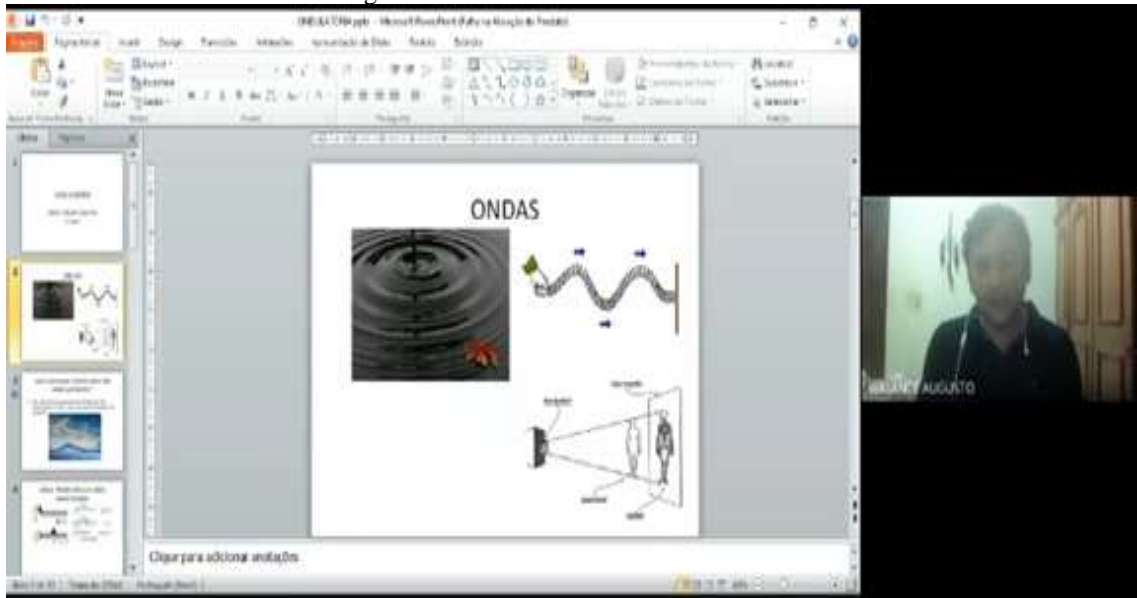
## 5.2 Relato do encontro 2

### 5.2.1 Aula 3, em 24 de agosto de 2020

O encontro 2 iniciou-se com a terceira aula, que ocorreu em sala de reunião no aplicativo Google Meet. Começamos expondo que, as duas próximas aulas seriam dedicadas ao estudo das ondas. Comentamos que o conceito de onda, os tipos, sua classificação e suas características seriam explorados nesse encontro, indicando que a análise do movimento oscilatório, realizada no encontro anterior, serviria de base para o estudo das ondas. A Figura 22 ilustra o início da aula no Google Meet.



Figura 22 – Abertura da aula na sala virtual



Fonte: Acervo do autor (2020).

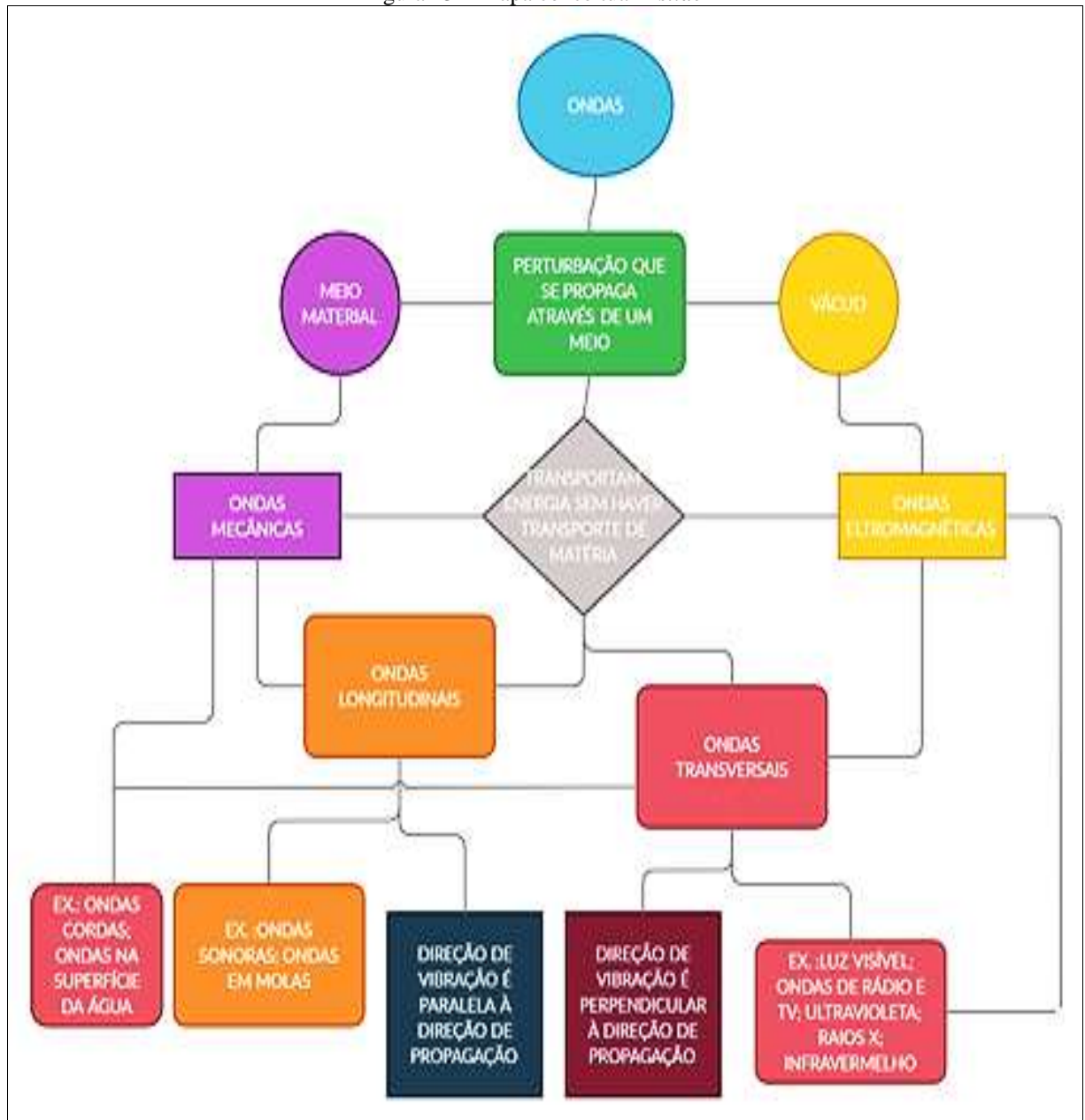
Após apresentar exemplos de propagação de ondas na água e em uma mola, dissemos que os raios-x são também um tipo de onda. Explicamos que a onda é uma perturbação que se propaga em um meio, transportando energia sem transportar matéria, o que exemplificamos com onda, que ao passar por um barco, lhe transfere a energia que provoca seu movimento de subida e descida em um mesmo lugar no mar.

A classificação das ondas com base na relação entre as direções de propagação da onda e das oscilações do meio foi discutida utilizando uma mola. Essa atividade foi realizada pelos estudantes, gerando ondas transversais e longitudinais. Na ocasião, questionamos sobre o meio de propagação dessa onda. Disponibilizamos na escola um conjunto de molas helicoidais que foram utilizadas pelos estudantes para a realização de vídeos das atividades experimentais.

Continuamos a aula de maneira expositiva. Explicamos que as ondas mecânicas precisam de um meio material para se propagar, já as eletromagnéticas propagam-se em meios materiais e no vácuo. Apresentamos *slides* sobre ondas mecânicas e ondas eletromagnéticas. Mostramos o espectro eletromagnético, destacando os tipos de ondas eletromagnéticas com base nas suas frequências. Na ocasião, uma aluna perguntou se as ondas eletromagnéticas só existiam no vácuo. Respondemos com diversos exemplos de ondas eletromagnéticas que são utilizadas no cotidiano. Indicamos o link (<https://www.youtube.com/watch?v=rEGO8-zUcEI>) que mostra que a onda mecânica não se propaga no vácuo.

Utilizamos um mapa conceitual (Figura 23) para sistematizar os conceitos que havíamos discutido, o que propiciou a participação dos alunos na aula.

Figura 23 – Mapa conceitual – slide 4



Fonte: Elaboração própria (2020).

Após breves comentários sobre os elementos de uma onda, finalizamos a aula orientando os estudantes a pesquisar sobre tais elementos: período, frequência, amplitude e velocidade de propagação

### 5.2.2 Aula 4, em 27 de agosto de 2020

De acordo com a metodologia que estabelecemos de comum acordo com os estudantes, na aula da segunda-feira apresentavam-se os conteúdos que, na aula de quinta-

feira, complementavam-se por meio de atividades experimentais realizadas pelos alunos, considerando nossas orientações.

Assim, antes de convidar os estudantes para fazer as apresentações correspondentes à aula anterior, de segunda feira, fizemos uma recapitulação dialogada dos conteúdos desta, contemplando: o conceito de onda, as suas características e classificação. Na ocasião verificamos se os alunos tinham assistido ao vídeo que mostrava que não havia propagação sonora no vácuo (Figura 24).

Figura 24 – Propagação da onda sonora



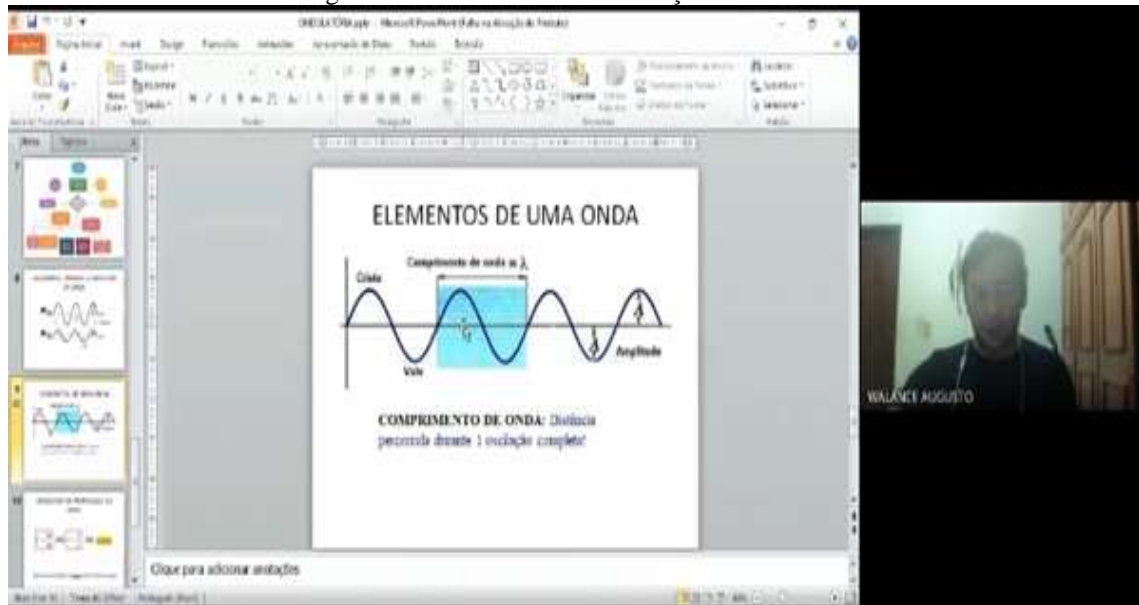
Fonte: Acervo do autor (2020).

De forma resumida, falamos sobre as ondas eletromagnéticas. A natureza da luz, com a teoria corpuscular de Newton, e a teoria ondulatória, de Huygens, foram comentadas para embasamento das ideias e fatos que deram sustentação teórica e experimental à compreensão das ondas eletromagnéticas. Expusemos a concepção da dualidade onda-partícula. Apresentamos exemplos de aplicabilidade das ondas eletromagnéticas no cotidiano, na ciência e na tecnologia.

Retomamos o mapa conceitual apresentado na aula anterior, destacando as unidades de medidas das grandezas físicas frequência, período e amplitude. Destacamos a dependência da velocidade da onda das características do meio de propagação. Qualitativamente justificamos a dependência da energia que a onda transporta da sua amplitude.

Pedimos aos estudantes propor uma forma de calcular a velocidade de propagação da onda utilizando a mola. Na ocasião, abordamos a relação entre a velocidade de propagação, o comprimento de onda e o período (Figura 25).

Figura 25 – Discussão sobre a relação fundamental



Fonte: Acervo do autor (2020).

Após as exposições das ideias e conceitos sobre a relação fundamental da ondulatória, em que se concentraram os conhecimentos matemáticos necessários para o desenvolvimento do estudo, convidamos os alunos a apresentarem os *slides* e as atividades experimentais. Dois estudantes, do 2º ano B, apresentaram *slides* sobre a natureza e classificação das ondas. Uma discente, do 2º ano C, e outra, do 2º ano A, fizeram as demonstrações na casa de uma delas. Elas utilizaram a mola helicoidal que disponibilizamos na escola para a realização da atividade. Diversos ajustes de posicionamento de câmera foram feitos para melhor visualização das demonstrações. A interação entre os alunos se intensificou nesse processo. As imagens da Figura 26 mostram os momentos da apresentação, ocorrida ao vivo, nos quais ondas longitudinais e transversais eram produzidas na mola pelas discentes. Com a apresentação das discentes concluímos a aula, que consideramos proporcionou momentos lúdicos e de aprendizagem para todas as turmas do segundo ano da escola.

Figura 26 – Estudantes realizando demonstrações com a mola ao vivo na aula



Fonte: Acervo do autor (2020).

### 5.2.3 Aula 5, em 31 de agosto de 2020

Esta aula foi necessária para concluir as apresentações dos alunos, cuja realização deveria ter acontecido na aula anterior. Nela a equipe de alunos que haviam apresentado os *slides* sobre ondulatória teve a oportunidade de complementar as explicações. Mostramos um vídeo de cerca de dois minutos, elaborado e editado por duas discentes, do 2º ano C, com atividades experimentais sobre o movimento oscilatório (Figura 27).

Figura 27 – Apresentação de vídeo de estudantes: experimentos com pêndulos



Fonte: Acervo do autor (2020).

No vídeo, dois pêndulos simples, com mesmo comprimento, porém com massas distintas, oscilam com o mesmo período, demonstrando que o período de oscilação do pêndulo simples independe da massa. A atividade experimental foi repetida para mostrar que o período de oscilação depende do comprimento do pêndulo (Figura 28). Uma aluna, do 2º ano A, utilizou um conjunto de pêndulos a fim de realizar a mesma demonstração do vídeo (Figura 29).

Figura 28 – Imagem de vídeo produzido pelas estudantes: pêndulos com comprimentos distintos



Fonte: Acervo do autor (2020).

Terminada a apresentação do vídeo, destacamos o caráter complementar da apresentação teórica dos conceitos realizada por uma das equipes e a demonstração prática realizada por outra.

Figura 29 – Demonstração ao vivo na sala virtual



Fonte: Acervo do autor (2020).

O encontro 2 da sequência didática foi finalizado com uma ampla discussão a respeito da relação fundamental da ondulatória a partir de uma apresentação de *slides*, proporcionada por um aluno na sala de aula virtual.

Consideramos que nesse encontro ao incentivar e orientar o trabalho independente e em equipe dos alunos conseguimos explorar as suas zonas de desenvolvimento proximal com resultados satisfatórios no que diz respeito ao processo de formação e assimilação de conceitos, no qual a experiência direta e a ampliação do vocabulário desempenham um papel importante.

### 5.3 Relato do encontro 3

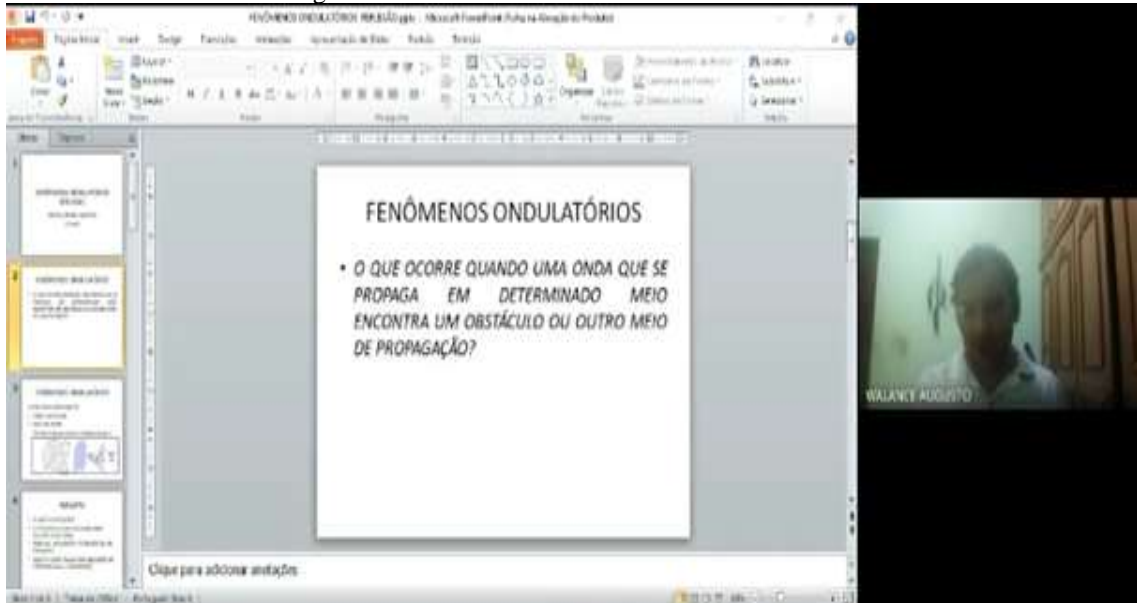
#### 5.3.1 Aula 5, em 31 de agosto de 2020

O encontro 3 da sequência didática teve início ainda na quinta aula. Utilizamos o terço final da aula para apresentar o tema do encontro: fenômenos ondulatórios.

Por meio de uma apresentação de *slides* começamos a discussão com o seguinte questionamento: “o que ocorre quando a onda encontra um obstáculo?”. Alguns estudantes responderam fazendo referência ao meio de propagação. Questionamos: o que ocorre quando

uma onda, que se propaga por uma corda fina se encontra com outra corda mais grossa amarrada a ela? A Figura 30 retrata esse momento da aula.

Figura 30 – Discussão sobre fenômenos ondulatórios



Fonte: Acervo do autor (2020).

Na ocasião, comentamos sobre os fenômenos ondulatórios. Dissemos que tais fenômenos são comportamentos específicos que a onda tem ao encontrar um obstáculo, ou a superfície que separa dois meios, chamada interface. Mencionamos a reflexão, a refração, a difração e a interferência como exemplos de fenômenos ondulatórios. Os estudantes foram convidados a pesquisar sobre tais fenômenos. Informamos que, em consonância com a metodologia de trabalho adotada, o fenômeno da reflexão seria o tema do trabalho independente das turmas, contemplando a realização de apresentações teóricas e atividades experimentais.

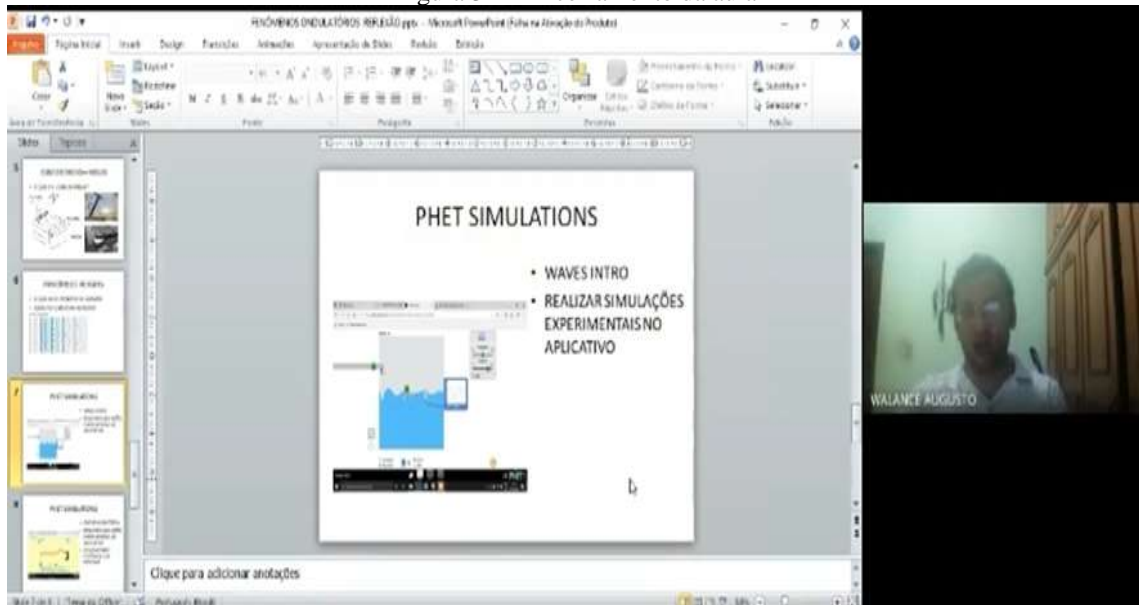
Na sequência, perguntamos: “onde podemos perceber o fenômeno da reflexão no dia a dia?”. Os alunos responderam que nos espelhos é possível ver a reflexão. Aproveitando esse conhecimento prévio, continuamos o questionamento: “qual o tipo de onda está relacionado à reflexão no espelho?”. Depois de algum tempo, os educandos responderam que se tratava da luz visível. A apresentação de *slides* contemplou: o princípio de Huygens e o conceito de frente de onda.

Encerramos a aula discorrendo sobre o equipamento a ser utilizado nos estudos: a cuba de ondas. A plataforma Phet Interactive Simulations foi apresentada como um recurso didático que seria utilizado nas próximas aulas. A imagem seguinte ilustra o encerramento da aula, com a sugestão de simulações virtuais, “Waves intro” e “Ondas numa corda” na



plataforma Phet Simulations, da Universidade do Colorado, nos Estados Unidos da América (Figura 31).

Figura 31 – Encerramento da aula



Fonte: Acervo do autor (2020).

### 5.3.2 Aula 6, em 3 de setembro de 2020

A aula foi iniciada com uma enquete, utilizando o *chat* do Google Meet, sobre quais os estudantes que haviam assistido aos vídeos recomendados na aula anterior. Em seguida, fizemos uma breve apresentação da cuba de onda, recurso didático a ser utilizado na aula.

A discussão das ideias sobre o fenômeno da reflexão se deu com uma célere revisão dos pontos abordados na aula anterior. Enfatizamos que as atividades experimentais para demonstrações da reflexão poderiam ser feitas na mola helicoidal e/ou na cuba de ondas. Utilizando *slides*, comentamos sobre o que ocorre quando a onda que se propaga em determinado meio encontra um obstáculo ou outro meio de propagação. De acordo com as ideias trabalhadas nos vídeos sugeridos, discutimos a propagação da onda em uma corda com uma de suas extremidades fixa. Tentamos interagir com a turma lançando perguntas, porém não houve êxito nesse momento. Para propiciar a participação pedimos para lembrar os vídeos que havíamos recomendado. Uma estudante comentou que assistira a um vídeo, no qual ondas eram produzidas num tanque com água, em que se colocavam barreiras dentro do tanque. Complementamos os comentários da discente com descrições dos fenômenos mostrados nos vídeos.

Na sequência, começamos a realizar as demonstrações na cuba de ondas, utilizando a câmera do celular para a visualização dos fenômenos (Figura 32).

Figura 32 – Sequência de imagens: montagem e apresentação da cuba de ondas



Fonte: Acervo do autor (2020).

Explicamos que as ondas eram visualizadas por meio da luz que atravessava a água e era projetada na parede. Mostramos que ao tocar a água, ou seja, quando o meio de propagação é perturbado, essa perturbação se propaga pelo meio. Ondas circulares e ondas retas foram produzidas, relacionando as linhas que se apareciam nas imagens com o conceito de frente de onda. Após a realização da atividade, vários discentes se manifestaram: “[...] é massa o experimento. Gostei”; “[...] muito legal, professor”.

A discussão das ideias relacionadas à reflexão continuou com questionamentos sobre as características da onda. Em relação à frequência uma estudante respondeu que a velocidade com que uma pessoa balança a mola muda à frequência da onda. Outro discente respondeu que tinha relação com a força que a pessoa aplicava à mola. Na ocasião, sistematizamos as respostas dos alunos. Destacamos que a velocidade de propagação da onda tem relação com o meio, que a amplitude se relaciona com a energia que é transportada pela

onda e que a frequência tem relação com a fonte geradora, o que contextualizamos no caso da reflexão, na qual não há alteração do meio de propagação nem da fonte geradora da onda.

O som teve destaque no contexto da reflexão de ondas. Questionamos sobre um fenômeno sonoro que guarda relação com a reflexão. Diversos alunos responderam que o eco era esse fenômeno. Abordamos por meio de indagações as aplicações tecnológicas da reflexão sonora como, por exemplo, os exames de diagnóstico com ultrassom.

Em seguida, perguntamos sobre a utilização do ultrassom por alguns animais. Eis respostas dos estudantes: “[...] as baleias belugas, professor, elas emitem um som e montam a imagem na cabeça delas com o som que volta, que nem um rastreador de navio”; “[...] é meio que uma ecolocalização isso aí”; “[...] o morcego também, professor”.

Finalizamos a aula com um resumo dos conteúdos que foram abordados e orientando o trabalho independente dos alunos sobre o princípio de Huygens.

## **5.4 Relato do encontro 4**

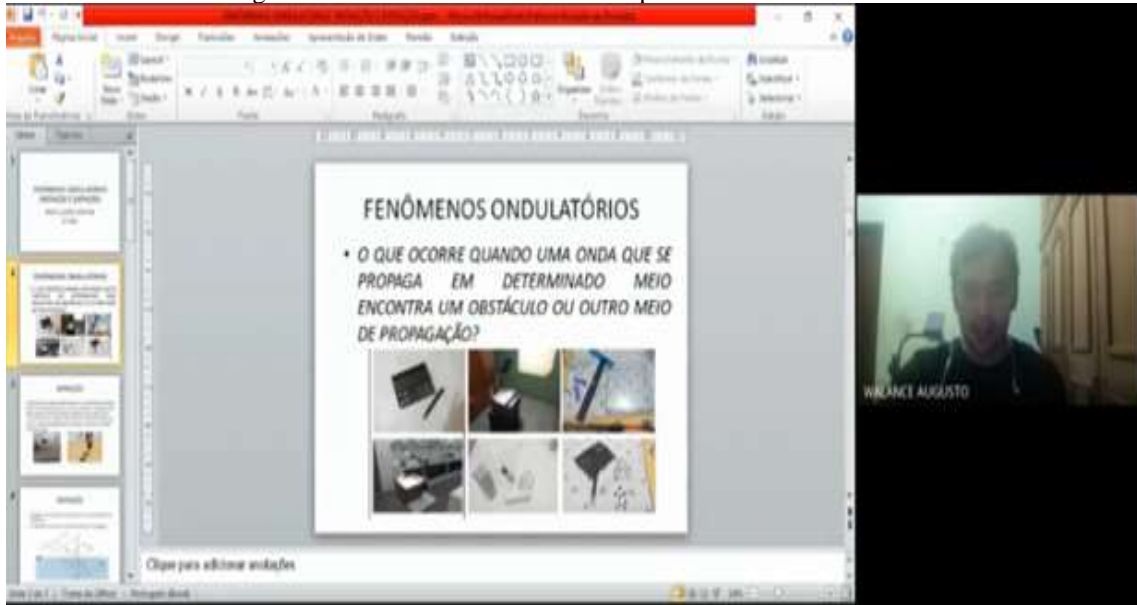
### ***5.4.1 Aula 7, em 14 de setembro de 2020***

Começamos o encontro 4 comunicando os temas das próximas duas aulas: a refração e a difração das ondas. Averiguamos se os estudantes haviam visto os vídeos e simulações sugeridos na aula anterior sobre as leis da reflexão e o princípio de Huygens. Em seguida, por meio de uma apresentação de *slides*, iniciamos a discussão dos conceitos. Relembrando as questões trabalhadas na aula passada, perguntamos: “O que ocorre quando uma onda que se propaga em determinado meio encontra um obstáculo ou outro meio de propagação?”. Uma estudante, do 2º ano A, disse que havia visto, em vídeos, que quando a onda contorna um obstáculo, propagando-se em regiões de sombra, acontecia o fenômeno da difração. Após complementar a intervenção da aluna, realizamos uma explanação detalhada do princípio de Huygens e dos conceitos de frente de onda e raio de onda. Conceituamos a frente de onda é o conjunto de pontos do meio que são atingidos pela onda ao mesmo tempo. Dissemos que, segundo o princípio de Huygens, a partir de uma dada posição da frente de onda, se pode determinar a sua posição em um instante de tempo posterior.

Na sequência, com questionamentos, que foram respondidos pelos estudantes fazendo referência ao que acontece quando a onda atinge a superfície de separação de dois meios, abordamos a refração das ondas. Primeiramente discutimos o fenômeno no caso da onda unidimensional, exemplificando com cordas, de diferentes densidades, amarradas entre

si. Apresentamos, na ocasião, os materiais e instrumentos que seriam utilizados na aula (Figura 33).

Figura 33 – Material das atividades experimentais do encontro 4



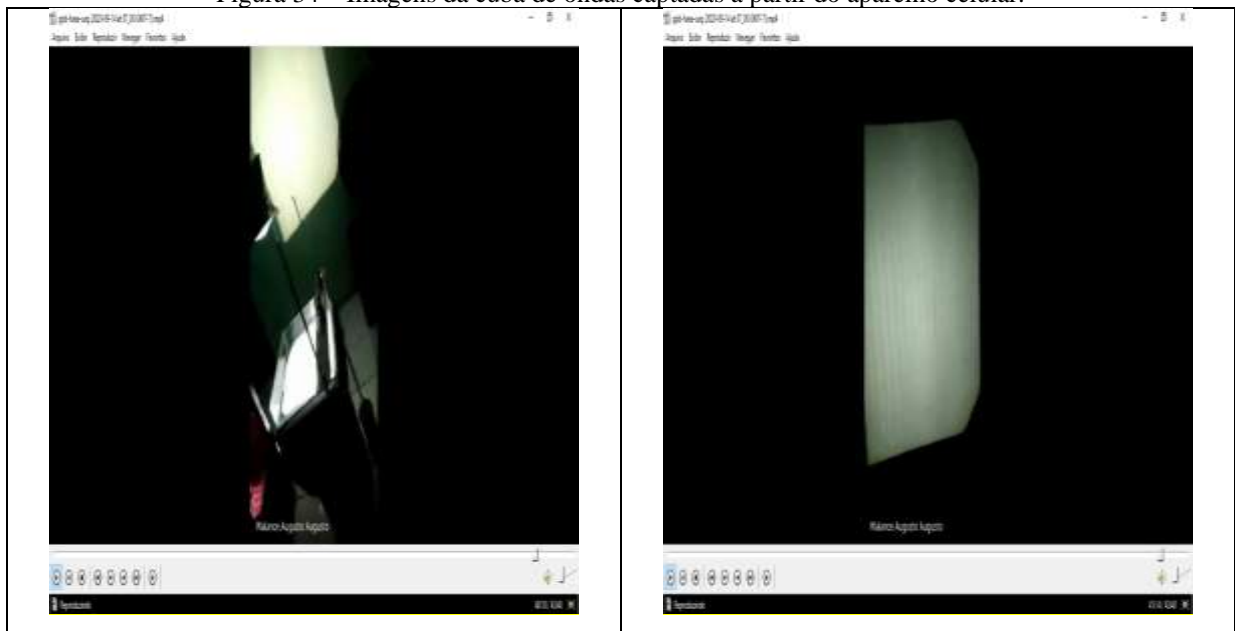
Fonte: Acervo do autor (2020).

Uma série de situações-problema foi apresentada para suscitar a utilização dos conhecimentos prévios dos estudantes acerca da refração. Com o auxílio de imagens, uma analogia entre uma pessoa se deslocando sobre uma superfície lisa que passa a se deslocar na areia e a onda quando muda de meio acalorou a discussão. Questionamos sobre o que ocorre, nesse caso, com a velocidade da pessoa. A diminuição da velocidade foi a resposta dada com unanimidade por parte dos alunos.

Discutimos que quando a onda muda de meio de propagação, a sua velocidade varia. Explicamos que nessa situação a frequência permanece inalterada, pois esta só depende da fonte geradora da onda. Utilizando a imagem de frentes de onda atingindo a interface entre dois meios de propagação, mostramos a mudança da velocidade e conseqüentemente a variação no comprimento de onda.

Apresentamos as leis da refração destacando os conceitos de reta normal à superfície de separação dos meios, ângulos de incidência e de refração. Finalizamos a aula com uma atividade utilizando a cuba de ondas. Com auxílio do aparelho celular, conectado a uma conta de *e-mail* particular para ter acesso à sala de aula virtual, captamos imagens da atividade (Figura 34). Assim, conseguimos realizar uma forma nova de interação com os estudantes.

Figura 34 – Imagens da cuba de ondas captadas a partir do aparelho celular.



Fonte: Acervo do autor (2020).

#### 5.4.2 Aula 8, em 17 de setembro de 2020

Iniciamos a aula, que teve caráter expositivo, com uma revisão e aprofundamento teórico dos conteúdos trabalhados nas aulas anteriores, nas quais privilegiamos as atividades experimentais. Para tanto, utilizamos a simulação virtual “Ondas numa corda”, da plataforma Phet Simulations, como recurso didático que aborda conteúdos tais como: pulsos, tipos de ondas, características das ondas, a reflexão de ondas unidimensionais, inversão de fase da onda, entre outros (Figura 35).

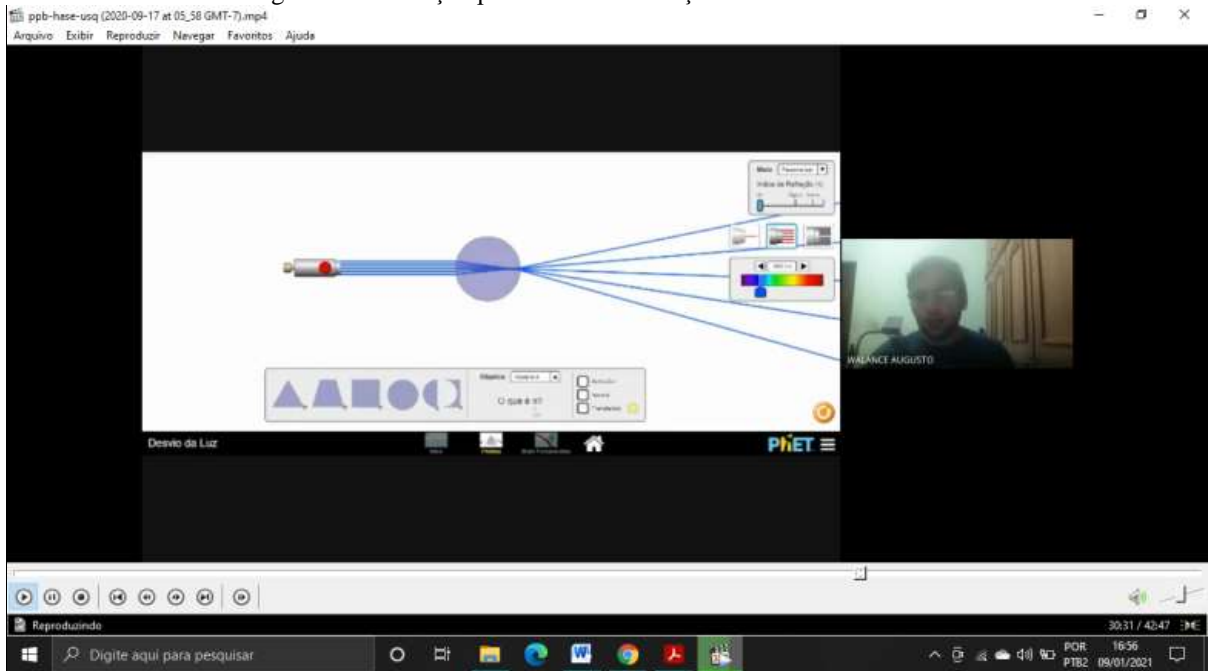
Figura 35 – Simulação virtual “Ondas numa corda”.



Fonte: Acervo do autor (2020).

Comentamos que as ondas do mar chegam sempre de frente à costa, devido à mudança de profundidade, o que faz que varie o módulo e a direção da sua velocidade de propagação. Continuamos contextualizando o fenômeno da refração por meio da simulação virtual “Desvio da luz”, da plataforma Phet Simulations. Mostramos e discutimos a refração da luz (Figura 36).

Figura 36 - Refração por meio da simulação virtual “Desvio da luz”



Fonte: Acervo do autor (2020).

Na sequência, apresentamos um vídeo, cujo link segue entre parênteses (<https://www.youtube.com/watch?v=CMd2KnrQwQI>) no qual o fenômeno da refração é produzido na cuba de ondas. A mudança de profundidade na cuba, quando se coloca uma peça triangular de vidro no fundo, provoca a mudança de direção das ondas retas produzidas.

Finalizamos a aula reproduzindo ao vivo com câmera do computador a atividade experimental mostrada anteriormente nesse vídeo (Figura 37).

Figura 37 – Refração na cuba de ondas



Fonte: Acervo do autor (2020).

## 5.5 Relato da última aula ministrada e avaliação

Após uma reunião do núcleo gestor da escola onde se deu a aplicação, se decidiu aplicar as provas bimestrais do 3º período no início do mês de outubro. Essa decisão impossibilitou a aplicação dos encontros 5 e 6, referentes ao estudo da interferência e da acústica. Portanto, a implementação da nossa proposta de intervenção na escola finalizou com a aula, cujo relato apresentamos a continuação.

### 5.5.1 Aula 9, em 21 de setembro de 2020

A aula foi dedicada à apresentação e discussão do conteúdo físico de três vídeos das atividades realizadas pelos estudantes a partir de nossas orientações. No primeiro, duas alunas, do 2º ano C, produziram ondas circulares por meio das quais explicaram os conceitos de frente de onda e de comprimento de onda. No segundo, um aluno utilizou uma moeda dentro de um copo com água para explicar, com base na refração da luz, a posição aparente dessa moeda. No terceiro, uma estudante, do 2º ano B, mostrou a refração do feixe de luz de um *laser* em um prisma de vidro, com água em seu interior. Os vídeos constam no ANEXO I desta dissertação, com os links disponíveis para visualização.

Finalizamos a aula com uma sistematização dos resultados das atividades realizadas pelos estudantes e parabenizando-os pelo excelente desempenho demonstrado nas apresentações.

### **5.5.2 Avaliação**

A avaliação formativa foi realizada com base nos seguintes critérios: participação, assiduidade, engajamento nas atividades e realização das atividades práticas nas aulas.

Por meio de um formulário, disponibilizado no Google Forms, aplicou-se uma avaliação somativa, na qual constavam dez questões de múltipla escolha, conforme diretrizes acordadas pelo núcleo gestor e o corpo docente da escola nas reuniões de planejamento pedagógico. O formulário, que está no Apêndice B desta dissertação, foi elaborado com a intenção de relacionar ideias e exemplos postos nas discussões dos conceitos durante as aulas.

O link de acesso do Google Forms é gerado no momento em que o professor envia o formulário para os discentes, ou pessoas interessadas. No momento da avaliação o link foi gerado e postado no grupo de Física 2º Ano, no aplicativo WhatsApp. Para acessar o formulário, enviar solicitação de acesso ao Questionário final da sequência didática ao Professor por meio do e-mail: [walance.souza@prof.ce.gov.br](mailto:walance.souza@prof.ce.gov.br) e aguardar o recebimento do link.

#### ***5.5.2.1 Análise das apresentações dos estudantes***

A montagem dos aparatos e desenhos experimentais por parte dos estudantes é uma ideia da nossa proposta pedagógica. Ela foi posta em prática dentro da aplicação do produto educacional, por meio de apresentações, nas quais os estudantes realizaram a atividade durante a aula, ou gravaram um vídeo produzindo e explicando as atividades experimentais.

No decorrer da implementação da sequência didática, do total de 42 participantes das aulas remotas, 21,42% participaram nas apresentações, que envolviam explicações e/ou demonstrações práticas, mostrando engajamento nas atividades orientadas e domínio satisfatório de seus conteúdos.

O “chat” da sala virtual foi utilizado como recurso avaliativo da participação e desempenho dos alunos nas aulas. Percebemos que muitos deles, por sentirem-se desconfortáveis perante a câmera, preferiam interagir por meio do “chat”.

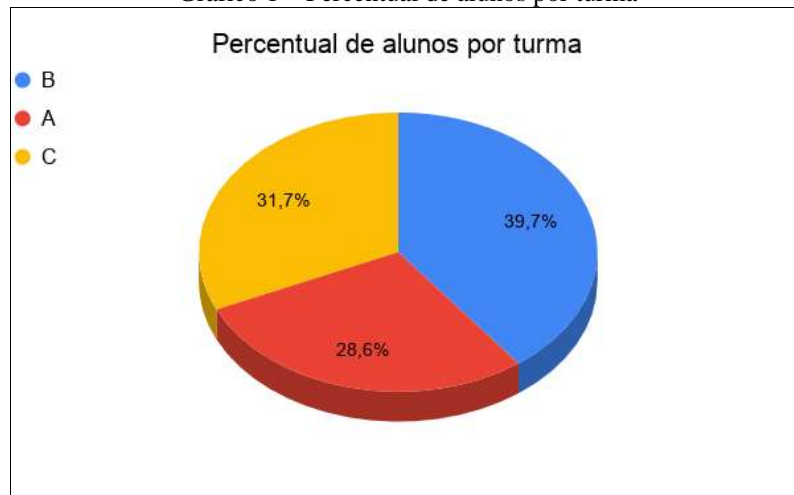
As apresentações dos estudantes podem ser visualizadas por meio do Quadro de atividades realizadas pelos estudantes, no ANEXO I desta dissertação. Os links para acessar alguns dos vídeos produzidos pelos alunos estão disponíveis.



### 5.5.2.2 Análise da avaliação somativa

A avaliação da aprendizagem foi realizada ao término do terceiro período. O formulário, que é constituído de 10 questões de múltipla escolha, nas quais exploramos o conceito de onda, características das ondas, tipos de ondas, a relação fundamental da ondulatória, os fenômenos da reflexão, refração, difração e ressonância. Este ficou disponível para os estudantes durante cinco horas. O Gráfico 1 mostra o percentual do número total de discentes por turmas que realizaram a avaliação.

Gráfico 1 – Percentual de alunos por turma



Fonte: Elaboração própria (2020).

A primeira questão, objetiva, abordava os conceitos de difração, os tipos de ondas e a relação fundamental da ondulatória. Um percentual de 61,9% respondeu corretamente.

Na segunda questão, pede-se para diferenciar ondas longitudinais de ondas transversais, no qual 77,8% dos estudantes responderam que estes dois tipos de ondas se diferem pela direção de propagação do meio.

Percebeu-se que a terceira questão não foi bem assimilada pelos estudantes, com um percentual de 23,6 % de respostas corretas. Nesta questão, apresentou-se uma situação-problema para contextualizar a característica principal das ondas.

Na questão seguinte, outra situação-problema é apresentada, para que identifiquem a solução relacionando-a a principal característica da onda. Com 69,4% das respostas corretas, é importante destacar que a terceira e quarta questões abordam o mesmo conceito, porem com situações-problema diferentes, o que gerou discrepância entre os valores percentuais de acertos.

A quinta questão, também objetiva, por meio de uma situação do cotidiano, o estudante deveria identificar um dos fenômenos ondulatórios trabalhados durante as aulas. A

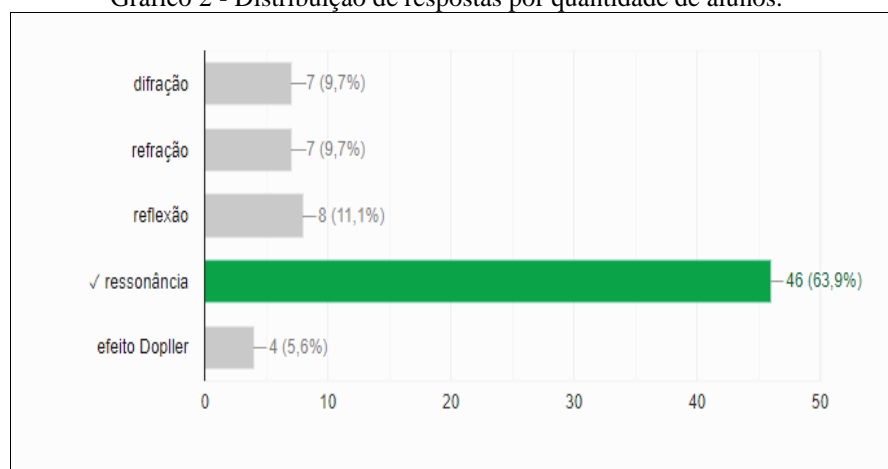
difração do som, juntamente com a condição para que a mesma ocorra foram explorados e o percentual de acertos foi de 68,1% do total.

Na sexta questão, a mesma proposta da questão anterior, só que ao invés do som, abordamos a difração da luz. Desta vez, 30,6% dos estudantes acertaram. Percebe-se a dificuldade, por parte dos alunos, em identificar o mesmo fenômeno ondulatório em diferentes tipos de ondas.

A refração da onda eletromagnética é abordada na sétima questão, por meio de três afirmativas, nas quais os estudantes analisavam e indicavam as verdadeiras. Apenas 11,1% do total das respostas foram corretas. Notou-se a dificuldade dos estudantes em relacionar diferentes situações e tipos de ondas com o fenômeno da refração e suas leis..

A oitava questão enunciou uma situação discutida em aula, na qual dois diapasões vibravam ilustrando o fenômeno da ressonância, para ser escolhido dentre outros fenômenos. Conforme ampla discussão deste conceito durante as aulas, o percentual de 63,9 % de acertos era provável. Por meio do gráfico 2, podemos observar a relação entre a distribuição de respostas por item e a quantidade de alunos.

Gráfico 2 - Distribuição de respostas por quantidade de alunos.



Fonte: Elaboração própria. (2020)

Na nona questão, buscou-se representar uma das atividades experimentais contemplada na sequência didática. Por meio de uma imagem, a difração na cuba de ondas era o fenômeno a ser identificado pelos alunos. Com 65,3% de acertos, consegue-se perceber que a situação que foi exposta na prática auxiliou os estudantes na assimilação da ideia.

A última questão trazia a reflexão de ondas bidimensionais como conceito principal. A situação apresentada nesta questão seria outra atividade experimental da sequência didática, sendo possível a sua realização apenas por parte dos estudantes. Num total de 41,7% de respostas corretas.

O questionário final foi um objeto pedagógico utilizado na avaliação da aprendizagem, conforme diretrizes da escola. Sua aplicação buscou analisar, principalmente, a assimilação de conceitos por parte dos estudantes nos quais não houve o engajamento nas atividades propostas na sequência didática.

## **CAPÍTULO 6**

### **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

As atividades experimentais representam uma componente das aulas de Física que incentiva a participação dos alunos e promove a aprendizagem significativa. Para alcançar tais objetivos, na proposta de intervenção didática em sala de aula aqui apresentada, elas foram concebidas como atividades investigativas a serem desenvolvidas pelos alunos sob a orientação do professor. Assim, a despeito de terem sido realizadas nas condições da modalidade de ensino remoto, conseguimos o engajamento de parte dos alunos no processo de ensino aprendizagem.

A teoria sociointeracionista, de Vygotsky e colaboradores, mostrou-se um referencial teórico fundamental na interação do professor com os alunos no processo de formação dos conceitos, no qual as competências dialógicas do professor, o ambiente sócio cultural e os conhecimentos prévios dos alunos são elementos decisivos. Nesse sentido, a partir do desempenho dos alunos na concepção e apresentação das atividades, com base em nossas orientações, podemos contatar a pertinência do conceito de zona de desenvolvimento proximal.

A relevância dos organizadores prévios para uma sedimentação dos conceitos subsunçores dos alunos, na concepção e implementação das situações de aprendizagem propostas na sequência didática corroborou o caráter complementar das abordagens sociointeracionista e da aprendizagem significativa, de Ausubel.

A implementação da proposta na modalidade de ensino remoto facilitou o aprimoramento das nossas competências e habilidades no uso das tecnologias da informação e da comunicação, sem as quais essa modalidade de ensino seria impossível. Tivemos a oportunidade de vivenciar as potencialidades e fragilidades dessas tecnologias na nossa realidade de atuação profissional, cuja caracterização sai do escopo destas considerações finais.

Vale ressaltar, que a nova realidade de aprendizado em ambiente virtual, não proporciona da mesma forma que o ensino presencial, a interação desejada entre aluno e professor, esperando replicar o trabalho em momento posterior, com turmas presenciais. Contudo, foi possível fazer com que os alunos fossem os agentes produtores de seu próprio conhecimento, sendo eles os protagonistas e o professor, o mediador deste aprendizado.

Avaliamos positivamente a metodologia adotada, de conceber um número significativo das aulas para serem conduzidas pelos alunos a partir da orientação prévia do professor e de seu acompanhamento durante a implementação.

Ela propiciou a aprendizagem significativa de uma parcela considerável dos estudantes que, participaram efetivamente das atividades experimentais, ou simplesmente, colaboraram com suas ideias e observações dos conceitos expostos pelos colegas, dentro das discussões, promovendo o desenvolvimento de competências e habilidades dos alunos, desejáveis na educação científica no ensino médio, relacionadas com linguagens e códigos, a observação, a investigação, a reflexão sobre as relações entre ciência, tecnologia e sociedade, o pensamento crítico e as estratégias argumentativas, susceptíveis de serem transferidas para situações da vida cotidiana.

Diante o exposto, consideramos que os objetivos da proposta de intervenção didática presente no produto educacional foram alcançados durante a implementação da sequência didática que acabamos de relatar.

## REFERÊNCIAS

- AUSUBEL, D. P. *Educational psychology: a cognitive view*. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1968.
- AUSUBEL, D. *Psicología educativa: un punto de vista cognoscitivo*. México, DF: Trillas, 1978.
- AUSUBEL, D. P. *The psychology of meaningful verbal learning*. New York: Grune and Stratton, 1963.
- AUSUBEL, D. P.; NOVAK, J.; HANESIAN, H. *Educational psychology: a cognitive view*. New York: Holt, 1968.
- BRASIL. *Base Nacional Comum Curricular: educação é a base – Ensino Fundamental*. Brasília, DF: MEC/SEB, 2017.
- BRASIL. *Base Nacional Comum Curricular: educação é a base – Ensino Médio*. Brasília, DF: MEC/SEB, 2018.
- BRASIL. *Ciências da natureza, matemática e suas tecnologias*. Brasília, DF: MEC/SEB, 2006.
- BRASIL. *Parâmetros Curriculares Nacionais: Ensino Médio*. Brasília, DF: MEC, 2000.
- BRASIL. *PCN+ Ensino Médio: orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais. Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias*. Brasília, DF: MEC/Semtec, 2002..
- CEARÁ. *Documento curricular referencial do Ceará*. Fortaleza: Seduc, 2019.
- COELHO, L.; PISONI, S. Vygotsky: sua teoria e a influência na educação. *Revista e-Ped*, Osório, v. 2, n. 1, p. 144-152, 2012.
- DEMO, P. *Educação hoje: “novas” tecnologias, pressões e oportunidades*. São Paulo: Atlas, 2009.
- EVANGELISTA, F. L.; CHAVES, L. T. Uma proposta experimental e tecnológica na perspectiva de Vygotsky para o ensino de Física. *Revista do Professor de Física*, Brasília, DF, v. 3, n. 1, p. 177-200, 2019.
- FRENCH, A. P. *Vibrations and waves*. New York: Norton & Company, 1971.
- GASPAR, A. *Compreendendo a Física*, São Paulo, Ática, 2011
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos de Física 1: Mecânica*. 4. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1996.

HERMANN, A. M. M.; SPONCHIADO, D. A. M.; FOSSATO, T. E. LIBÂNEO, J. C. Adeus professor, adeus professora? Novas exigências educacionais e profissão docente. 13 ed. São Paulo: Cortez, 2011. *Perspectiva*, Erechim, v. 41, n. 156, p. 103-106, 2017.

IVIC, I. *Lev Semionovich Vygotsky*. Recife: Joaquim Nabuco, 2010.

MOREIRA, M. A. *A teoria da aprendizagem significativa e sua implementação em sala de aula*. Brasília, DF: UnB, 2006a.

MOREIRA, M. A. Aprendizagem significativa: da visão clássica à visão crítica. In: ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA, 5., 2006, Madrid. *Atas [...]*. Madrid: 2006b.

MOREIRA, M. A. Grandes desafios para o ensino da Física na educação contemporânea. *Revista do Professor de Física*, Brasília, DF, v. 1, n. 1, p. 1-13, 2017.

MOREIRA, M. A. Mapas conceituais. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 3, n. 1, p. 17-25, 1986.

MOREIRA, M. A. O que é afinal aprendizagem significativa?. *Qurrriculum*, La Laguna, p. 1-27, 2012.

MOREIRA, M. A. *Teorias da aprendizagem*. São Paulo: EPU, 1999.

MOREIRA, M. A.; OSTERMANN, F. Sobre o ensino do método científico. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 10, n. 2, p. 108-117, 1993.

NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física básica*. São Paulo: Edgard Blücher, 2008.

OLIVEIRA, M. K. *Vygotsky: aprendizado e desenvolvimento - um processo sócio-histórico*. São Paulo: Scipione, 1993.

PIVATTO, W. Aprendizagem significativa: revisão teórica e apresentação de um instrumento para aplicação em sala de aula. *Itinerarius Reflectionis*, Jataí, v. 2, n. 15, p. 1-20, 2013.

REGO, T. C. *Vygotsky: uma perspectiva histórico-cultural da educação*. Petrópolis: Vozes, 1995.

ROSA, C. T. W.; ROSA, A. B. A teoria histórico-cultural e o ensino da Física. *Revista Iberoamericana de Educación*, Logroño, n. 43, p. 1-9, 2007.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. *Physics for scientists and engineers: with modern physics*. 6. ed. New York: W. H. Freeman, 2008.

VIGOTSKI, L. S. *A construção do pensamento e da linguagem*. São Paulo: Martins Fontes, 2007.

VIGOTSKI, L. S. *A formação social da mente*. São Paulo: Martins Fontes, 2003

**APÊNDICE A – PRODUTO EDUCACIONAL**

**MNPEF**  
Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física



**WALANCE AUGUSTO DA SILVA SOUZA**

**SEQUÊNCIA DIDÁTICA SOBRE O MOVIMENTO ONDULATÓRIO COM FOCO  
NAS ATIVIDADES EXPERIMENTAIS**

Produto Educacional apresentado ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal Rural do Semi-Árido no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antonio López Ruiz.

**MOSSORÓ**

**2021**



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Animação de movimento ondulatório.....	92
Figura 2	– Movimento oscilatório da projeção do ponto no eixo horizontal. ....	93
Figura 3	– Movimento oscilatório da projeção do ponto (sistema massa-mola).....	93
Figura 4	– Períodos iguais .....	94
Figura 5	– Períodos distintos .....	94
Figura 6	– Lei de Hooke.....	95
Figura 7	– Osciladores massa-mola.....	95
Figura 8	– Ressonância num balanço .....	96
Figura 9	– Oscilações forçadas e ressonância .....	97
Figura 10	– Mola helicoidal de aço .....	99
Figura 11	– Onda transversal.....	100
Figura 12	– Onda longitudinal.....	100
Figura 13	– Imagem do vídeo “Som no vácuo” .....	101
Figura 14	– Propagação de ondas mecânicas em meios diferentes.....	101
Figura 15	– Amplitude da onda.....	102
Figura 16	– Propagação de um pulso numa mola 1 .....	103
Figura 17	– Propagação de um pulso numa mola 2 .....	103
Figura 18	– Determinação da velocidade de propagação da onda .....	104
Figura 19	– Comprimento de onda.....	104
Figura 20	– Relação entre o comprimento de onda, a velocidade de propagação e o período .....	105
Figura 21	– Determinação da velocidade de propagação da onda .....	105
Figura 22	– Cuba de ondas .....	106
Figura 23	– Aparato experimental: reflexão e refração.....	107
Figura 24	– Frente de onda e raio de onda .....	108
Figura 25	– Frentes de ondas circulares .....	109
Figura 26	– Frentes de ondas retas .....	109
Figura 27	– Frente de onda e raio de onda .....	109
Figura 28	– Gerador de ondas retas e circulares .....	110
Figura 29	– Princípio de Huygens .....	110
Figura 30	– Introdução às ondas.....	111
Figura 31	– Reflexão numa mola .....	112

Figura 32	– Simulação ondas numa corda.....	112
Figura 33	– Reflexão na cuba de ondas.....	113
Figura 34	– Equipamentos: refração e difração de ondas .....	114
Figura 35	– Superfície de separação de meios .....	115
Figura 36	– Refração da onda.....	115
Figura 37	– Propagação das ondas na superfície líquida.....	116
Figura 38	– Refração em ondas do mar.....	117
Figura 39	– Refração no prisma de vidro .....	117
Figura 40	– Bending Light .....	118
Figura 41	– Refração na cuba de ondas.....	119
Figura 42	– Refração em onda unidimensional.....	120
Figura 43	– Difração em obstáculo triangular.....	120
Figura 44	– Difração em fenda única triangular.....	121
Figura 45	– Difração da luz em redes.....	122
Figura 46	– Cuba de ondas .....	123
Figura 47	– Interferência construtiva .....	124
Figura 48	– Interferência destrutiva .....	124
Figura 49	– Onda estacionária.....	125
Figura 50	– Brinquedo “bola maluca” e corda elástica .....	125
Figura 51	– Experimento onda estacionária .....	126
Figura 52	– Imagem do vídeo de interferência de ondas circulares .....	127
Figura 53	– Interferência em fenda dupla .....	128
Figura 54	– Interferência entre ondas circulares .....	128
Figura 55	– Fontes coerentes e diferença de percurso.....	129
Figura 56	– Wave interference 1 .....	130
Figura 57	– Wave interference 2 .....	130
Figura 58	– Wave interference 3 .....	131
Figura 59	– Som, infrassom e ultrassom .....	132
Figura 60	– Representação da onda sonora .....	133
Figura 61	– Poluição sonora.....	134
Figura 62	– Timbre de instrumentos .....	135
Figura 63	– Produção de som em taça de cristal .....	135
Figura 64	– Diapasão com caixa acústica .....	136
Figura 65	– Harmônicos dos tubos abertos .....	137

Figura 66 – Harmônicos dos tubos fechados.....	138
Figura 67 – Velocidade do som por ressonância.....	139
Figura 68 – Propagação do som em sólidos .....	140
Figura 69 – Ultrassonografia de um feto.....	140

**SUMÁRIO**

<b>APRESENTAÇÃO</b> .....	91
<b>Encontro 1 – Movimento oscilatório</b> .....	92
<b>Encontro 2 – Movimento ondulatório</b> .....	98
<b>Encontro 3 – Fenômenos ondulatórios: reflexão</b> .....	106
<b>Encontro 4 – Fenômenos ondulatórios: refração e difração</b> .....	114
<b>Encontro 5 – Fenômenos ondulatórios: interferência</b> .....	123
<b>Encontro 6 – Acústica</b> .....	132

## APRESENTAÇÃO

O presente produto educacional é uma proposta de sequência didática sobre o movimento ondulatório com foco em atividades experimentais concebidas para ser realizadas pelos alunos a partir da orientação do professor. Ele é resultado da nossa participação como discente do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física no polo 9 (nove), da Universidade Federal Rural do Semi-Árido. A pandemia da COVID-19 provocou que a proposta, concebida para ser implementada na modalidade de ensino presencial, tivera que ser aplicada na modalidade de ensino remoto, o que aconteceu em três (3) turmas do ensino médio da Escola de Ensino Médio em Tempo Integral Cláudio Martins, na cidade de Fortaleza, Ceará.

Para a elaboração da proposta realizamos uma revisão bibliográfica em periódicos de ensino de Física com foco nos trabalhos que abordam a utilização de experimentos sobre o movimento ondulatório no ensino médio (POSSOBON, 2016; BORGES, 2002; MARTINS; BIGANSOLLI; CRUZ, 2002; SCHIEL *et al.*, 2003). Como principais referenciais teóricos consideramos as abordagens da aprendizagem significativa, de Ausubel, e a interacionista, de Vygotsky e colaboradores que, implícita e/ou explicitamente, estão refletidas em documentos do Ministério de Educação para a educação básica e particularmente para o ensino médio.

No planejamento e implementação das atividades experimentais se enfatiza a sua concepção como situações de aprendizagem que facilitam a atribuição de significados aos fenômenos e conceitos relacionados com o movimento ondulatório e promovem uma adequada visão da natureza da ciência e das relações entre ciência e tecnologia (VILCHES; SOLBES; GIL-PÉREZ, 2004). Assim, pretende-se superar a concepção da realização dessas atividades como meras receitas de bolo que não propiciam o desenvolvimento de competências e habilidades relacionadas com a investigação científica, uma das finalidades da educação básica.

Portanto, recomenda-se ao professor interessado na aplicação deste produto educacional privilegiar a criação de situações/problemas na solução das quais os estudantes são provocados a expressar seus conhecimentos prévios na elaboração de hipóteses a serem avaliadas durante o desenvolvimento das atividades experimentais concebidas dentro da zona de desenvolvimento proximal dos alunos.

O produto educacional contempla atividades experimentais sobre oscilações livres e oscilações forçadas, elementos, classificação e características das ondas, os fenômenos da reflexão, refração, difração, interferência e ressonância. Tais atividades que podem ser

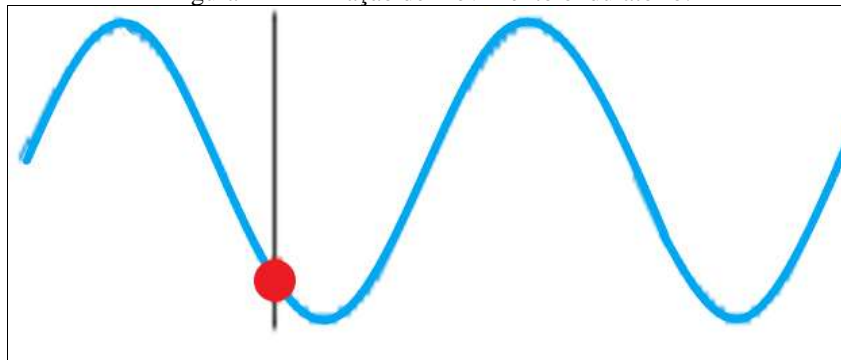
realizadas utilizando, tanto equipamentos simples como molas, diapasões, taças, *laser* e uma cuba de ondas quanto recursos das tecnologias da informação e da comunicação, com destaque para as simulações computacionais. Elas, pressupõem a orientação previa do professor e o seu acompanhamento durante as apresentações dos estudantes.

Esperamos que o presente produto educacional se constitua em uma modesta contribuição para tornar o processo de ensino aprendizagem de Física mais motivador e prazeroso para professores e alunos.

### **Encontro 1 – Movimento oscilatório**

Iniciar a atividade dizendo que no presente encontro vamos começar a estudar o movimento ondulatório utilizando como principal recurso didático as atividades experimentais, privilegiando a participação dos alunos. Apresentam-se exemplos de movimento ondulatório presentes no universo vivencial mais imediato dos alunos, como: ondas no mar, ondas sonoras, ondas na comunicação. Sugere-se apresentação de uma animação (Figura 1). Nela, fica evidente que, durante a propagação de uma onda, partes do meio de propagação realizam um movimento oscilatório em torno de certa posição, sem deslocar-se desta, justificando, assim, o estudo do movimento ondulatório a partir do movimento oscilatório.

Figura 1 – Animação de movimento ondulatório.



Fonte: Elaboração própria do autor (2020).

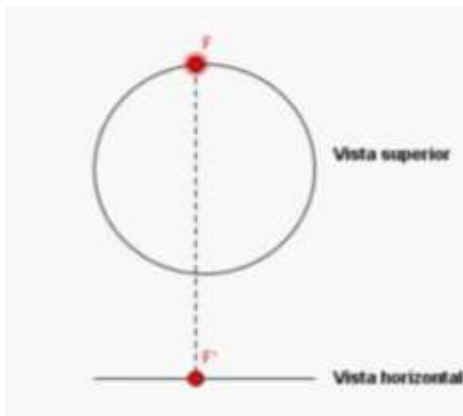
A partir disto, serão apresentados experimentos demonstrativos do movimento oscilatório de um pêndulo simples e do sistema corpo-mola, destacando, mais uma vez, que o estudo do movimento ondulatório pressupõe o conhecimento de conceitos advindos desse movimento oscilatório, como de período, frequência e amplitude.

A dinâmica desses movimentos é discutida como uma aplicação importante das Leis de Newton; por meio de diálogos com os alunos, obtêm-se as equações do movimento, destacando-se a dependência linear da aceleração em relação ao deslocamento da posição de equilíbrio, sendo que a constante de proporcionalidade depende das características próprias dos sistemas: o comprimento do pêndulo e o campo gravitacional no caso do pêndulo simples, a constante elástica e a massa para o caso do oscilador massa-mola.

Na análise do movimento do pêndulo, introduz-se o conceito de período. Para mostrar que a função que determina a posição do pêndulo em qualquer momento de tempo é a função seno (ou cosseno) do ângulo de separação do pêndulo da posição de equilíbrio, sugere-se desafiar os alunos, perguntando-lhes: “Como podemos relacionar o movimento circular uniforme de um ponto e o movimento oscilatório da sua projeção entorno do zero do eixo de projeção?”.

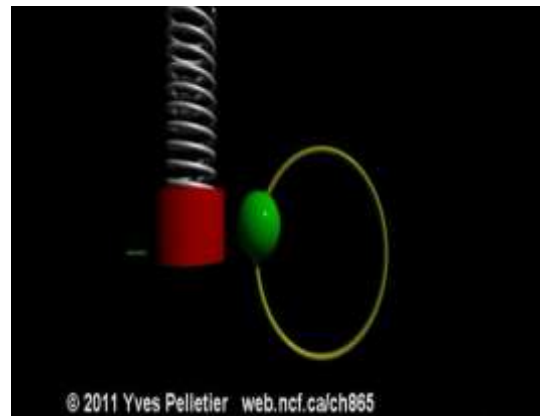
Logo após, apresentam-se dois vídeos (Figuras 2 e 3) com animações que mostram a relação do movimento circular uniforme com o movimento oscilatório da projeção do ponto no eixo horizontal. Na ocasião, será discutida a relação entre a posição angular do ponto em função da velocidade angular e do tempo e se calculará a projeção, no eixo horizontal, do raio vetor que determina a posição do ponto em movimento circular uniforme.

Figuras 2 e 3 – Movimento oscilatório da projeção do ponto no eixo horizontal..



Fonte:

<https://www.youtube.com/watch?v=xnitjik6wlo>.



Fonte:

<https://www.youtube.com/watch?v=cy6au-krxio>.

Na sequência, demonstra-se que o período de oscilação do pêndulo independe da massa. Para tanto, colocam-se dois pêndulos (Figura 4), previamente pendurados no suporte, de forma tal que seus comprimentos, do ponto de fixação até o centro de massa de cada bola, sejam os mesmos. Quando postos a oscilar, os dois pêndulos descrevem praticamente os

mesmos movimentos, com os períodos de oscilação quase idênticos, mesmo com os valores das massas das esferas bem diferentes.

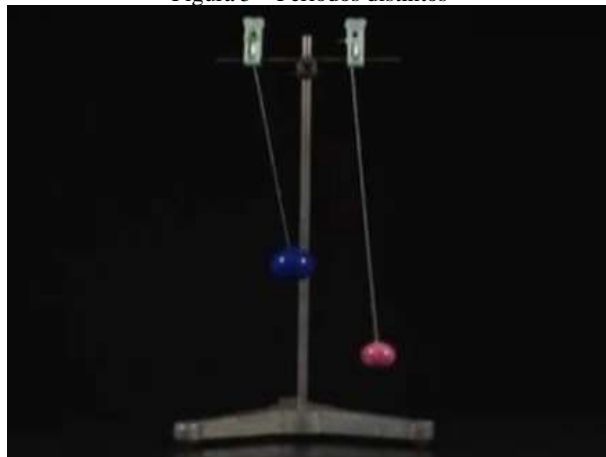
Figura 4 – Períodos iguais



Fonte: Elaboração própria (2020).

Em seguida, apresentam-se as equações do período e da frequência do pêndulo simples, aplicando-as no caso do experimento anteriormente mencionado. Recomenda-se realizar uma discussão, com base nessa equação, indagando como se poderia alterar o período e conseqüentemente a frequência das oscilações do pêndulo. Essa discussão teórica deverá ser complementada com a realização de medições do comprimento e do período de oscilação dos pêndulos utilizados no experimento. Espera-se que os alunos constatem que o pêndulo mais curto vai oscilar mais depressa (menor período) e o pêndulo mais longo vai oscilar mais devagar (maior período) (Figura 5).

Figura 5 – Períodos distintos



Fonte: Elaboração própria (2020).

Dando continuidade à aula, realiza-se a montagem do sistema massa-mola. Inicia-se a montagem pendurando uma das molas no suporte e acoplado um porta-massas a ela.



Ao colocar uma massa de 200 gramas no porta-massas, a mola se deforma. Na ocasião, os alunos serão convidados a lembrar da Lei de Hooke (Figura 6). Espera-se que eles digam que a força-peso, na posição de equilíbrio do sistema, é igual à força elástica da mola e que, quando o corpo é separado da posição de equilíbrio, a força elástica atua na direção e sentido dessa posição de equilíbrio. Na sequência, coloca-se mais uma massa no porta-massas, de forma que a mola vai esticar-se mais.

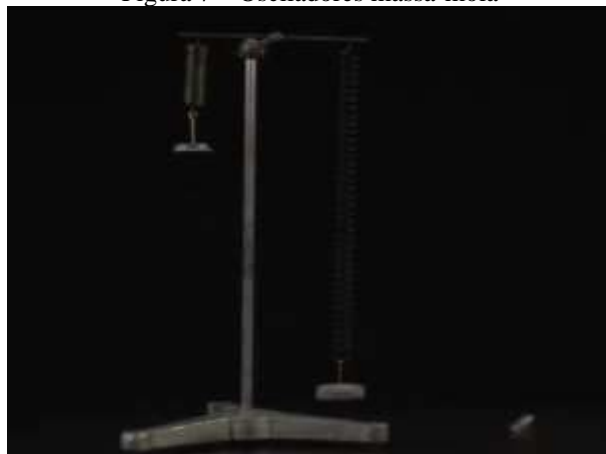
Figura 6 – Lei de Hooke



Fonte: Elaboração própria (2020).

A discussão do movimento desse sistema corpo-mola será baseada nos resultados do experimento utilizando molas diferentes e corpos de massa diferentes. Os estudantes deverão ser convidados a prever o período das oscilações de dois sistemas corpo-mola nos casos de estes terem: a mesma mola com massas diferentes e molas diferentes com massas iguais. Essa discussão deverá destacar que o período de oscilação do sistema depende das suas características próprias: a massa e a constante elástica da mola, sendo maior com o aumento da massa e diminuição da constante elástica da mola (Figura 7).

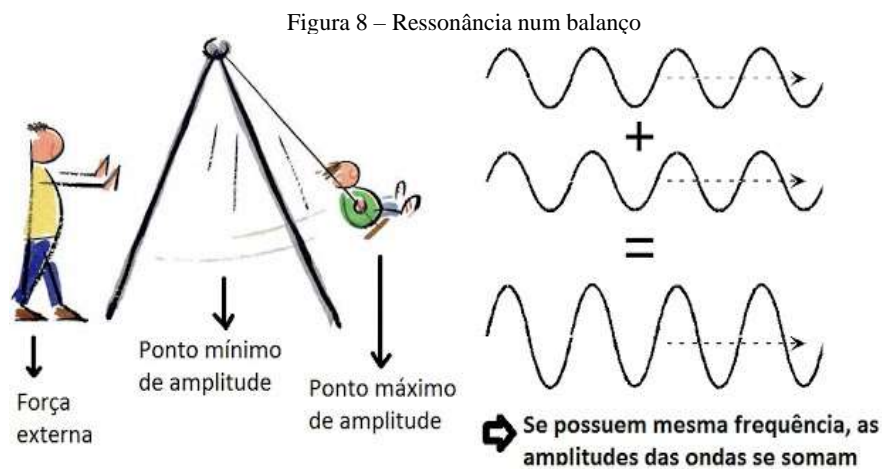
Figura 7 – Osciladores massa-mola



Fonte: Elaboração própria (2020).

Para finalizar essa discussão sobre movimento oscilatório, argumenta-se que o pêndulo dificilmente irá oscilar debaixo d'água, pois esta exerce uma força viscosa no pêndulo, que rapidamente amortece o movimento. Ao oscilar no ar, o pêndulo se sai melhor, mas, ainda sim, o movimento vai lentamente diminuindo, porque o ar exerce uma força viscosa sobre o pêndulo, provocando a perda progressiva da sua energia. Argumenta-se que, quando o movimento de um oscilador é reduzido por um agente externo, o oscilador e seu movimento são ditos amortecidos. Devido à força viscosa que atua sobre todo o sistema oscilante, a energia mecânica do sistema é reduzida, à medida que é transformada em energia térmica no ar.

Na ocasião, deverão ser lembrados os conceitos de oscilações livres e oscilações forçadas, sendo que o pêndulo simples e o oscilador massa-mola, quando postos a oscilar passivamente, são exemplos de oscilação livre. Quando transferimos energia periodicamente aos sistemas oscilantes, por meio de uma força externa, temos oscilações forçadas. Explica-se que, neste último caso, teremos duas frequências de oscilação, a frequência de oscilação livre do sistema e a frequência da força externa. Quando atingimos a situação em que as frequências do sistema oscilante e da força externa são iguais, os dois sistemas estarão em ressonância. Nesta situação, a amplitude das oscilações será máxima. Nesse momento, discute-se um exemplo clássico dessa situação, o movimento de uma pessoa num balanço e outra pessoa empurrando o balanço periodicamente (Figura 8). Pergunta-se aos estudantes: “Quando a pessoa deve empurrar a outra que está no balanço para que o balanço não pare?”.

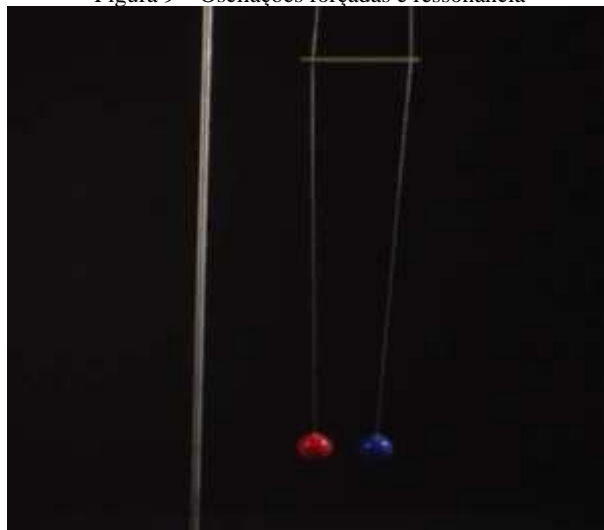


Fonte: [google.com.br/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fpir2.forumeiros.com%2Ft175583-questao-teorica-ressonancia-ou-interferencia](https://www.google.com.br/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fpir2.forumeiros.com%2Ft175583-questao-teorica-ressonancia-ou-interferencia).

Espera-se que os alunos digam que o empurrão não pode ser dado quando o balanço está passando pela posição de equilíbrio. Portanto, o fornecimento da energia ao sistema, para manter ou aumentar as suas oscilações, deverá cumprir certas condições. Depois de discutir esse exemplo, apresenta-se o conceito de ressonância. Argumenta-se que a ressonância ocorre quando há dois sistemas físicos oscilantes postos a vibrar, em que um destes sistemas recebe energia por meio de excitações do segundo sistema, sendo que a frequência de excitação deve ser igual à de uma das frequências naturais do primeiro. Na ocasião, deverá ser feita menção à sua presença no movimento ondulatório, o que será discutido em outro encontro.

Por fim, realiza-se um último experimento demonstrativo sobre oscilações forçadas e ressonância. Basta utilizarmos a montagem de dois pêndulos simples (Figura 9), na qual se deve acoplar os fios dos dois pêndulos com mesmo comprimento, por meio de um canudinho de refresco com cortes transversais, que permite ser encaixado nos fios. Coloca-se um dos pêndulos para se movimentar, deixando o outro parado, assim, à medida que o pêndulo se movimenta, parte da sua energia de oscilação será transmitida para o pêndulo que estava parado, por meio do canudinho acoplado aos fios. Como o comprimento dos fios é igual, os períodos de oscilação também serão iguais, dessa forma podemos observar que, por terem as mesmas frequências de oscilação, haverá ressonância entre os dois movimentos, sendo que o pêndulo que estava em movimento transmitirá toda sua energia de oscilação para o pêndulo que estava parado. Logo em seguida, essa energia de oscilação retornará ao pêndulo original por meio da oscilação do segundo pêndulo. Esses pêndulos acoplados exemplificam bem o fenômeno da transmissão de energia por meio de oscilações, que chamamos de ressonância.

Figura 9 – Oscilações forçadas e ressonância



Fonte: Elaboração própria (2020).

## Encontro 2 – Movimento ondulatório

Dar início à atividade discorrendo sobre o tema a ser discutido na aula: o movimento ondulatório. Nesta primeira abordagem, enfatizar que neste encontro discutiremos as propriedades das ondas, como podem ser classificadas, bem como realizaremos demonstrações e montaremos um desenho experimental para analisarmos a relação entre a velocidade, o comprimento de onda e o período. A princípio, apresenta-se a principal característica desse movimento, como também alguns exemplos que ocorrem no dia a dia. Pode-se citar o caso de uma pedra lançada em um tanque tranquilo, em que uma configuração circular se estende a partir do ponto de impacto. Uma perturbação desse tipo se denomina uma onda; se você observar de bem perto como uma onda dessa espécie se move pela superfície do líquido, verificará que, apesar de a água poder ser agitada e empurrada localmente, ela não se desloca com a onda (PSSC-1968).

Em seguida, orienta-se que os estudantes citem exemplos de ondas que foram discutidos no encontro sobre movimento oscilatório, intervindo de forma que possam estar de posse de um amplo repertório de situações-problema. Diferenciar as ondas citadas nos exemplos, como onda periódica, pulsos, onda de partida. Enfatizar, neste momento, o conceito de onda: uma perturbação que se propaga através de um meio. Apresentam-se algumas imagens para ilustrar melhor o conceito e exemplos citados. No que diz respeito à característica preponderante das ondas, fazer a seguinte indagação: “Qual a principal característica das ondas periódicas?”.

Discutir as respostas dos alunos, intervindo com correções de possíveis conceitos erroneamente apresentados. Explica-se que na onda a energia se transfere pelo meio, sem haver deslocamento de matéria. Exemplifica-se que, ao passar sob um barco em alto mar, a onda levanta o barco, transferindo-lhe energia potencial gravitacional, que é devolvida pelo meio em forma de trabalho e energia cinética. A partir disso, apresentar o dispositivo que será utilizado durante o desenvolvimento da atividade: a mola helicoidal (Figura 10).

Figura 10 – Mola helicoidal de aço



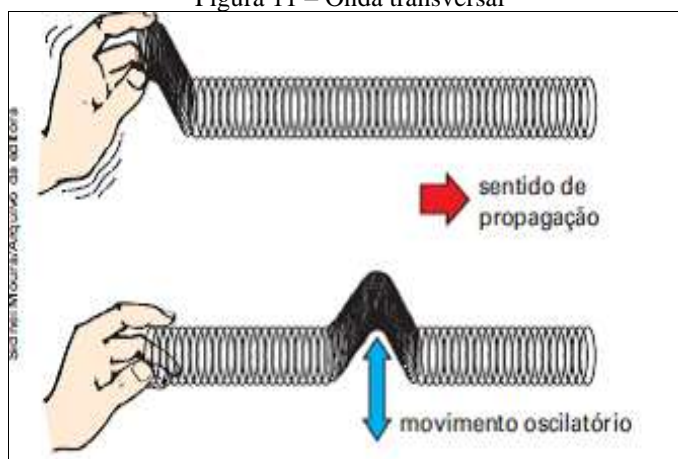
Fonte: Elaboração própria (2020).

Como situação de aprendizagem, os alunos são convidados a ter contato com a mola, deixando-os à vontade num primeiro momento e, logo em seguida, mostrando-lhes exemplos em que possam ver a formação de uma onda. Na ocasião, comenta-se que, quando esticada sobre a mesa ou no chão, a mola transmite uma perturbação. Essa perturbação que se propaga pela mola é chamada de onda.

É comum que alguns questionamentos surjam por parte dos estudantes no que diz respeito ao não deslocamento de matéria pela onda, por exemplo: “Se a onda transporta energia sem haver transporte de matéria, por que o surfista se desloca na onda?”. A resposta está na diferença entre a forma das ondas que quebram na praia na costa e das ondas periódicas, que serão estudadas mais à frente.

Em seguida, procede-se à demonstração experimental da característica principal das ondas, prendendo-se uma fita num elemento específico da mola e produzindo-se um pulso transversal, que, ao passar pela porção da mola onde a fita está presa, faz com que esta oscile na direção perpendicular à direção de propagação do pulso. Com base nessa demonstração, apresenta-se o conceito de onda transversal (Figura 11).

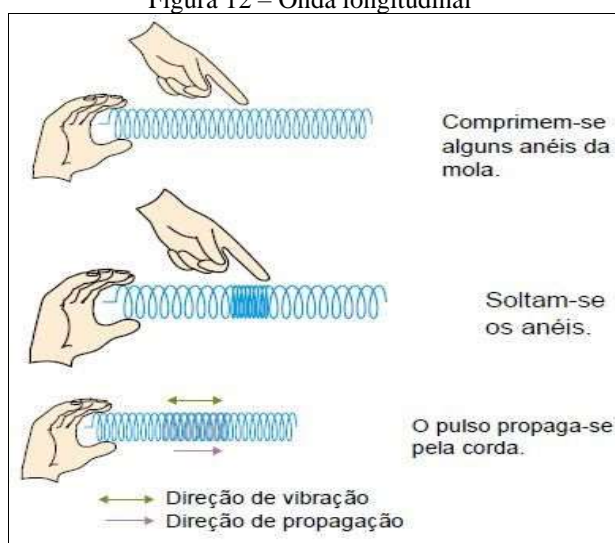
Figura 11 – Onda transversal



Fonte: <http://fisicacontextoaplicacoes.blogspot.com/2017/08/caracteristicas-das-ondas-mecanicas.html>

Na sequência, utilizando novamente a mola, introduz-se o conceito de onda longitudinal (Figura 12). Essas demonstrações de ondas longitudinais e transversais nas molas deverão ser realizadas pelos alunos.

Figura 12 – Onda longitudinal



Fonte: <https://www.coladaweb.com/wp-content/uploads/2015/04/20180817-tipos-ondas2.jpg>.

A aula continua com a apresentação da classificação das ondas quanto à sua natureza, mostrando exemplos e situações de ondas mecânicas, em primeiro lugar. Argumenta-se que, quando a propagação da onda acontece num meio material, sólido, líquido ou gasoso, chamamos essa onda de mecânica. São exemplos de ondas mecânicas as produzidas em cordas, as geradas na água e no som, as que se propagam no ar. Destaca-se que as ondas mecânicas dependem da movimentação das partículas que compõem o meio. Logo, ondas mecânicas não se propagam no vácuo. Neste momento, o professor faz uma intervenção, dizendo que o som não se propaga no vácuo. Nele não existem partículas para vibrar e propagar a energia; explica-se. Logo em seguida, apresenta-se um vídeo no qual se

mostra que, ao fazer vácuo num recipiente dentro do qual uma campainha produza som, este deixa de se escutar. Não há som no vácuo produzido no recipiente, conforme explicado no vídeo da Figura 13.

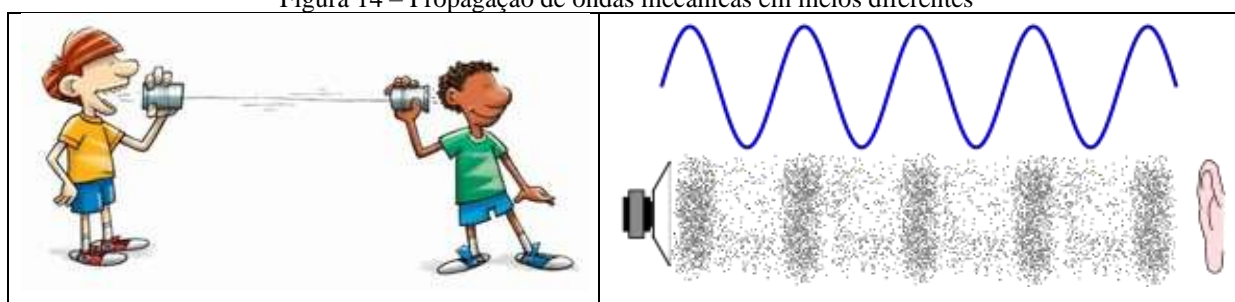
Figura 13 – Imagem do vídeo “Som no vácuo”



Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=rego8-zucei>.

Na sequência, comenta-se sobre a velocidade de propagação das ondas mecânicas nos sólidos, líquidos e gases, destacando que ela é maior nos sólidos do que nos líquidos e nestes maior do que nos gases. Recomenda-se questionar os alunos sobre esses fatos experimentais. Espera-se que eles os relacionem com a ligação entre as partículas que compõem a substância nesses três estados de agregação, sendo esta maior nos sólidos. Essa discussão deverá ser acompanhada com exemplos de propagação em diferentes meios (Figura 14).

Figura 14 – Propagação de ondas mecânicas em meios diferentes

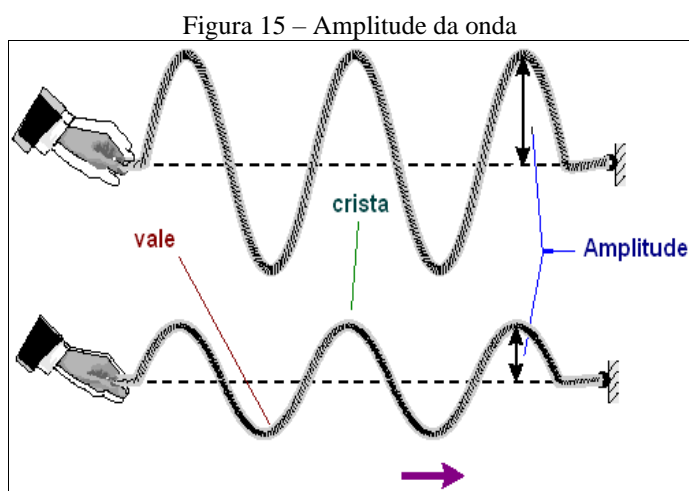


Fonte: <http://omundofisica.blogspot.com/2012/10/telefone-de-latinha.html> e [https://www.wikiwand.com/pt/Intensidade\\_acustica](https://www.wikiwand.com/pt/Intensidade_acustica)

As ondas eletromagnéticas serão introduzidas de maneira eminentemente declarativa. Isso pode ser feito contando brevemente a história do surgimento da teoria eletromagnética da luz. Explica-se que as equações que descrevem a interação eletromagnética podem ser apresentadas de uma forma semelhante à que descreve a propagação de uma onda mecânica. Com base nessa constatação teórica, levantou-se a

hipótese, comprovada experimentalmente, de que essa interação se manifestava como sendo uma onda, que pode existir no vácuo. E, como a velocidade de propagação dessa onda no vácuo ( $3,0 \times 10^8$  m/s), pressuposta teoricamente, coincidia com a da luz, concluiu-se que a natureza desta é eletromagnética; em outras palavras, a luz é uma onda eletromagnética. Seguidamente se enfatiza que, como a luz que chega a nós proveniente do Sol o faz atravessando o vácuo, as ondas eletromagnéticas não precisam de um meio material para se propagar. Os diferentes tipos de ondas eletromagnéticas deverão ser mencionados, utilizando o espectro destas. Mais na frente, esse relato sobre as ondas eletromagnéticas deverá ser complementado, mostrando experimentos sobre os fenômenos de reflexão, refração, interferência e difração da luz.

Na sequência, como visto no encontro 1, destacam-se os conceitos de frequência, período e amplitude, que caracterizam uma onda periódica. Associam-se a frequência e o período ao movimento oscilatório dos pontos do meio de propagação da onda, sendo que a frequência se relaciona com a fonte geradora da onda. A amplitude das oscilações está relacionada com a energia que se propaga pelo meio, no caso, a mola. Quanto maior a energia que se propaga pela onda, maior a sua amplitude (Figura 15).



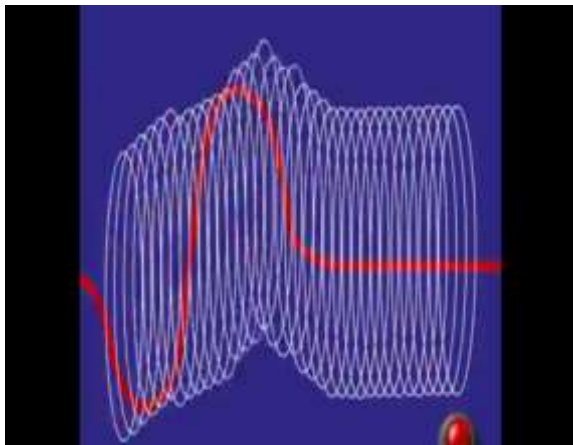
Fonte: [https://www.sobiologia.com.br/conteudos/oitava\\_serie/Ondas2.php](https://www.sobiologia.com.br/conteudos/oitava_serie/Ondas2.php)

A discussão tem sequência, agora com ênfase na velocidade de propagação da onda, no comprimento de onda e na ideia de como medir tais parâmetros utilizando-se a mola helicoidal e outros equipamentos à disposição. Para tanto, o professor lança a pergunta: “Quais procedimentos podem ser utilizados para determinar, de forma experimental, a velocidade de propagação e o comprimento de onda na mola?”.



Feito isso, apresentar um vídeo que consta de uma simulação da propagação de um pulso numa mola, representado nas Figuras 16 e 17.

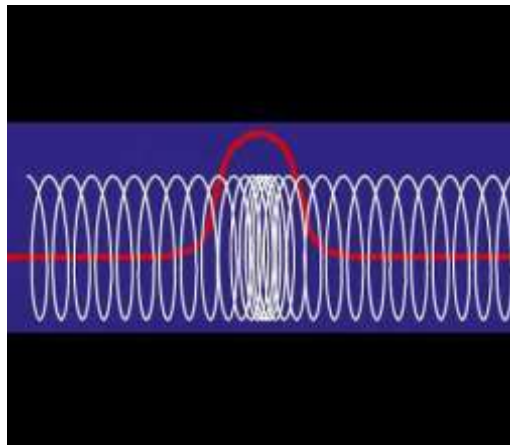
Figura 16 – Propagação de um pulso numa mola 1



Fonte:

<https://www.youtube.com/watch?v=dxeicgqiavy>.

Figura 17 – Propagação de um pulso numa mola 2



Fonte:

<https://www.youtube.com/watch?v=kmaqz1lj5ay>.

Para realizar a medida da velocidade de propagação da onda na mola helicoidal, deve-se proceder da seguinte forma: após a mola ser distendida, prendem-se duas fitas em pontos distintos da mola, de maneira que os estudantes medirão a distância entre as fitas. Os alunos produzirão um pulso transversal na mola, ao passo que outro estudante registrará, através de uma câmera que tira fotos em sequência, instantes distintos da posição do pulso propagando-se na mola.

O intervalo de tempo entre os registros da câmera deve ser estipulado previamente, por exemplo,  $\frac{1}{20}$  segundos. Esse tempo deve ser configurado no aplicativo escolhido para tirar as fotos.

Quando o pulso passar pela primeira fita que está presa à mola, esse registro será a primeira imagem a ser contada, seguindo os registros fotográficos até que o pulso passe pela segunda fita, no qual teremos o último registro. O número de fotos registradas no intervalo entre a foto do pulso passando pela primeira fita e o pulso passando pela segunda fita será multiplicado pelo intervalo de tempo entre cada foto, que foi estipulado no início. Recomenda-se o uso de um tripé para apoiar a câmera, evitando possíveis distorções de imagem. Com as informações da distância entre as fitas e o intervalo de tempo que o pulso levou para percorrer tal distância, calcula-se a velocidade de propagação do pulso (Figura 18).

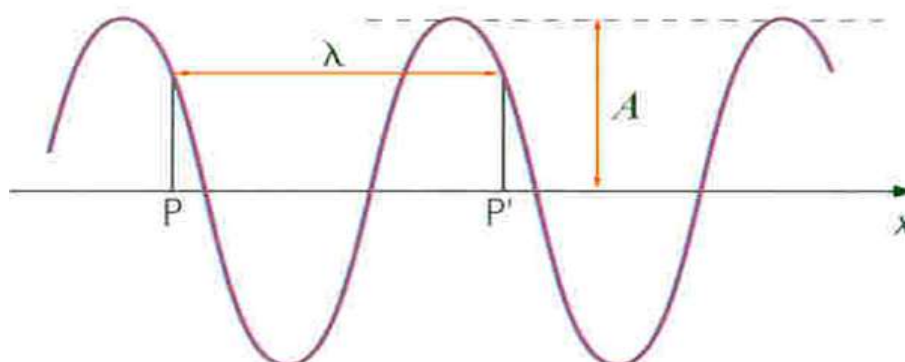
Figura 18 – Determinação da velocidade de propagação da onda



Após a apresentação desse experimento demonstrativo, continua-se a discussão dos conceitos, visando a uma melhor compreensão acerca do comprimento de onda. Para tanto, apresenta-se uma simulação, na qual se demonstra a relação entre a velocidade, o período e o comprimento de onda. Trata-se de uma simulação em que a forma da onda em diferentes momentos de tempo representa uma função senoidal.

Essa onda senoidal é gerada quando se movimenta transversalmente a extremidade da mola num movimento oscilatório. Deve-se supor que uma onda transversal se propaga ao longo da mola esticada ao longo do eixo  $x$ . O comprimento de onda é a distância ao longo do eixo  $x$  após a qual a forma da onda começa a se repetir (Figura 19).

Figura 19 – Comprimento de onda

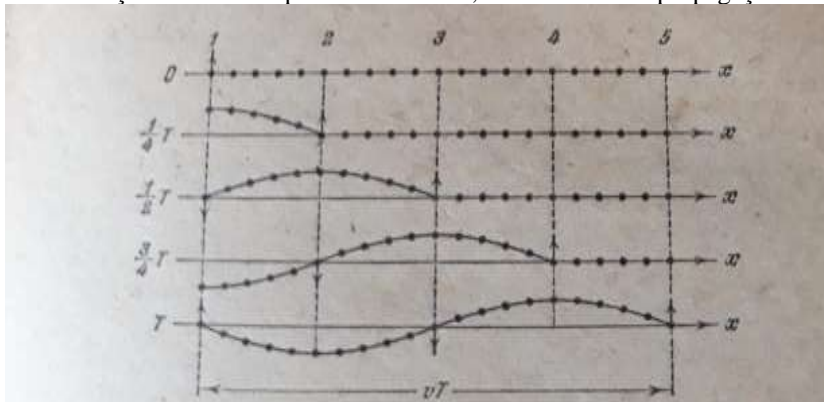


Fonte: <https://moodle.ufsc.br/mod/book/view.php?id=504285&chapterid=2667>.

É importante que os estudantes percebam que os pontos  $p$  e  $p'$  estão em fase, ou seja, eles oscilam da mesma forma, e que a distância entre eles é o comprimento de onda. A simulação consiste em produzirmos uma onda na mola de forma tal que poderemos analisar o

movimento de um ponto inicial da mola e qual a forma dessa onda após  $\frac{1}{4} T$ ,  $\frac{1}{2} T$ ,  $\frac{3}{4} T$  e  $T$ , como indicado na Figura 20.

Figura 20 – Relação entre o comprimento de onda, a velocidade de propagação e o período



Fonte: Saveleev, I.V. Curso de Física Geral, T.2 (em russo) Editora Nauka, 1978, pág. 267, Fig. 93.1 (И.В. САВЕЛЬЕВ. Курс Общей Физики – Том 2. Наука, Москва, 1978)

Esses instantes de tempo serão registrados por meio de uma sequência de fotografias, de maneira que os alunos possam observar a posição, em relação ao eixo horizontal, dos pontos da mola nesses intervalos de tempo. Destaca-se que, quando o ponto inicial da mola executa um período de oscilação, a onda alcança um ponto que começa a oscilar do mesmo jeito que o primeiro. Nesse sentido, diz-se que esses dois pontos oscilam em fase. Com base nessa simulação, apresenta-se o conceito de comprimento de onda como a distância entre dois pontos da onda que oscilam em fase. Portanto, o comprimento de onda é igual ao produto da multiplicação da velocidade de propagação da onda pelo período de oscilação. A Figura 21 representa a simulação realizada, para uma melhor compreensão acerca do conceito de comprimento de onda.

Figura 21 – Determinação da velocidade de propagação da onda



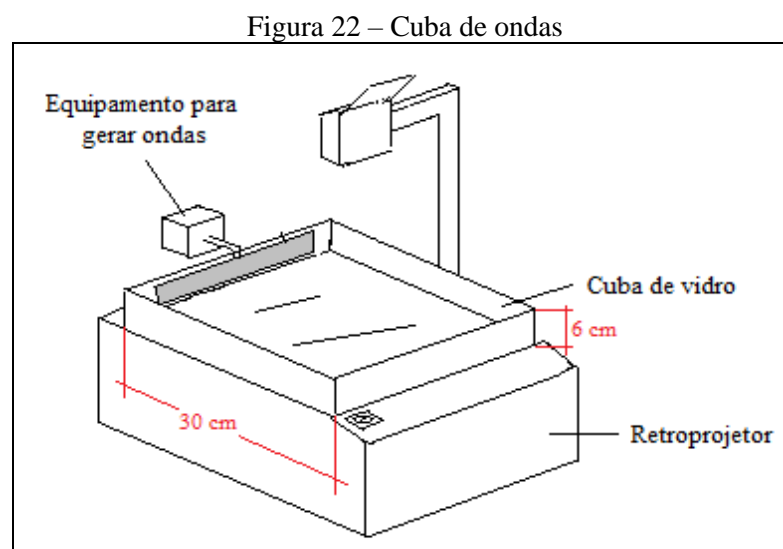
Fonte: Elaboração própria do autor (2020)

### Encontro 3 – Fenômenos ondulatórios: reflexão

Iniciar a atividade mostrando uma visão geral dos conteúdos a serem trabalhados, fenômenos ondulatórios, bem como apresentar os dispositivos a serem elaborados para a execução de atividades práticas com a temática acima, as quais proporcionarão espaços para reflexão e discussão da prática científica sob o enfoque das relações entre Ciências, tecnologia e sociedade.

Neste encontro, discutem-se algumas propriedades do movimento ondulatório já vistas no encontro anterior, como também, de forma aprofundada, um dos fenômenos ondulatórios: a reflexão. Por meio de demonstrações, exemplos do dia a dia, noções intuitivas, diálogos e interações entre professor/aluno, argumenta-se que tais conteúdos carregam grande relevância em diversos aspectos da vida, sendo também assuntos recorrentes em exames e provas que ocorrem em nível nacional.

Dentro dessa perspectiva, apresentar aos estudantes a cuba de ondas, aparato experimental desenvolvido para estudo e análise de ondas em duas dimensões, conforme se apresenta na Figura 22. Imagens da cuba de ondas frequentemente aparecem ilustrando fenômenos ondulatórios em livros didáticos de Física.



Fonte: Possobon (2016).

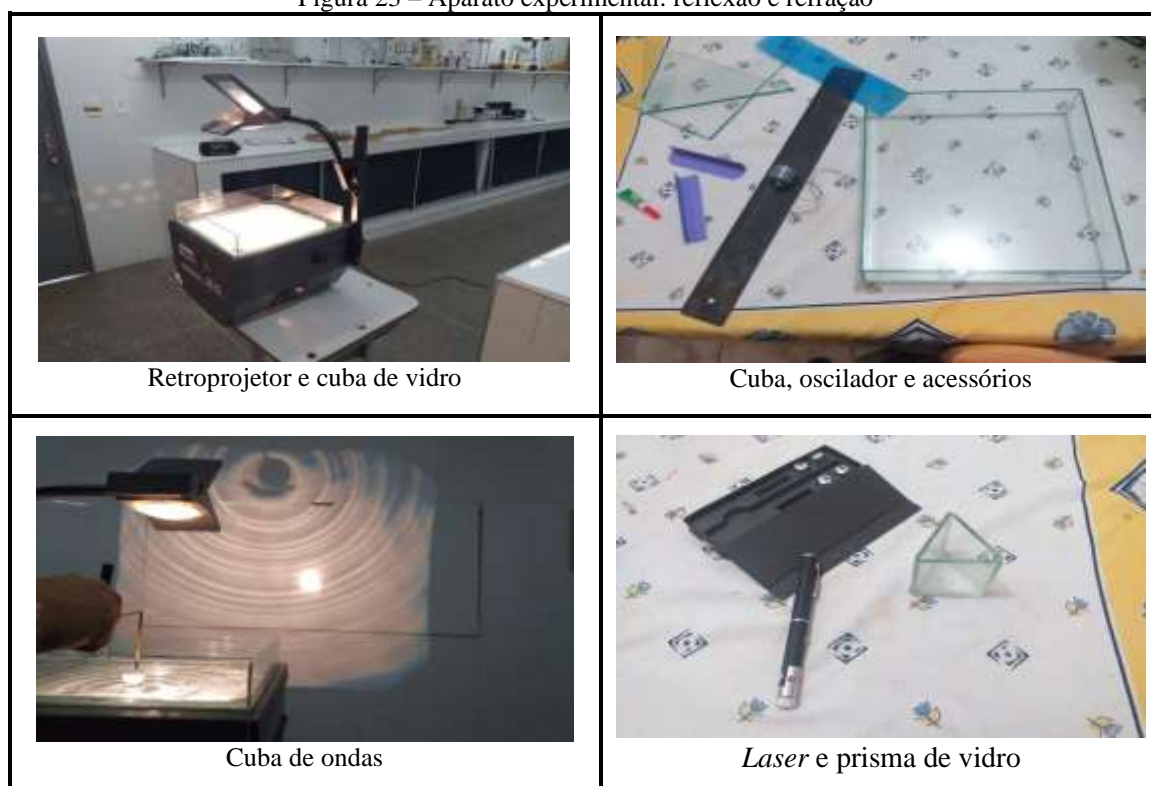
A cuba de ondas é formada por três elementos básicos: a cuba de vidro, onde se coloca o líquido, cujo fundo de vidro torna possível projetar as imagens das ondas num anteparo; o oscilador, responsável pela geração das ondas; e o retroprojetor, para uma melhor visualização dos fenômenos produzidos. Essas imagens são produzidas porque as cristas da onda atuam como lentes convergentes e tendem a focalizar a luz da lâmpada, enquanto as

depressões atuam como lentes divergentes e tendem a dispersá-la. Portanto, as cristas aparecem no anteparo como faixas brilhantes, enquanto as depressões aparecem como faixas escuras (PSSC, 1968). Além desses elementos, serão necessários alguns acessórios que auxiliarão na demonstração dos fenômenos ondulatórios, sendo estes apresentados conforme sua adoção dentro da sequência didática.

A cuba de ondas desenvolvida e utilizada nesta proposta pedagógica segue um projeto de relatório de construção, da autora Renata Possobon (POSSOBON, 2016), da Universidade Estadual de Campinas e do Instituto De Física Gleb Wataghin. Neste relatório constam duas propostas distintas de construção de osciladores a serem utilizados, no qual foi escolhida uma delas para a realização das atividades experimentais nesta sequência didática.

Esse dispositivo também serve para analisarmos concomitantemente ondas mecânicas e ondas eletromagnéticas, no caso, a luz e as ondas na superfície da água, já que seu funcionamento depende da relação entre esses dois tipos de ondas. A Figura 23 mostra os elementos que compõem a cuba de ondas, como também outros dispositivos a serem utilizados durante a aula.

Figura 23 – Aparato experimental: reflexão e refração



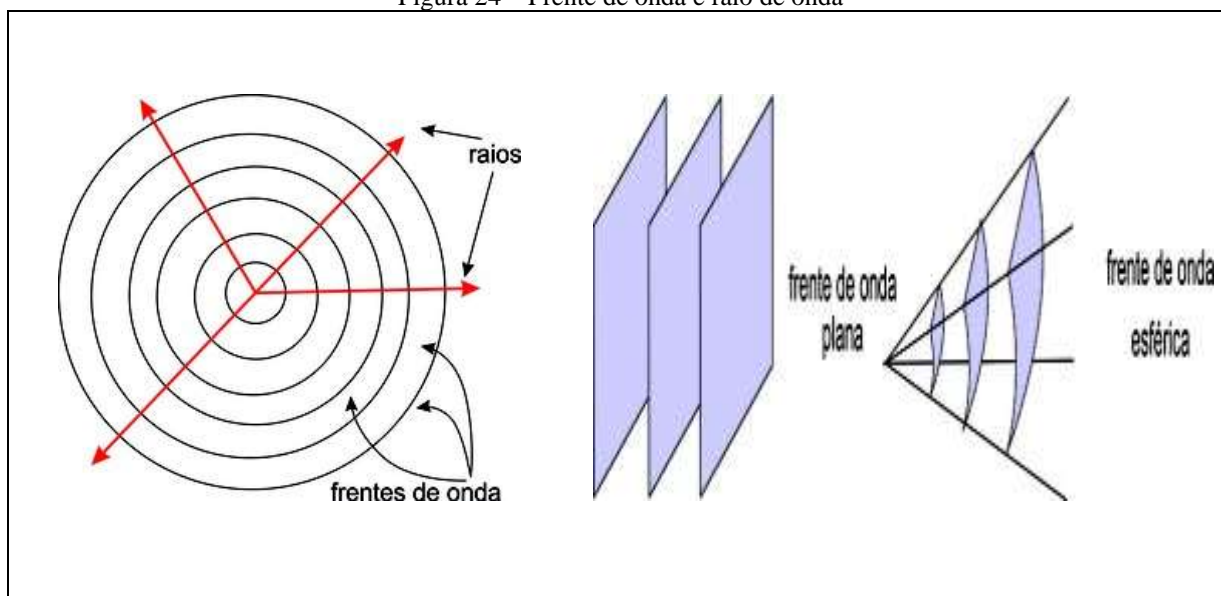
Fonte: Acervo do autor (2020).

Inicia-se a discussão dos conceitos a serem abordados neste encontro com o seguinte questionamento: “O que ocorre quando uma onda que se propaga por um

determinado meio encontra um obstáculo ou outro meio de propagação?”. Diz-se que a interação da onda com esses obstáculos gera comportamentos específicos da onda, chamados de fenômenos ondulatórios, objeto de estudo na presente aula. Destaca-se que esses fenômenos serão abordados em três tipos distintos de ondas: unidimensionais, as quais se propagam em uma única dimensão, por exemplo, ondas em cordas e em molas; bidimensionais, que se propagam em duas dimensões, na superfície da água, por exemplo; e ondas tridimensionais, nas quais a propagação da energia ocorre nas três dimensões, como acontece, por exemplo, nos casos da luz e do som. Ressalta-se que, no estudo de ondas bidimensionais e tridimensionais, dois conceitos são imprescindíveis: a frente de onda e o raio de onda.

Explica-se que frente de onda é o conjunto de pontos que separa a região já atingida pela onda da região ainda não atingida. Raio de onda é uma linha que representa a direção de propagação da onda em certo ponto. Representa-se através de imagens contidas na Figura 24.

Figura 24 – Frente de onda e raio de onda



Fonte: <http://educacao.globo.com/fisica/assunto/ondas-e-luz/fenomenos-ondulatorios.html>

Para melhor ilustrar esses conceitos, procede-se à primeira demonstração experimental, empregando-se a cuba de ondas e pedindo para que os alunos produzam ondas bidimensionais na superfície da água. Primeiramente, por meio de um gotejador ou uma haste com uma pequena esfera na ponta, produzem-se ondas circulares, cujas frentes de onda são circunferências (Figura 25). Logo após, contando-se com uma haste plana, eles produzirão ondas retas, cujas frentes de onda são segmentos de reta (Figura 26).

Figura 25 – Frentes de ondas circulares



Fonte: Acervo do autor (2020).

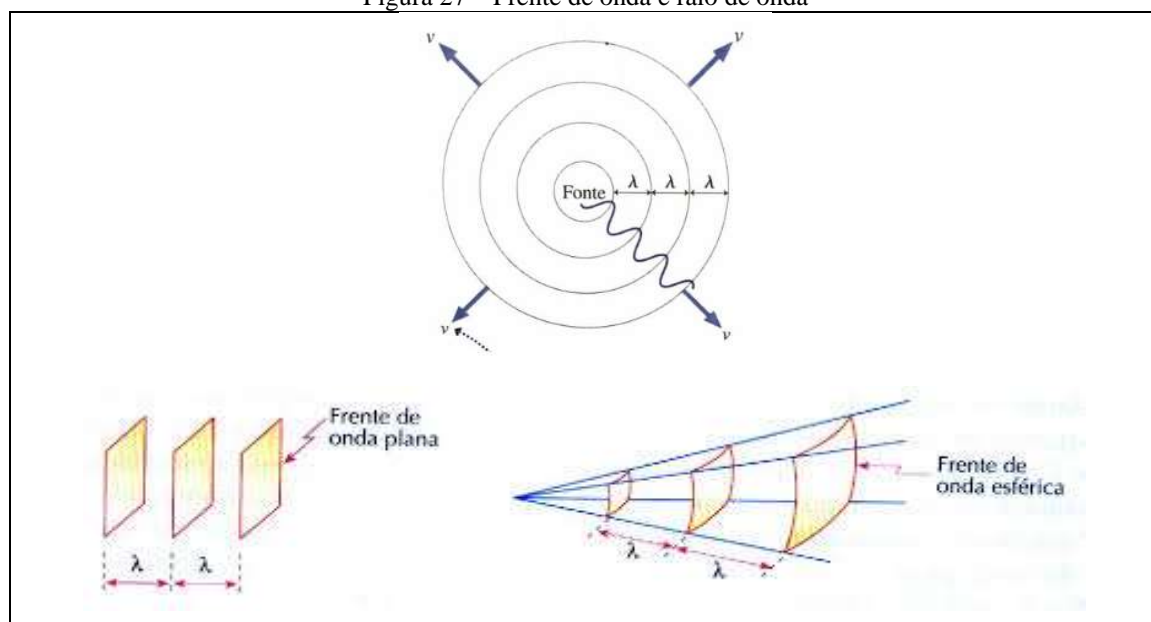
Figura 26 – Frentes de ondas retas



Fonte: Acervo do autor (2020).

A partir daí, menciona-se que a distância entre as frentes de onda representa o comprimento de onda, pois os pontos que constituem tais frentes de onda oscilam em concordância de fase, conforme demonstrado no encontro anterior (Figura 27).

Figura 27 – Frente de onda e raio de onda

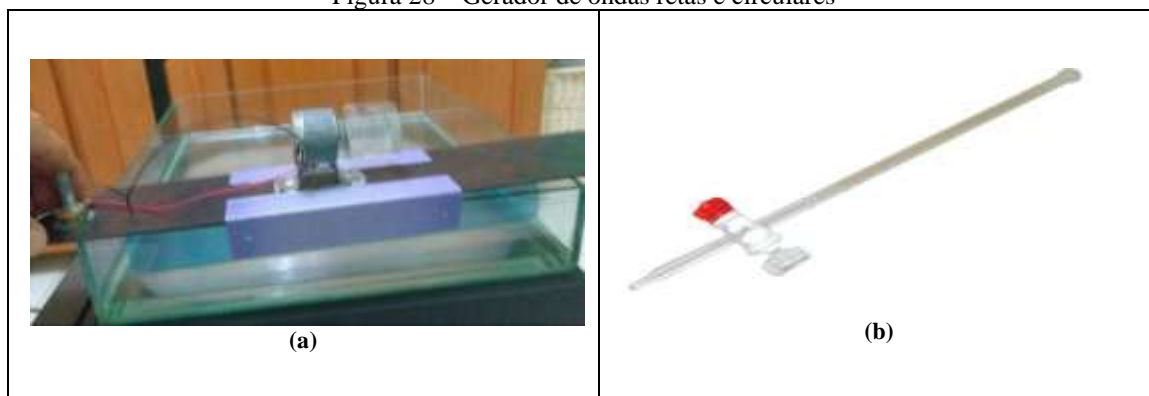


Fonte: <http://educacao.globo.com/fisica/assunto/ondas-e-luz/fenomenos-ondulatorios.html>

Uma segunda demonstração é realizada, por meio da qual se verifica a relação  $\lambda = vT$ . Com a haste plana acoplada ao motor com frequência ajustável (Figura 27a), ao mudar a frequência de vibração, percebe-se uma mudança no comprimento de onda. Na ocasião, os alunos serão convidados a explicar esse fato experimental. Espera-se que eles

argumentem que, como não houve modificação nas características do meio, a velocidade permanece constante. O mesmo procedimento deve ser utilizado com ondas planas e ondas circulares. Para a produção de ondas circulares, utiliza-se um gotejador (bureta) com torneira (Figura 28b), para regularmos a frequência e novamente vemos a relação entre essas grandezas.

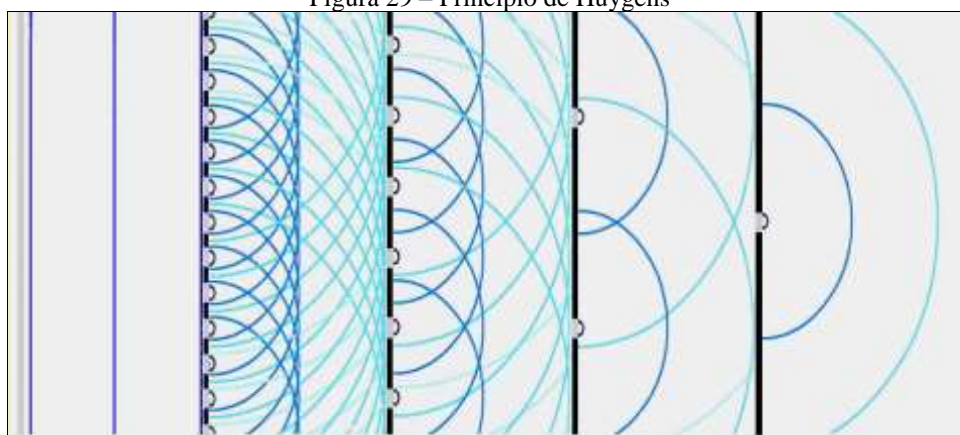
Figura 28 – Gerador de ondas retas e circulares



Fonte: Elaboração própria (2020).

Em seguida, apresenta-se o princípio de Huygens, contextualizando-o na discussão que havia na época sobre duas teorias para explicar a natureza dos fenômenos luminosos: a teoria corpuscular defendida por Isaac Newton e a teoria ondulatória, que tinha como principais aspectos as ideias de Christian Huygens. Mostra-se, então, uma animação que ilustra esse princípio (Figura 29).

Figura 29 – Princípio de Huygens



Fonte: [http://home.hiroshima-u.ac.jp/atoda/index\\_e.html](http://home.hiroshima-u.ac.jp/atoda/index_e.html).

Continuar explicando, com apoio na ilustração gráfica do princípio, que cada ponto da frente de onda, ao chegar ao obstáculo, comporta-se como uma fonte de ondas elementares circulares e progressivas. A linha ou a superfície que tangencia todas as ondas elementares circulares produzidas corresponde à frente de onda em um instante posterior.



Recomenda-se complementar essa explicação do princípio de Huygens por meio de uma simulação virtual, disponibilizada em uma plataforma amplamente utilizada por diversos professores de Física em todo mundo, a Phet Interactive Simulations, da Universidade do Colorado, nos Estados Unidos.

Nela se encontram diversos objetos de aprendizagem baseados em simulações virtuais de experimentos. Especificamente, para a demonstração que estamos propondo, utiliza-se a “Waves Intro” (Figura 30), na qual podemos ver as frentes de onda em ondas mecânicas na água, similares às apresentadas experimentalmente no decorrer deste encontro, e nas ondas sonoras. Deve-se fazer alusão ao princípio de Huygens, medindo-se o comprimento de onda através de recursos disponibilizados na plataforma Phet Simulations.

Figura 30 – Introdução às ondas

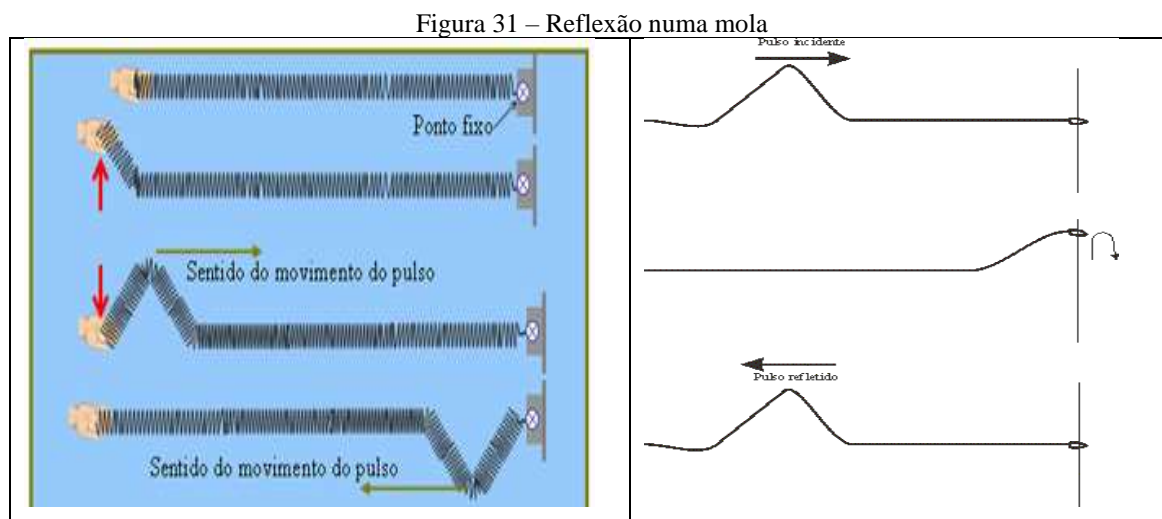


Fonte: <https://phet.colorado.edu/en/simulation/waves-intro>.

Logo após, introduz-se conceitualmente o primeiro fenômeno ondulatório a ser abordado dentro dessa atividade, a reflexão. Ela ocorre quando a onda atinge uma região que separa dois meios e retorna ao mesmo meio, no qual se propagava antes de incidir sobre a superfície de separação desses dois meios. Discute-se que nesse fenômeno não há alteração na velocidade de propagação porque não há mudança do meio de propagação de ambas as ondas, nem da frequência das oscilações, porque a fonte destas é a mesma. Recomenda-se, com base nessas duas explicações, questionar os alunos sobre a relação existente entre os comprimentos da onda incidente e da onda refletida. Espera-se que eles concluam que são iguais.

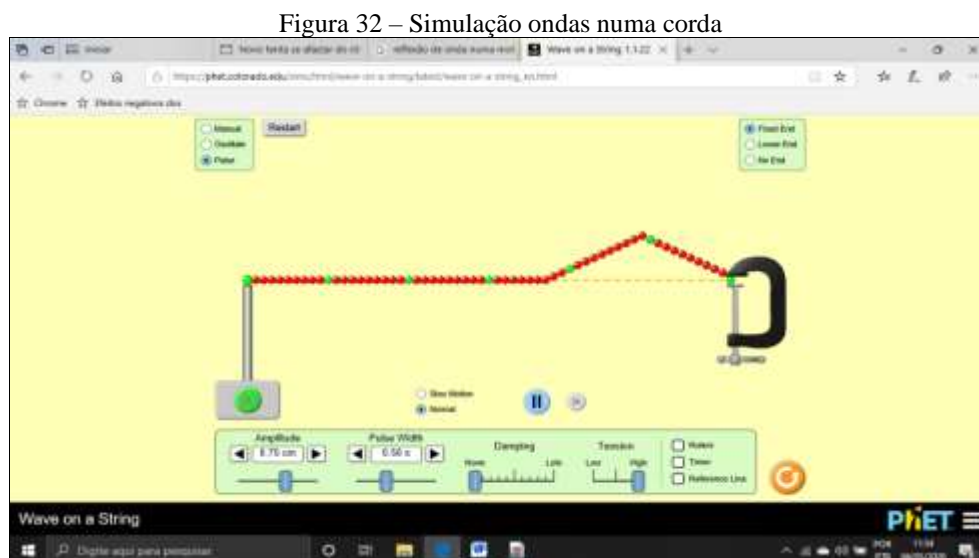
No caso de um pulso unidimensional em uma mola (corda), mostra-se que a reflexão pode gerar dois efeitos diferentes. Discute-se, com base na Terceira Lei de Newton, que, se a extremidade da mola estiver fixa, o ponto desta que está preso ao obstáculo exercerá

uma força sobre este dirigida para cima, sofrendo uma reação do obstáculo em sentido contrário, para baixo, o que fará inverter a orientação do pulso. Na ocasião, diz-se que, nesse caso, houve inversão da fase da onda. Se as extremidades estiverem livres, esta força não atua, e o pulso retorna sem inversão da fase (Figura 31).



Fonte: <http://portaldoprofessor.mec.gov.br/> e  
<https://www.sofisica.com.br/conteudos/Ondulatoria/Ondas/reflexao.php>

Este procedimento pode ser realizado através de uma simulação virtual, também disponível na plataforma Phet Interactive Simulations (Figura 32).

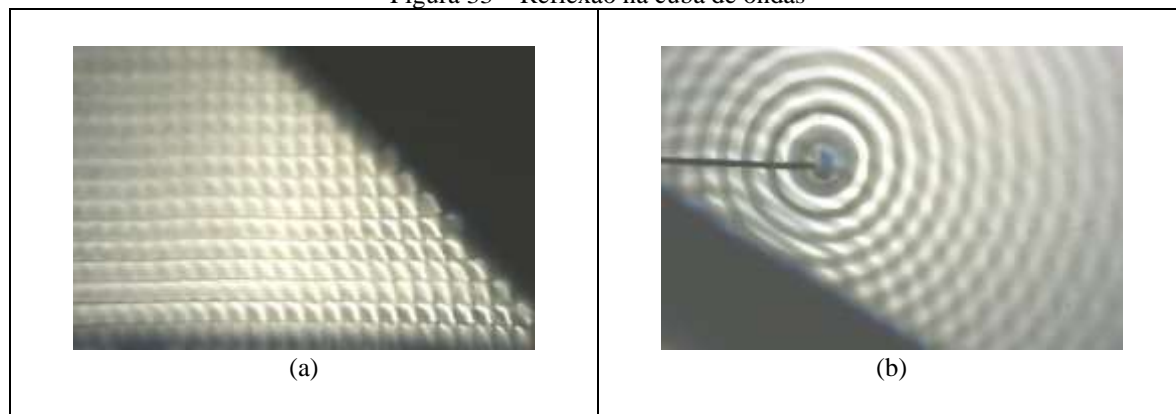


Fonte: <https://phet.colorado.edu/>.

Dar continuidade às atividades realizando a demonstração da reflexão em duas dimensões por meio da cuba de ondas. Para tanto, utiliza-se uma haste plana acoplada ao gerador de frequência, para que sejam produzidas ondas planas na superfície do líquido. Colocar uma placa de metal ou de plástico posicionada de maneira a formar um triângulo no

canto da cuba, que impedirá a propagação da onda nessa região (Figura 33a). O mesmo procedimento é utilizado com ondas planas e ondas circulares. Para a produção de ondas circulares, utilizamos um gotejador (bureta) com torneira e novamente observamos a reflexão (Figura 33b).

Figura 33 – Reflexão na cuba de ondas



Fonte: Elaboração própria (2020).

Para finalizar, com auxílio das imagens produzidas na cuba de ondas, comenta-se sobre as duas leis da reflexão. A primeira diz que o raio de onda incidente, o raio de onda refletido e a reta normal estão contidos no mesmo plano. A segunda mostra a relação de igualdade entre os ângulos de incidência e de reflexão. Ressalta-se que, durante as demonstrações na cuba de ondas, a reflexão é o fenômeno que estará presente simultaneamente a outros que serão produzidos, sendo essa concomitância fundamental para demonstrações posteriores.

Em seguida, pedir para alguns estudantes fotografar as imagens. Destacar a existência de *softwares* específicos capazes de analisar essas imagens e verificar a validade das leis anteriormente mencionadas. Dizer que nas próximas aulas, quando seja abordada a reflexão da luz, a discussão apresentada neste encontro sobre esse fenômeno ondulatório, eminentemente qualitativa, será complementada com elementos de análise quantitativa.

Deve-se relacionar os conceitos vistos durante o encontro com exemplos de possível conhecimento dos alunos, tais como: a reflexão em espelhos e suas aplicações na ciência e tecnologia; o eco, exemplo clássico da reflexão das ondas sonoras; as aplicações do ultrassom na medicina; a existência de sonares em morcegos e golfinhos; entre outros.

#### Encontro 4 – Fenômenos ondulatórios: refração e difração

Começar a atividade recapitulando os conceitos abordados no encontro anterior, visando conhecer como aconteceu a aprendizagem. Dizer que nesse encontro serão abordados outros dois fenômenos ondulatórios: a refração e a difração. Explana-se que, como mencionado no encontro anterior, a reflexão de uma onda pode ocorrer concomitantemente com a sua refração.

Em seguida, apresentam-se os recursos e aparatos experimentais dispostos sobre a mesa ou bancada, como ilustra as imagens da Figura 34: a cuba de ondas, um prisma de vidro, *laser* com pontas, redes de difração, uma peça tringular de vidro e alguns acessórios feitos com material reutilizado.

Figura 34 – Equipamentos: refração e difração de ondas



Fonte: Acervo do autor (2020).

Introduzir a refração fazendo referência a diversos acontecimentos do cotidiano nos quais este fenômeno está presente. Discutir o que acontece quando uma onda atinge a superfície de separação de dois meios, questionando sobre o que deveria suceder com a velocidade de propagação e o comprimento da onda ao passar de um meio para o outro. Para tanto, propõem-se aos estudantes refletirem e responderem às seguintes perguntas: “Imaginem uma pessoa deslocando-se com velocidade constante sobre uma superfície plana, como o cimento, por exemplo, e num determinado instante passa a se deslocar sobre a areia. O que

ocorre neste caso? Haverá alteração do movimento da pessoa? Correr numa superfície plana é a mesma coisa de correr sobre a areia??"

Figura 35 – Superfície de separação de meios

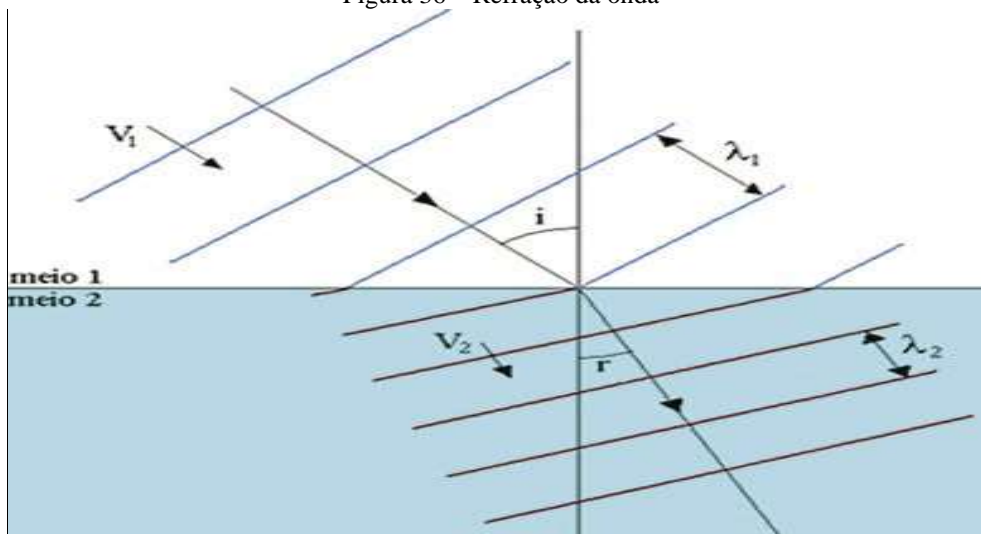


Fonte: <https://www.folhavoria.com.br/esportes/blogs/corridaderua/2020/07/01/conheca-beneficios-de-correr-na-areia/>.

Aguardar as respostas dos estudantes. Dizer que esse exemplo representado na Figura 35 está sendo utilizado como uma analogia do que acontece com uma onda ao passar de um meio de propagação para outro. Em ambos os casos, da pessoa e da onda, a velocidade varia. No caso da pessoa, ao passar do cimento para areia, a sua velocidade diminui.

Conceitua-se a refração de uma onda como a passagem desta de um meio para outro de características diferentes. Utilizando a Figura 36, explica-se que, quando a onda atinge obliquamente a superfície que separa os meios, devido à mudança das características destes, a velocidade da onda se modifica, o mesmo ocorrendo para o comprimento de onda. Nesta situação, a onda sofrerá um desvio em sua direção de propagação, representado pelos ângulos  $i$  e  $r$ .

Figura 36 – Refração da onda



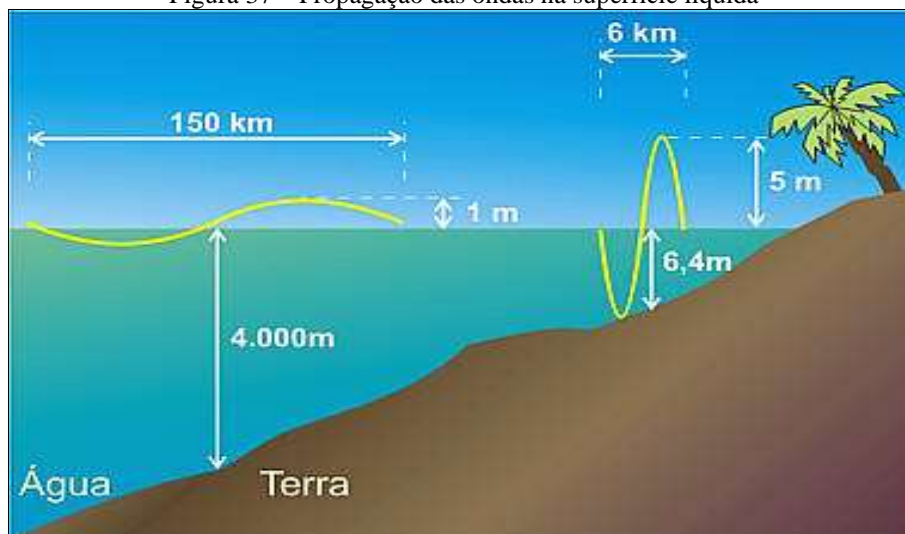
Fonte: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/refracao-ondas.htm>.

Uma breve demonstração deve ser realizada para evidenciar, ainda mais, o anteriormente explicado. Dois estudantes irão caminhar, tendo cada um que segurar uma das extremidades de uma haste rígida. No começo, os dois caminham diretamente para frente, com a mesma velocidade. Nesse caso, a haste se moverá em planos paralelos, isto é, não girará, sendo todas as posições consecutivas da haste paralelas entre si. Se, por um pequeno intervalo de tempo, as velocidades desses dois estudantes deixassem de ser iguais, pergunta-se: “O que acontecerá?”. Nessa situação, não resultará difícil constatar que, durante esse intervalo de tempo, a haste girará e que, após as velocidades dos estudantes voltarem a ser iguais, a haste se moverá numa direção diferente daquela que tinha antes de girar (EINSTEIN; INFELD, 2008).

Para contextualizar a refração, é conveniente questionar os alunos sobre as ondas do mar. Averiguar o que eles sabem sobre estas. Perguntar por que elas sempre chegam de frente à costa, mesmo sendo esta última uma superfície irregular, com entrantes e salientes? Destacar que, se observarmos o oceano de cima, de um ponto mais elevado, numa costa, veremos o padrão horizontal de cristas de onda que se aproximam dela. Mas, independentemente desse padrão, as ondas acabam chegando à costa numa direção quase perpendicular a esta.

A discussão dessa questão deverá ser concluída dizendo que a velocidade de propagação das ondas na superfície de um líquido depende da profundidade do local. Observa-se que o módulo da velocidade diminui quando as ondas passam de regiões profundas para regiões rasas. Dessa forma, meios de diferentes profundidades podem ser considerados diferentes meios de propagação, como mostrado na Figura 37.

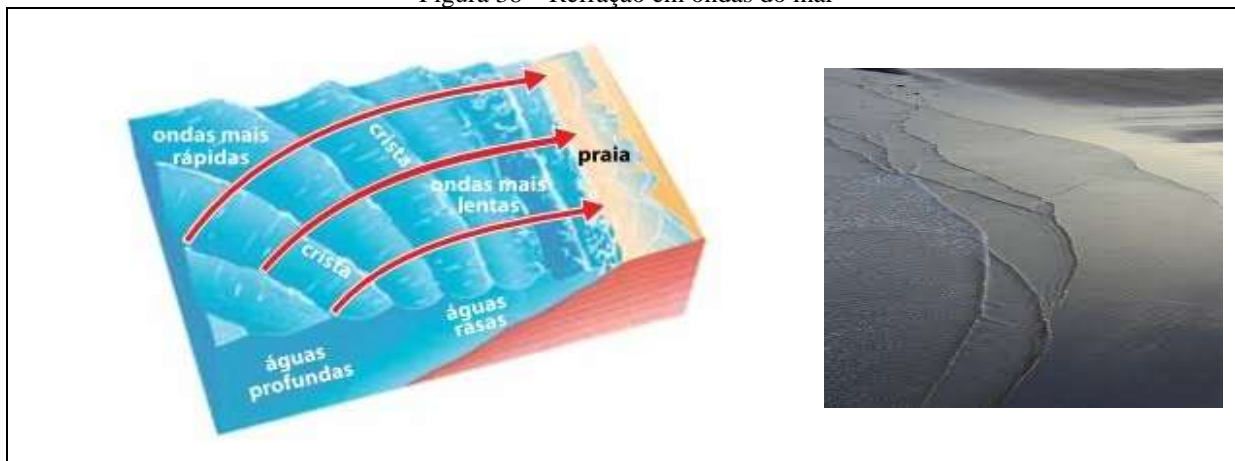
Figura 37 – Propagação das ondas na superfície líquida



Fonte: <http://fisikanarede.blogspot.com/2010/08/fisica-por-tras-de-um-tsunami.html>.

Na ocasião, destaca-se que a profundidade do mar diminui à medida que a onda se aproxima da costa, alterando a sua velocidade de propagação. Relaciona-se esse fato com a formação de *tsunamis* e ondas que quebram na costa (Figura 38).

Figura 38 – Refração em ondas do mar



Fonte: <https://brainly.com.br/tarefa/13429549>.

A partir desse momento, proceder às demonstrações experimentais do fenômeno da refração, propiciando a participação dos alunos, tanto nas montagens desses experimentos quanto na discussão dos conceitos que os tornam inteligíveis. Primeiramente, com auxílio de um apontador *laser*, de cor verde, os alunos interagem entre si, para demonstrar o desvio que a onda luminosa sofre ao penetrar num prisma de vidro contendo água (Figura 39). Por se tratar de um aparato simples, tem-se a possibilidade de todos os alunos realizarem a atividade. Com base nesse experimento, apresentam-se os conceitos de ângulo de incidência, ângulo de refração e reta normal à superfície de separação dos dois meios, juntamente com as leis que relacionam tais conceitos, as leis da refração. Na apresentação da Lei de Snell-Descartes, irá ser discutido o conceito de índice de refração.

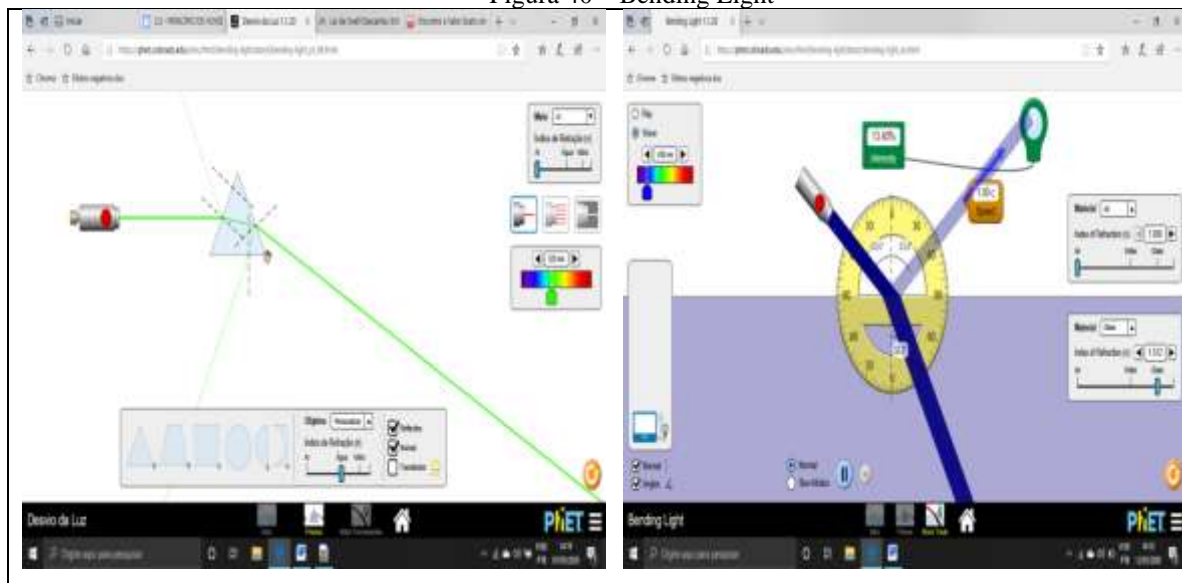
Figura 39 – Refração no prisma de vidro



Fonte: Elaboração própria do autor (2020).

Na sequência, por meio de uma simulação experimental disponibilizada na plataforma Phet Interactive Simulations, reproduzir o experimento que foi desenvolvido anteriormente de forma prática. Nessa simulação, os alunos podem produzir a refração no prisma, bem como em objetos com outras formas geométricas, medir os ângulos de incidência e de refração e verificar a Lei de Snell-Descartes (Figura 40).

Figura 40 – Bending Light



Fonte: <https://phet.colorado.edu/sims/html/bending-light/>.

Feito isso, realiza-se a demonstração da refração na cuba de ondas, enfatizando-se que a refração é um fenômeno comum a todos os tipos de ondas. Com a haste plana acoplada ao motor com frequência ajustável, liga-se o motor de forma que a haste plana comece a fazer um movimento vertical na superfície da água, formando ondas planas e retas que serão projetadas na imagem. Como a profundidade da água na cuba é constante, a velocidade da onda na superfície também será constante. Assim, se alterarmos a profundidade colocando uma placa triangular de vidro dentro da água, faremos que a lâmina de água tenha uma profundidade bem menor. Isso irá alterar a velocidade da onda nessa região. Além disso, na imagem projetada os estudantes podem visualizar o fenômeno da refração, conforme a Figura 41.



Figura 41 – Refração na cuba de ondas



Fonte: Acervo do autor (2020).

Segue-se a discussão fazendo alguns questionamentos aos estudantes acerca do fenômeno que está sendo apresentado. Pergunta-se:

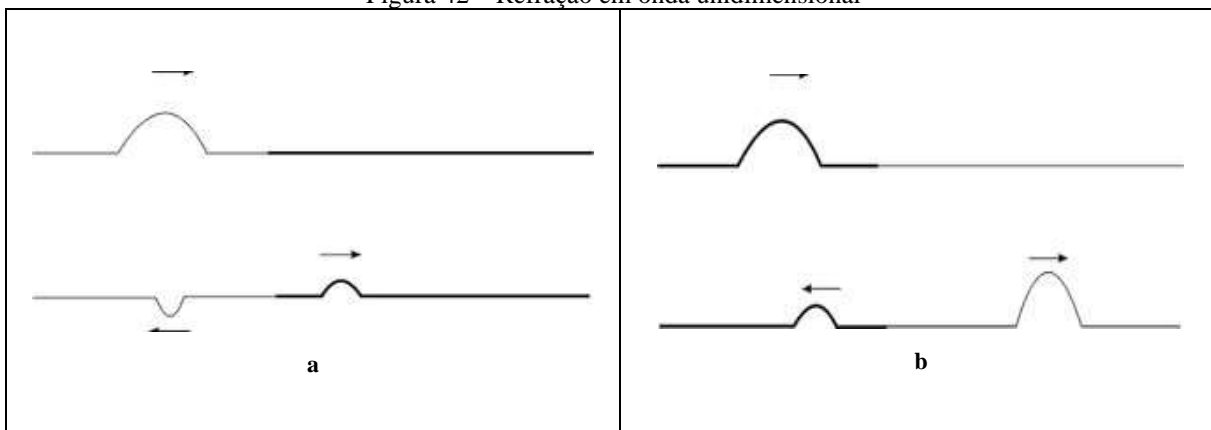
“O que ocorre com a onda ao passar pela região mais rasa, acima da placa de vidro triangular?”. Os estudantes devem responder, baseados na observação, que a onda plana e reta muda sua direção de propagação.

“Por que isso ocorre?”. Espera-se que eles respondam dizendo que, na parte mais rasa, a velocidade das ondas diminui, provocando um atraso nas frentes de onda.

“O que acontece com o comprimento de onda das ondas que passam sob a placa de vidro?”. A resposta esperada é que a onda possui um comprimento de onda menor, pois sua velocidade também fica menor.

Em seguida, discute-se o caso de um pulso unidimensional em uma corda. A refração pode acontecer, por exemplo, quando unimos duas cordas de diferentes densidades. É bom lembrar que a velocidade de propagação é maior na corda menos densa. Destacar que, se o pulso se propaga da corda menos densa para a mais densa, a segunda corda se comporta como um ponto fixo para a primeira e o pulso refletido sofre inversão de fase (Figura 42a). Se o pulso se propaga da corda mais densa para a menos densa, a segunda corda se comporta como um ponto livre para a primeira e o pulso refletido não sofre inversão de fase (Figura 42b).

Figura 42 – Refração em onda unidimensional



Fonte: Elaboração própria do autor (2020).

Após todas as considerações cabíveis sobre o fenômeno da refração, continuar a aula fazendo uso da cuba de ondas para apresentar o fenômeno da difração. Destacar que esse fenômeno, assim como a reflexão e a refração, é comum a todos os tipos de ondas. Destacar a importância do princípio de Huygens na explicação dos fenômenos ondulatórios e da difração em particular.

Deve-se, mais uma vez, ligar o motor com haste plana acoplada para se produzir ondas retas na superfície da água. Ao posicionar um obstáculo de plástico (PVC) ou de metal na frente das ondas planas, os estudantes devem observar que as ondas planas passam a contornar a borda do obstáculo, aparecendo ondas circulares tanto na parte do meio posterior quanto na anterior do obstáculo, ao contrário do que a maioria dos alunos pode imaginar.

Na ocasião, conceitua-se o fenômeno observado como sendo a difração da onda. Na realização da demonstração, os discentes podem trocar a barra por uma peça triangular, na qual a difração acontece nos dois lados desse novo obstáculo (Figura 43).

Figura 43 – Difração em obstáculo triangular



Fonte: Acervo do autor (2020).

Na sequência, apresenta-se a difração numa abertura ou fenda formada por duas barras (Figura 44). Explica-se que, quanto menor for a abertura, mais as ondas se difratam.

Figura 44 – Difração em fenda única triangular



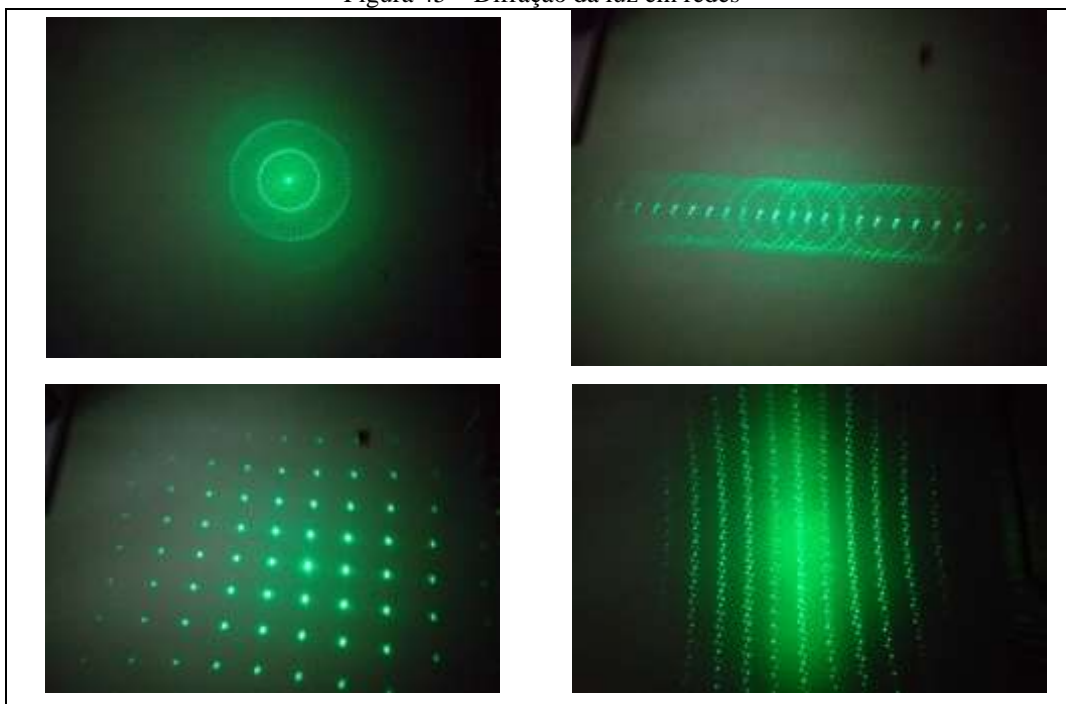
Fonte: Acervo do autor (2020).

Nesse momento da atividade, pede-se aos estudantes para realizar o experimento utilizando fendas de larguras diferentes e observar os padrões de difração em cada caso. Destacar que, quando a largura da fenda aumenta, percebe-se uma diminuição do efeito da difração. Aproveitar a ocasião para falar da relação entre a largura da fenda ou do tamanho do obstáculo num sentido mais amplo e o comprimento de onda. Nesse sentido, recomenda-se falar da difração da luz e do som relacionando-a com a significativa diferença dos comprimentos desses dois tipos de onda.

Na sequência, explica-se que uma rede de difração consiste num conjunto de fendas em cada uma das quais acontece a difração. Recomenda-se apresentar os CDs, presentes no universo vivencial dos alunos, como um exemplo de rede de difração. Nesse caso, as ranhuras na superfície atuam como fendas.

Dizer que no apontador *laser* se utilizam redes de difração para se produzir diferentes padrões de difração (Figura 45). Mostra-se assim que cada ponta do *laser* corresponde a uma rede de difração distinta, formando imagens diferentes como ilustram as imagens a seguir.

Figura 45 – Difração da luz em redes



Fonte: Acervo do autor (2020).

## Encontro 5 – Fenômenos ondulatórios: interferência

Inicia-se a atividade pedindo aos estudantes que montem o desenho experimental da aula anterior (Figura 46). A cuba de ondas será o aparato experimental principal a ser utilizado para demonstrações sobre os assuntos inerentes às análises que serão realizadas. Busca-se enfatizar a importância da experimentação na compreensão de um fenômeno físico denominado interferência, assim como uma discussão dos seus efeitos e suas aplicações tecnológicas.

Figura 46 – Cuba de ondas.



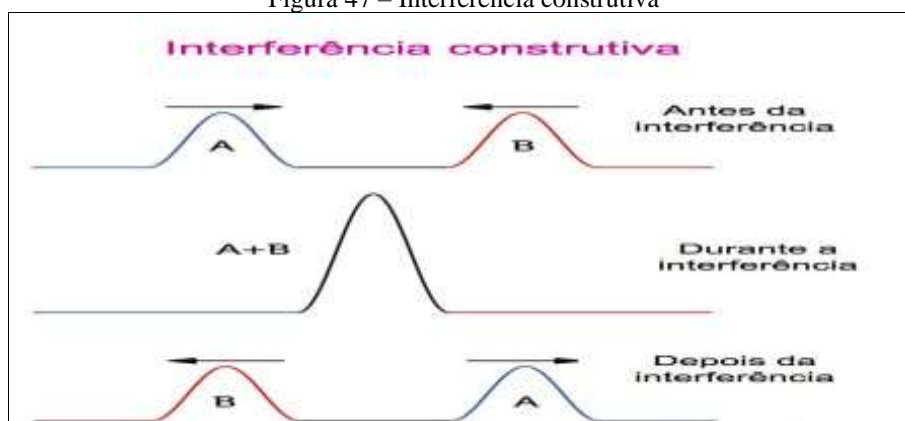
Fonte: Acervo do autor (2020).

Comenta-se que uma discussão acerca da onda estacionária será realizada. Para tanto, serão utilizados uma mola helicoidal e um arranjo experimental de baixo custo. Conclui-se essa parte introdutória da aula dizendo que a apresentação dos conceitos contemplará uma descrição matemática simples que será utilizada no encontro posterior para o cálculo da velocidade do som.

Na sequência, introduz-se o princípio da superposição, indicando seu lugar no entendimento do fenômeno da interferência. Destaca-se que um dos resultados mais surpreendentes das experiências com ondas em uma mola é o de que dois pulsos se propagando em sentidos opostos passam um através do outro (PSSC, 1968).

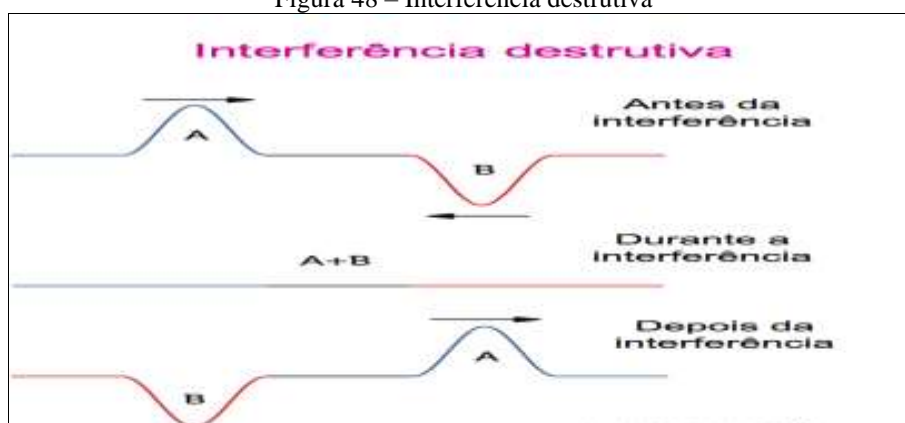
Explica-se que, quando duas ondas atingem um mesmo ponto do meio de propagação, cada uma delas atua sobre este sem experimentar influência de uma sobre a outra. Ou seja, cada onda atua sobre o meio da mesma forma que o faria sem a presença de outra onda. Os estudantes deverão ser convidados a produzir pulsos na mola, visando vivenciarem o anteriormente exposto. Com base nas Figuras 47 e 48, discutem-se os casos de interferência construtiva e destrutiva, respectivamente.

Figura 47 – Interferência construtiva



Fonte: [https://cdn.resumov.com.br/resumov/uploads/2017/11/img\\_5a0ebe72c2730.png](https://cdn.resumov.com.br/resumov/uploads/2017/11/img_5a0ebe72c2730.png).

Figura 48 – Interferência destrutiva



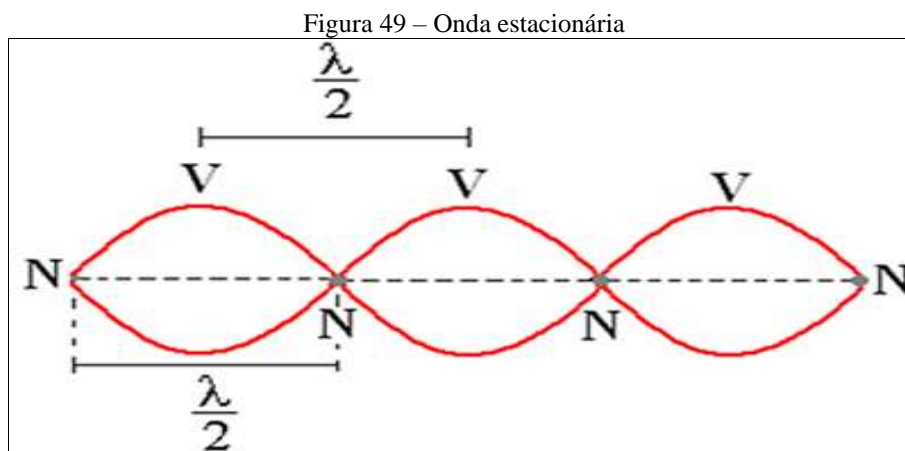
Fonte: [https://cdn.resumov.com.br/resumov/uploads/2017/11/img\\_5a0ebe72c2730.png](https://cdn.resumov.com.br/resumov/uploads/2017/11/img_5a0ebe72c2730.png).

Essa discussão deverá ser complementada com a realização pelos alunos de experimentos com auxílio da mola helicoidal. Eles serão convidados a produzir pulsos nas extremidades da mola e observar atentamente quando os pulsos se encontram. Esse procedimento deverá ser realizado com a produção de pulsos em concordância e oposição de fase, contemplando registros fotográficos.

Por meio de uma demonstração, apresentar uma consequência importante da interferência, a onda estacionária. Falar da onda estacionária no caso do som em tubos e numa corda com as extremidades fixas, destacando a presença dessa onda em instrumentos musicais de sopro e cordas.

Discute-se a formação de pontos na onda onde não existe vibração, graças à interferência destrutiva, chamados nós, e pontos onde a amplitude de vibração é máxima, devido à interferência construtiva, denominados ventres. Indica-se que a distância entre dois nós consecutivos ou dois ventres consecutivos é igual à metade do comprimento das ondas

que se superpõem (Figura 49). Outros pontos possuem amplitude intermediária. Assim, os vários pontos da onda vibram com amplitudes diferentes, mas com mesma frequência.



Fonte: [brasilecola.uol.com.br/fisica/ondas-estacionarias.htm](http://brasilecola.uol.com.br/fisica/ondas-estacionarias.htm).

Na ocasião, os estudantes serão convidados a reproduzir experimentalmente a Figura 48, fazendo uso da mola helicoidal. Eles deverão obter diferentes modos de vibração, denominados harmônicos, relacionando-os com o comprimento da mola.

Apresenta-se outra forma de os discentes constatarem a formação dos harmônicos. Trata-se de uma demonstração utilizando-se uma corda elástica, que deve ser amarrada a uma bola de brinquedo, conhecida como “bola maluca” (Figura 50). Nessa demonstração experimental, os modos de vibração da onda estacionária podem ser obtidos variando-se o comprimento da corda, com a frequência permanecendo inalterada.

Figura 50 – Brinquedo “bola maluca” e corda elástica



Fonte: Acervo do autor (2020).

A bola funciona com um motor acionado por pilhas que gira em seu interior de forma excêntrica. O movimento do motor faz a bola vibrar com uma determinada frequência, que é justamente a frequência de giro do motor. Pendurando a bola, com a corda amarrada a ela, os estudantes irão aumentar lentamente o comprimento da corda, para que ela possa entrar em ressonância com a vibração da bola. Dessa forma, a corda começará a vibrar, aumentando gradualmente a amplitude de vibração, em que se pode observar o modo fundamental, ou seja,

o primeiro harmônico (Figura 51-a). Os alunos são orientados a aumentar ainda mais o comprimento da corda, para que se obtenha o segundo modo de vibração da corda. Nessa situação, eles podem visualizar a formação de dois ventres (Figura 51-b).

Figura 51 – Experimento onda estacionária



Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=YC6KzLuBOZY>.

No que diz respeito à análise matemática, explicar-se-á como a expressão dos harmônicos pode ser obtida com base na condição de que o comprimento da corda é sempre igual a um número inteiro da metade do comprimento de onda:

$$l = n \frac{\lambda}{2},$$

em que  $l$  é o comprimento da corda,  $\lambda$  é o comprimento de onda e  $n$  é um número natural (1,2,3,...) que representa o modo de vibração ou harmônico.

Na sequência, ilustra-se a interferência de ondas bidimensionais, apresentando um pequeno vídeo, em que uma pessoa toca, com duas esferas, verticalmente a superfície da água, produzindo ondas idênticas e em fase. Questionam-se os estudantes sobre as imagens apresentadas. Espera-se que eles indiquem a presença de linhas, que parecem não vibrar, e de regiões que vibram intensamente. Essas possíveis manifestações dos estudantes serão relacionadas com os casos de interferência destrutiva e construtiva em ondas bidimensionais, respectivamente.



Figura 52 – Imagem do vídeo de interferência de ondas circulares



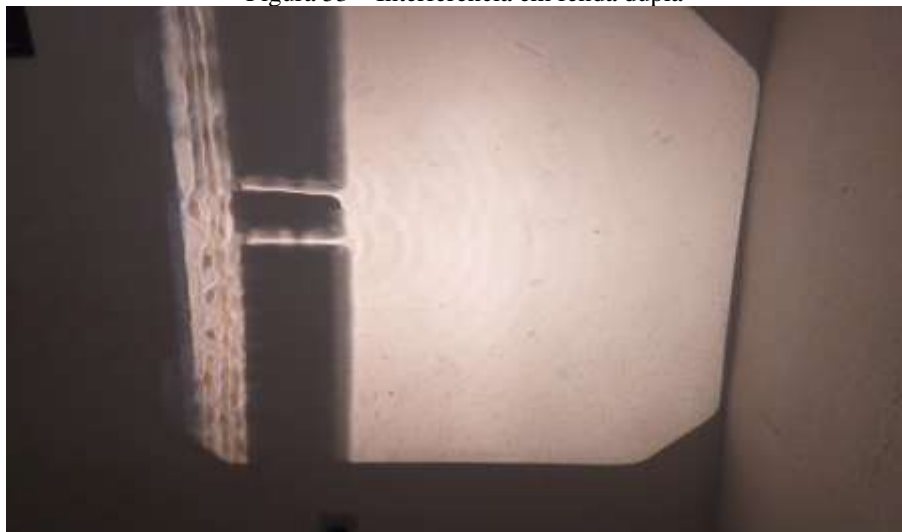
Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=1mpyq5dvpqx>.

Reitera-se que, nos pontos em que ocorre a superposição de duas cristas ou de dois vales, a amplitude da perturbação resultante é igual à soma das amplitudes individuais dessas ondas, em que teremos as linhas ventrais. Nestas linhas fica caracterizada a interferência construtiva. Já nas linhas onde não observamos a vibração do meio, temos o que chamamos de linhas nodais, este fato se deve pelo encontro de uma crista de uma das ondas, com um vale da outra onda, caracterizando a interferência destrutiva.

Em seguida, os estudantes serão convidados a vivenciar a interferência de ondas bidimensionais na cuba de ondas. Para tanto, será utilizada a haste plana acoplada ao motor de frequência ajustável para produzir a onda bidimensional e três peças de plástico para formar duas fendas no interior da cuba. Os educandos observarão que os obstáculos (fendas) atuam como fontes de ondas circulares, uma em cada fenda. Como estas ondas são formadas pela mesma frente de onda plana, as ondas circulares terão o mesmo comprimento de onda e estarão em concordância de fase, assim ocorrerá interferência entre elas (Figura 53).

Pede-se aos estudantes que mudem a abertura das fendas e relatem as suas observações.

Figura 53 – Interferência em fenda dupla



Fonte: Acervo do autor (2020).

Prosseguir a discussão dos conceitos sobre interferência em duas dimensões, produzindo-se, mais uma vez, ondas circulares na cuba de ondas. Explica-se que, no arranjo experimental anterior, as ondas circulares foram produzidas devido ao fenômeno da difração, que ocorre em cada uma das fendas. Dessa vez, as ondas circulares serão produzidas de maneira similar ao que foi exposto no vídeo de interferência de ondas circulares.

Os estudantes devem trocar a haste plana, a qual está acoplada ao motor com frequência ajustável, por dois suportes com esferas, para que estas toquem a água simultaneamente, produzindo ondas com a mesma frequência e em concordância de fase. Da mesma forma que as fendas, as ondas circulares formadas pelas esferas vão provocar interferências entre si, formando regiões de nós e de ventres, conforme Figura 54.

Figura 54 – Interferência entre ondas circulares



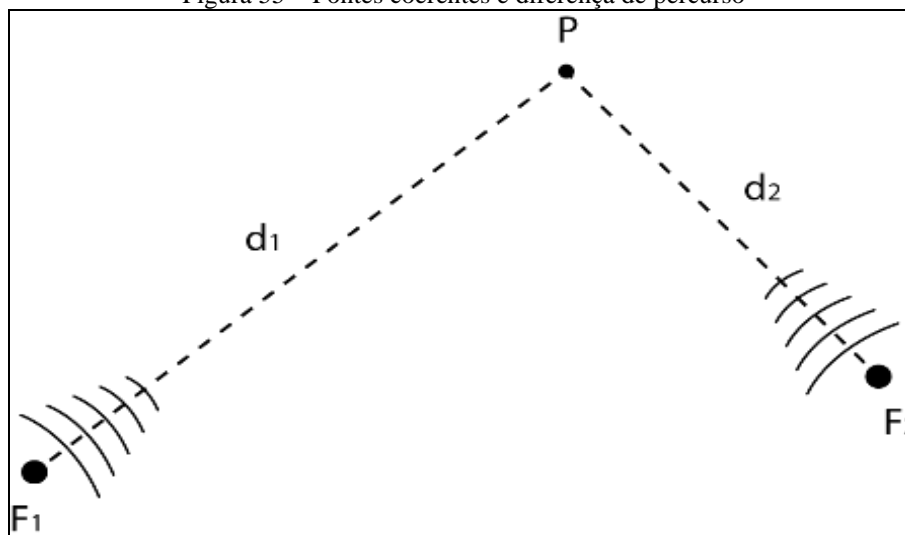
Fonte: Acervo do autor (2020).

A partir da observação das imagens, questiona-se em quais pontos haverá interferência construtiva e em que pontos ocorrerá interferência destrutiva. Espera-se que os estudantes identifiquem nas imagens que estão sendo produzidas as linhas nodais como locais onde ocorre interferência destrutiva e as linhas ventrais onde ocorre interferência construtiva.

Nesse momento, apresentam-se exemplos do cotidiano nos quais os casos de interferência construtiva e destrutiva de ondas de natureza diferente estão presentes. Assim, além de ser contextualizada, a interferência é destacada como um fenômeno tipicamente ondulatório, que se manifesta em importantes aplicações tecnológicas do som e das ondas eletromagnéticas. Recomenda-se abordar o fato de que, em voos de aviões, os passageiros são convidados a desligar os aparelhos eletrônicos que usam ondas eletromagnéticas para comunicação. Afirma-se que isso ocorre devido às ondas emitidas pelos aparelhos, que podem causar interferência nas ondas utilizadas na comunicação entre a aeronave e a torre de comando, gerando falhas de interlocução que podem causar acidentes.

A partir de então, comenta-se sobre a condição de interferência construtiva e destrutiva nas ondas bidimensionais e tridimensionais. Com base na Figura 55, diz-se que, para saber se no ponto P a interferência vai ser construtiva ou destrutiva, é necessário determinar a diferença ( $d_1 - d_2$ ) entre as distâncias,  $d_1$  e  $d_2$ , das fontes,  $F_1$  e  $F_2$ , até o ponto P. Se ( $d_1 - d_2$ ) for igual a um número inteiro de comprimentos de onda, a interferência será construtiva, pois as ondas chegam ao ponto P em concordância de fase. Se ( $d_1 - d_2$ ) for igual a um número ímpar de comprimentos de onda, a interferência será destrutiva, pois as ondas chegam ao ponto P em oposição de fase.

Figura 55 – Fontes coerentes e diferença de percurso

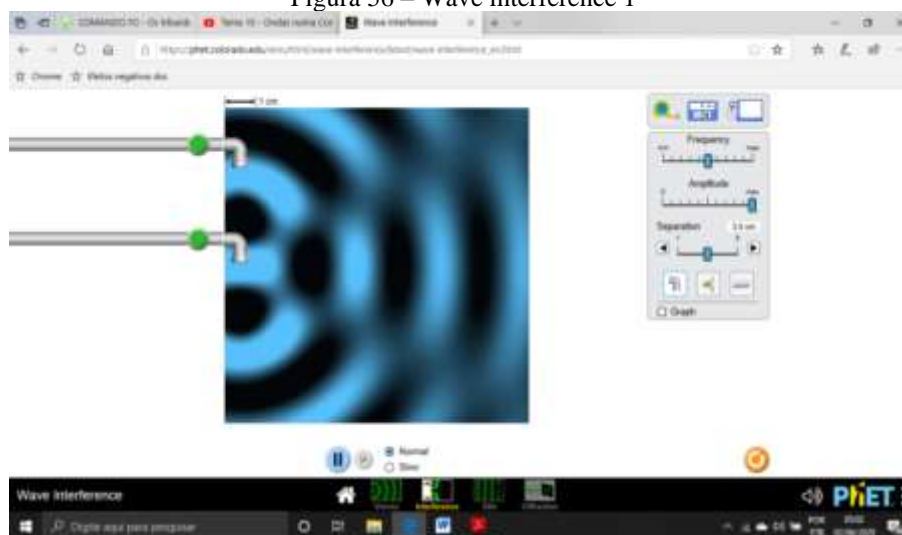


Fonte: Elaboração própria (2020).

Na ocasião, explica-se que fontes coerentes emitem ondas com o mesmo comprimento de onda em um mesmo plano de vibração; têm diferenças de fase constante; passam por uma mesma região do espaço, num mesmo intervalo de tempo. Para essa análise, será considerado que as fontes  $F_1$  e  $F_2$  são coerentes.

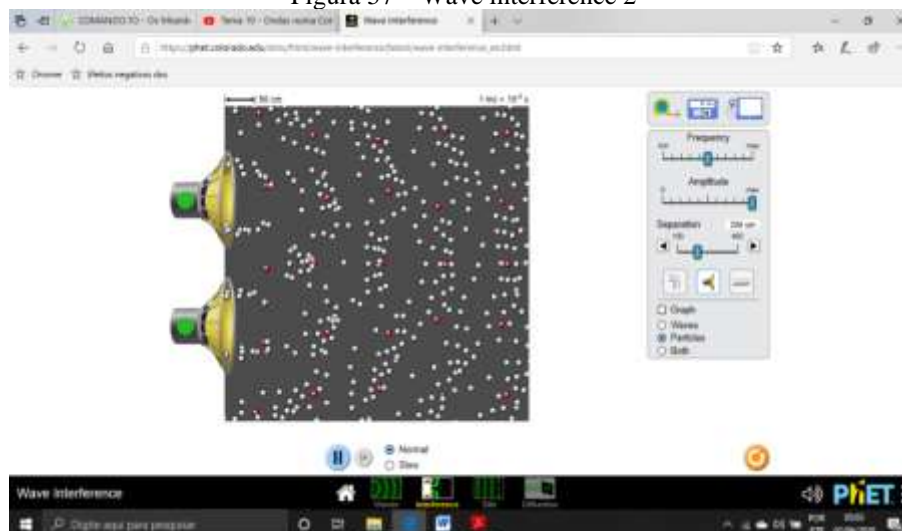
Finalizar a atividade apresentando uma simulação da plataforma Phet Interactive Simulations, denominada “*waves interference*”, na qual os discentes podem reproduzir os experimentos apresentados durante o encontro, assim como outros arranjos experimentais. Pede-se que os aprendizes modifiquem o meio de propagação das ondas, como também os tipos de ondas, conforme ilustrado nas figuras a seguir.

Figura 56 – Wave interference 1



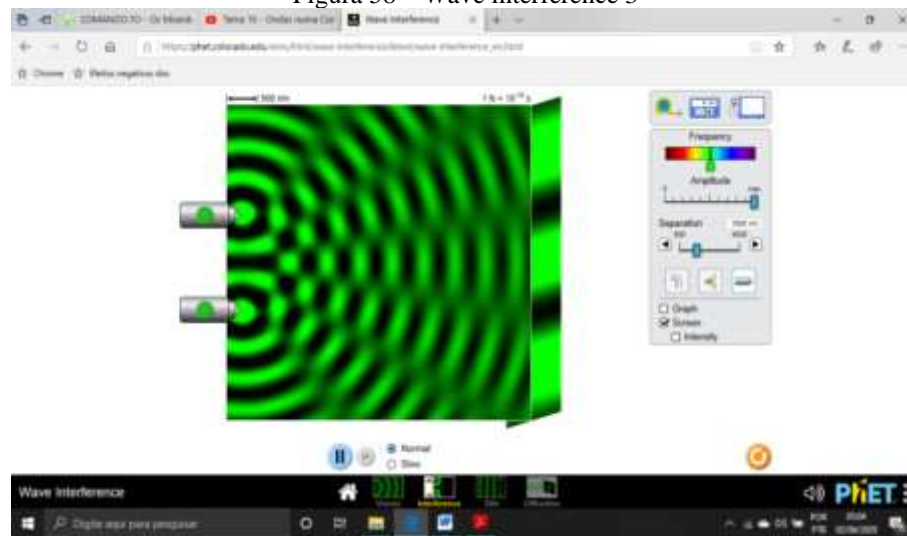
Fonte: Phet Interactive Simulations (2020).

Figura 57 – Wave interference 2



Fonte: Phet Interactive Simulations (2020).

Figura 58 – Wave interference 3



Fonte: Phet Interactive Simulations (2020).

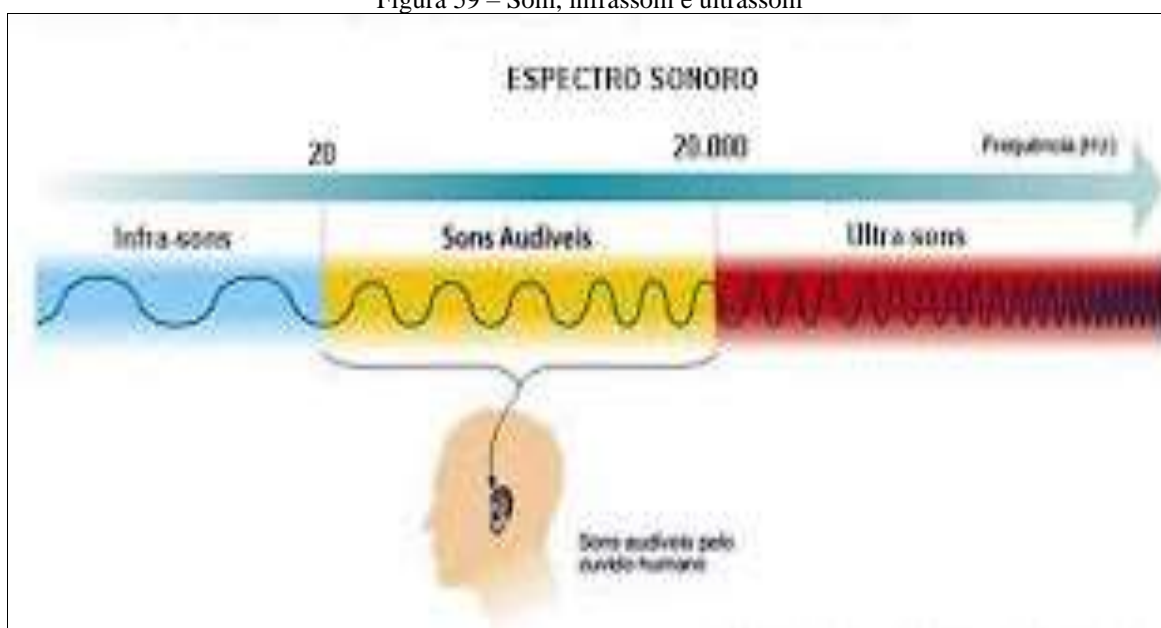
## Encontro 6 – Acústica

Para iniciar, devem-se apontar os conceitos que serão abordados durante as atividades a serem desenvolvidas. O estudo do movimento ondulatório será complementado com ênfase num assunto de grande importância prática: a acústica. Em acústica, estudam-se as fontes das ondas sonoras e os fenômenos ondulatórios que podem ocorrer durante a propagação dessas ondas. Esses fenômenos deverão ser contextualizados com enfoque nas relações entre ciência, tecnologia, sociedade e ambiente (CTSA), de maneira a propiciar uma aprendizagem significativa.

Prosseguir dizendo que, durante a discussão dos conceitos, utilizaremos recursos didáticos de cunho experimental, com a participação dos estudantes na execução das atividades. Enfatiza-se que, para isso, serão utilizados equipamentos específicos nas demonstrações de tais conceitos, assim como um desenho experimental para medição da velocidade do som no ar, no desfecho da atividade.

Explanar que as ondas sonoras são ondas longitudinais em meios fluidos, tendo origem mecânica e, portanto, não se propagam no vácuo. Seguir na explanação dizendo que a sensibilidade do ouvido humano às ondas sonoras varia de uma pessoa para outra; e, para uma mesma pessoa, varia com a idade. Os parâmetros médios adotados são 20 Hz, como frequência mínima audível, e 20000 Hz, como máxima. As vibrações abaixo de 20 Hz são chamadas de infrassons; acima de 20000 Hz, ultrassons. Apresentar a Figura 59, espectro sonoro, que mostra os limites para o infrassom, som e ultrassom.

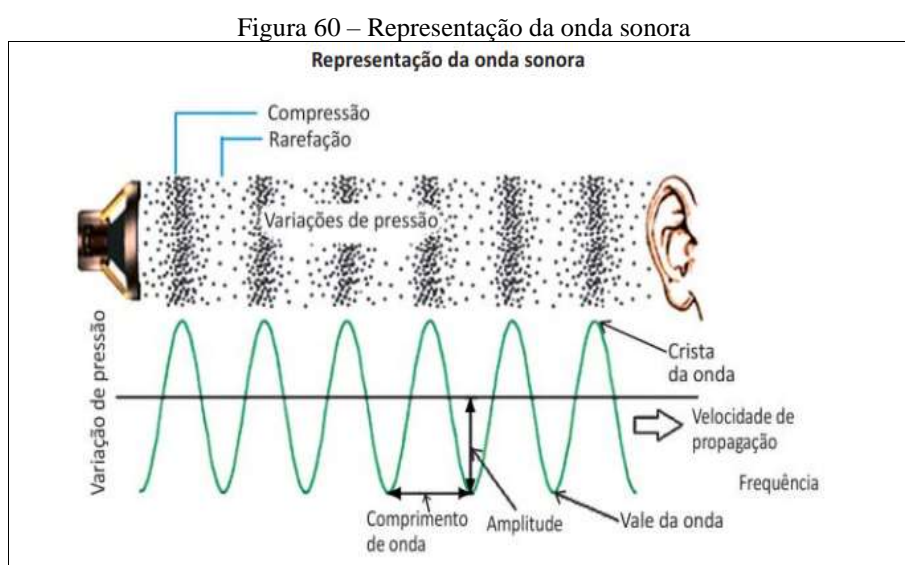
Figura 59 – Som, infrassom e ultrassom



Fonte: [http://www.aulas-fisica-quimica.com/8f\\_07.html](http://www.aulas-fisica-quimica.com/8f_07.html).

A partir de então, questionam-se os estudantes sobre exemplos de fontes sonoras. Complementar discutindo as respostas, citando o aparelho fonador, as cordas vocais, as colunas de ar e as membranas vibrantes, especialmente pelo seu uso nos instrumentos musicais. Diz-se que a fonte sonora, ao vibrar, ela também faz vibrar o meio em que se encontra, em geral o ar; assim acontece a emissão do som.

Utiliza-se o exemplo do alto-falante para explicar o processo exposto anteriormente. O movimento da membrana do alto-falante faz o ar vibrar, gerando zonas de compressão e rarefação do ar, que se constituem numa onda periódica de determinado comprimento de onda (Figura 60).



Fonte: <https://www.aprovaconcursos.com.br/questoes-de-concurso/questao/635425>

Ainda com base na figura anterior, discutem-se algumas grandezas físicas que caracterizam o som. Começar expondo que a altura do som está relacionada à frequência na qual a fonte geradora emite o som, sendo a sensação de grave ou agudo que ele provoca. Quanto mais alto for o som, maior sua frequência de vibração e mais agudo será o som. Para uma melhor compreensão desse conceito, exemplifica-se dizendo que as notas musicais se distinguem pela altura do som. Cada nota musical é caracterizada por certa frequência de vibração.

Outra propriedade que deve ser discutida é a intensidade sonora. Esta é definida como a energia transportada pela onda através de uma superfície por unidade de tempo e por unidade de área. Em outras palavras, a intensidade é a potência por unidade de área e sua unidade no sistema internacional é Watt por metro quadrado. Concluir essa parte da discussão mostrando que o ouvido humano é capaz de detectar sons com intensidade que varia entre  $10^{-12} \text{ W/m}^2$  (limiar da audição) e  $1 \text{ W/m}^2$  (limiar de dor). Explica-se que, devido ao intervalo

entre os valores mínimo e máximo de intensidade ser da ordem de  $10^{12}$ , o ouvido humano reduz drasticamente a intensidade sonora que detecta. Portanto, define-se uma grandeza mais apropriada, chamada nível sonoro ( $\beta$ ), com sua unidade de grandeza dada em decibel (dB). Sugere-se apresentar a expressão que define esta grandeza, como segue:

$$\beta = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}$$

Nesta equação,  $I$  representa a intensidade sonora do som e  $I_0$  representa o limiar de audição do ouvido humano.

Nesta ocasião, recomenda-se discutir sobre os níveis sonoros permitidos por lei aqui no Brasil. Questionam-se os estudantes, do ponto de vista da lei, se há alguma diferença entre esses valores de níveis sonoros de acordo com o período do dia. Em caso afirmativo, quais são esses valores para o dia e para noite? Pergunta-se também sobre o nome do aparelho utilizado para medição do nível sonoro. Apresenta-se o decibelímetro através de aplicativo no *smartphone*, fazendo-se algumas medições durante a discussão dessa característica do som.

Contextualiza-se essa característica do som na poluição sonora, indicando seus tipos e as principais causas. Apresenta-se a Figura 61, para discutir essa questão como um problema social, destacando as potencialidades da ciência e da tecnologia para lhe dar uma resposta consistente.

Figura 61 – Poluição sonora

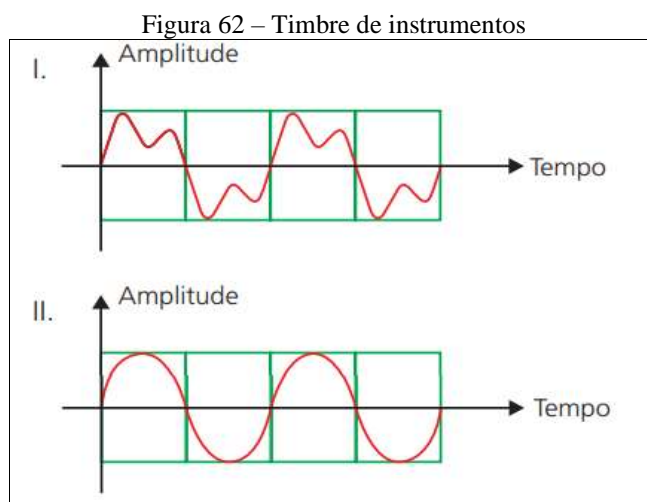


Fonte: <https://pt.quizur.com/quiz/poluicao-sonora-49Tk>

Uma terceira característica do som é o timbre. Expôr de forma dialógica que o timbre nos permite distinguir sons de mesma frequência (mesma altura) e de mesma



intensidade, emitidos por fontes diferentes. Exemplificar dizendo que percebemos se uma mesma nota musical é produzida por um piano ou por uma flauta porque o timbre do som de um instrumento difere do timbre do som do outro, pois produzem em nosso sistema auditivo sensações diferentes. Apresentar a Figura 62, em que I e II são gráficos que ilustram o conceito de timbre de dois desses instrumentos. Neles, destaca-se que, sendo igual o comprimento da onda (frequência), a forma da onda para um determinado momento de tempo é diferente.



Fonte: <https://app.planejativo.com/q/10443/fisica-2/acustica-fenomenos-sonoros-e-instrumentos-musicais>

Feito isto, deve-se realizar uma demonstração bem simples de algumas dessas características, utilizando-se uma taça de cristal. Para começar a demonstração, questionam-se os estudantes: “Alguém sabe como tirar um som de uma taça de cristal?”. Realiza-se então esta demonstração, colocando-se um pouco de água dentro da taça; em seguida, molha-se a ponta do dedo com um pouco de água, apoia-o na borda da taça e começa-se a fazer um movimento giratório em torno desta, conforme ilustrado na Figura 63.

Figura 63 – Produção de som em taça de cristal



Fonte: Elaboração própria do autor (2020).

Explica-se que os átomos do vidro que constitui a taça vibram com uma determinada frequência, denominada frequência natural de vibração. Ao movimentar o dedo sobre a borda da taça, fazemos essa vibração aumentar por ressonância. Os átomos fazem o ar dentro da taça vibrar, o que gera a onda sonora. Dizer que podemos aumentar ou diminuir a frequência da onda sonora que está sendo produzida adicionando-se água no interior da taça. Perguntar aos alunos o que pode ocorrer se uma fonte sonora emitir uma onda com frequência igual à frequência natural de vibração dos átomos da taça, fazendo esses sistemas entrarem em ressonância. Eles devem concluir que ocorrerá um aumento da vibração dos átomos, podendo quebrar a taça de cristal.

Nessa ocasião, por meio de aplicativo do *smartphone*, convidam-se os educandos a realizarem medições de frequência para níveis diferentes de água na taça, questionando-os acerca da relação entre a altura da coluna de ar dentro da taça com a frequência que está sendo medida. O esperado é que eles percebam que existe uma relação inversamente proporcional entre a frequência e a altura da coluna de ar.

A partir daí, apresentar outro aparato que tem como base de entendimento a ressonância acústica: o diapasão (Figura 64). Primeiramente, pergunta-se se eles conhecem esse equipamento e qual sua funcionalidade. Dizer que o diapasão serve para afinar instrumentos musicais. Ele, quando acoplado a uma caixa de ressonância acústica, resulta ser uma fonte de onda sonora.

Figura 64 – Diapasão com caixa acústica



Fonte: Elaboração própria do autor (2020).

Explicar que, quando batemos nas hastes do diapasão com martelo de borracha, estas irão vibrar, produzindo a onda sonora. Dizer que, em geral, essas hastes em formato de U vibram com frequência de 440 Hz. Comentar que, quando o diapasão é acoplado a uma

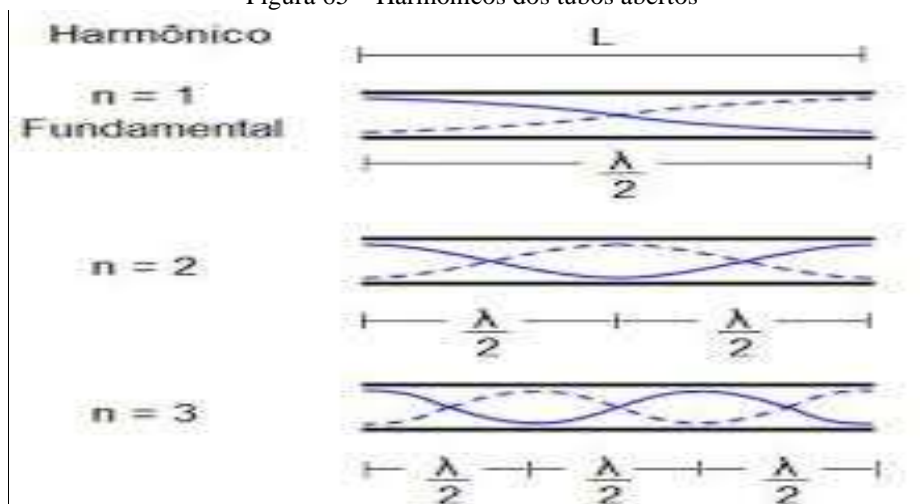
caixa de madeira oca com um de seus lados aberto, acontece o fenômeno da ressonância e consequentemente um aumento na intensidade do som. Esse reforço da intensidade do som é utilizado para afinar um determinado instrumento musical, pois ele acontece quando a frequência do instrumento se iguala à frequência padrão do diapasão (Figura 64).

Continuar percorrendo sobre o processo de formação da onda sonora em cordas vibrantes e nos tubos sonoros. Dizer que essa onda se forma nas cordas vibrantes de maneira análoga à onda estacionária, abordada no encontro anterior. No caso dos tubos sonoros, discute-se que uma coluna gasosa possui suas frequências naturais de vibração que, quando excitadas, provocam a amplificação do som pela ressonância. A onda estacionária formada nesse processo difere das cordas vibrantes, devido ao fato de que nas cordas as extremidades devem ser nós, pois não podem vibrar, enquanto nos tubos pelo menos uma das extremidades deve ser aberta, portanto nela se forma um ventre.

Comentar que muitos instrumentos musicais utilizam tubos sonoros como ressonadores. Nesses tipos de instrumentos, os sons são produzidos por fluxos de ar em uma das extremidades. Esses sons compõem-se de várias frequências, mas só ressonam ou se amplificam aquelas que correspondem às frequências naturais, isto é, ao som fundamental e aos harmônicos da coluna gasosa. Complementar dizendo que os tubos são classificados em abertos e fechados. Os tubos abertos são aqueles que têm as duas extremidades abertas e os tubos fechados são aqueles que têm uma extremidade aberta e a outra fechada.

Por meio de imagens, concluir essa parte da discussão realizando uma análise matemática sobre a formação dos modos de vibração em um tubo aberto, de comprimento  $L$ , pedindo aos estudantes que observem, nas três situações, ventres de deslocamento nas extremidades abertas (Figura 65).

Figura 65 – Harmônicos dos tubos abertos



Fonte: [http://fisicasp.com.br/wp-content/uploads/2016/02/Tubos\\_sonoros.pdf](http://fisicasp.com.br/wp-content/uploads/2016/02/Tubos_sonoros.pdf)

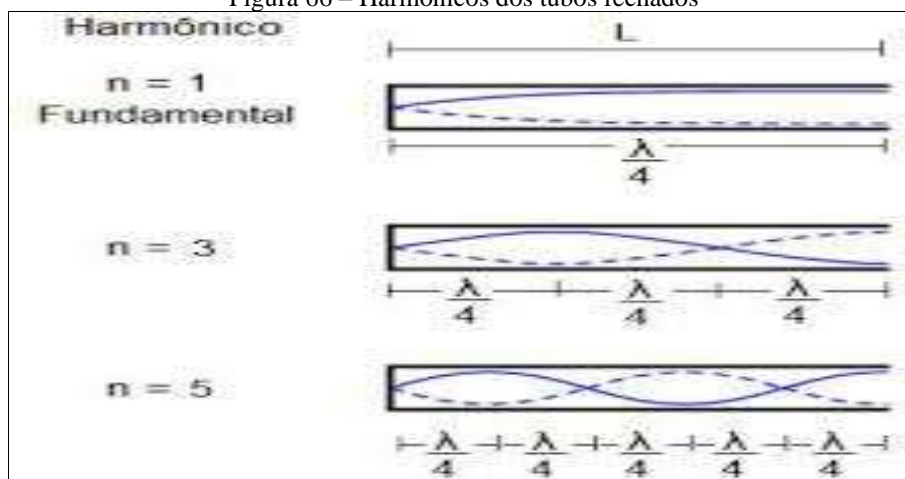
Generaliza-se, com auxílio da relação fundamental da ondulatória, que, para um harmônico de ordem N qualquer, obteremos a seguinte relação:

$$f = \frac{Nv}{2L} \quad (N = 1, 2, 3, \dots),$$

em que o número N é a ordem do harmônico e corresponde à quantidade de meios de comprimentos de onda em cada configuração da onda estacionária.

Para os tubos fechados (Figura 66), de comprimento L, os discentes irão notar os três primeiros modos de vibração, destacando-se a formação de ventre na extremidade aberta e de um nó na extremidade fechada.

Figura 66 – Harmônicos dos tubos fechados



Fonte: [http://fisicasp.com.br/wp-content/uploads/2016/02/Tubos\\_sonoros.pdf](http://fisicasp.com.br/wp-content/uploads/2016/02/Tubos_sonoros.pdf)

Destaca-se que os tubos fechados apenas emitem o som fundamental e os harmônicos de ordem ímpar, isto é, os harmônicos que são múltiplos ímpares da frequência do som fundamental. Assim sendo, demonstra-se, com auxílio da relação fundamental da ondulatória e da imagem apresentada, que a generalização para um harmônico qualquer de ordem ímpar é dada por:

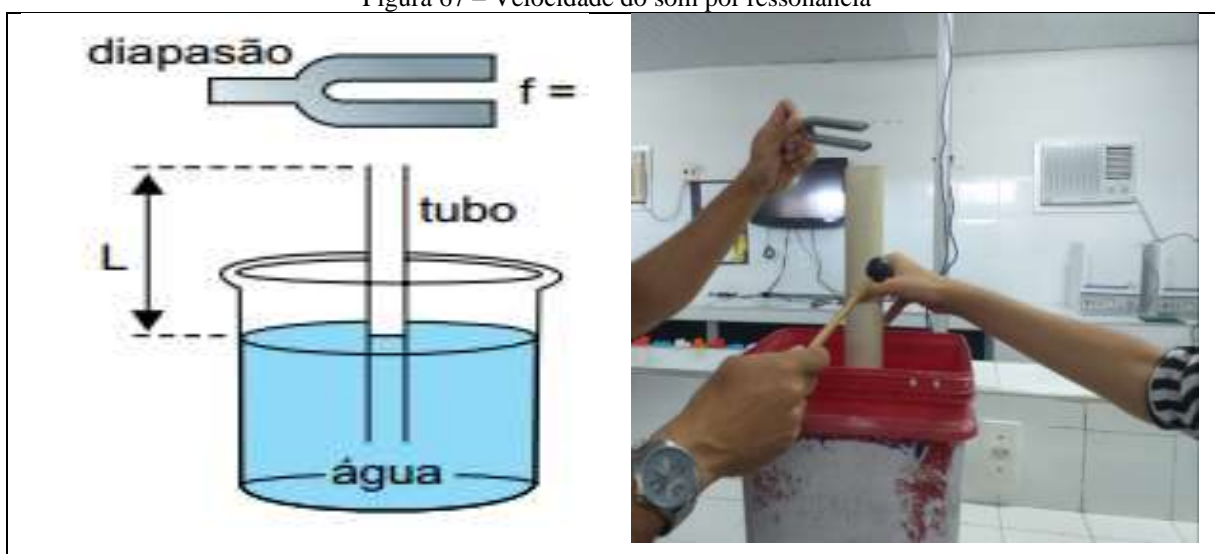
$$f = \frac{Nv}{4L} \quad (N = 1, 3, 5, \dots),$$

em que o número N, nesse caso, continua sendo a ordem do harmônico, porém corresponde à quantidade de quartos de comprimentos de onda.

Nesse momento, faz-se referência aos tubos fechados e à relação anterior na medição da velocidade do som no ar. Expõe-se que existem diversos métodos de medição da velocidade da onda sonora; nessa atividade, os alunos devem investigar como determinar a

velocidade do som, com uso de um tubo de PVC, água num recipiente e um diapásão. Questionamentos acerca das extremidades do tubo são realizados. Pergunta-se aos estudantes: “Como proceder para que tenhamos uma extremidade aberta e a outra fechada?”. Os educandos devem perceber que uma das extremidades ficará fechada por meio da água. Continuar os questionamentos, desta vez indagando-os como se pode fazer vibrar o ar na extremidade aberta. A resposta esperada é: fazendo-se vibrar um diapásão de frequência 440 Hz próximo dessa extremidade. Em seguida, indagar sobre o comprimento  $L$  em que ocorre a ressonância. “Como eles devem agir para encontrar tal parâmetro?”. A resposta que se espera nesse caso é que basta afundar o tubo de PVC no recipiente com água, procurando com atenção o momento em que haja um reforço da intensidade sonora, conforme a Figura 67. Achado o comprimento em que ocorre a ressonância, pode-se medi-lo diretamente com uma régua ou marcar a posição com um lápis e medir depois.

Figura 67 – Velocidade do som por ressonância



Fonte: Acervo do autor (2020).

Orientar que o nível da água do recipiente deve estar a uma altura de pelo menos 25 cm do fundo. Recipientes transparentes são mais indicados, pois facilitam a visualização da altura da coluna livre do tubo.

Complementa-se a atividade explicando que a velocidade da onda sonora nos líquidos é maior do que nos gases e nos sólidos maior do que nos líquidos. Exemplificar esse conceito com uma situação que aparece em filmes e desenhos animados: trata-se de uma pessoa encostando o ouvido nos trilhos de um trem. Dessa forma, ela consegue saber se o trem está se aproximando antes mesmo do contato visual e de o som chegar pelo ar (Figura 68).

Figura 68 – Propagação do som em sólidos



Fonte: <http://trilhafilmes.blogspot.com/2008/05/ndio-vidente.html>

Finalizar o encontro falando das aplicações tecnológicas do som. O fenômeno da reflexão das ondas é inserido no contexto para se abordar a tecnologia do eco. Fala-se do uso do ultrassom na medicina e na indústria. Explica-se que alguns cristais, quando pressionados, geram correntes elétricas. Esse fenômeno, denominado piezoelectricidade, permite a transformação da energia mecânica das ondas sonoras em energia elétrica. Assim, quando atingidos pela pressão exercida por ultrassons, esses cristais geram pequenas correntes elétricas que se transformam em imagens na tela de um monitor. Esse é o princípio da ultrassonografia. O feixe de ultrassom se propaga no corpo humano, refletindo-se nos seus órgãos internos. O som refletido é interpretado eletronicamente, formando-se imagens que, por sua vez, são interpretadas por um especialista ou por um computador, como na Figura 69.

Figura 69 – Ultrassonografia de um feto.



Fonte: <https://brasil.babycenter.com/a1500549/tudo-sobre-os-ultrassons-na-gravidez>


Outra aplicação importante dessa tecnologia acontece no sonar. Esse equipamento utiliza o eco de forma direta, sem que seja necessária uma complexa decodificação eletrônica dos sinais sonoros refletidos. Essa tecnologia foi desenvolvida em 1917 pelo físico francês Paul Langevin (1872-1946) para localizar submarinos alemães. Explicar que o funcionamento do sonar é simples: o equipamento instalado no navio emite a onda sonora em direção ao fundo do mar e, a partir do eco dessa onda, obtém as informações de que necessita, como a profundidade local e a existência de cardumes e obstáculos. Essa capacidade de localização ou de detecção também se observa em animais. Os golfinhos e os morcegos se movimentam e capturam presas com auxílio da reflexão de ultrassons que emitem de modo semelhante ao do sonar.

## REFERÊNCIAS

- BARBETA, V. B.; MARZZULLI, C. R. Experimento didático para determinação da velocidade de propagação do som no ar, assistido por computador. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 22, n. 4, p. 447-455, 2000.
- BORGES, A. T. Novos rumos para o laboratório escolar de Ciências. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 19, n. 3, p. 291-313, 2002.
- CARRASCOSA, J. *et al.* Papel de la actividad experimental en la educación científica. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 23, n. 2, p. 157-181, 2006
- EINTEIN, A.; INFELD, L. *A evolução da Física*. Rio de Janeiro: Zahar, 2008.
- FREITAS, M. A. B. *Medindo a velocidade do som com o microfone do PC*. 2005. 31 f. Projeto de Final de Curso (Graduação em Física) – Programa de Graduação em Física. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- MARTINS, J. S.; BIGANSOLLI, A. R.; CRUZ, F. A. O. Cuba de ondas: uma atividade prática para o ensino de Física utilizando o programa Audacity. *Vivências*, Erechim, v. 8, p. 18-31, 2012.
- POSSOBON, R. *Cuba de ondas: relatório*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2016.
- PSSC. *Física: Parte II*. São Paulo: Edart, 1966.
- SANTOS, A. G.; BARROS, F. S. Ondas de água: uma revisão ao nível médio. *Física na Escola*, [S.l.], v. 9, n. 2, p. 14-16, 2008.
- SCHIEL, D. *et al.* Análise digital de ondas em uma cuba de ondas. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, 15., 2003, Curitiba. *Atas [...]*. Curitiba: Cefet-PR, 2003. p. 2313-2322.
- SILVA, L. R.; SANTOS, B. M. Uso do aplicativo decibelímetro Sound Meter para o estudo da diretividade do som: uma abordagem para o ensino médio. *Revista do Professor de Física*, Brasília, DF, v. 3, n. esp., p. 43-44, 2019.
- SILVEIRA, M. V.; BARTHEM, R. B.; SANTOS, A. C. Proposta didático-experimental para o ensino inclusivo de ondas no ensino médio. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 41, n. 1, e20180084, 2019.
- VILCHES, A.; SOLBES, J.; GIL-PÉREZ, D. Alfabetización científica para todos contra ciência para futuros científicos. *Alambique*, Barcelona, v. 41, p. 89-98, 2004.
- YAMAMOTO, I.; BARBETA, V. B. Simulações de experiências como ferramenta de demonstração virtual em aulas de Teoria de Física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 23, n. 2, p. 215-225, 2001.



## APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO FINAL



### AVALIAÇÃO BIMESTRAL DE FÍSICA-2º ANO

Boa tarde!

Responda as questões que seguem, marcando apenas uma das opções, em seguida clique em enviar. Cada questão vale 1 ponto, num total de 10.  
Boa prova!

**\*Obrigatório**

Endereço de e-mail \*

Seu e-mail \_\_\_\_\_

Nome \_\_\_\_\_ \*


Texto de resposta curta  
\_\_\_\_\_

TURMA: \*

A

B

C



Analise as afirmativas a seguir: \*

- I. O fenômeno pelo qual uma onda não forma uma sombra com limites precisos, quando contorna uma barreira que a bloqueia parcialmente, é chamado de difração.
- II. As ondas sonoras são exemplos de ondas longitudinais, e as ondas eletromagnéticas são exemplos de ondas transversais.
- III. Uma onda de frequência 50 Hz e comprimento de onda 20 cm está se movendo à velocidade de 10 m/s.

Marque a opção CORRETA

- se apenas as afirmativas I e II forem falsas
- se apenas as afirmativas II e III forem
- se apenas as afirmativas I e III forem falsas
- se todas forem verdadeiras
- se todas forem falsas

O som é um exemplo de uma onda longitudinal. Uma onda produzida numa corda esticada é um exemplo de uma onda transversal. O que difere ondas mecânicas longitudinais de ondas mecânicas transversais é \*

- a frequência.
- a direção de vibração do meio de propagação.
- o comprimento de onda.
- a direção de propagação.
- a amplitude.

Um garoto arremessa uma pedra nas águas de um lago tranquilo e observa que foram geradas ondas circulares. Conclui, acertadamente que: \*

- as ondas transportam matéria
- as ondas transportam energia.
- a velocidade de propagação das ondas independe da direção.
- a velocidade de propagação das ondas depende da profundidade do lago.
- a frequência depende do meio de propagação.

Uma boia encontra-se no meio de uma piscina. Uma pessoa provoca ondas na água, tentando deslocar a boia para a borda. A chegada da boia à borda da piscina: \*

- jamais ocorrerá.
- depende da frequência da onda.
- depende da amplitude da onda.
- depende da densidade da água.
- depende da razão frequência/amplitude da onda.



Marque o item correto com base nas afirmativas sobre o fenômeno da refração de onda eletromagnética: \*

- I. Quando uma onda se refrata sua velocidade é alterada devido à mudança do meio de propagação da onda.
  - II. Na refração de uma onda sempre há mudança em sua direção de propagação.
  - III. Quando uma onda se propaga de um meio 1 de menor índice de refração, para um meio 2 de maior índice de refração, sua velocidade é maior no meio 2.
- Analisando-se as afirmativas é correto concluir que

- somente a I é correta.
- somente a II é correta.
- todas são corretas.
- somente I e III são corretas.
- somente II e III são corretas.



Uma pessoa é capaz de ouvir a voz de outra, situada atrás de um muro de concreto, mas não pode vê-la. Isto se deve à: \*

- difração, pois o comprimento de onda da luz é comparável às dimensões do obstáculo, mas o do som não...
- velocidade da luz ser muito maior que a do som, não havendo tempo para que ela contorne o obstáculo, e...
- interferência entre as ondas provenientes do emissor e sua reflexão no muro: construtiva para as ondas s...
- dispersão da luz, por se tratar de uma onda eletromagnética, e não-dispersão do som, por ser uma onda ...
- difração, pois o comprimento de onda do som é comparável às dimensões do obstáculo, mas o da luz não...



Quando a luz passa por um orifício muito pequeno, comparável ao seu comprimento de onda, ela sofre um efeito chamado de: \*

- dispersão.
- interferência.
- difração
- refração.
- polarização.

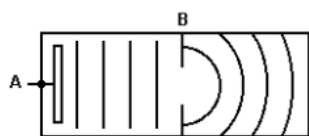


Dois diapasões idênticos encontram-se próximos um do outro. Um estudante de música, pretendendo afinar seu violão, utilizando-se de um macete de borracha, faz vibrar um dos diapasões. Após algum tempo observa que o outro também encontra-se em vibração. Intrigado, busca num livro de física a explicação e descobre que o fenômeno observado é conhecido como:

- difração
- refração
- reflexão
- ressonância
- efeito Doppler



A figura representa uma cuba com água onde o dispositivo A produz uma onda plana que chega ao anteparo B, o qual possui uma abertura. \*

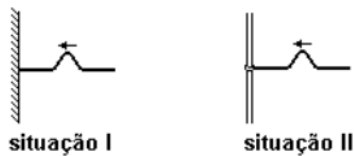


O fenômeno representado após a abertura é conhecido como

- difração.
- refração.
- polarização
- reflexão.

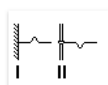


A figura representa a propagação de dois pulsos em cordas idênticas e homogêneas. A extremidade esquerda da corda, na situação I, está fixa na parede e, na situação II, está livre para deslizar, com atrito desprezível, ao longo de uma haste. \*



Identifique a opção em que estão mais bem representados os pulsos refletidos nas situações I e II:

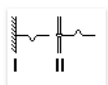
.



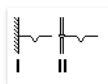
..



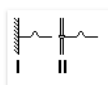
...



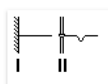
....



.....



.....



## APÊNDICE C – ATIVIDADES PROPOSTAS NO GOOGLE CLASSROOM

2ª Série/A  
EEMTI CLÁUDIO MARTINS

Instruções Trabalhos dos alunos

### OSCILAÇÕES - MOVIMENTO HARMÔNICO SIMPLES

WALANCE AUGUSTO • 18 de ago. de 2020

BOA TARDE!

CONFORME FOI VISTO EM AULA NO GOOGLETEET, SEGUIE EM ANEXO LINKS DE VÍDEOS COM EXPERIMENTOS SOBRE OSCILAÇÕES E MOVIMENTO HARMÔNICO SIMPLES. ASSISTAM OS VÍDEOS E REALIZEM AS ATIVIDADES EXPERIMENTAIS QUE CONSTAM NOS MESMOS. AS ATIVIDADES EXPERIMENTAIS DEVEM SER GRAVADAS E POSTADAS NO GRUPO DE FÍSICA DO 2º ANO (WHATS'S APP). REALIZEM PESQUISA INVESTIGATIVA PARA EXPLICAR OS CONCEITOS VISTOS NA AULA E NOS VÍDEOS. ESTA ATIVIDADE PODE SER REALIZADA EM GRUPO OU INDIVIDUALMENTE, SENDO QUE NA PRÓXIMA AULA SERÁ REALIZADA UMA DISCUSSÃO SOBRE TAIS CONCEITOS. OS VÍDEOS VALEM PONTUAÇÃO NA MÉDIA DO 3º BIMESTRE. ESCOLHA UM DOS EXPERIMENTOS PARA REALIZAÇÃO DO VÍDEO. UTILIZEM MATERIAIS ACESSÍVEIS E DE BAIXO CUSTO.

LINKS DOS VÍDEOS:

- OSCILADOR HARMÔNICO SIMPLES  
[https://www.youtube.com/watch?v=Ab90B9Q6QNw&list=PL1Dq40xxk\\_RI2Pqb541vQyaUboUuXtiuJ&index=1](https://www.youtube.com/watch?v=Ab90B9Q6QNw&list=PL1Dq40xxk_RI2Pqb541vQyaUboUuXtiuJ&index=1)
- OSCILADOR HARMÔNICO SIMPLES  
[https://www.youtube.com/watch?v=Bf001gGpmHE&list=PL1Dq40xxk\\_RI2Pqb541vQyaUboUuXtiuJ&index=2](https://www.youtube.com/watch?v=Bf001gGpmHE&list=PL1Dq40xxk_RI2Pqb541vQyaUboUuXtiuJ&index=2)
- OSCILAÇÕES AMORTECIDAS

2ª Série/A  
EEMTI CLÁUDIO MARTINS

Instruções Trabalhos dos alunos

UTILIZEM MATERIAIS ACESSÍVEIS E DE BAIXO CUSTO.

LINKS DOS VÍDEOS:

- OSCILADOR HARMÔNICO SIMPLES  
[https://www.youtube.com/watch?v=Ab90B9Q6QNw&list=PL1Dq40xxk\\_RI2Pqb541vQyaUboUuXtiuJ&index=1](https://www.youtube.com/watch?v=Ab90B9Q6QNw&list=PL1Dq40xxk_RI2Pqb541vQyaUboUuXtiuJ&index=1)
- OSCILADOR HARMÔNICO SIMPLES  
[https://www.youtube.com/watch?v=Bf001gGpmHE&list=PL1Dq40xxk\\_RI2Pqb541vQyaUboUuXtiuJ&index=2](https://www.youtube.com/watch?v=Bf001gGpmHE&list=PL1Dq40xxk_RI2Pqb541vQyaUboUuXtiuJ&index=2)
- OSCILAÇÕES AMORTECIDAS  
[https://www.youtube.com/watch?v=h\\_JOS7ld48&list=PL1Dq40xxk\\_RI2Pqb541vQyaUboUuXtiuJ&index=3](https://www.youtube.com/watch?v=h_JOS7ld48&list=PL1Dq40xxk_RI2Pqb541vQyaUboUuXtiuJ&index=3)
- PÊNDEULOS ACOPLADOS - RESSONÂNCIA  
[https://www.youtube.com/watch?v=vetRMbo35iw&list=PL1Dq40xxk\\_RI2Pqb541vQyaUboUuXtiuJ&index=5](https://www.youtube.com/watch?v=vetRMbo35iw&list=PL1Dq40xxk_RI2Pqb541vQyaUboUuXtiuJ&index=5)

UM ABRAÇO A TODOS E BONS ESTUDOS!

**MOVIMENTO OSCILATÓRIO...**  
PowerPoint

Comentários da turma

Adicionar comentário para a turma...

2ª Série/A  
EEMTI CLÁUDIO MARTINS

Instruções Trabalhos dos alunos

## SOM NO VÁCUO.

WALANCE AUGUSTO • 25 de ago. de 2020

SEGUIE LINK DO VÍDEOS SOBRE ONDA SONORA NO VÁCUO.  
<https://www.youtube.com/watch?v=rEG08-zUcEI>

Comentários da turma

Adicionar comentário para a turma

?

2ª Série/A  
EEMTI CLÁUDIO MARTINS

Instruções Trabalhos dos alunos

## FENÔMENOS ONDULATÓRIOS - REFLEXÃO

WALANCE AUGUSTO • 1 de set. de 2020

BOA TARDE!

CONFORME AULA DO DIA 31.08, SEGUIE LINKS DE VÍDEOS A SEREM ASSISTIDOS PARA DISCUSSÃO NA PRÓXIMA AULA. OS SLIDES APRESENTADOS ESTARÃO ANEXADOS PARA PESQUISA DOS CONCEITOS SOBRE FENÔMENOS ONDULATÓRIOS E REFLEXÃO DE ONDAS.  
 VALE LEMBRAR QUE AS ATIVIDADES EXPERIMENTAIS DEVEM SER REALIZADAS EM EQUIPE. ESTAS ATIVIDADES DEVEM SER GRAVADAS OU APRESENTADAS EM AULA.  
 A PLATAFORMA DE SIMULAÇÕES VIRTUAIS PHET INTERACTIVE SIMULATIONS SERÁ UTILIZADA EM AULA. REALIZEM EXPERIMENTOS VIRTUAIS, PARA APRESENTAÇÃO E EXPOSIÇÃO DOS CONCEITOS. SEGUIE LINK DAS SIMULAÇÕES REFERENTES AO CONTEÚDO ABORDADO.( ONDAS; REFLEXÃO DE ONDAS)

- REFLEXÃO DE ONDAS (UNIDIMENSIONAL)  
<https://www.youtube.com/watch?v=rH09eZ6UZGE>
- REFLEXÃO DE ONDAS (BIDIMENSIONAL)  
<https://www.youtube.com/watch?v=0BjU-2mtEfi>
- PRINCÍPIO DE HUYGENS (FRENTES DE ONDA)  
<https://www.youtube.com/watch?v=1vDpy0kPo84>  
[https://www.youtube.com/watch?v=t6XFPQW7\\_IQ](https://www.youtube.com/watch?v=t6XFPQW7_IQ)

PHET INTERACTIVE SIMULATIONS

?

2ª Série/A  
EEN TI CLÁUDIO MARTINS

Instruções    Trabalhos dos alunos

<https://www.youtube.com/watch?v=0R1J-2mtE1>

- PRINCÍPIO DE HUYGENS (FRENTES DE ONDA)  
<https://www.youtube.com/watch?v=1vDpyQkPc84>  
[https://www.youtube.com/watch?v=16XFPOW7\\_IQ](https://www.youtube.com/watch?v=16XFPOW7_IQ)

PHET INTERACTIVE SIMULATIONS

- WAVES INTRO (ONDAS: INTRO)  
[https://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulation/waves-intro](https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/waves-intro)

- WAVES ON A STRING (ONDAS NUMA CORDA)  
[https://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulation/wave-on-a-string](https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/wave-on-a-string)

BONS ESTUDOS!!

	<b>FENÔMENOS ONDULATÓRI...</b> PowerPoint
--	--

Comentários da turma

Adicionar comentário para a turma...



## ANEXO A

## QUADRO DE ATIVIDADES REALIZADAS PELOS ESTUDANTES

ATIVIDADE	CONCEITOS	EQUIPE	LINK
Seminário - Apresentação de Slides	Movimento oscilatório	2° A, 2° C	Acervo do autor
Seminário - Apresentação de Slides	Ondas	2° B	Acervo do autor
Demonstração síncrona na aula	Pêndulo simples	2° A	<a href="https://drive.google.com/file/d/1cBcCw6htqkoxbCK6-yD-voOmCEk_XIzB/view?usp=sharing">https://drive.google.com/file/d/1cBcCw6htqkoxbCK6-yD-voOmCEk_XIzB/view?usp=sharing</a>
Vídeo de atividade experimental	Refração da luz	2° C	Acervo do autor
Vídeo de atividade experimental	Movimento harmônico simples	2° C	<a href="https://www.youtube.com/watch?v=WtISEqPRU4Y">https://www.youtube.com/watch?v=WtISEqPRU4Y</a>
Vídeo de atividade experimental	Ondas bidimensionais	2° C	<a href="https://www.youtube.com/watch?v=etpdi-etbn0">https://www.youtube.com/watch?v=etpdi-etbn0</a>
Demonstração síncrona na aula	Tipos de ondas	2° A, 2° C	<a href="https://drive.google.com/file/d/1kMM_8AiAiL5BZq8g_aIp9sp8LoZKBHs/view?usp=sharing">https://drive.google.com/file/d/1kMM_8AiAiL5BZq8g_aIp9sp8LoZKBHs/view?usp=sharing</a>
Vídeo de atividade experimental	Reflexão, Refração e Difração	2° B	<a href="https://youtu.be/rz7wtDzXmn8">https://youtu.be/rz7wtDzXmn8</a>
Vídeo animação	Ondas	2° C	Acervo do autor