

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

## 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

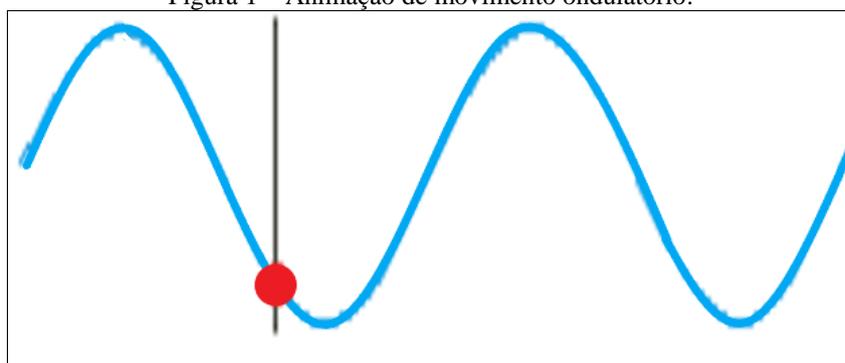
fenômenos da reflexão, refração, difração, interferência e ressonância. Tais atividades que podem ser realizadas utilizando, tanto equipamentos simples como molas, diapasões, taças, *laser* e uma cuba de ondas quanto recursos das tecnologias da informação e da comunicação, com destaque para as simulações 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

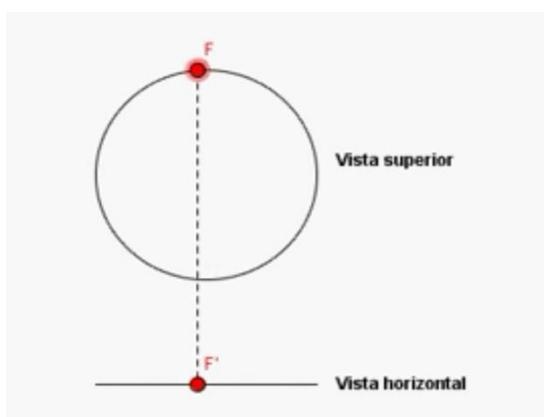
conceitos advindos desse movimento oscilatório, como de período, frequência e amplitude.

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?”.

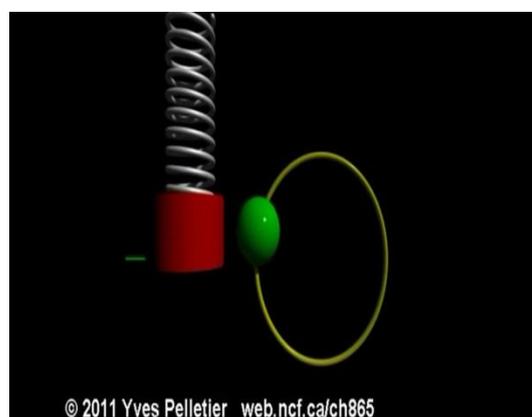
Logo após, apresentam-se dois vídeos (Figuras 2 e 3) com animações que mostram a relação do movimento circular uniforme com o movimento oscilatório da projeção do ponto no eixo horizontal. Na ocasião, será discutida a relação entre a posição angular do ponto em função da velocidade angular e do tempo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

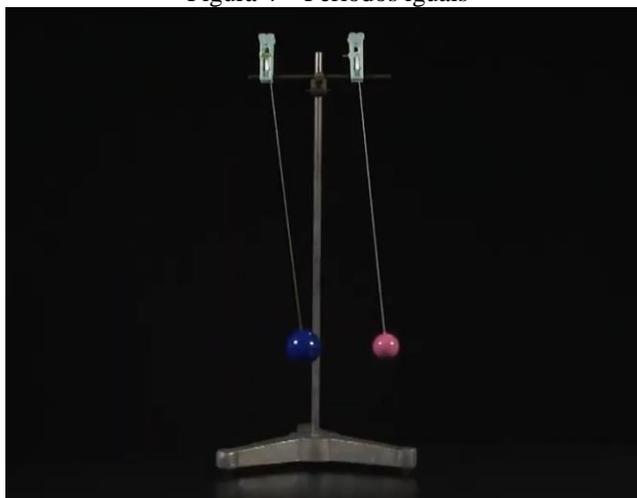


Fonte:

<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.

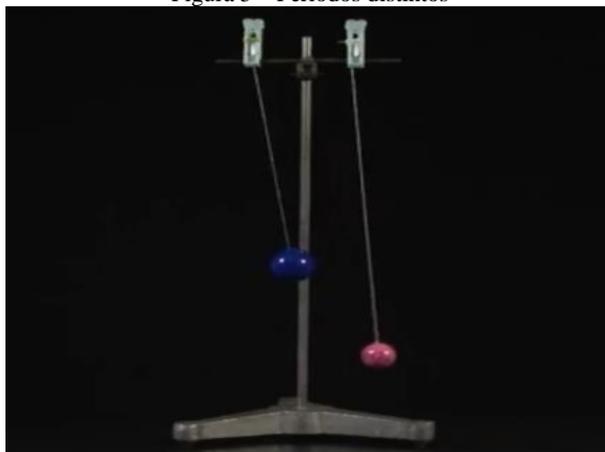
Figura 4 – Períodos iguais



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

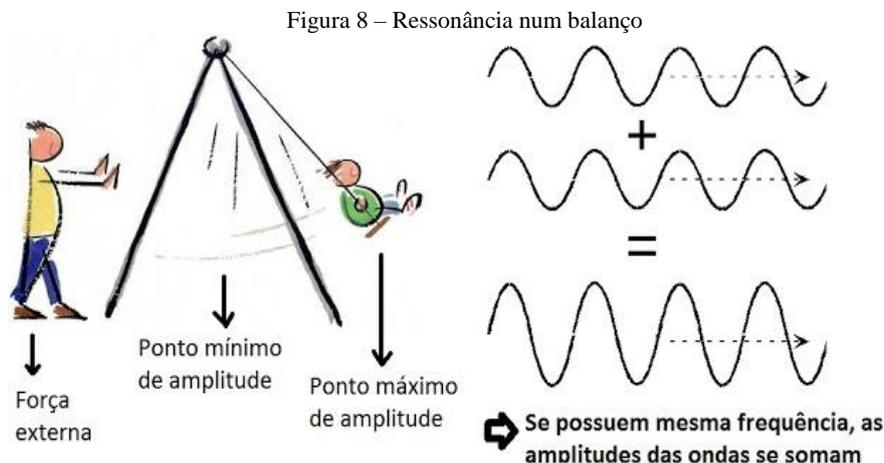


Fonte: Elaboração própria (2020).

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?”.



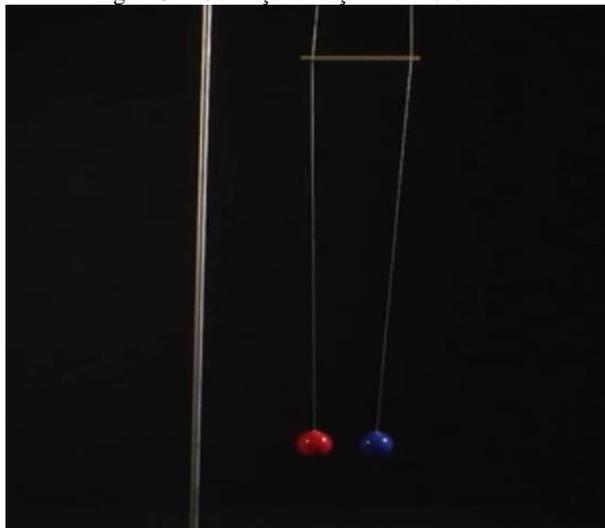
Fonte: [google.com.br/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fpir2.forumeiros.com%2Ft175583-questao-teorica-ressonancia-ou-interferencia](https://www.google.com.br/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fpir2.forumeiros.com%2Ft175583-questao-teorica-ressonancia-ou-interferencia).

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**

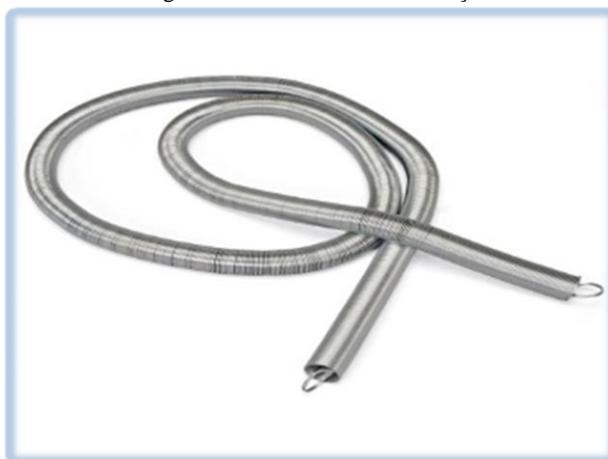
Dar início à atividade discorrendo sobre o tema a ser discutido na aula: o movimento ondulatório. Nesta primeira abordagem, enfatizar que neste encontro discutiremos as propriedades das ondas, como podem ser classificadas, bem como realizaremos demonstrações e montaremos um desenho experimental para 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

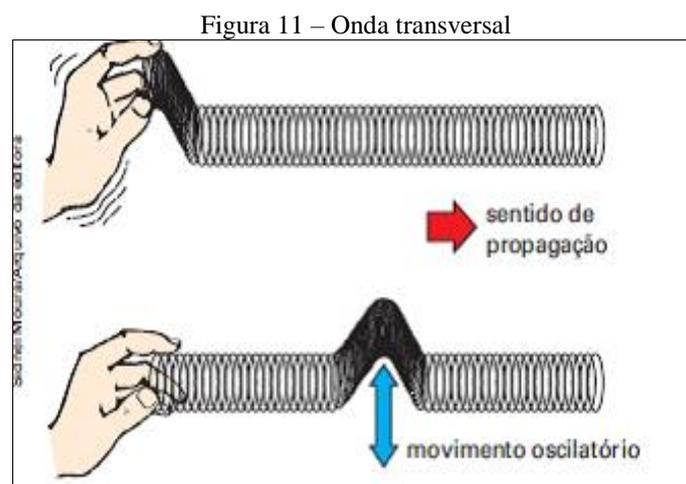


Fonte: Elaboração própria (2020).

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.

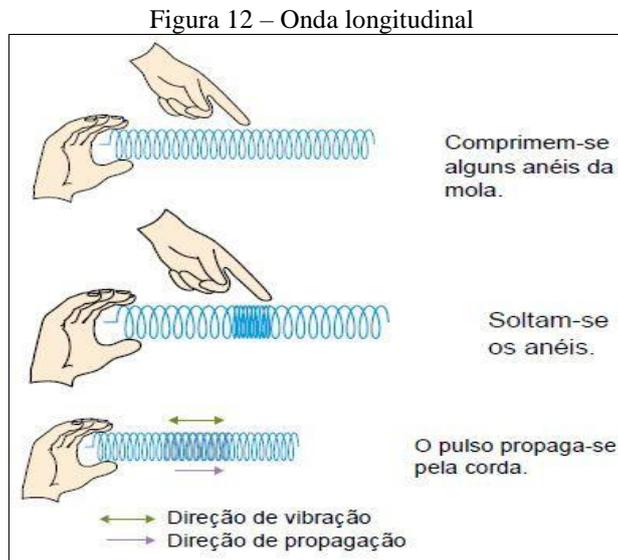
É comum que alguns questionamentos surjam por parte dos estudantes no que diz respeito ao não deslocamento de matéria pela onda, por exemplo: “Se a onda transporta energia sem haver transporte de matéria, por que o surfista se desloca na onda?”. A resposta está na diferença entre a forma das ondas que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



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.



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.

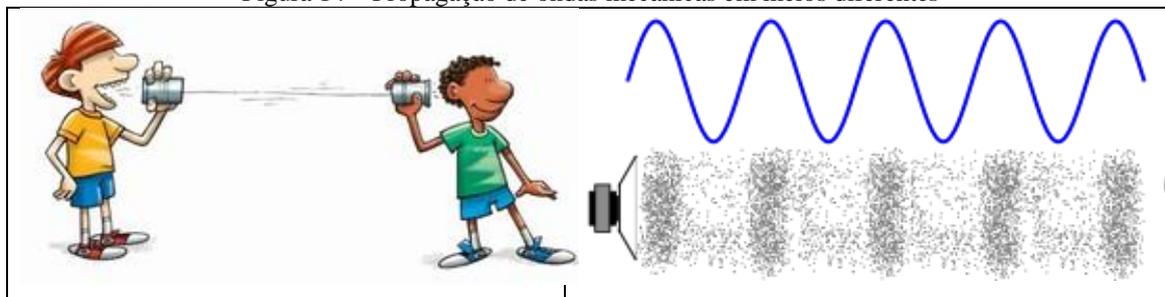
Figura 13 – Imagem do vídeo “Som no vácuo”



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

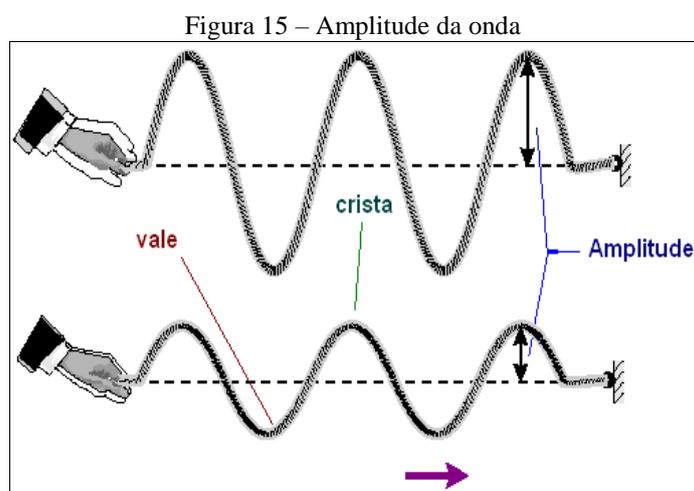


Fonte: <http://omundofisica.blogspot.com/2012/10/telefone-de-latinha.html> e [https://www.wikiwand.com/pt/Intensidade\\_acustica](https://www.wikiwand.com/pt/Intensidade_acustica)

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).

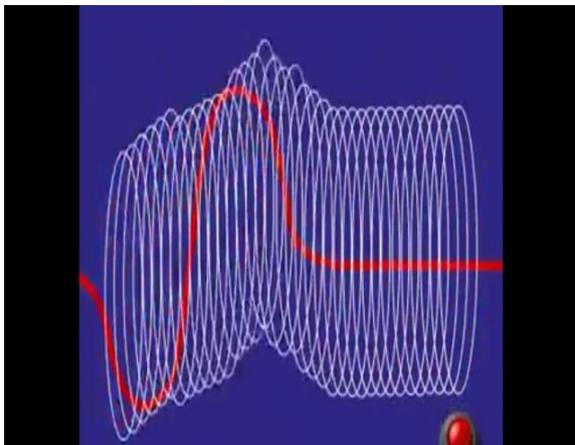


Fonte: [https://www.sobiologia.com.br/conteudos/oitava\\_serie/Ondas2.php](https://www.sobiologia.com.br/conteudos/oitava_serie/Ondas2.php)

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.

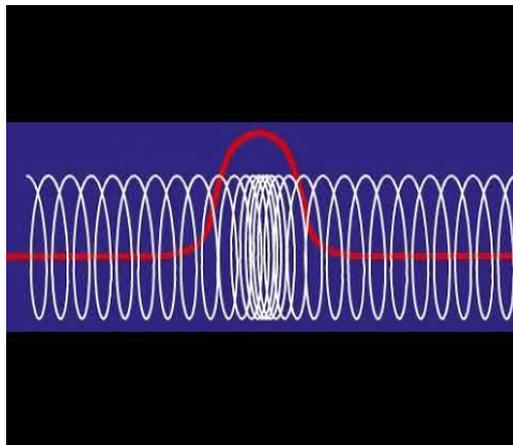
Figura 16 – Propagação de um pulso numa mola 1



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).

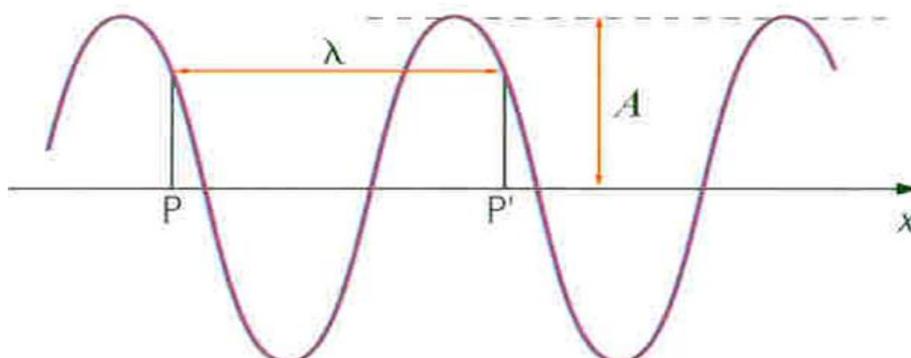
Figura 18 – Determinação da velocidade de propagação da onda



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

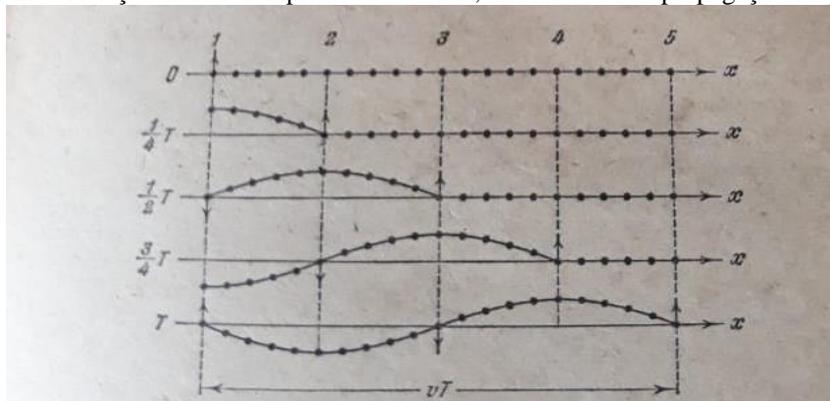


Fonte: <https://moodle.ufsc.br/mod/book/view.php?id=504285&chapterid=2667>.

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: Savelev, 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)

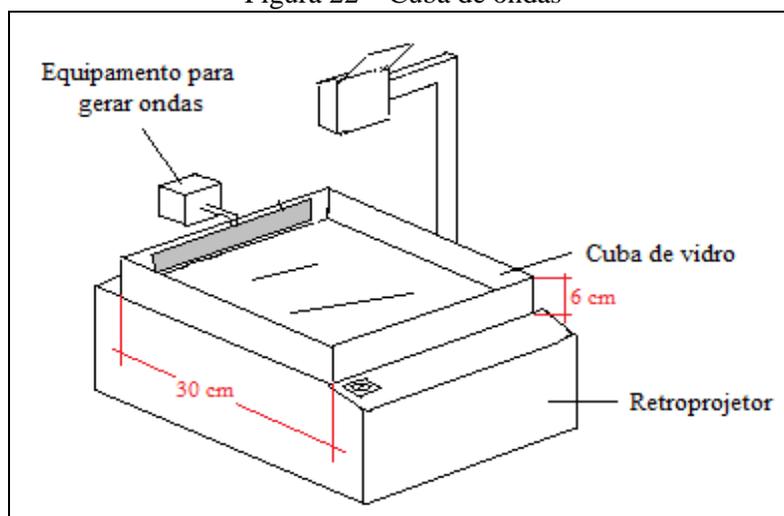
### Encontro 3 – Fenômenos ondulatórios: reflexão

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.

Figura 22 – Cuba de ondas



Fonte: Possobon (2016).

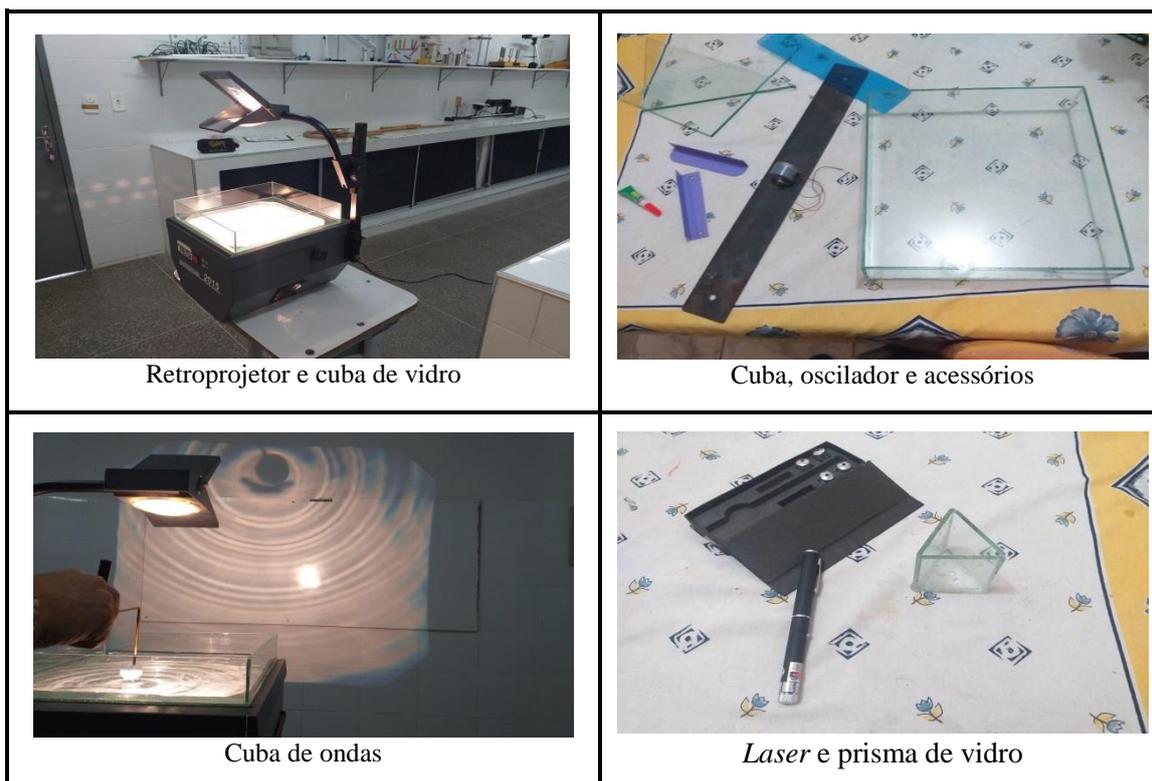
A cuba de ondas é formada por três elementos básicos: a cuba de vidro, onde se coloca o líquido, cujo fundo de vidro torna possível projetar as imagens das ondas num anteparo; o oscilador, responsável pela geração das ondas; e o retroprojetor, para uma melhor visualização dos fenômenos produzidos. Essas 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

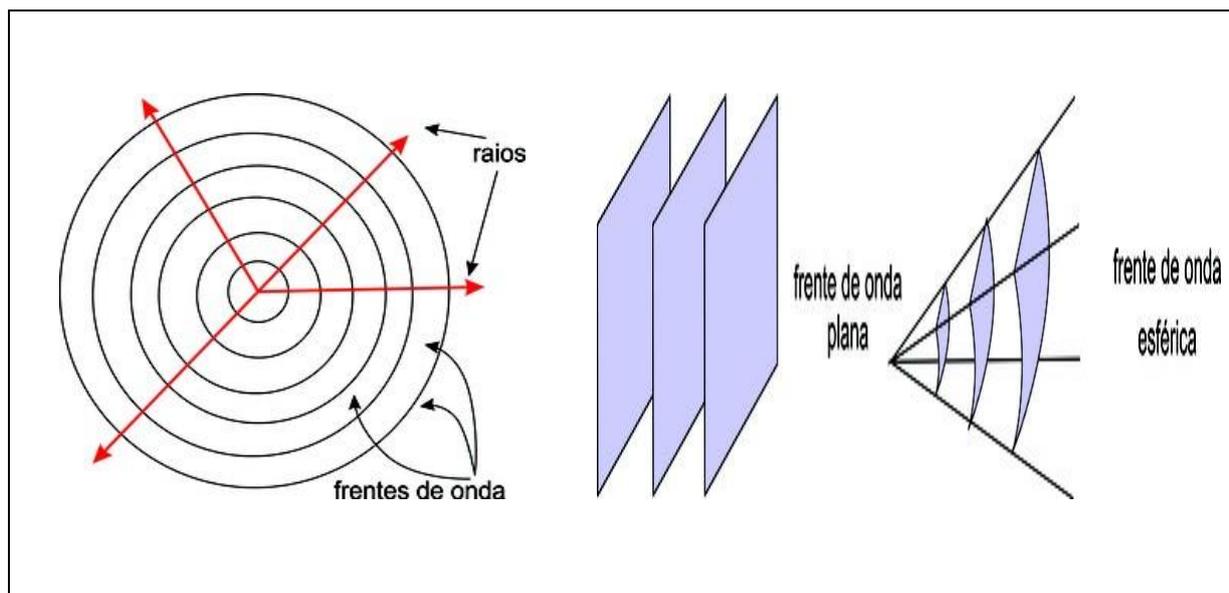


Fonte: Acervo do autor (2020).

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 ondas 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).

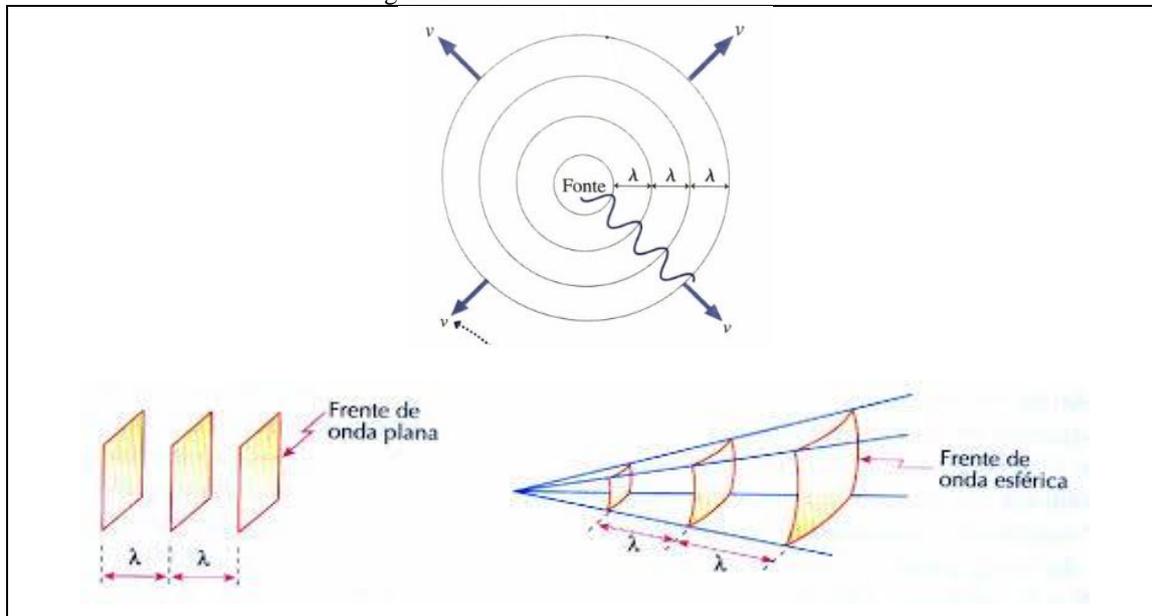
Figura 26 – Frentes de ondas retas



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).

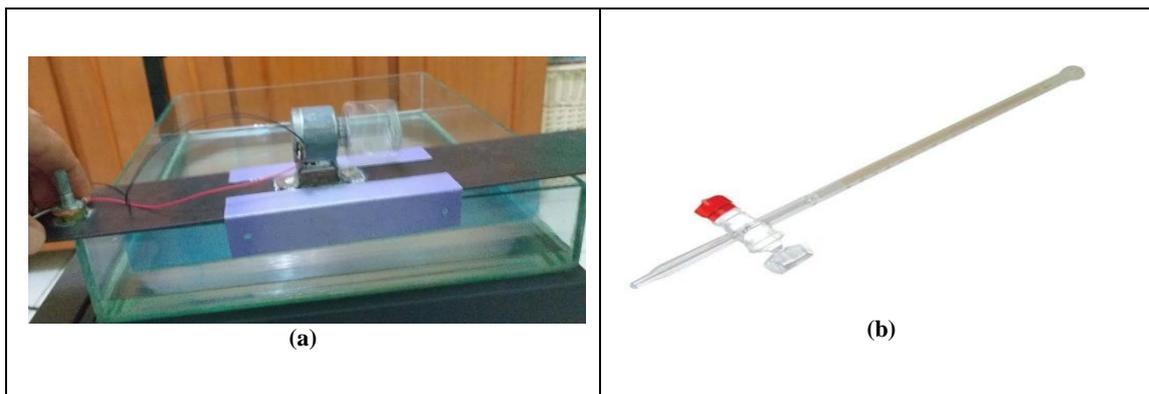
Figura 27 – Frente de onda e raio de onda



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

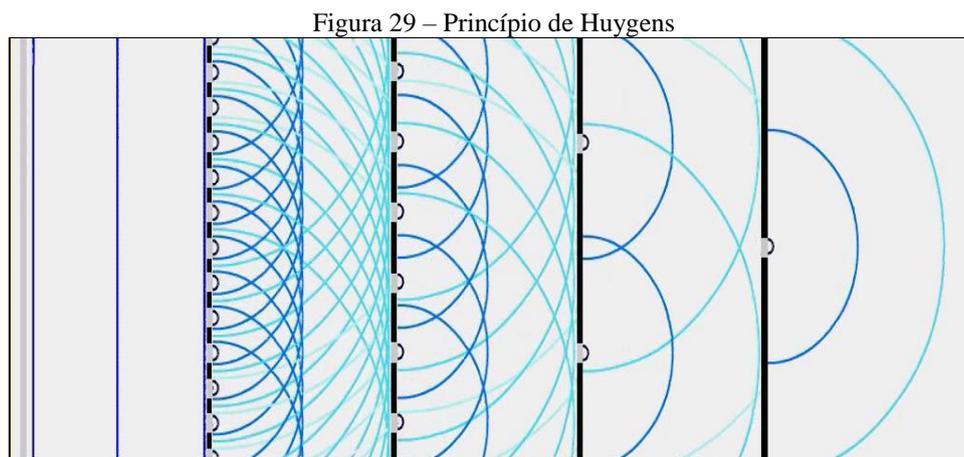
Uma segunda demonstração é realizada, por meio da qual se verifica a relação  $\lambda = vT$ . Com a haste plana acoplada ao motor com frequência ajustável (Figura 27a), ao mudar a frequência de vibração, percebe-se uma mudança no comprimento de onda. Na ocasião, os alunos serão convidados a explicar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

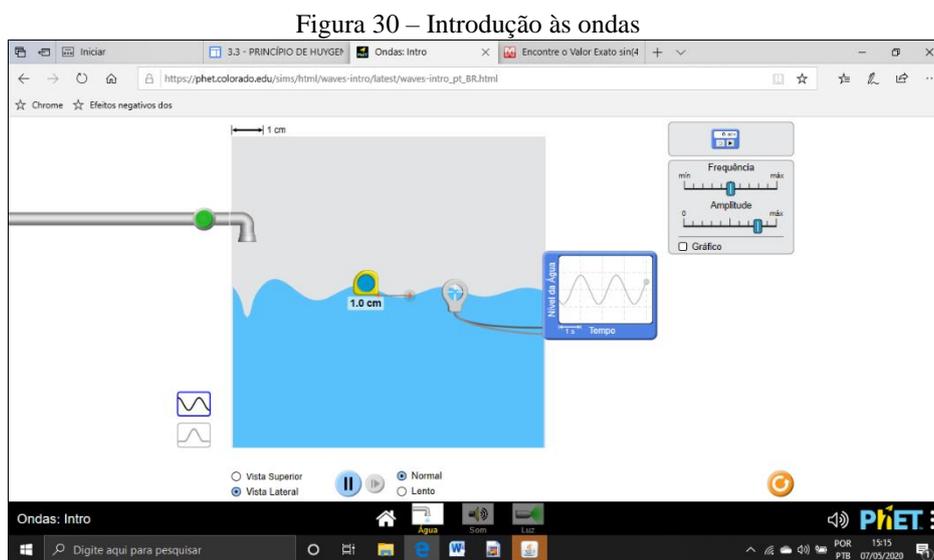


Fonte: [http://home.hiroshima-u.ac.jp/atoda/index\\_e.html](http://home.hiroshima-u.ac.jp/atoda/index_e.html).

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.

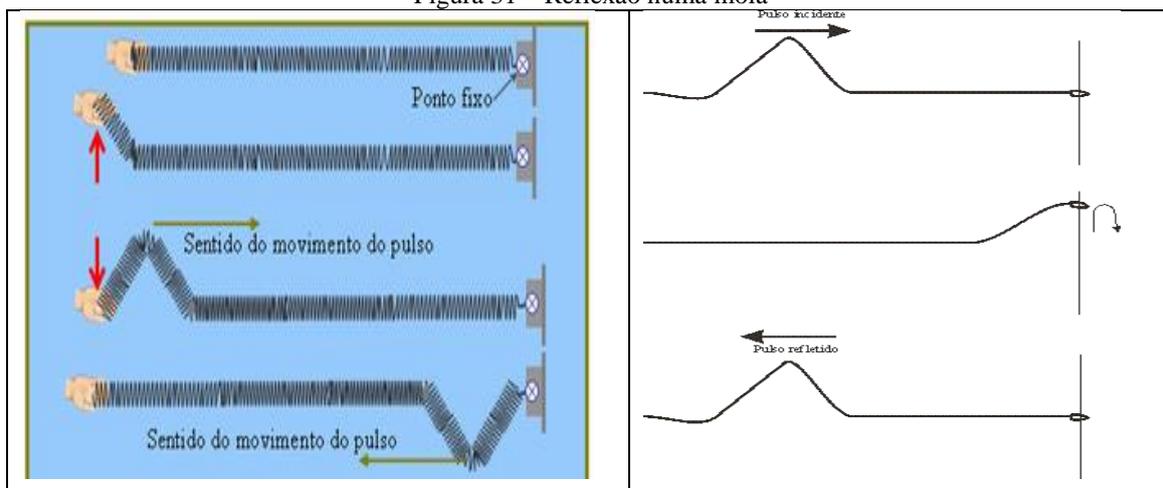


Fonte: <https://phet.colorado.edu/en/simulation/waves-intro>.

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).

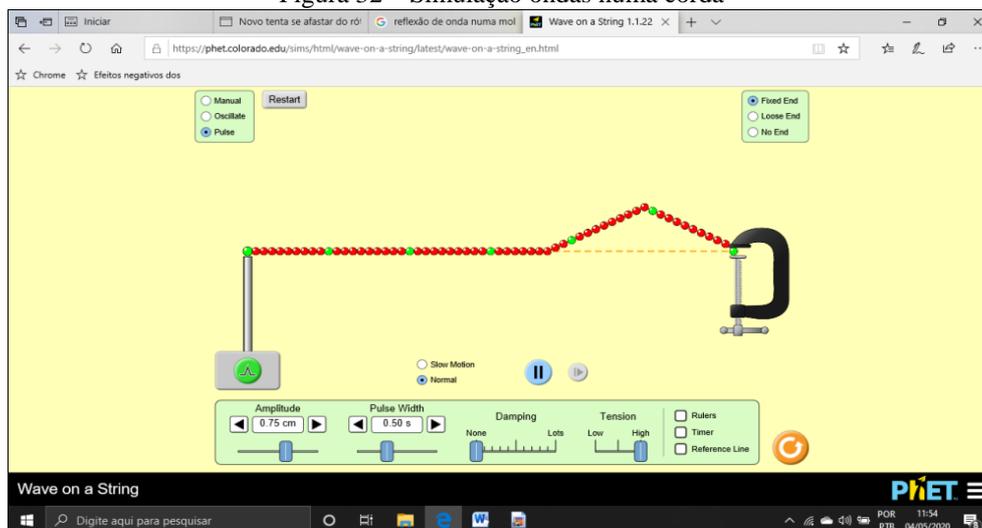
Figura 31 – Reflexão numa mola



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

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

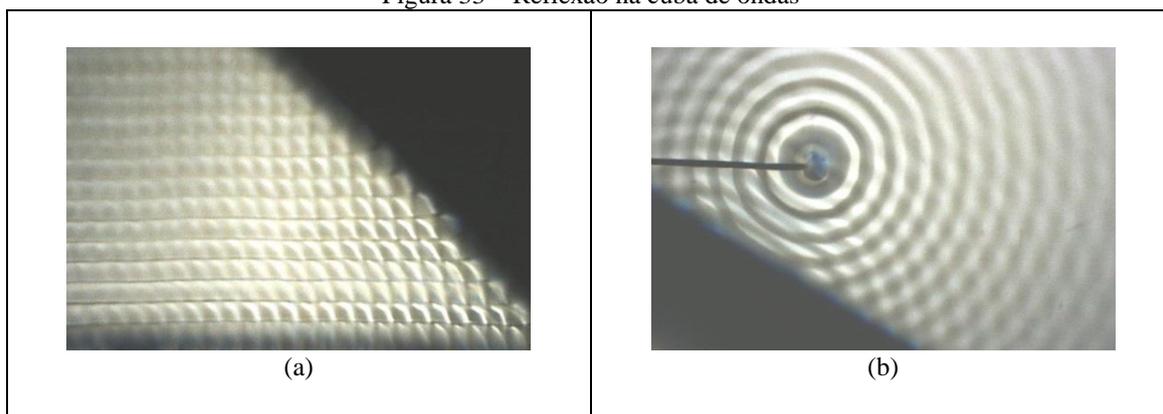
Figura 32 – Simulação ondas numa corda



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 triangular 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 da praia?”.

Figura 35 – Superfície de separação de meios

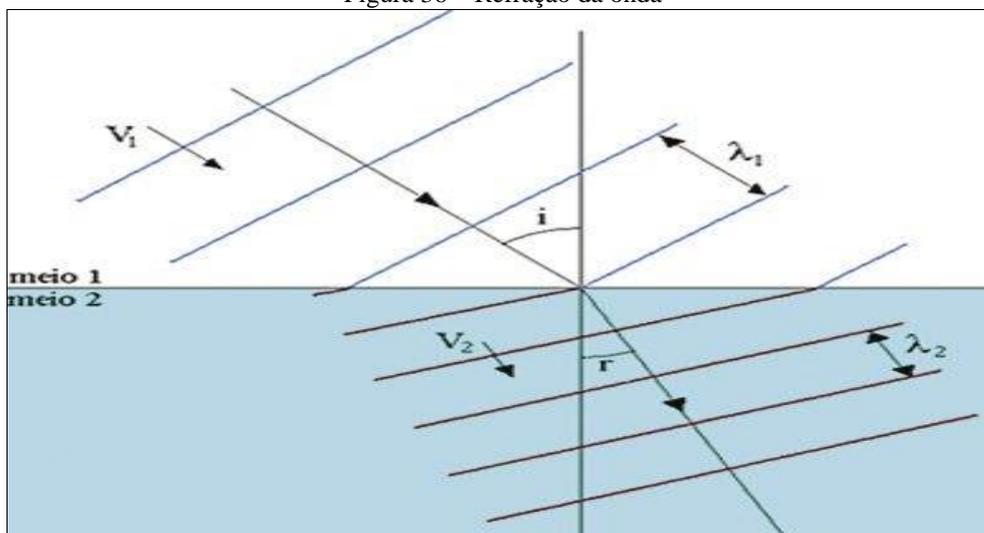


Fonte: <https://www.folhavitoria.com.br/esportes/blogs/corridaderua/2020/07/01/conheca-beneficios-de-correr-na-areia/>.

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



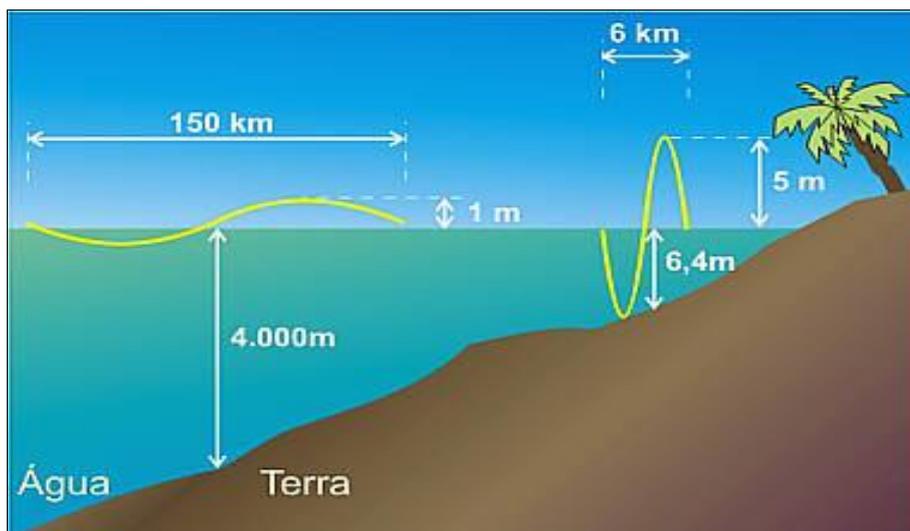
Fonte: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/refracao-ondas.htm>.

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.

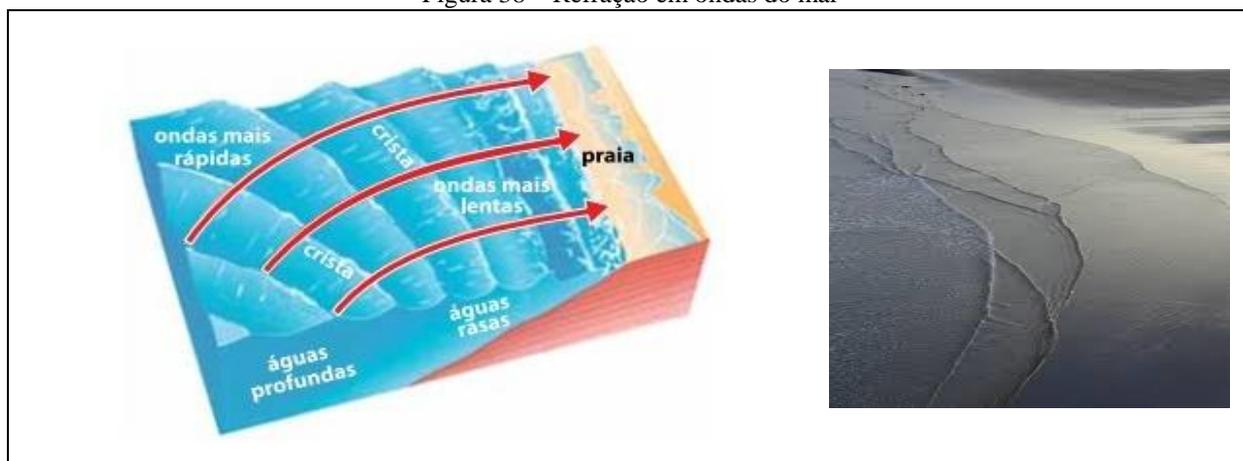
Figura 37 – Propagação das ondas na superfície líquida



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

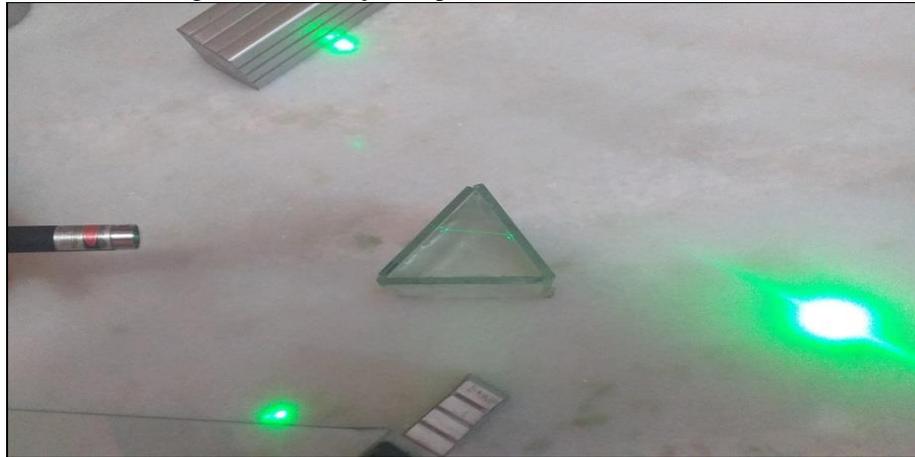


Fonte: <https://brainly.com.br/tarefa/13429549>.

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.

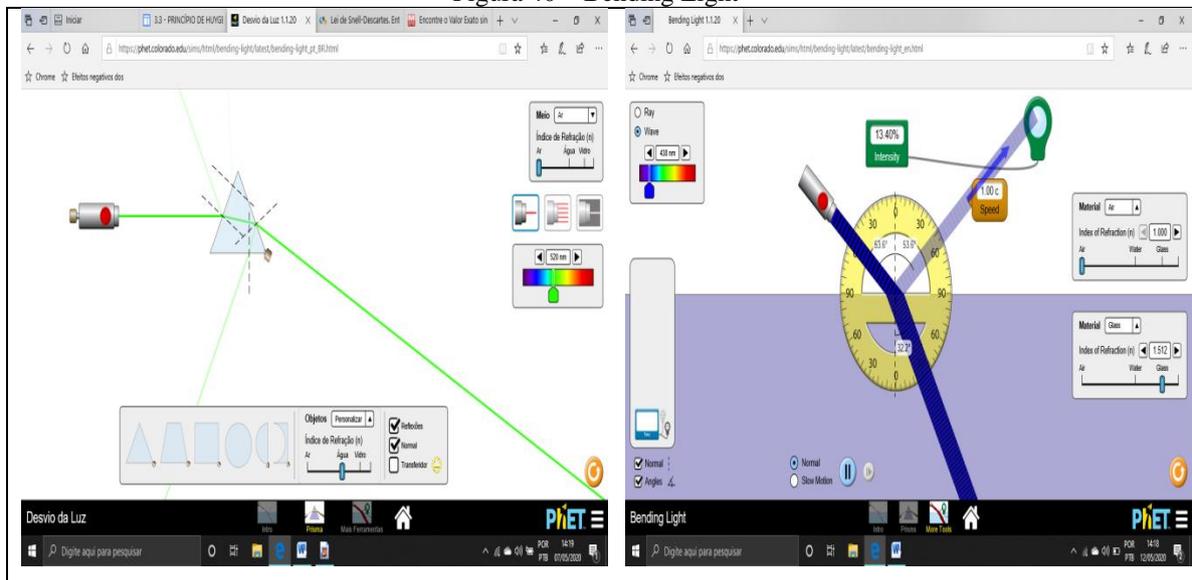
Figura 39 – Refração no prisma de vidro



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

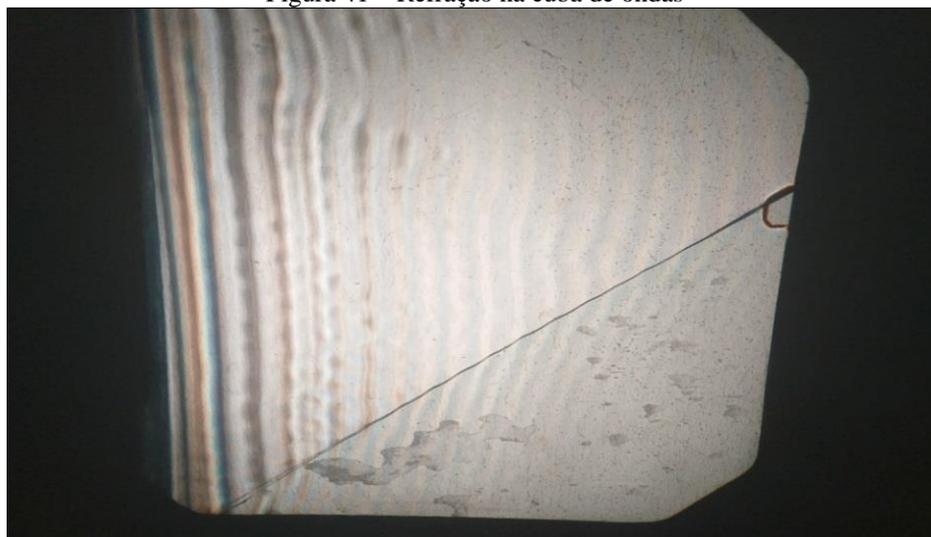


Fonte: <https://phet.colorado.edu/sims/html/bending-light/>.

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:

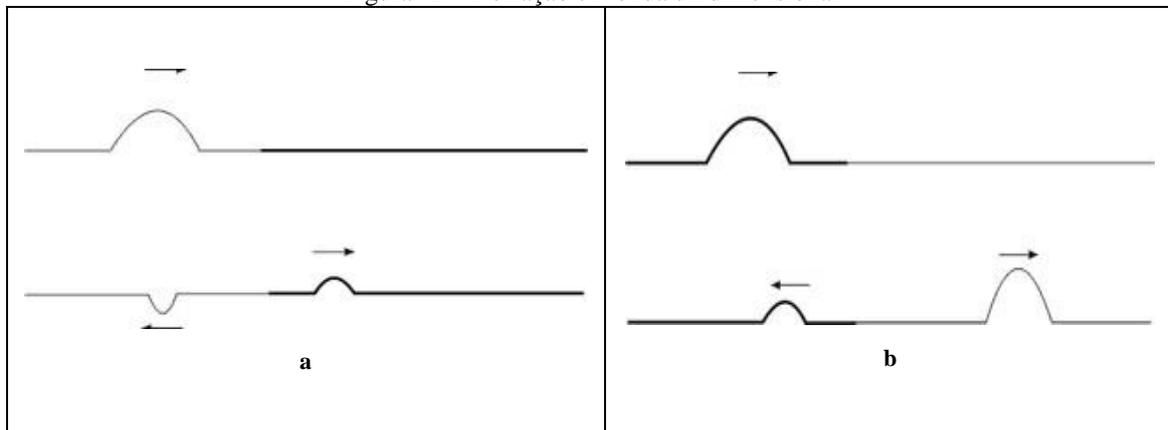
“O que ocorre com a onda ao passar pela região mais rasa, acima da placa de vidro triangular?”. Os estudantes devem responder, baseados na observação, que a onda plana e reta muda sua direção de propagação.

“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).

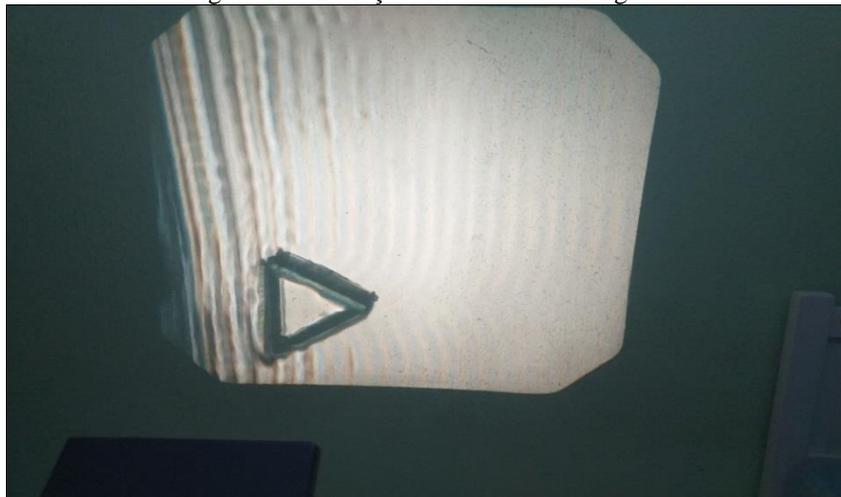
Após todas as considerações cabíveis sobre o fenômeno da refração, continuar a aula fazendo uso da cuba de ondas para apresentar o fenômeno da difração. Destacar que esse fenômeno, assim como a reflexão e a refração, é comum a todos os tipos de ondas. Destacar a importância do princípio de Huygens na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

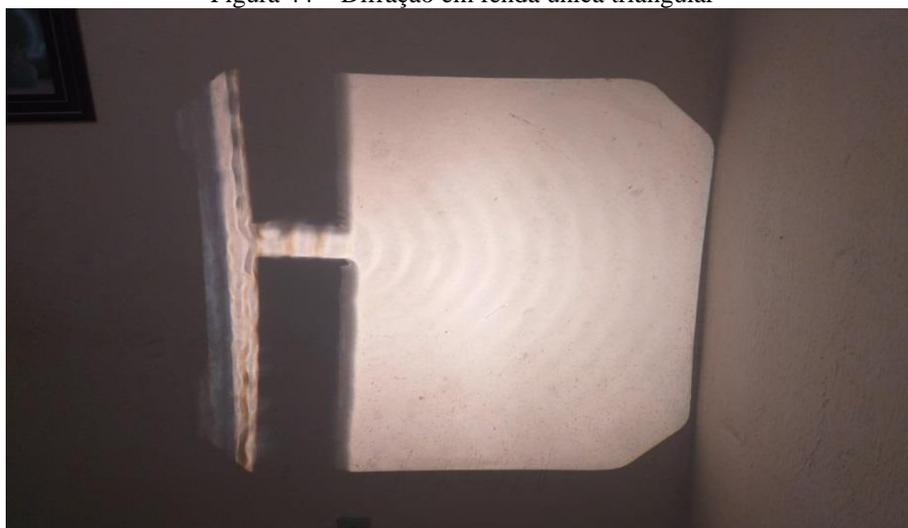
Figura 43 – Difração em obstáculo triangular



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



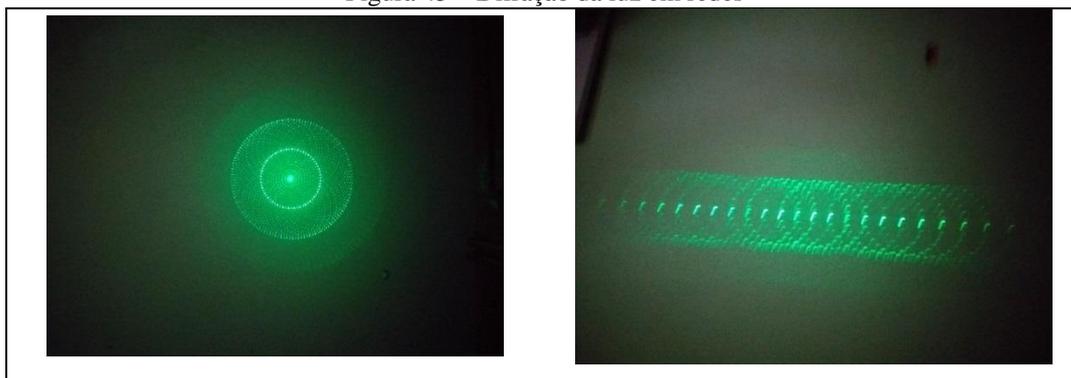
Fonte: Acervo do autor (2020).

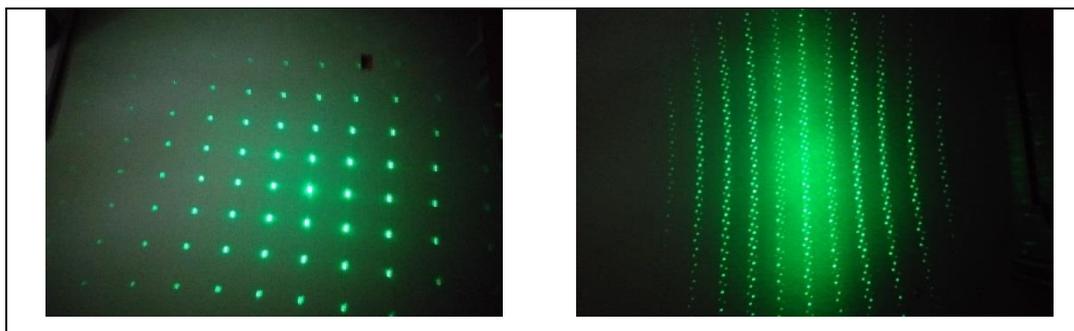
Nesse momento da atividade, pede-se aos estudantes para realizar o experimento utilizando fendas de larguras diferentes e observar os padrões de difração em cada caso. Destacar que, quando a largura da fenda aumenta, percebe-se uma diminuição do efeito da difração. Aproveitar a ocasião para falar da 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.



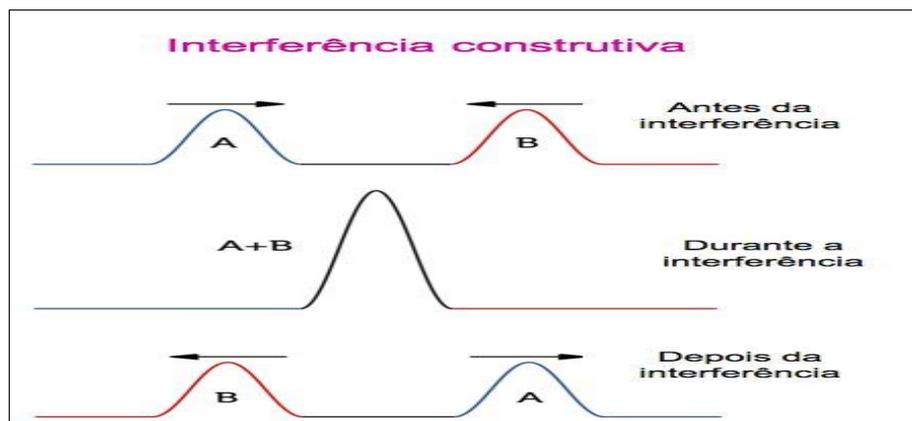
Fonte: Acervo do autor (2020).

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).

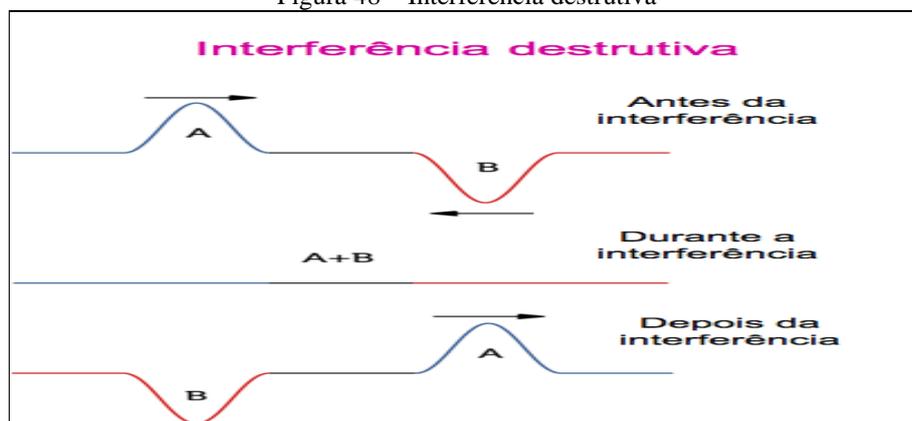
Explica-se que, quando duas ondas atingem um mesmo ponto do meio de propagação, cada uma delas atua sobre este sem experimentar influência de uma sobre a outra. Ou seja, cada onda atua sobre o meio da mesma forma que o faria sem a presença de outra onda. Os estudantes deverão ser convidados a produzir 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



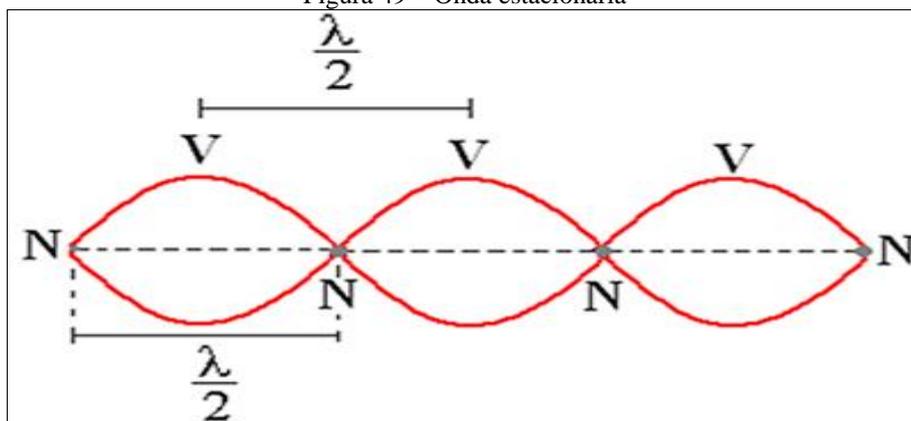
Fonte: [https://cdn.resumov.com.br/resumov/uploads/2017/11/img\\_5a0ebe72c2730.png](https://cdn.resumov.com.br/resumov/uploads/2017/11/img_5a0ebe72c2730.png).

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.

Figura 49 – Onda estacionária



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

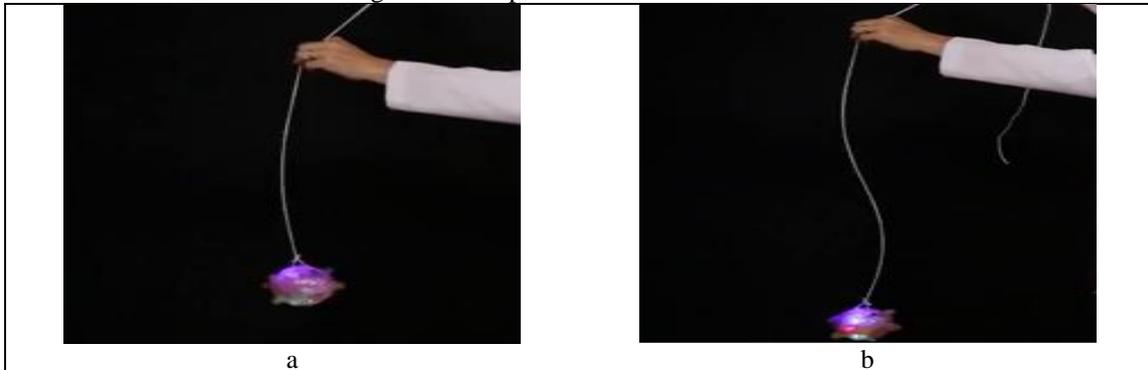


Fonte: Acervo do autor (2020).

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



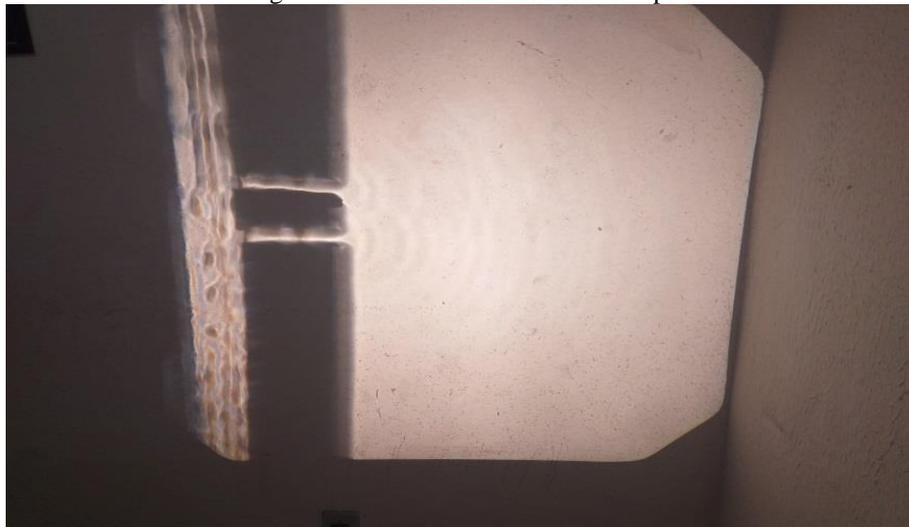
Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=1mpyq5dvpqxq>.

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).

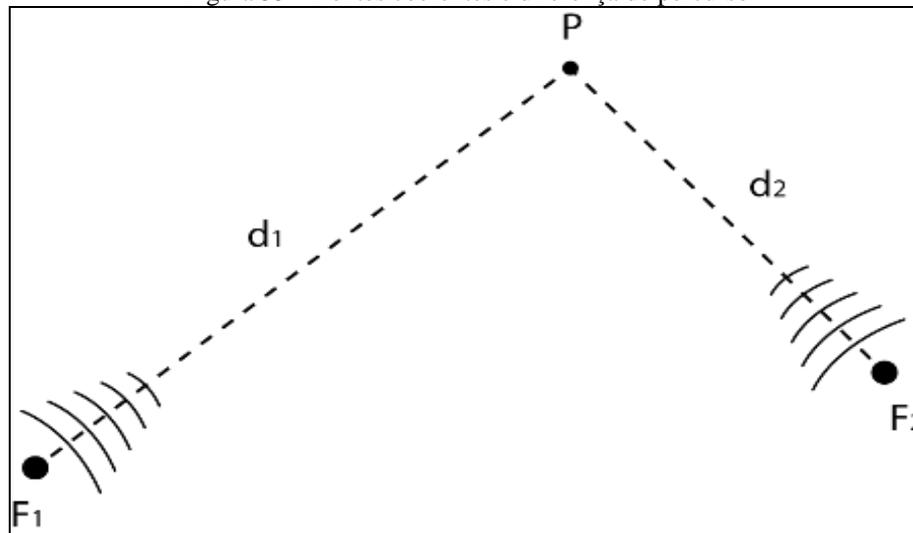
A partir da observação das imagens, questiona-se em quais pontos haverá interferência construtiva e em que pontos ocorrerá interferência destrutiva. Espera-se que os estudantes identifiquem nas imagens que estão sendo produzidas as linhas nodais como locais onde ocorre interferência destrutiva e as linhas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

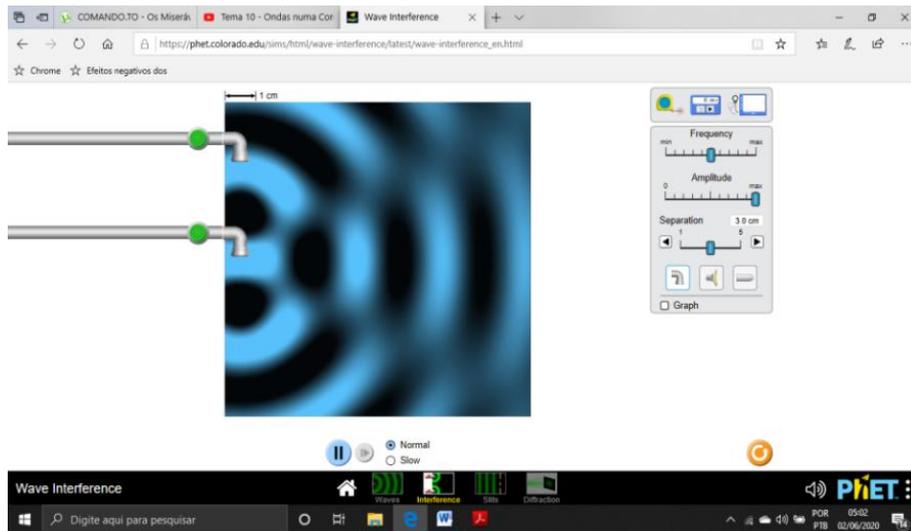


Fonte: Elaboração própria (2020).

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.

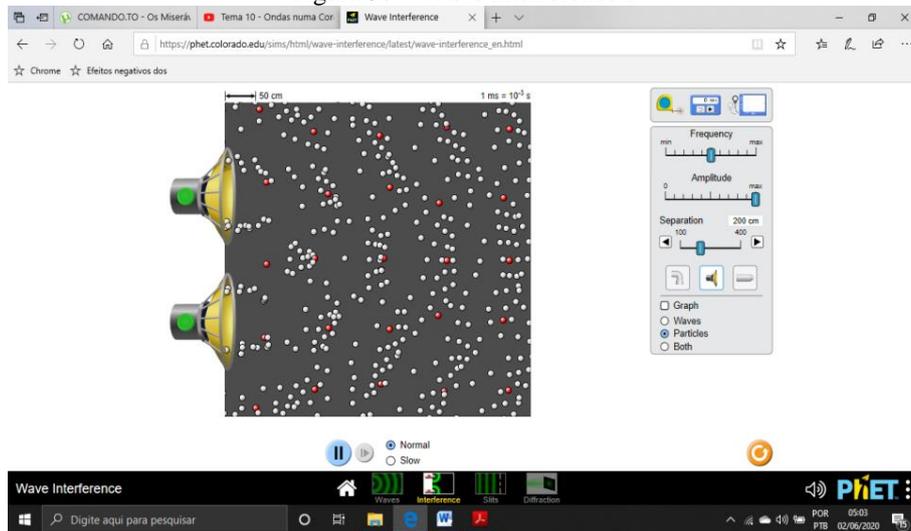
Finalizar a atividade apresentando uma simulação da plataforma Phet Interactive Simulations, denominada “*waves interference*”, na qual os discentes podem reproduzir os experimentos apresentados durante o encontro, assim como outros arranjos experimentais. Pede-se que os aprendizes modifiquem o meio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

Figura 56 – Wave interference 1



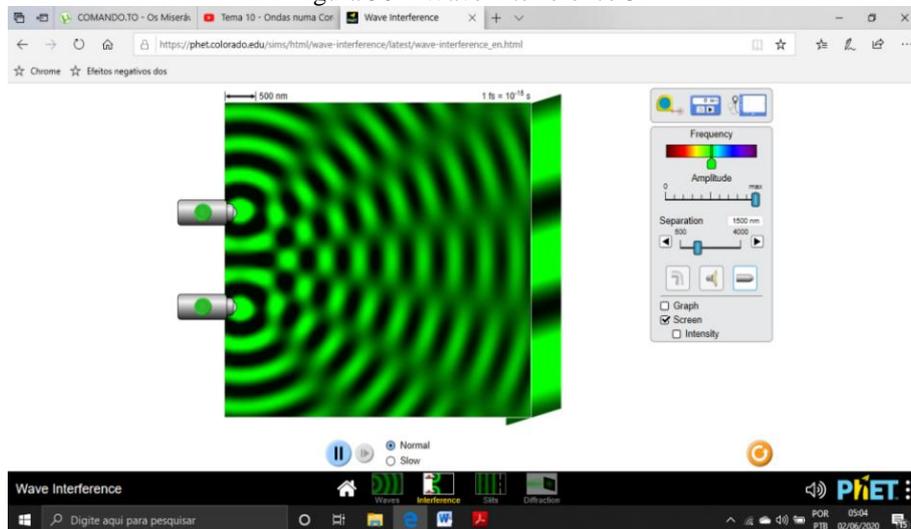
Fonte: Phet Interactive Simulations (2020).

Figura 57 – Wave interference 2



Fonte: Phet Interactive Simulations (2020).

Figura 58 – Wave interference 3



Fonte: Phet Interactive Simulations (2020).

## **Encontro 6 – Acústica**

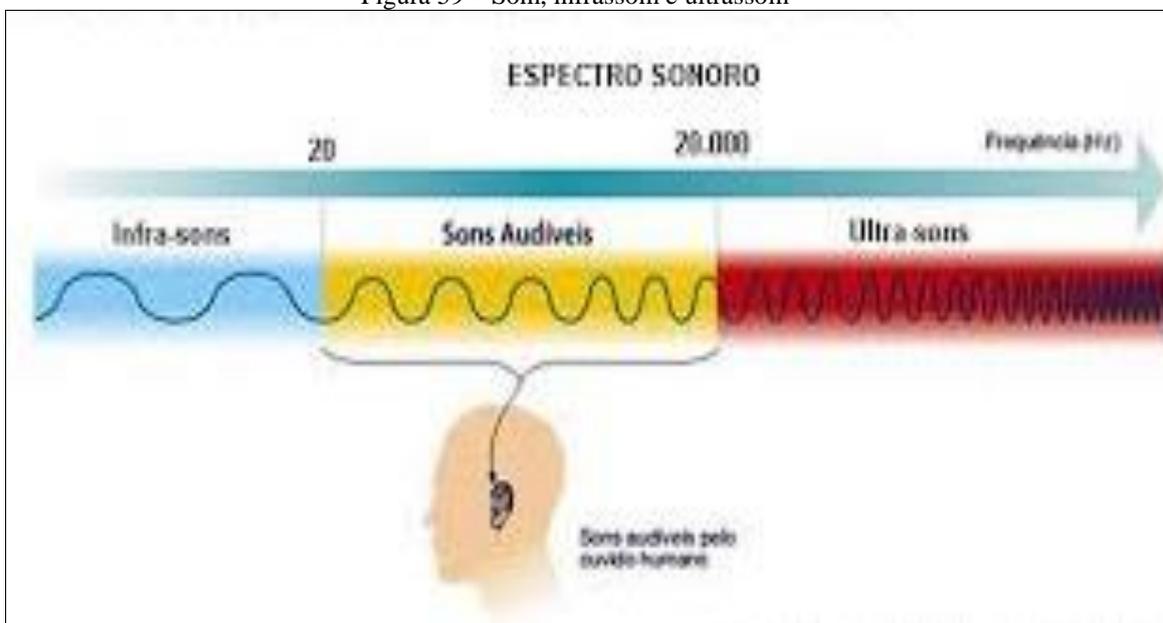
Para iniciar, devem-se apontar os conceitos que serão abordados durante as atividades a serem desenvolvidas. O estudo do movimento ondulatório será complementado com ênfase num assunto de grande importância prática: a acústica. Em acústica, estudam-se as fontes das ondas sonoras e os fenômenos ondulatórios 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.

Explicar que as ondas sonoras são ondas longitudinais em meios fluidos, tendo origem mecânica e, portanto, não se propagam no vácuo. Seguir na explicação 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

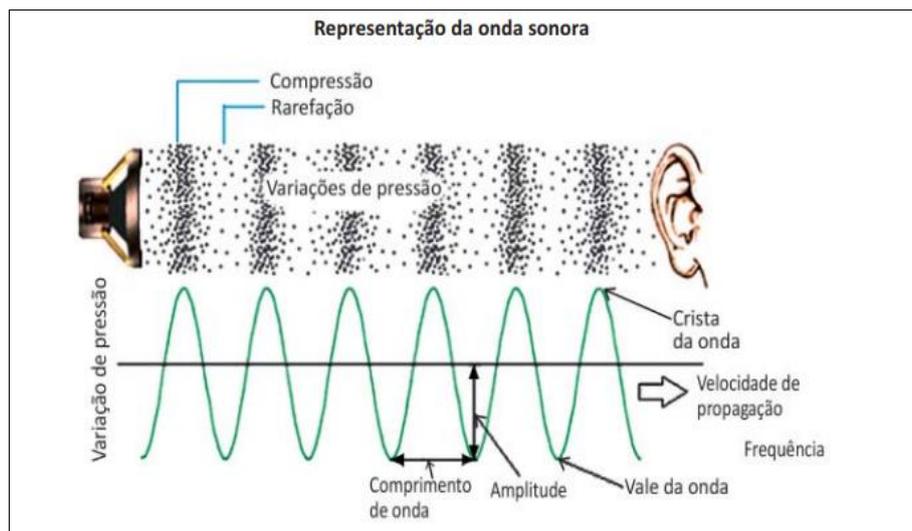


Fonte: [http://www.aulas-fisica-quimica.com/8f\\_07.html](http://www.aulas-fisica-quimica.com/8f_07.html).

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).

Figura 60 – Representação da onda sonora



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.

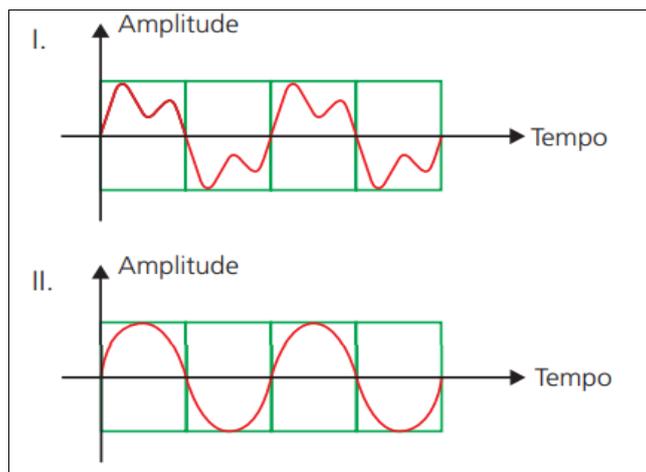
Figura 61 – Poluição sonora



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

Uma terceira característica do som é o timbre. Expõe-se 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.

Figura 62 – Timbre de instrumentos



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 conseqüentemente 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).

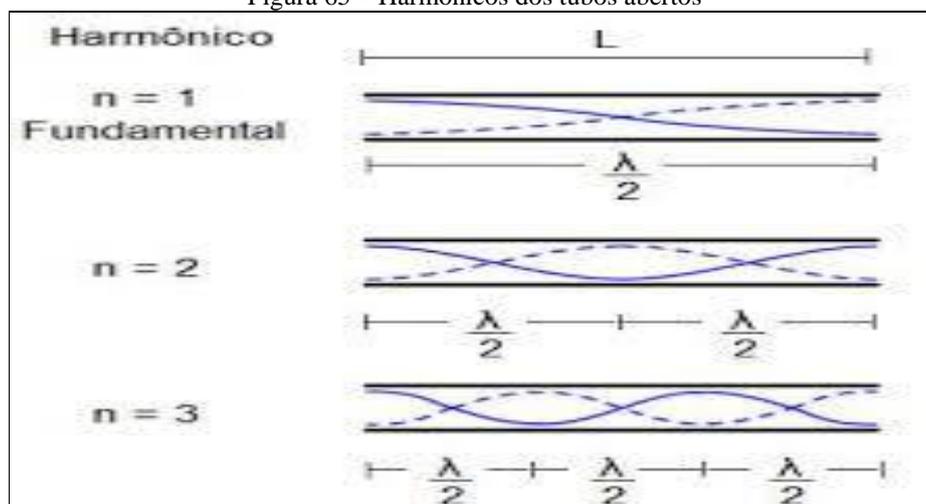
Continuar discorrendo sobre o processo de formação da onda sonora em cordas vibrantes e nos tubos sonoros. Dizer que essa onda se forma nas cordas vibrantes

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 ressoam 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)

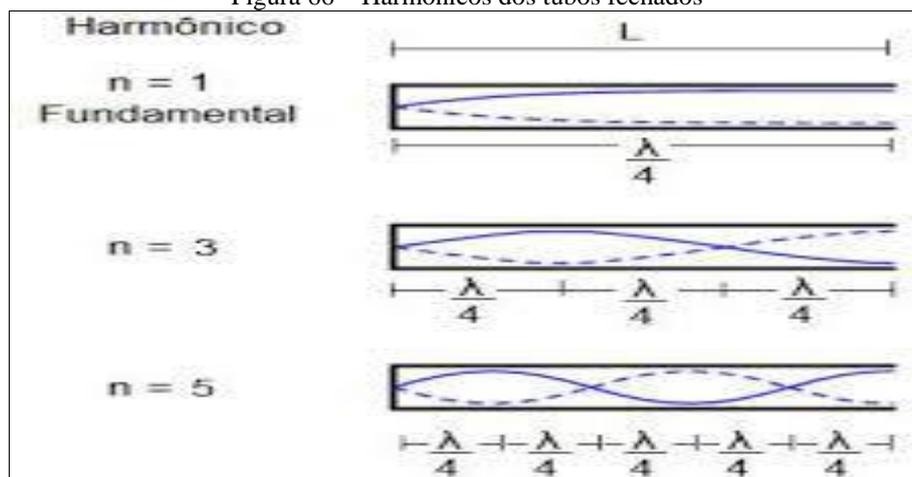
Generaliza-se, com auxílio da relação fundamental da ondulatória, que, para um harmônico de ordem  $N$  qualquer, obteremos a seguinte relação:

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

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:

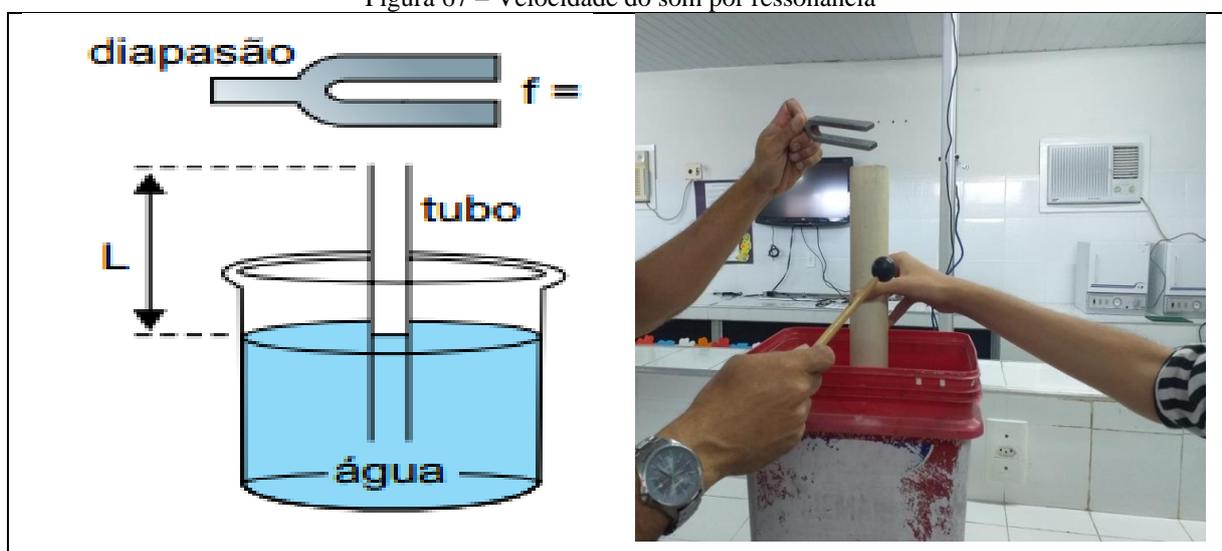
$$f = \frac{Nv}{4L} \quad (N = 1, 3, 5, \dots),$$

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 diapasão. 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 diapasão 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

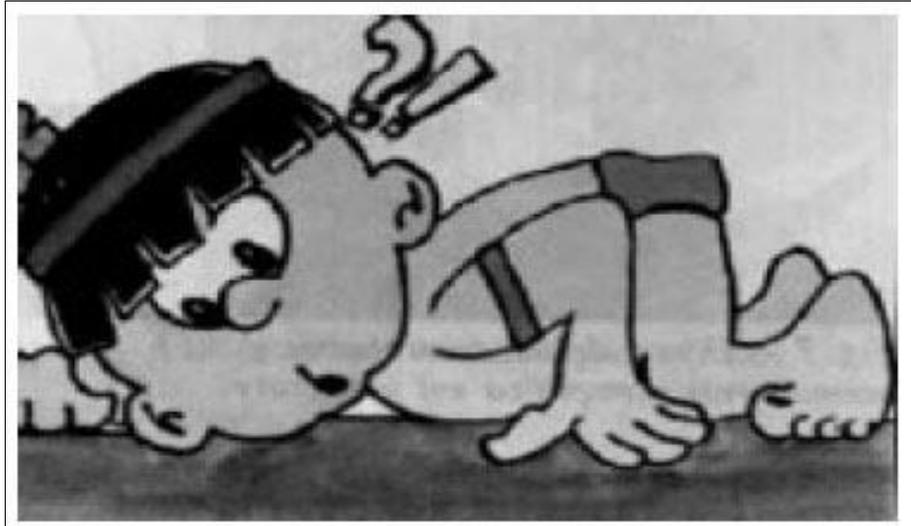


Fonte: Acervo do autor (2020).

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.