



TUBO DE RESSONÂNCIA DE BAIXO CUSTO EM UMA PERSPECTIVA NA TEORIA DE FORMAÇÃO DE AÇÕES MENTAIS POR ETAPAS DE GALPERIN

RANYLSON GOMES LEOCÁDIO

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

Orientador(es): Dr. Ijanílio Gabriel de Araújo

BOA VISTA-RR

2019

RANYLSON GOMES LEOCÁDIO

**TUBO DE RESSONÂNCIA DE BAIXO CUSTO EM UMA
PERSPECTIVA NA TEORIA DE FORMAÇÃO DE AÇÕES MENTAIS
POR ETAPAS DE GALPERIN**

Orientador: Dr. Ijanílio Gabriel de Araújo

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

Aprovada por:

Dr. Ijanílio Gabriel de Araújo

Dr. José Dilson da Silva Teixeira

Dr. Júlio Akashi Hernandez

Boa Vista-RR

2019

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na publicação (CIP)
Biblioteca Central da Universidade Federal de Roraima

L576t Leocádio, Ranylson Gomes.

Tubo de ressonância de baixo custo em uma perspectiva na teoria de formação de ações mentais por etapas de Galperin/ Ranylson Gomes Leocádio. – Boa Vista, 2019. 277 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Ijanílio Gabriel de Araújo.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Roraima, Programa de Pós-Graduação em Física.

1 - Ensino de física. 2 - Ondas. 3 - Comprimento de onda. 4 - Frequência. 5 - Ressonância. I - Título. II - Araújo, Ijanílio Gabriel de (orientador).

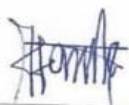
CDU - 537.86

RANYLSON GOMES LEOCADIO

**TUBO DE RESSONÂNCIA DE BAIXO CUSTO EM UMA
PERSPECTIVA NA TEORIA DE FORMAÇÃO DE AÇÕES MENTAIS
POR ETAPAS DE GALPERIN**

Dissertação submetida ao Mestrado Nacional Profissional em ensino de Física (MNPEF), polo 38 UFRR, como parte dos requisitos necessários à obtenção de título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovado em : 16 de agosto de 2019



Prof. Dr. Ijanílio Gabriel de Araújo (Orientador - UFRR)



Prof. Dr. Júlio Akashi Hernandes (Membro Externo - UFJF)



Prof. Dr. José Dilson da Silva Teixeira (Membro Interno – GER)

Dedico esta dissertação ao senhor nosso Deus, todo poderoso, que guiou a minha trajetória, não deixando desistir nos momentos difíceis. Aos meus pais Kátia Maria Leocadio e Waldeglacio Gomes Franco que proporcionaram todas as condições necessárias para que eu pudesse chegar no fim de mais uma etapa profissional. E a todos os professores que colaboraram com os seus ensinamentos para minha formação, em especial, aos professores de Física da Universidade Federal de Roraima

Agradecimentos

A Deus, o criador.

Aos meus pais, Kátia Maria Leocadio da Silva e Waldeglacio Gomes Franco que com muito esforço passaram a educação necessária para que eu traçasse meus próprios caminhos na vida acadêmica, além de bancar todos os gastos dessa jornada.

A minha esposa Sâmara da Silva Nazareno, que me deu suporte durante essa jornada.

A minha filha Halana Nazareno Leocadio fonte de inspiração na formação profissional.

Aos meus irmãos, e em especial ao cunhado Davi Farias.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Ao Polo 38 – UFRR do MNPEF por proporcionar a realização do curso.

Aos professores do Polo 38 – UFRR pela oportunidade de discutir o ensino profissional em Física.

Aos colegas discentes do Polo 38 – UFRR pelo convívio e estudo de disciplinas do curso.

Às escolas participantes do Projeto pela oportunidade de executar e realizar ações propostas.

Ao professor orientador Dr. Ijanílio Gabriel de Araújo (UFRR).

Ao professor Prof. Dr. Oscar Delgado Tintorer – (UERR, Polo 38-UFRR-MNPEF-SBF), pelos ensinamentos em teorias de aprendizagem e discussão de Física.

RESUMO

A Dissertação tem como proposta um produto educacional, para auxiliar o professor na sala de aula, no estudo de ondas estacionárias em um tubo com uma extremidade aberta, a fim de compreender conceitos físicos elementares, e fenômenos físicos como compressão e rarefação, comprimento de onda, velocidade de propagação de onda e outros conceitos envolvidos, relacionar propriedades, e observar conceitos e fenômenos correlacionados, além de elucidar onde o fenômeno de onda sonora é mais frequente no cotidiano, como exemplo em instrumentos musicais, equipamentos em medicina, telecomunicações e outros. O experimento proposto na Dissertação é baseado no protótipo de dispositivo produzido pela empresa Pasco, com o registro (registro *economy resonance tube wa-9495*), uma versão industrializada de fácil manuseio. O experimento alternativo consiste em um tubo com uma extremidade aberta e outra fechada, em um mecanismo que possibilita a variação do comprimento do tubo por meio de um pistão no interior do tubo, permitindo identificar o comprimento de onda de cada modo de vibração, percebendo conceitos elementares característicos de onda, como comprimento de onda e frequência, e também, explorar fenômenos como exemplo ressonância, compressão e rarefação.

Palavras-chave: Ensino de Física, ondas, comprimento de onda, frequência, ressonância.

ABSTRACT

The dissertation proposes an educational product, to assist the teacher in the classroom, to study stationary waves in a tube with an open end, in order to understand elementary physical concepts, and physical phenomena such as compression and rarefaction, wavelength, speed of wave propagation and other concepts involved, to relate properties, and to observe concepts and correlated phenomena, besides elucidating where the phenomenon of sound wave is more frequent in daily life, as an example in musical instruments, medical equipment, telecommunications and others. The experiment proposed in the Dissertation is based on the prototype device produced by Pasco, with the record (economy resonance tube wa-9495), an industrialized version of easy handling. The alternative experiment consists of a tube with one open end and the other closed, in a mechanism that allows the variation of tube length by means of a piston inside the tube, allowing to identify the wavelength of each mode of vibration, perceiving concepts characteristic element of wave, such as wavelength and frequency, and also, to explore phenomena such as resonance, compression and rarefaction.

Keywords: Physics Teaching, waves, wavelength, frequency, resonance.

LISTA DE FIGURA

Figura 1 - Onda longitudinal.....	38
Figura 2 - Onda transversal.....	39
Figura 3 - Duração de propagação de uma onda ou de uma sucessão de pulsos em uma corda.....	40
Figura 4 - Onda eletromagnética.....	41
Figura 5 - Onda resultante.....	41
Figura 6 - Característica de ondas periódicas.....	42
Figura 7 - Amplitude.....	43
Figura 8 - Analisando um ponto de referência.....	44
Figura 9 - Acompanhando as oscilações em três pontos da corda.....	46
Figura 10 - Segmento de corda em equilíbrio	54
Figura 11 - Onda tridimensional se propagando.....	56
Figura 12 - Reflexão de um pulso na corda.....	57
Figura 13 - Reflexão de um pulso na corda com inversão de fase.....	58
Figura 14 - Refração de um pulso na corda (situação 1).....	58
Figura 15 - Refração de um pulso na corda (situação 2).....	59
Figura 16 - Refração de onda bidimensional.....	60
Figura 17 - Resultante de vetores girante.....	61
Figura 18 - Princípio da superposição.....	62
Figura 19 - Perfis instantâneos da onda.....	66
Figura 20 - Aspecto visual de onda estacionária.....	67
Figura 21 - Ondas estacionárias.....	68
Figura 22 - Onda estacionária na corda.....	70
Figura 23 - Ondas sonoras.....	72
Figura 24 - Espectro sonoro.....	73
Figura 25 - Eco.....	74

Figura 26 - Ciclo de deslocamento do som.....	75
Figura 27 - Variação de volume.....	79
Figura 28 - Ondas estacionárias no tubo de extremidades abertas.....	84
Figura 29 - Tubo com uma extremidade fechada.....	85
Figura 30 - Tubo de ressonância de baixo custo.....	87
Figura 31 - Modelo alternativo do tubo de ressonância	87
Figura 32 - Ilustração do tubo de ressonância.....	89
Figura 33 - Fluxograma referente à metodologia.....	92
Figura 34 - Aula teórica na Escola A ,.....	94
Figura 35 - Aula teórica Escola B.....	94
Figura 36 - Aplicação do Questionário 1 Pré - intervenção.....	95
Figura 37 - Aplicação do produto.....	96
Figura 38 - Aplicação do Questionário 1 Pós - intervenção.....	97
Figura 39 - Valores encontrados experimentalmente da velocidade do som/ aluno A.....	100
Figura 40 - Valores encontrados experimentalmente da velocidade do som/aluno B.....	100
Figura 41 - Dados experimentais do tubo der ressonância de baixo custo/ professor	101
Figura 42 - Resposta correta pergunta1.....	102
Figura 43 - Resposta incorreta pergunta 1	103
Figura 44 - Resposta correta pergunta 2.....	106
Figura 45 - Resposta incorreta pergunta 2.....	106
Figura 46 - Resposta correta pergunta 3.....	108
Figura 47 - Resposta incorreta pergunta 3.....	108
Figura 48 - Ilustração de sugestão de atividade.....	110

Figura 49 - Resposta correta pergunta 4.....	111
Figura 50 - Resposta incorreta pergunta 4.....	112
Figura 51 - Resposta correta pergunta 5.....	114
Figura 52 - Resposta incorreta pergunta 5.....	115
Figura 53 - Resposta correta pergunta 6.....	117
Figura 54 - Resposta incorreta pergunta 6.....	117
Figura 55 - Resposta correta pergunta 7.....	119
Figura 56 - Resposta incorreta pergunta 7.....	119
Figura 57 - Resposta correta pergunta 8.....	122
Figura 58 - Resposta incorreta pergunta 8.....	122
Figura 59 - Resposta correta pergunta 9	123
Figura 60 - Resposta incorreta pergunta 9.....	125
Figura 61 - Esbolço dos 4 primeiros modo de vibração.....	127
Figura 62 - Resposta considerada correta pergunta 10.....	127
Figura 63 - Resposta incorreta pergunta 10	128
Figura 64 - Justificativa para opção sim.....	133
Figura 65 - Justificativa para opção não.....	133

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Primeira derivada de $\ln$ em um ponto.....51

Tabela 2 - Segunda derivada de $\ln$ em um ponto.....52

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 JUSTIFICATIVA	18
1.2 OBJETIVO GERAL.....	21
1.2.1 Objetivos específicos.....	21
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 EXPERIMENTAÇÃO NO ENSINO DE FÍSICA.....	23
2.2 A PRÁTICA EXPERIMENTAL NO ESTUDO DE ONDAS.....	25
3 TEORIA DE FORMAÇÃO DAS AÇÕES MENTAIS POR ETAPAS DE GALPERIN.....	26
3.1 ETAPA MOTIVACIONAL.....	29
3.2 DESENVOLVIMENTO DA BASE ORIENTADORA DE AÇÃO.....	30
3.3 ETAPA DE FORMAÇÃO DA AÇÃO DO PLANO MATERIAL OU MATERIALIZADO	32
3.4 ETAPA DE FORMAÇÃO DA AÇÃO NO PLANO DA LINGUAGEM EXTERNA	33
3.5 ETAPA MENTAL.....	34
4. ONDAS.....	36
4.1 CONCEITO DE ONDA	36
4.2 CLASSIFICAÇÃO DE ONDAS	36
4.2.1 Quanto à natureza.....	37
4.2.1.1 Ondas mecânicas	37
4.2.1.2 Ondas eletromagnéticas.....	37
4.2.1.3 Teste de detecção de onda gravitacional.....	37

4.2.2 Quanto à dimensão de propagação	38
4.2.3 Referente à direção de propagação e de perturbação.....	38
4.2.3.1 Onda longitudinal.....	38
4.2.3.2 Onda transversal.....	39
4.2.3.2.1 Observação.....	39
4.2.3.2.2 Um exemplo em destaque - Onda eletromagnética.....	40
4.3 CARACTERÍSTICAS DE ONDAS PERIÓDICAS.....	42
4.3.1 Função de onda de uma onda senoidal.....	45
4.4 EQUAÇÃO DE ONDA UNIDIMENSIONAL.....	50
4.4.1 Nota sobre derivada.....	50
4.4.2 Equação de onda unidimensional.....	52
4.5 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DAS CORDAS VIBRANTES...53	53
4.6 INTENSIDADE DE UMA ONDA.....	55
4.7 REFLEXÃO E REFRAÇÃO.....	57
4.8 PRINCÍPIO DA SUPERPOSIÇÃO – INTERFERÊNCIA.....	61
4.9 ONDAS ESTACIONÁRIAS.....	67
4.9.1 Ondas estacionárias em instrumento de corda.....	70
4.9.2 Um destaque relevante de aplicação em física quântica.....	71
5. ONDAS SONORAS.....	72
5.1 RELAÇÃO DE DENSIDADE – PRESSÃO.....	75
5.2 RELAÇÃO DESLOCAMENTO E DENSIDADE.....	79
5.3 RELAÇÃO DE PRESSÃO E DESLOCAMENTO.....	80
5.4 A VELOCIDADE DO SOM.....	81
5.4.1 VELOCIDADE DO SOM EM GASES.....	81
5.4.2 Velocidade do som na água	82
5.5 Tubos Sonoros.....	83
5.5.1 Tubos de Extremidades Aberta.....	83

5.5.2	Tubo com uma Extremidade Fechada.....	84
6	PRODUTO EDUCACIONAL.....	86
6.1	MATERIAIS E MONTAGEM	87
6.2	FÍSICA NO TUBO DE RESSONÂNCIA DE BAIXO CUSTO.....	88
6.3	METODOLOGIA.....	90
7	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	99
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	138
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICA	140
	APÊNDICE A – PLANEJAMENTO DE AULAS MINISTRADAS	144
	APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO 1 PRÉ-INTERVENÇÃO.....	217
	APÊNDICE C – QUESTIONÁRIO 2 PÓS-INTERVENÇÃO.....	219
	APÊNDICE D – QUESTIONÁRIO 3 DE OPINIÃO.....	221
	APÊNDICE E – TERMO DE CONSENTIMENTO DA ESCOLA.....	222
	APÊNDICE F – TERMO DE CONSENTIMENTO DOS PAIS OU RESPONSÁVEIS.....	223
	APÊNDICE G –TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE USO DE IMAGEM (menor).....	224
	APÊNDICE H – TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE USO DE IMAGEM (maior).....	225
	APÊNDICE I – MANUAL DE APLICAÇÃO E CONSTRUÇÃO DO PRODUTO.....	226
	APÊNDICE J – DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO FUNDAMENTAL DA ONDA.....	272
	APÊNDICE K – DEDUÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDA.....	273
	APÊNDICE L – RELAÇÃO DESLOCAMENTO E DENSIDADE.....	274
	APÊNDICE M – RELAÇÃO DE PRESSÃO E DESLOCAMENTO.....	275
	APÊNDICE N – DEDUÇÃO DA VELOCIDADE DO SOM	276

1 INTRODUÇÃO

A Física é lecionada nas escolas públicas e privadas com o objetivo de formar cidadãos que serão capazes de se adaptar e viver em um mundo repleto de novas tecnologias. É importante salientar que o estudo de Física do ensino médio que destacamos não é voltado no sentido de formar físicos, mas significa o estudo dessa disciplina, destinando-se aos estudantes que não estudam Física em detalhes, e que terão, nas aulas, oportunidades de se ocupar da aprendizagem da disciplina, de forma reflexiva, como auxílio no estudo de ciências.

A Proposta do estudo de ondas estacionárias em uma cavidade desse trabalho, pode ser considerada complexa, dependendo da metodologia aplicada nas aulas, tendo como preocupação o estudo tradicional, em que este é definido como exposição da teoria e resolução de exercício, sem ter que se preocupar com o aluno em realizar, e refletir, alguma experiência com o fenômeno. Com a proposta de realizar esse desafio podemos solucioná-lo através do Produto proposto pela Dissertação. O discente será capaz de entender e resolver situação problema e no futuro poderá utilizar, quando necessário, o conhecimento dessa natureza, contribuindo para sociedade.

Segundo a Secretaria de Educação Básica – Brasília, no livro “Orientações curriculares para o ensino médio” (2008), o parâmetro curricular nacional (PCN) determina como sugestão um meio para atingir o objetivo, que formam o desenvolvimento de competências e habilidades específicas, e a área de ciência é sustentada por três pilares de competências, que são: *representação e comunicação; investigação e compreensão; contextualização sociocultural*.

O desenvolvimento dessas habilidades e competências torna-se um desafio para o profissional, sendo necessário ressaltar outros fatores que devem dificultar o ensino e a aprendizagem de Física no ensino médio.

Segundo Berloni (2015), sabemos que um grande percentual desse público alvo tem desinteresse na disciplina, conforme foi observado nas últimas décadas, em que essa disciplina vem sendo lecionada de forma isolada, ou seja, há uma tendência em expor os conceitos e partindo para a resolução de problemas. O aluno

fica fadado à resolução de exercícios, obtendo-se como resultado discente que não possuem uma atitude reflexiva e autocrítica dos possíveis erros, isto é, alunos que possuem o conhecimento para resolver o problema, mas, no entanto, não sabe o momento de utilizar.

Esse tipo de aula é conhecido como aulas “tradicionais”, essas aulas tornam-se um catalizador para o desinteresse dos discentes na disciplina, comprometendo o processo de ensino aprendizagem.

Segundo Bertelli, no seu livro “A Educação brasileira e o mercado de trabalho”:

A falta de interesse pelos estudos é um dos problemas mais graves que acomete a qualidade da educação. Na maioria das escolas, o que se vê são estudantes desmotivados, sem interesse em estudar. Entre 30 e 40 alunos de uma sala, apenas quatro ou cinco demonstram alguma vontade em aprender. E dentro desse quadro, são poucos os professores que sabem como agir para motivar esses alunos. (BERTELLI, 2013).

Desse modo, tornar aulas atrativas é primordial para que a aprendizagem seja atingida. Assim, destacamos o método experimental, segundo Snyders 1998 ele relata que:

Alegria de agir sobre os objetos, de experimentar, isto é, de colocar suas ideias à prova dos fatos, aperceber-se de seus erros e ter confiança que se pode retificá-los; os fenômenos familiares colocam-se em ordem, as noções integram-se, ligam-se em conjunto estruturados, ao mesmo tempo que se vai à uma convergência entre as práticas e o pensamento teórico: esse sentimento de unidade conduz o indivíduo à satisfação, enquanto que a distorção, a fragmentação suscitam ao contrário dor, até culpabilidade. (SNYDERS, 1998. P.99).

Silva (2010) indica que em autores recentes, o método é usado como ferramenta motivacional explorando as riquezas visuais e o lúdico, assim como comprovação de teoria, apresenta aspectos demonstrativos e investigativos.

Para Delizoicon (1994) sobre a experimentação:

Considera-se mais um trabalho experimental que dê margem à discussão e interpretação de resultados obtidos (quaisquer que tenham sido), com o professor atuando no sentido de apresentar e desenvolver certos conceitos, leis e teorias envolvidas na experimentação. Dessa forma o professor será um orientador crítico de aprendizagem, distanciando-se de uma postura autoritária e dogmática no ensino e possibilitando que os alunos venham ter

uma visão mais adequada do trabalho em ciências. Se essa perspectiva da atividade experimental não for contemplada, será inevitável que se resuma à simples execução de “receitas” e à comprovação da “verdade” daquilo que repousa nos livros didáticos.(DELIZOICOV, 1994,p 22).

Os estudos de Araújo e Abid (2003) sobre “Atividades experimentais no ensino da Física: Diferentes enfoques, diferentes finalidades”. evidencia benefícios no ensino, professores e alunos satisfeitos com o implemento dessa metodologia em sala de aula, resultando em um ensino significativo e consistente.

Os Parâmetros Curriculares Nacionais (Brasil,1997), se posicionaram no sentido de organizar de que maneira podemos utilizar o método. Este documento aponta que: primeiro é necessário a elaboração de um protocolo onde ele define o objetivo da aula, o protocolo de excursão da aula pelo docente ou aprendiz, ou o aluno criar o experimento objetual e executar as ações.

E nesse ambiente que a teoria da aprendizagem de formação de ações mentais por etapas de Galperin se encaixa perfeitamente.

1.1 JUSTIFICATIVA

O estudo de Física dos pesquisadores é diferente do estudo de Física do ensino médio, embora ambos estejam intimamente interligados, isto é, para o ensino médio a física é ensinada de forma simplificada e prática. Porém alguns fenômenos são difíceis de abstração, pois não possuímos mecanismos que demonstrem o fenômeno em uma linguagem acessível. Além disso, muitos experimentos que existem em laboratórios são muito caros para adquirir, reproduzir e difundir na rede pública, ou até mesmo para um indivíduo investir no custo elevado, tornando ainda mais difícil o acesso a esses recursos didáticos no ensino.

Um possível direcionamento para resolver esses problemas é a utilização da experimentação de baixo custo em sala de aula, de forma fundamentada, isto é, subsidiada por teorias da aprendizagem. Com o avanço da tecnologia, os meios de comunicação se tornaram mais rápidos para acesso à informação, por exemplo TV, rádio e internet etc. Isso possibilitou um acesso à informação científica fundamentada e, em algumas vezes, fragmentada, com o foco apenas nas reações particulares de observação de fenômeno.

Com as influências de plataformas educacionais como exemplo objetos educacionais do MEC (Ministério da educação e Cultura), portal do professor, *youtube* e redes sociais entre outros fatores, podem ter acesso à elaboração de experimentos, sem antes conhecer os conceitos físicos relacionados ao conhecimento mecânico, simplesmente no fato de executar o fenômeno sem saber interligar os conceitos norteadores do fenômeno. Essas experiências prévias são fundamentais para aguçar a curiosidade sobre o fenômeno, promovendo discussões entre alunos e professores, e abrindo uma oportunidade (“porta”) para trabalhar o fenômeno de forma fundamentada na teoria.

Segundo os Referenciais Curriculares para o Ensino Médio, Componente Curricular Física, Brasil (2010), essa metodologia possibilita ao aprendiz visualizar e compreender melhor os fenômenos, assim como relacionar o novo conhecimento com o mundo em que vivemos, desenvolvendo assim habilidades previstas pelo (PCN).

Para Lewin e Lomascólo (2003).

A situação de formular hipóteses, preparar experiências, realizá-las, recolher dados, analisar resultados, quer dizer, encarar trabalhos de laboratório com ‘projetos de investigação’, favorece fortemente a motivação dos estudantes, fazendo-os adquirir atitudes tais como curiosidade, desejo de experimentar, acostumar-se a duvidar de certas afirmações, a confrontar resultados, a obterem profundas mudanças conceituais, metodológicas e atitudinais. (LOMASCÓLO, p. 21).

Utilizando a estratégia da experimentação é que buscamos, nesse trabalho, a habilidade de desenvolver hipóteses, recolher dados, analisar resultados e aguçar o desejo de experimentar ações. Esses princípios serão fundamentados pelo processo de ensino aprendizagem da formação por etapas de Galperin, que são processos e mecanismos que possibilitam a transposição do conhecimento extrapsíquico para intrapsíquico, baseando-se na experiência social do indivíduo, onde necessitamos de mecanismo (experimento) para eficácia do processo, pois nessa fase o sistema de signo é fundamental.

Segundo Nuñez e Pacheco.

Para entender conceitos, generalizações, conhecimentos e habilidades, a criança deve assimilar ações mentais adequadas. Isso supõe que tais ações organizem ativamente. De início assumem a forma de ações externas, que se formam em colaboração, e só depois se transformam em ações mentais internas. Esse processo foi estudado por Galperin, que descreveu, como produto de suas pesquisas, o mecanismo de interiorização das ações externas em internas. (NUÑES, PACHECO, 1988, p97).

Seguindo essas vertentes é que essa dissertação tem como proposta um produto educacional, para auxiliar o professor na sala de aula, no estudo de ondas estacionárias em um tubo com uma extremidade aberta, na tentativa de melhor compreensão de conceitos como ventre, comprimento de onda, velocidade de onda etc., e demonstrar como os conceitos estão correlacionados, além de elucidar onde o fenômeno é mais frequente no cotidiano, como exemplo nos instrumentos musicais, tecnologia de informação, equipamentos em medicina.

O experimento é baseado no protótipo de dispositivo produzido pela empresa Pasco, com o registro *economy resonance tube wa-9495*, uma versão industrializada de fácil manuseio. O experimento consiste em um tubo com uma extremidade aberta e outra fechada, em um mecanismo que possibilite a variação do comprimento do tubo por meio de um pistão no interior do tubo, permitindo identificar o comprimento de onda de cada modo de vibração, percebendo assim, elementos de característica de onda como rarefação e compressão. Para produzir onda nessa tecnologia de informação, recorreremos aos aplicativos chamados de modulador de frequência, que nos permite ampliar ou diminuir a frequência, e com esses dados podemos calcular a velocidade da onda sonora.

Dessa forma, se insere a proposta de desenvolver uma aula experimental, fundamentada pela teoria de Galperin, permitindo (oportunizando) um ensino de qualidade com materiais de baixo custo, de fácil acesso, e manuseio.

Segundo Barbosa Silva.

Acreditamos que fazendo pesquisas e construindo experimentos com materiais do cotidiano o aluno poderá entender melhor os conceitos e a aplicação das Leis que estudam na sala de aula e relacioná-la as suas descobertas ao seu bem estar. (SILVA 2016).

Assim, as aulas foram ministradas em duas escolas, por diferentes docentes, na Escola Estadual Indígena Sizenando Diniz, município Cantá, no estado de

Roraima, participando 15 alunos da 2ª série do ensino médio no turno vespertino. E na escola Estadual Gonçalves Dias, município Boa Vista, no estado de Roraima, participaram 25 alunos da 2ª série do ensino médio no turno matutino.

1.2 OBJETIVO GERAL

Verificar a formação do conceito de onda estacionária, através da metodologia experimental, subsidiada na teoria de formação por etapas de Galperin para os estudantes da segunda série do ensino médio.

1.2.1 Objetivos específicos:

- Diagnosticar a internalização dos conceitos de ondas estacionárias;
- Analisar a influência do dispositivo na formação dos conceitos;
- Verificar a velocidade de propagação do som no ar pelo dispositivo, e explorar o potencial da ferramenta como auxílio no estudo de ondas estacionárias.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No capítulo 1 é referente à introdução e origem do estudo, e no próximo capítulo 2, é dedicado a revisão bibliográfica que procuramos evidenciar os trabalhos que ressaltam a importância do método experimental no ensino de onda, assim como suas consequências para o ensino.

No capítulo 3, é realizado um estudo de fundamentação metodológica sobre a teoria de formação das ações mentais por etapas de Galperin, isto é, faz-se um estudo do referencial teórico para fundamentar os processos das aulas aplicadas ao discente.

No capítulo 4 e 5 é trabalhado o eixo temático da Física, o qual norteou esse projeto, procurando detalhar cada conceito aplicado em sala de aula referente ao assunto de ondas.

No capítulo 6 é apresentado o Produto educacional da Dissertação.

No antepenúltimo capítulo, analisaremos dados, relatos de experiências, avaliaremos os resultados da aplicação do produto, e representaremos, graficamente, as questões pré-estabelecidas pelo modelo metodológico para considerações.

No último capítulo, faremos comentários gerais e apresentaremos considerações finais sobre a dissertação, com relação as discussões de resultados sobre o tema.

Nos elementos pós-textuais temos um manual de construção e aplicação do dispositivo tubo de ressonância de baixo custo e questionários aplicados nesse trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 EXPERIMENTAÇÃO NO ENSINO DE FÍSICA

Os trabalhos de Labaru (2006), Silva (2012), White (1996), Cerbaro (2009), Santos (2004), Araújo (2009) e Reis (2013), são unânimes em relação ao ensino aprendizagem empregados pela metodologia experimentação.

O ensino é desafiador ao docente que busca metodologia que incentive e de modo criativo e eficiente na disciplina de física. Que desenvolva no aprendiz conceitos que ele possa usufruir posteriormente.

Segundo GALIAZZI (2001) esse método vem sendo discutido por pesquisadores educacionais nas últimas décadas, e é apresentado como um ótimo recurso no processo de ensino aprendizagem no desenvolvimento de conceitos e procedimentos de causa e ação.

Porém o método mais utilizado, ainda é ensinado nas escolas, um método baseado na exposição direta do conteúdo e aplicação e manipulações algébricas pelos exercícios. Segundo Batista (2009):

Tal modelo de educação trata o conhecimento como um conjunto de informações que são simplesmente transmitidas pelos professores para os alunos, não resultando em um aprendizado efetivo. Os alunos têm o papel de ouvintes e, na maioria das vezes, os conhecimentos transmitidos pelos professores não são realmente absorvidos por eles, são apenas memorizados por um curto período de tempo e, em geral, esquecidos posteriormente, comprovando a não-ocorrência de um aprendizado significativo. (BATISTA, 2009, p.44)

Essa metodologia é válida, porém não é muito eficiente, desmotiva o aluno, o reflexo é observado em grande parcela dos alunos do ensino médio que não sente interesse em estudar a disciplina.

Analisamos as metodologias como possível solução e que destacamos a experimentação de acordo com SILVA (2012). Essa tem a função de estimular o estudante, despertando, ou mantendo o interesse do discente pela disciplina.

Segundo Araújo (2003), o docente e discente indicam a utilização da experimentação, os resultados são eficazes para ambas as partes.

Os PCNs especificam que essa metodologia além de motivar, desenvolve, e aprimorar habilidades do indivíduo, o mesmo é desafiado a coletar e manipular dados para desenvolver um conceito ou prever uma futura reação proveniente de uma ação anterior.

O docente dispõe de um recurso que permita a motivação, a comprovação de teorias, como demonstração e atividades investigativas de acordo com Silva (2010).

De acordo com Villatore; Higa; Tychanowicz, (2008)

As atividades experimentais permitem a manipulação do material concreto, não ficando só no abstrato, como é de costume. Permitem as observações dos fenômenos naturais. “É feita através do tato, da visão e da audição, contribuindo para as deduções e considerações abstratas sobre os fenômenos observados.” (VILLATORE; HIGA; TYCHANOWICZ, 2008, p. 107).

Para Santos (2004) essa prática aproxima o aluno da Física, estimulando a pensar, a criar hipótese, analisar um problema e buscar soluções.

Cerbaro (2009) defende que só será possível minimizar os problemas de ensino aprendizagem na disciplina quando associamos os estudos com a realidade, isto é, partir de experiência do indivíduo, criar um ambiente propício ao entendimento de leis.

Borges (2012) discute que essa prática depende do roteiro que é desenvolvido, é desse ponto que é definido o que será feito, que técnicas e que procedimento resultará no objetivo, outra crítica é em relação ao tempo de execução leva-se muito tempo para aplicação dessa aula.

A prática experimental não é a solução de todo ensino de física, assim como outras metodologias também apresentam defeitos e falhas, porém os resultados têm sido satisfatórios.

Como vimos anteriormente, vários autores enfatizam o emprego dessa prática nas aulas de física pela sua eficácia no processo de ensino aprendizagem.

2.2 A PRÁTICA EXPERIMENTAL NO ESTUDO DE ONDAS

O estudo de ondas tem sido objeto de estudo pelos seguintes autores Fazio (2008); Viennot (2001); Wittmann (1999); Maurines (1992); Silva (2016); Caldas (2017); Mazeti(2017).

O estudo de ondas é responsável por vários fenômenos que acontecem na natureza, como exemplo as ondas sísmicas que provocam terremoto, ondas eletromagnéticas que definem o alicerce do eixo temático de estudo de funcionamento numa variedade de aparelhos tecnológicos, como destacando-se, na atividade humana, a técnica de Raios X, câmera fotográfica, ondas de rádio em telecomunicações etc.

Apesar da variabilidade de aplicação de fenômenos, ainda são poucos disponíveis instrumentos de laboratórios prontos para experimentar, que possa possibilitar o estudo de fenômenos. Mesmo assim, o custo ainda é elevado para estudo e aplicação didática em uma metodologia simples. Assim, recorreremos aos protótipos de experimentos de baixo custo e de material reciclado, descartado na natureza.

Dentre vários exemplos, podemos citar os experimentos populares de demonstração nos trabalhos de Silva (2016); Saab (2005); Caldas (2017); Barroso (2005), Costa (2018) e Souza e Aguiar (2011).

Os trabalhos de prática experimental para constatação de teorias no ensino médio são poucos disponíveis, e os que existem são inacessíveis pelo fator preço, custos elevados, e atrapalham o emprego dessa prática. Esse trabalho é mais uma alternativa de baixo custo, e com eficiência no estudo de ondas.

A seguir, vamos discutir a escolha do procedimento metodológico de ensino adotado para a proposta do estudo.

3 TEORIA DE FORMAÇÃO DAS AÇÕES MENTAIS POR ETAPAS DE GALPERIN

A teoria de formação por etapas de Galperin é fundamentada pela teoria da formação de conceitos de L. S. Vygotsky. O mesmo se propõe a analisar os processos que orientam a formação de conceito e não os conteúdos, diferenciando assim as ações que formulam o conceito não científico, que Vygotsky definiu como sendo espontâneo, do conhecimento não espontâneo, isto é, o conhecimento científico segundo ele.

O conhecimento espontâneo são aqueles formados a partir de experiência de vida do indivíduo, um conhecimento gerado de acordo com os erros e tentativas, nos primeiros anos de vida o ser humano, para resolver um determinado problema, necessita de atributos essenciais. Segundo Talízina.

“É neste inconsciente das características essenciais que Vygotsky via o específico dos denominados conceitos espontâneos”. (TALÍZINA, 1988. p.148)

O conhecimento científico é originário de ações norteadas e instituídas no momento em que se motiva a conscientização das características essenciais. Essa aprendizagem é de caráter verbal, no entanto, Talízina (Talízina, 1998), via estudo da psicologia fundamenta, diz que a atividade é desenvolvida seguindo etapas, hierárquicas em um objeto. Assim, o discente pode obter o conhecimento não espontâneo pela essência do objeto, resultado de suas ações dirigidas que, por meios de símbolos e signos, lhe favorece a formação de conceitos.

Para Vygotsky os signos são os elementos principais na dominação das funções psíquicas superiores, ele é o elo que permite dominá-los e dirigi-los. Nesse processo, signo é a palavra, sendo que no futuro se torna seu símbolo, tornando-se um elemento decisivo no desenvolvimento psíquico. Para que as aulas atinjam o objetivo é necessário definir o tipo de atividade, organizá-la de forma sistemática, assim como definir mecanismos que permita a transposição de ações externas em ações psíquicas internas.

Segundo Talízina:

As particularidades das ações orientadas para os objetos os fenômenos do mundo exterior determinam diretamente o conteúdo e a qualidade do conceito em formação. (TALÍZINA.1988.p.54)

[...]

O conceito como imagem integral surge quando a ação sobre a base da qual se forma, passando pela elaboração por etapas, se transforma em um processo mental generalizado, reduzido, automatizado e subconsciente. (TALÍZINA.1988.p35)

A morte prematura de Vygotsky não permitiu que ele concluir sua teoria deixando lacunas como, por exemplo, toda ação do sujeito, o que impossibilitou elucidar como o sujeito que assimilará os conceitos resultantes das suas atividades. Seu trabalho se limita à formação de conceito por meio de elementos característicos essenciais. Porém, a psicologia soviética é complementada com seus colaboradores A. N. Leontiev, e S. L. Rubinshtein, assim como a teoria de formação por etapas de Galperin.

A pesquisa de A. N. Leontiev em sua tese em que a atividade psíquica está correlacionada com a atividade material externa. O mesmo é analisar que a formação e a absorção dos conceitos não significam o artifício final no processo de ensino aprendizagem, ou seja, necessitamos de mecanismo que favoreça a utilização e aplicação correta desses conhecimentos assimilados, para que haja a transposição do conhecimento interno em ações externas e vice-versa.

Para desenvolver habilidades de formar conceito, generalizações e usufruir posteriormente, quando necessário, o aprendiz deve processar os estágios de ações adequadas. Ações que são organizadas de forma sistemáticas, a princípio, de modo externo, que atua em colaboração para serem transformadas em ações internas na psique. Essa base metodológica foi instituída por Galperin pela teoria de formação de ações mentais por etapas. Esse modelo propõe que o conhecimento a ser instruído deve ser regulado:

- I. A situação-problema tende a ser o ponto de partida para o desenvolvimento dos conceitos e habilidades, uma vez que esse tipo de metodologia apresenta ao estudante onde e como o conhecimento pode ser utilizado.
- II. Qualquer atividade educacional deve levar em consideração o potencial de qualquer aluno, Galperin institui como princípio em sua tese, garantindo

assim, que qualquer aprendiz consiga atingir o objetivo, conhecimento que é intermediado por etapas em cada estágio específico.

- III. A atividade é dividida por etapas até o seu produto final, e as etapas minimizam a divergência do conteúdo, sendo que cada etapa apresenta um objetivo específico, caso não seja atingido, possibilita uma rápida correção analisando o processo anterior, resultando em uma rápida resolução da situação problema. Uma consequência da própria atividade que permite ao aprendiz a percepção e a operacionalidade da essência do conteúdo, pois a mesma não assume a forma de um exercício.
- IV. O ponto de partida é que tem o objetivo de caminhar o estudante para os aspectos de generalização, de modo que ambos estão interligados pela atividade para alcançar objetivo.

A respeito dos processos de interiorização do conhecimento, Galperin elaborou um estudo mais detalhado subsidiando-se no estudo da psicologia soviética, nas representações essenciais do mundo externo para o interno. Sua tese possibilita ao professor uma maneira de perceber e intervir no modo e na maneira em que os estudantes compreendem o assunto estudado, sendo assim, podemos dizer que o docente estrutura a atividade em orientação, execução e controle.

Nessa perspectiva, podemos ressaltar que o conhecimento de experiência social se torna individual, os momentos são de extrema importância, e devemos elaborar condições para tal finalidade. O autor exemplifica que a primeira atitude são ações específicas, segundo a forma de representação que o processo de ensino nos proporciona, e por fim, transposição da linguagem em ações da psique.

Dessa forma, o conhecimento é instituído na estrutura cognitiva do estudante, mesmo tornando-se independente, não deixa de representar generalizações das experiências do indivíduo com o mundo. O processo demonstra que a psicologia do conhecimento não é um processo diferente das representações externas, mas sim, a complementação do processo.

Segundo Davidov e Radzinkhosky (1984) os processos estão organizados para atingir o objetivo, definindo assim as suas representações.

Os estudos do autor demonstram que, quando a atividade é desenvolvida de modo a transcorrer de forma hierárquica com estágios definidos, o resultado é um

conhecimento de base sólida, e esse dificilmente decai no esquecimento, desenvolvendo novos costumes. E as atividades inerentes necessitam de estágios diferentes, de acordo com suas peculiaridades, isto é, desenvolvimento e interiorização dos conceitos, e mediante a atividade, definirá a qualidade da abstração e refinação dos conceitos nas ações que transferem o conhecimento para o indivíduo.

Galperin destaca cinco etapas, ou momentos, que, de forma geral são os pilares para qualquer atividade que envolva aprender novos conceitos, quais sejam:

- Motivacional;
- Desenvolvimento da base orientadora de ação (B.O.A);
- Ações do plano material ou materializado;
- Ações do plano de linguagem externa;
- Mental.

Esses momentos direcionam e automatizam as ações até o seu produto final, permitindo ser maleável de acordo com a essência do conteúdo.

Na sequência, a seguir, estudaremos cada etapa em detalhes.

3.1 ETAPA MOTIVACIONAL

Essa etapa tem como função propiciar um ambiente para o ingresso de novos conhecimentos referente à individualidade de cada ser, pesquisas favorecerem a situação de que se o ser não estar motivado a aprender o conteúdo, a atividade se transforma em passa tempo perdendo assim sua essência dificultando ainda mais o processo de ensino aprendizagem.

Segundo Nuñez e Pacheco (1998).

“A motivação para aprender é sempre determinada por valores que apoiem e justifiquem a aprendizagem como atividade de estudo”. (NUÑEZ ; PACHECO, 1998.p.100).

Referente essa etapa, a psicologia classifica em duas etapas, externa e interna. A etapa externa não está relacionada com a atividade, e seu estudo tem

outras finalidades, mas, a etapa interna é oposta a externa, e assume papel importante no processo de ensino, pois a ciência psicológica tem como pressuposto que a assimilação da essência dos conceitos ocorre quando a interna está catalisando a aprendizagem. Desse modo, primeira ação do docente é propiciar a ação interna, que, naturalmente, essa é relacionada com questões, situação problema do cotidiano, ou seja, faz parte da experiência social do indivíduo.

3.2 DESENVOLVIMENTO DA BASE ORIENTADORA DE AÇÃO

É nessa etapa que o professor se apoiará ao desenvolver o modelo da atividade, organizar os conhecimentos a serem utilizados, e definir ordem de apresentações dos conceitos, assim como, as ações que nortearão a atividade. Em essência resume-se, em: orientação, execução e controle.

Desse modo, o aluno deve dispor de todo conhecimento necessário sobre os conceitos, como também, domínio do manuseio da representação externa, e nessa etapa, este deve-se determinar os limites da aplicação da ação.

Galperin desenvolveu mais de oito bases orientadoras de ação (B.O.A), no entanto, três se sobressaem por apresentar bons resultados, tornando-se objetos de pesquisa por seus colaboradores. Essas são conhecidas, como: B.O.A **I**; B.O.A **II**; e B.O.A **III**.

A B.O.A **I** tem como essência a orientação incompleta, seguindo essa perspectiva, é natural no processo de ensino que o índice de erro seja maior referente a solução do problema. Assim, a assimilação dos conceitos se torna lenta de acordo com as tentativas de solução do problema.

O ensino tradicional é totalmente caracterizado pela B.O.A **II**, sendo que o mesmo apresenta uma série de condições a respeito de um determinado fenômeno. Esse método minimiza o número de erros nas tentativas de solução dos problemas, e torna a ação dos conceitos mais rápida, no entanto, o conhecimento adquirido é limitado, sendo utilizado somente em situações específicas. A BOA **II** permite um avanço rápido, com uma margem mínima de erros, o que resulta em uma transferência limitada.

É notável a vantagem da B.O.A II em relação a B.O.A I, sabendo que hoje o processo de ensino aprendizagem necessita de métodos práticos para a formação dos conceitos em relação a essa questão.

De acordo com Galperin (1958).

As vantagens da aprendizagem conforme segundo tipo de orientação em comparação com o primeiro são evidentes e significativas, especialmente quando o trabalho estiver limitado à assimilação de diferentes tarefas. Mas no ensino escolar, as tarefas em geral se reportam a uma esfera determinada e constituem uma série mais ou menos extensa. Em relação a essa série, manifesta-se claramente a deficiência fundamental da aprendizagem conforme o segundo tipo: para cada nova tarefa, deve-se destacar novamente a base orientadora, e ela é encontrada empiricamente. (GALPERIN, 1959. P,8)

A B.O.A III apresenta ações focalizando na generalização do problema organizada de forma hierárquica completa, a ação de formação dos conceitos é mais rápida, os erros são menores a generalização possibilita uma maior transferência de conhecimento para o discente. Com essa visão o aluno torna-se apto não só para a resolução de teste particular mais sim para um conjunto de teste de fenômenos de mesma classe.

Segundo Galperin na BOA III ocorrem tres mudanças fundamentais.

Assim, como resultado do ensino conforme o terceiro tipo, no panorama das coisas ocorrem três mudanças fundamentais: em lugar de simplesmente as coisas, um conjunto de parâmetros relativamente independente intervêm; em lugar de simplesmente a propriedade, o conjunto de suas unidades fundamentais; de acordo com esquema comum a todos os objetos da esfera que se estuda. (GALPERIN, 1986b.P.232)

Os trabalhos de H.G. Sálmina (1988), N. F. Talízina (1987), destacam vantagem em se trabalhar com essa base orientadora, dentre elas temos:

1. É propício ao trabalho de forma independente, porque possibilita maior chance de trabalho criativo;
2. Por apresentar característica de generalização, é mais produtiva;
3. Possibilita ao discente uma metodologia que o liberar da necessidade de estudar varios fenômenos particulares de cada assunto. O método dessa B.O.A consiste na assimilação de um método unificado a partir de fenômeno particular;

4. Trabalha com as essências dos fatos, contribuindo de forma planejada para o desenvolvimento do pensamento dos discentes;
5. Em relação ao conteúdo, a generalização é garantida;
6. Apresenta uma rapidez no desenvolvimento do processo, assim, os erros são mínimos, e propicia uma maior janela de transferências dos conteúdos para novas situações.

A B.O.A **III** assume papel fundamental para assuntos de baixa complexidade, geralmente, em problemas do ensino médio, pois a esfera de conhecimento não é muita extensa, e a generalização é a melhor opção. No entanto, para problemas de alta complexidade, a orientação incompleta é a mais indicada. Esses problemas exigem um conhecimento específico, então, a B.O.A **III** não resolve as especificidades do ensino médio, e nesse aspecto, necessitamos da peculiaridade da B.O.A **I** e B.O.A **II**.

Na construção da B.O.A é necessário introduzir as essências do fenômeno para formação do conceito, onde o discente não executa a ação pré-determinada, ele constrói o conhecimento pela intervenção das ações hierárquicas, criando condições para a formação dos conceitos por meio das representações.

3.3 ETAPA DE FORMAÇÃO DA AÇÃO DO PLANO MATERIAL OU MATERIALIZADO

O plano material é caracterizado pela sua representação nesse modelo, sendo que o objeto é fundamental, onde todas as ações são executadas seguindo um guia orientado pela B.O.A.. No plano materializado, o objeto não é necessário, e sim, esse é um representante de forma abstrata. É importante ressaltar que esse plano também será orientado por uma B.O.A, portanto, não é a operação que diferencia o plano, e sim, a forma de utilização do objeto.

Em geral, o objeto é substituído pelas ilustrações, gráficos, etc. Na elaboração de um substituto do objeto, destaca os aspectos essenciais, para que o aluno não desfoque do objetivo. Pois, o mesmo deve conter as essências da atividade ou da ação, considerando as experiências do discente com o conteúdo.

São nessas etapas que o aprendiz inicia a execução das atividades. E, em uma perspectiva exterior, o professor intervém regulamentando o conjunto de ações da atividade que é realizada em pequenos grupos.

A atividade está orientada para a percepção e construção da essência do fenômeno. O discente não está apto a resolver atividades mentais, pois, as ações são mecânicas, com astúcia da essência do objeto.

Após a execução da B.O.A, é com o auxílio dos signos e manuseio que ocorre a transposição da representação do objeto para a parte intrapsíquica. É na B.O.A que está todo o conhecimento e a parte operacional e de controle da ação, por que o aluno se beneficia dessa ficha estudo para minimização dos erros na execução das ações, além de propiciar ao aprendiz todo conhecimento específico, evitando a memorização do conhecimento prévio para a realização da ação. Dessa forma, esse sistema facilita a interpretação e interiorização pelo seu próprio uso.

É nessa etapa que, inconscientemente, o aluno já está sendo preparado para a etapa posterior que é a verbal, pois as atividades exigem do aluno uma representação externa em relação ao modelo objetal. Segundo NUÑEZ e PACHECO (1998):

Com que a materialização do processo contribui para o ensino? De acordo com a teoria da atividade e da concepção própria dos métodos ativos de ensino, a ação é a fonte dos conhecimentos humanos; não basta ver ou executar algo relacionado com o tema, objeto de estudo, é preciso fazer algo, realizar alguma ação com seu conteúdo. (NUÑEZ e PACHECO, 1998.p105)

Nesse sentido, Galperin salienta, mesmo quando não está claro que, a materialização do objeto necessitou evidenciá-la, e é nessa etapa que abonamos a formação mental (Galperin 1966). Como a experiência do discente é limitada, para esse tipo de trabalho, o mesmo deve se orientar pelas fichas de estudo.

3.4 ETAPA DE FORMAÇÃO DA AÇÃO NO PLANO DA LINGUAGEM EXTERNA

Desde os primórdios, o homem vem se adaptando ao meio em que vive, buscando evoluir o desempenho cognitivo, desenvolvendo ferramentas para

manipular e controlar comportamentos da natureza, pois, a história demonstra que a aprendizagem não está somente em meios materiais, e é nesse sentido que os símbolos desenvolvem papel fundamental.

Segundo Luria (1994), as representações do mundo exterior, pelos símbolos, permitem ultrapassar as fronteiras do fenômeno concreto para o abstrato, com essa ferramenta de representação é possível conduzir, analisar e estabelecer novas conexões de relações complexas, e resolver problema específico de acordo com sua especificidade e prever suas consequências no plano exterior, antes mesmo de executar a ação.

Nessa perspectiva, essa etapa tem como objetivo dispor, ao aprendiz, mecanismo de ação mental, desenvolvida por intermédio da representação teórica (escrita ou oral), onde toda atividade é realizada no plano cognitivo. Desse modo, o aluno não dispõe do objeto e nem de suas representações fenomenológicas. E, no decorrer da resolução da atividade, o discente assume papel de monitor ou crítico, já que essa atividade é em grupo, o que resulta em possível redefinição de conceitos estabelecidos na estrutura psíquica do indivíduo.

A linguagem externa apresenta estágio em que direciona para formação de novos conceitos, sendo que nessa etapa, o aluno se apoia somente na simbologia do exercício. No final do processo, inicia-se a redução das ações, já que o sistema tende a evidenciar os conceitos. E nesse momento, considerando a interpretação e a percepção do conceito que o torna generalizado.

Galperin defende que, nesse processo, as ações extras psíquicas, na forma externa, são conduzidas para estrutura cognitiva pela linguagem, em um conjunto de símbolos que representam os estágios, o que possibilita separar, nessa etapa, a imagem e a parte operacional. Essa simbologia no contexto sócio histórico é de comunicação entre grupos, e posteriormente no plano interno.

Nesse sentido, a aprendizagem está presente em duas etapas, na atividade cultural presente na sociedade e depois, no plano interno. Essa visão é demonstrada pelo desenvolvimento de uma criança, que nos primeiros anos de vida sua fala não é completa, e com o passar do tempo, ao realizar contato com grupos, os símbolos externos são internalizados, e representado na forma verbal.

O caso particular está no objeto. E a forma verbal é a generalização de um caso específico. Portanto, destacamos três momentos da linguagem verbal, o primeiro e o segundo desempenham a função sensorial do aprendiz, ou seja, a

descoberta por intermédio da percepção, assim, a palavra não assume o papel mais importante e sim, o seu significado fenomenológico. E o terceiro momento, torna a linguagem totalmente independente do objeto, tanto na atividade quanto no estágio.

3.5 ETAPA MENTAL

Para a resolução de situação problema é necessário ações externas escrita e verbal que formam um conjunto de análises de informação, estabelecida pelo cognitivo do aprendiz.

Na etapa mental, o indivíduo desenvolve uma linguagem que é direcionada ao plano exterior, em que se compreende a representação verbal, oral ou escrita, embora a ação seja externa, o início da mesma é interna, o que caracteriza uma ação mental totalmente independente. Isto é, observa-se a transmutação das representações mentais assimiladas no processo anterior. Durante a solução do problema é natural a seleção de conceitos, o que resulta em métodos específicos para atingir o objetivo. O exercício desse fato demonstrará de que modo o fenômeno foi assimilado.

O estágio final do processo é a etapa mental, porém sua origem está correlacionada com as representações do objeto, e suas representações culminam-se no substituto do objeto. No entanto, é incorreto pensar que o estudo de todo fenômeno necessita do objeto contendo a essência, e que toda ação mental tem suas essências no objeto, considerando que o aluno já dispõe de experiência relacionada ao conteúdo. Esse pressuposto é suficiente para o início do processo de ensino e aprendizagem.

4. ONDAS

Nesse capítulo, apresentaremos conteúdo dos conceitos e fenômenos físicos envolvidos na proposta da dissertação, abordando, de forma mais abrangente, os conteúdos discutidos com os discentes. Utilizamos, como referência, os livros de Física, Alberto Gaspar (2009), Física, Sears, Zemansky, Young e Freedman, (2008), Termodinâmica e Ondas. Também, H. Moysés Nussenzveig (2002), fluidos, oscilações, ondas e calor, e para livro de consulta, Halliday e Resnick (2013), Fundamentos de Física.

4.1 CONCEITO DE ONDA

Segundo Nussenzveig (2002), onda é uma perturbação, gerada através de um pulso (manifestação da energia produzida no meio), que se transmite de um ponto a outro, de um meio sólido, líquido, ou gasoso, com velocidade definida. Uma onda tem como característica o transporte de energia, sem que haja transporte de matéria de um desses pontos em relação ao outro.

4.2 CLASSIFICAÇÃO DE ONDAS

Ao analisar a classificação de ondas (Sears, Zemansky, Young e Freedman, (2008)), observa-se que ondas podem ser classificadas dependendo da sua natureza, isto é, direção de vibração e direção de propagação.

Em relação a sua natureza, onda é classificada em mecânica e eletromagnética, e como complemento desta análise de classificação inseriu-se onda gravitacional.

Em relação a dimensão de propagação, onda pode se propagar em sistemas unidimensional, bidimensional ou tridimensional. E quanto a direção de Propagação e de Perturbação, onda é classificada como transversal e longitudinal. Esses conceitos serão abordados nas próximas subseções deste capítulo.

4.2.1 Quanto à natureza

Quanto à característica fenomenológica geradora, ondas podem ser:

4.2.1.1 Ondas mecânicas

Estas necessitam de um meio para se propagar, são produzidas por estímulos mecânicos, isto é, ondas que são governadas pelas leis de Newton, que produzem pulsos (manifestação da energia produzida no meio), e se propagam em meios que oferecem pouca perda de energia, por exemplo: ondas em uma corda, ondas dos mares, e o som que necessita do Ar para se propagar.

4.2.1.2 Ondas eletromagnéticas

Estas não necessitam de um meio para se propagar, e são obtidas como resultado das interações e variações de campos elétricos e magnéticos. Assim, o campo variante resulta na origem do outro campo, e vice e versa. São exemplos desse tipo de onda: raios-X, luz visível, radiação infravermelha, raios ultravioletas e ondas de rádio.

Estas ondas são responsáveis por vários fenômenos do cotidiano, porém vamos focar nosso estudo em ondas mecânicas que é o eixo principal da temática dessa dissertação.

4.2.1.3 Teste de detecção de onda gravitacional

Temos também o recente teste de detecção de onda gravitacional publicado em 12 de fevereiro de 2016 pelo periódico PHYSICAL REVIEW LETTERS, tendo como autoria Abbott e autores. As condições necessárias para gerar esse tipo de onda, definida como onda de gravidade, foram observadas através da colisão de corpos extremamente massivos, na ocasião, observada com dois buracos negros, os pesquisadores detectaram um sinal (transiente) de onda gravitacional na faixa de 35 a 250 Hz. E garantem 90% de confiança dos resultados. Outra característica

encontrada foi que o sinal não necessitava de meio para se propagar, e a determinação de sua velocidade no vácuo, em modulo, foi obtida de forma análoga para o caso da luz.

4.2.2 Quanto à dimensão de propagação

As ondas podem ser classificadas quanto a dimensão de propagação (Sears, Zemansky, Young e Freedman, (2008)), as quais são ondas encontradas em sistemas unidimensional, bidimensional e tridimensional, quais sejam, denominando-se ondas, respectivamente:

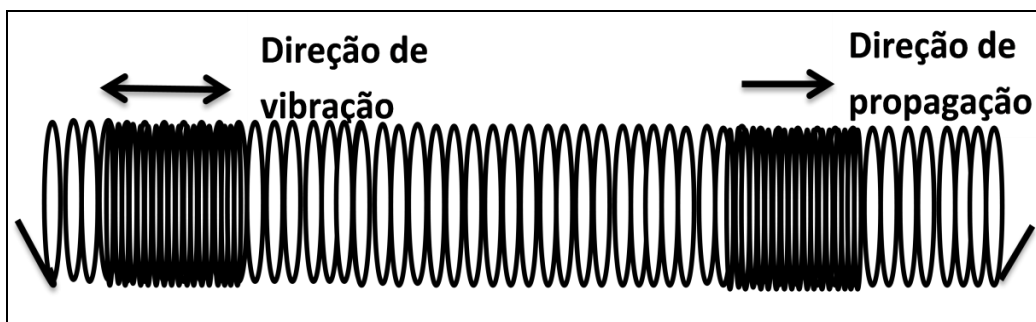
- Unidimensionais, são ondas que se propagam em uma dimensão (linearmente), como em uma corda.
- Bidimensionais, são ondas que se propagam em duas dimensões (superficialmente), como ondas da superfície de um lago.
- Tridimensionais, são ondas que se propagam em três dimensões, como o som e a luz.

4.2.3 Referente à direção de propagação e de perturbação

4.2.3.1 Onda longitudinal

Ondas longitudinais são ondas que se propagam na mesma direção do movimento de oscilação de qualquer ponto do meio. Por exemplo, considere uma mola oscilando na direção horizontal, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Onda longitudinal



Fonte: www.osfundamentosdafisica.com

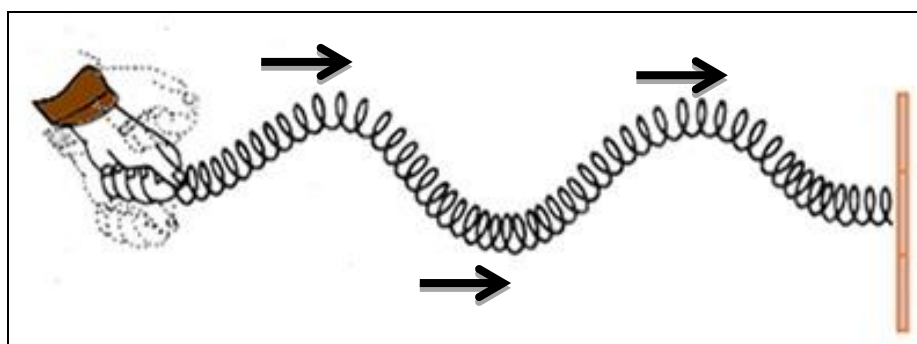
Agentes externos exercem uma força em uma das extremidades da mola (resultado da ação de comprimir ou puxar) na direção horizontal. A força restauradora da mola reage no sentido oposto com a mesma intensidade e direção, o que provoca uma perturbação no meio que se propaga. A oscilação geradora do movimento ondulatório tem a mesma direção da propagação, por isso ondas com essas características são chamadas de ondas longitudinais.

4.2.3.2 Onda transversal

São ondas cuja direção de oscilação, geradora da perturbação no meio, é perpendicular à direção de propagação de onda.

Por exemplo, considere uma mola em repouso na direção horizontal, oscilando com o movimento de uma sacudida rápida na direção vertical, no sentido de cima para baixo (ou de modo inverso) numa das extremidades da mola. Assim, é produzido um pulso que se propaga na direção vertical, no sentido horizontal da esquerda para a direita, conforme é mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Onda transversal



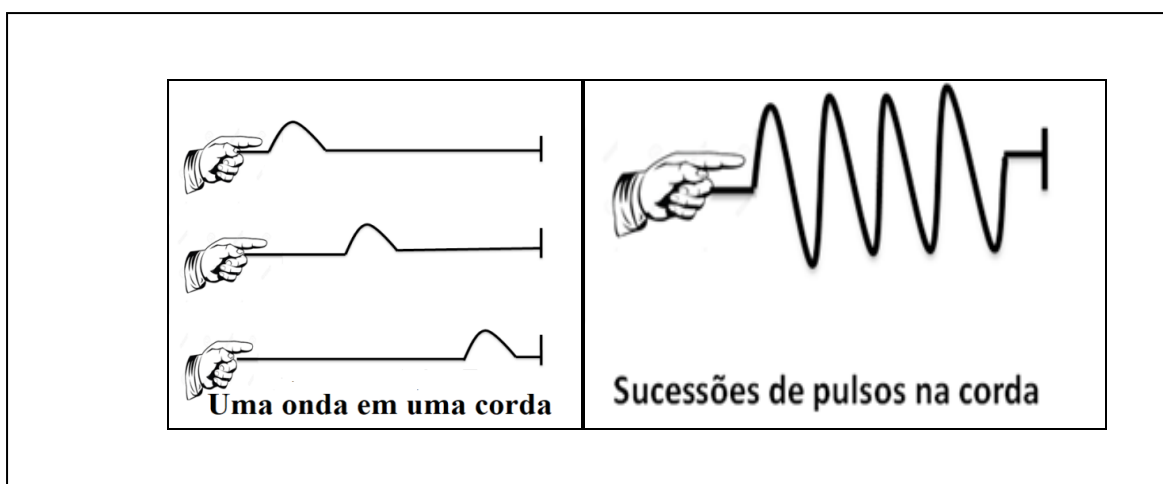
Fonte: mundoeducacao.bol.uol.com.br Acesso: 30/10/2018

4.2.3.2.1 Observação

Analisando o tempo de duração de propagação de uma onda transversal, temos:

Uma única onda, ou uma sucessão de pulsos, como é indicado na Figura 3.

Figura 3 - Duração de propagação de uma onda ou de uma sucessão de pulsos em uma corda



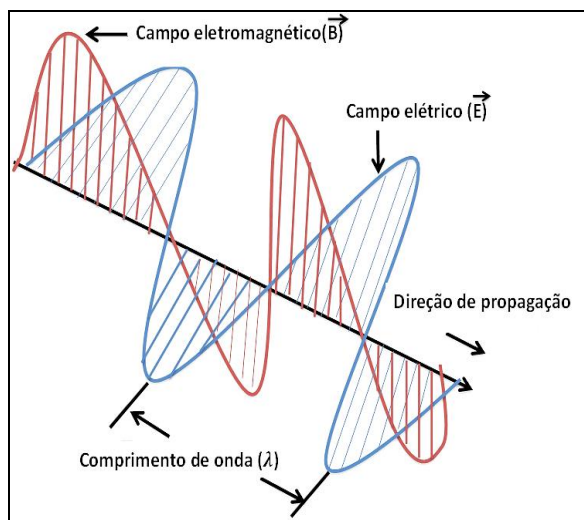
Fonte: www.infoEscola.com

De acordo com a Figura 3, a onda única (imagem da esquerda) na corda tem um princípio e um fim, sendo produzida com uma única sacudida na corda tensionada. As sucessões de pulsos na Figura 3 (imagem da direita) da corda encontram-se nas mesmas condições, porém estas são produzidas com o movimento repetitivo, que pode originar mais de um pulso no meio.

4.2.3.2.2 Um exemplo em destaque - Onda eletromagnética

Um exemplo importante de onda transversal é o caso de onda eletromagnética. Esta é resultante da composição da interação dos campos elétricos e magnéticos variáveis e da superposição de ondas. O fenômeno da superposição de ondas ocorre quando duas (ou mais) ondas se encontram no mesmo ponto e ao mesmo tempo. Uma característica deste fenômeno é que os campos são perpendiculares entre si, conforme é mostrado na Figura 4.

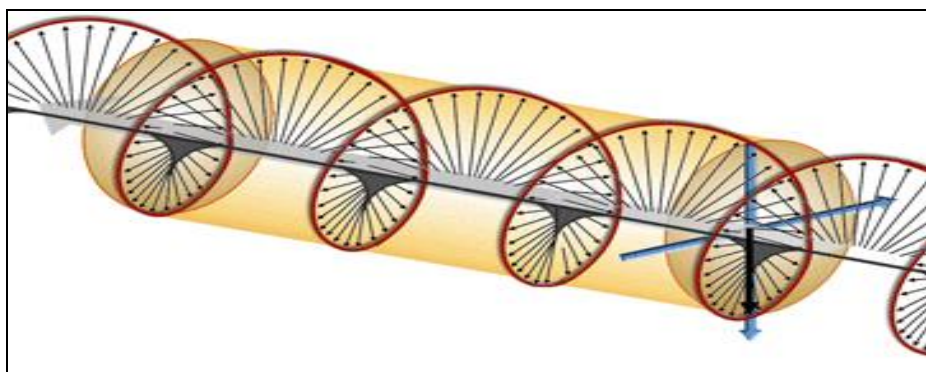
Figura 4 - Onda eletromagnética



Fonte: tutorbrasil.com.br acesso: 30/9/18

Como os campos elétrico e magnético são perpendiculares entre si, em relação a direção de propagação da onda de cada campo representado, de acordo com a seção 4.2.3.2, esse tipo de onda resultante é classificado como onda transversal, onde a velocidade de propagação da onda resultante, no vácuo, é constante e tem valor $C = 299\,792\,458\text{ m/s}$. Na Figura 5 é mostrado uma representação da onda resultante (combinação, superposição, envolvimento) das interações dos campos elétricos e magnéticos.

Figura 5 - Onda resultante



Fonte: educaçãoconectada.com.br

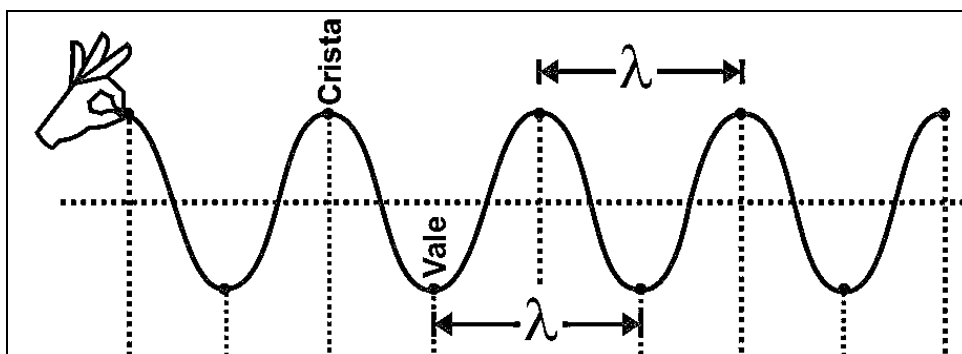
4.3 CARACTERÍSTICAS DE ONDAS PERIÓDICAS

Segundo Sears, Zemansky, Young e Freedman, (2008), podemos observar um exemplo de pulso ondulatório, analisando a Figura 3, que essa tem a esquerda um único pulso (resultado da alteração na energia que induz uma deformação no meio) manifestando-se na corda esticada, que está presa em uma extremidade. O pulso é resultado de um único movimento vertical da mão (subir e descer até a posição de equilíbrio). A corda está sujeita a tensão, que restaura o meio a posição de equilíbrio, após a passagem do pulso.

Referente à Figura 3, do lado direito, tem outro caso particular para as mesmas condições da corda citada anteriormente, cuja diferença dessa outra situação está no número de sacudidas que o agente realiza na extremidade da corda. Assim, ao executar-se um movimento repetitivo ou periódico, reproduz-se um pulso, como consequência, para cada sacudida na corda, tendo como resultante uma sucessão contínua de perturbações senoidais transversais ou ondas periódicas, conforme é representado na Figura 3.

Destacando as características que a configuração de ondas periódicas se apresenta, podemos determinar o comprimento de onda, observando a distância entre dois vales ou duas cristas consecutivas, vemos esse fato conforme é indicado na Figura 6.

Figura 6 - Característica de ondas periódicas



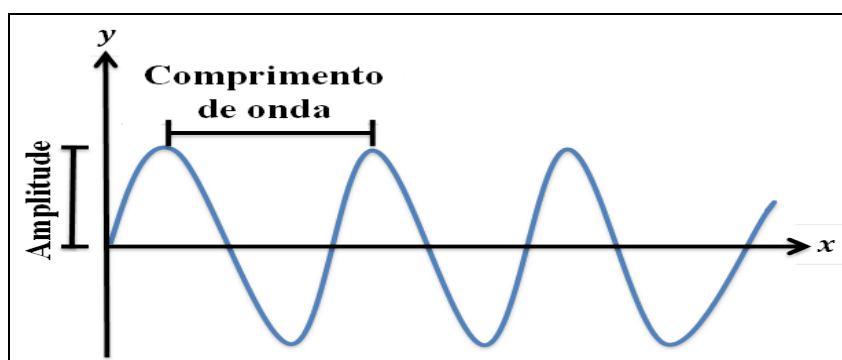
Fonte: <http://crv.educacao.mg.gov.br> Acesso: 30/10/18

De acordo com a Figura 6, os pontos mais elevados, no sentido positivo da direção vertical, são denominados de crista, e no sentido oposto (negativo), os pontos mínimos de vale. A distância entre dois vales ou duas cristas consecutivas chama-se **comprimento de onda**, que é representado pela letra grega lambda (λ).

Como consequência, temos conceitos elementares de onda, a seguir:

Amplitude (A) é a distância transversal entre o ponto de equilíbrio e os extremos de onda, crista ou vale, de acordo com a Figura 7.

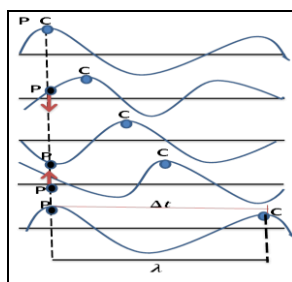
Figura 7 - Amplitude



Fonte: mundoeducação.bol.uol.com.br Acesso 30/10/18

Considere um pulso em uma corda, conforme representado na Figura 7, e observando um ponto qualquer sobre a corda, na medida em que a onda se propaga no meio, é verificado que a corda oscila com característica de MHS (movimento harmônico simples) referente à posição de equilíbrio. Ou seja, quando uma onda senoidal se propaga em um meio, cada partícula do meio executa um movimento harmônico simples com mesma **frequência**. Para definir a frequência, analisemos os pontos P e C em destaque na figura 8.

Figura 8- Analisando um ponto de referência



Fonte: mundoeducação.bol.uol.com.br Acesso 30/10/18

Seguindo uma sequência de cima para baixo, no primeiro instante t , temos dois pontos coincidentes, o ponto C e P. O ponto P representa uma parte pequena da corda, e C, a crista da onda. No segundo instante, podemos perceber que P encontra-se em cima do eixo de propagação ou da posição de equilíbrio, e C se desloca no sentido positivo do eixo. No terceiro momento, o ponto P situa-se no extremo negativo, o vale, e C continua o seu movimento no sentido positivo do eixo. No quarto instante, o ponto P encontra-se na posição de equilíbrio, e C, mais à frente, de acordo com seu sentido de propagação. E no quinto instante, o ponto P retorna-se a posição transversal da origem do movimento e, exatamente nesse momento completa-se um ciclo de oscilação. O tempo que decorre para uma oscilação completa é denominado de período. A seguir definiremos período (T) e frequência (f) de uma onda.

O **Período (T)** do movimento de uma onda é o tempo (em unidade de segundo) de uma oscilação completa, como exemplo, uma oscilação que é apresentada na Figura 8, deslocando-se do ponto P até o ponto C.

A **Frequência (f)** de oscilação desse movimento é definida como o inverso do período, sendo (correspondendo) o número de oscilação completa em um intervalo de tempo. A unidade dessa quantidade é o hertz (H_z), e a frequência é expressa pela relação:

$$f = \frac{n \text{ oscilações}}{\Delta t} \quad \text{Para uma oscilação temos } f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

A configuração periódica apresenta velocidade constante v avançando em uma distancia λ no intervalo de tempo T. Partindo da equação do movimento uniforme para velocidade $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$, concluímos que $v = \frac{\lambda}{T}$ ou, como $f = \frac{1}{T}$, temos a seguinte relação entre esses parâmetros:

$$v = \lambda f \quad (2)$$

onde a velocidade de uma onda progressiva é o produto do comprimento de onda pela frequência de oscilação da onda.

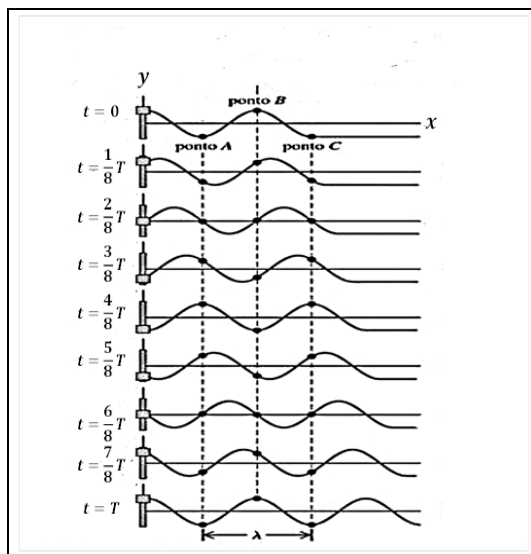
De acordo com Sears, Zemansky, Young e Freedman, (2008), para descrever uma onda periódica precisamos de detalhes das posições e movimentos das partículas individuais do meio em função do tempo, durante a manifestação da onda no meio. Isto é, precisamos do conceito de função de onda, e esta função detalha a posição de qualquer partícula do meio em função do tempo.

Vamos prosseguir essa análise, nesse exemplo específico de ondas periódicas, em uma corda, de acordo com as condições da (Fig.8). Adotaremos um eixo de coordenadas Ox ao longo da posição de equilíbrio x , em que este é prolongado (extenso) na direção horizontal, e tendo, na direção vertical, o eixo Oy , eixo que é perpendicular ao eixo Ox . O módulo da distância vertical depende da partícula, e este é também função do tempo t , ou seja, y é uma função de x e de t , $y = (x, t)$. Isso implica em uma **função de onda** que descreve o comportamento da onda. Esta função permite conhecer o deslocamento em relação ao ponto de equilíbrio de qualquer partícula em qualquer instante na corda (ponto da corda). E desse modo, a partir desses resultados, pode-se calcular velocidade e aceleração para descrição da partícula na corda.

4.3.1 Função de onda de uma onda senoidal

Segundo Sears, Zemansky, Young e Freedman, (2008), para determinar uma função de onda senoidal, consideramos uma onda senoidal propagando-se no sentido positivo do eixo Ox , como mostrado na Figura 9, acompanhando as oscilações em três pontos da corda.

Figura 9 – Acompanhando as oscilações em três pontos da corda



Fonte: adaptada de Sears, Zemansky, Young e Freedman, (2008)

As partículas que compõem o meio verificam-se as mesmas características da onda senoidal (amplitude e frequência), sendo que as oscilações da partícula estão em um MHS (movimento harmônico simples). Porém, de acordo com a Figura 9, em pontos distintos do meio não apresenta uma sincronização. Analisando a partícula do ponto B para $t = 0$, observa-se que y é máximo referente a posição de B, e para o instante $t = \frac{2}{8}T$ o módulo de y é mínimo. Eventos semelhantes ocorrem para as partículas do ponto A e C nos instantes $t = \frac{4}{8}T$ e $t = \frac{6}{8}T$. Para pares distintos de pontos do meio, o movimento do ponto da direita na corda (em relação à onda, a partícula desloca-se 'para baixo') se atrasa (com instante t) em relação ao movimento do ponto da esquerda.

Considere o deslocamento de uma partícula na extremidade esquerda do meio ($x = 0$). Essa configuração, nessas condições, se desenvolverá de acordo com a ilustração da Figura 9, ou seja, a oscilação é executada, apresentando todas as características do MHS, com frequência f , frequência angular $\omega = 2\pi f$ e amplitude A. Adotaremos a seguinte notação para a função de onda $y(x = 0, t)$, isto é, uma

variação particular da notação geral da função $y(x, t)$, que detalha o movimento ondulatório.

Assim, a função de onda é escrita na linguagem matemática para o movimento harmônico simples, logo:

$$y(x = 0, t) = A \cos 2\pi f t \quad (3)$$

Para $t = 0$, a partícula é localizada no ponto ($X = 0$, $y_0 = A$) em $T_0 = 0$, deslocando-se no sentido positivo máximo ($y = A$). Nesse instante ($t_0=0$), esta encontra-se em repouso, devido as condições da perturbação ondulatória, e em seguida, em um instante t , propagando-se de $x = 0$ até um ponto x à direita, sendo o intervalo de tempo obtido da definição do movimento uniforme, ou seja, x/v , onde v é a velocidade da onda. Logo, o movimento do ponto x no instante t é análogo ao movimento do ponto $x = 0$ no instante $t - x/v$, então, substituindo esse tempo na Eq.(3), temos.

$$y(x, t) = A \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \right] \quad (4)$$

Como a função cosseno é par, isto é, reescrevendo a função de onda, teremos:

$$y(x, t) = A \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \right] = A \cos 2\pi f \left(\frac{x}{v} - t \right) \quad (5)$$

A equação Eq.(5) descreve o movimento da onda em função do tempo, por uma onda senoidal movendo-se no sentido positivo.

Vejamos agora a equação Eq.(5) reescrita em termos do período $T = \frac{1}{f}$ e do comprimento de onda $\lambda = v/f$:

$$y(x, t) = A \cos 2\pi \left[\omega \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \right] \quad (6)$$

Para definir outra forma de representação da função de onda é necessário definir uma quantidade k , chamada de número de onda, dado por:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (7)$$

Assim, isolando λ , temos $\lambda = 2\pi/k$, e substituindo $f = \omega/2\pi$ na equação Eq.(2), obtemos (para onda periódica)

$$\omega = vk \quad (8)$$

Portanto, podemos escrever a equação de onda Eq.(5) na forma

$$y(x, t) = A \cos(kx - \omega t) \quad (9)$$

A equação Eq.(9) também descreve o movimento de uma onda progressiva senoidal propagando-se no sentido positivo.

Essas notações de onda são utilizadas em momentos específicos do estudo de ondas, por questão de conveniência para a solução de problemas particulares.

A seguir, aprofundaremos nossos estudos sobre função de onda seguindo o livro de Nussenzveig.

Segundo Nussenzveig (2002), esse caso particular trata-se de **ondas harmônicas**, são assim denominadas, porque, ao analisar a perturbação no ponto x , esta corresponde uma oscilação harmônica simples, exemplo ilustrado na figura 8, apresentando um perfil senoidal, sendo x' a posição final referente um instante t . Então, em relação aos estudos de mecânica, temos $x' = x - vt$, onde x é a posição inicial, v velocidade e t o tempo. Para uma oscilação harmônica temos a função $f(x')$, dada pela equação Eq.(10), onde A é a amplitude, k o número de onda, e δ é

a constante de fase, para $t = 0$. Logo, o deslocamento em função do tempo é representado pela equação Eq.(10).

$$f(x') = A \cos(kx' + \delta), \quad (10)$$

O que implica para uma onda harmônica,

$$y(x, t) = A \cos(kx' + \delta) \quad . \quad (11)$$

Isolando a velocidade, temos $v = \omega/k$, e substituindo na equação Eq.(11), obtemos

$$y(x, t) = A \cos(kx - \omega t + \delta) \quad . \quad (12)$$

Analisando o argumento do cosseno, temos função de x e t , ou seja,

$$\varphi(x, t) = kx - \omega t + \delta \quad . \quad (13)$$

Considerando a fase constante em um ponto, e acompanhando o deslocamento, temos

$$\varphi(x, t) = \varphi_0 = \text{Constante}. \quad (14)$$

Derivando a equação Eq.(14) em relação a variação de tempo, obteremos

$$\frac{d\varphi}{dt} = K \frac{dx}{dt} - \omega = 0 \quad (15)$$

ou seja,

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{k} = v = v\lambda \quad . \quad (16)$$

Para fases constantes, a crista de onda, como exemplo que surge em $\varphi = 2\pi$, se movimenta com a mesma velocidade v da onda, assim v é chamada de **velocidade de fase**.

Da Eq.(12), para uma onda harmônica, temos a notação complexa,

$$y(x, t) = \text{Re}[Ae^{i(kx - \omega t + \delta)}] \quad . \quad (17)$$

Uma onda harmônica também é sinônimo de uma onda monocromática, referente a decomposição espectral da luz, isto é, uma frequência ou um comprimento de onda específico determina uma cor pura.

4.4 EQUAÇÃO DE ONDA UNIDIMENSIONAL

4.4.1 Nota sobre derivada

Para compreender a ideia intuitiva de derivada, vamos analisar, como exemplo, a função $f(x) = x^2 + 2x$ na Tabela 1, que relaciona valores da função $f(x)$ próximo de um ponto $(x, f(x)) = (2, 8)$, e também a variação qualquer (grande ou pequena) da função, $\Delta f(x)$, com relação a variação Δx , utilizada em velocidade média (v_m), onde $f(x)$ pode representar deslocamento de x .

Por exemplo, em problemas reais de estudo de Física, podemos interpretar uma função de posição (energia potencial em sistemas do tipo massa-mola, oscilador harmônico simples), observando o comportamento da função para os valores da imagem $f(x)$. E depois, o quociente, a razão da variação (da imagem) da função em relação a variação de x , isto é, velocidade v_m , conforme Tabela 1.

Para obter a velocidade instantânea, aproximamos $\Delta f(x)$ por pequena variação Dy e Δx por Dx , logo a razão $\Delta f(x)/\Delta x$ corresponde à Dy/Dx , conforme

Tabela 1, compreendendo a derivada de uma função, por exemplo, $f'(2) = 6$ (é o valor da velocidade instantânea em $x=2$), em torno de um ponto de abscissa $x = 2$, cuja interpretação geométrica corresponde ao coeficiente angular da reta tangente ao gráfico da função $y = f(x)$.

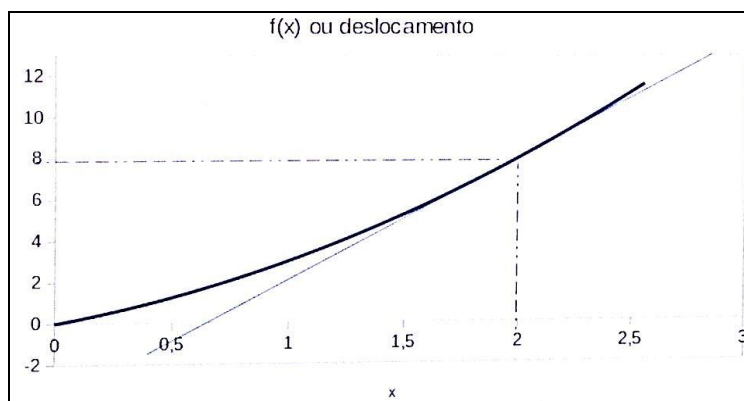
Tabela 1 - Primeira derivada de f em um ponto

x	$f(x) = x^2 + 2x$	$f' = Dy/Dx$ ou v_m
1.85	7.1225	5.65
1.9	7.41	5.75
1.95	7.7025	5.85
2	8	5.95
2.05	8.3025	6.05
2.1	8.61	6.15
2.15	8.9225	6.25

Fonte: autor

No Gráfico 1, observamos a função $f(x) = x^2 + 2x$ e sua derivada, e na medida que a posição x se aproxima de 2, a imagem da função aproxima-se de $y = 8$, de acordo com a Tabela 1, o valor limite 6 é a derivada (corresponde $f'(2) = 6$ é o valor da velocidade instantânea em $x=2$) no ponto (2,8), isto é, o valor da derivada neste ponto é o coeficiente angular da reta que passa por este ponto de abscissa $x = 2$.

Gráfico 1 – Gráfico de uma função da posição e sua derivada primeira



Fonte: autor

Para introduzir a ideia do conceito de segunda derivada, podemos observar, de modo semelhante, a Tabela 2 para avaliar a segunda (quer dizer, a variação de variação da primeira variação de f) variação da função $f(x)$, que corresponderá no limite $\Delta x \cong 0$ a segunda derivada de $f(x)$, ou seja, $f''(x)$. Isto é, de modo análogo a Tabela 1, obtemos a aceleração média e aceleração instantânea (ou seja, a derivada da velocidade instantânea). Por exemplo, $(x, f(x)) = (2, 8)$, $f'(2) = 6$, e na Tabela 2, temos a segunda derivada $f''(2) = 2$.

Tabela 2 - Segunda derivada de f em um ponto

x	$f(x) = x^2 + 2x$	Dy/Dx ou v_m	$f''(x) = \Delta(\Delta y/\Delta x)$
1.85	7.1225	5.65	2
1.9	7.41	5.75	2
1.95	7.7025	5.85	2
2	8	5.95	2
2.05	8.3025	6.05	2
2.1	8.61	6.15	2
2.15	8.9225	6.25	2

Fonte: autor

4.4.2 Equação de onda unidimensional

A característica da onda, em um dado instante t , é dada pela sua forma que é uma consequência da função $y(x, t)$. Por exemplo, fazendo $t = 0$, logo a função é definida como $y(x, 0)$ no instante $t=0$. Assim, a perturbação é uma onda caminante que se desloca para direita, preservando sua forma com velocidade v .

Considerando o movimento de uma onda progressiva que se movimenta para a direita, a expressão é dada pela relação Eq.(18):

$$y(x, t) = f(x'), \quad x' = x - vt \quad (18)$$

Para que a propagação de onda obtenha uma equação do movimento, necessitamos descrever as medidas essenciais como velocidade e aceleração num dado ponto x , fazendo x fixo e derivando em relação ao tempo.

Agora podemos derivar a função da posição Eq.(18) para obter, respectivamente, a velocidade (v) da onda e a aceleração (a). Tomando as derivadas parciais, temos:

$$v_m = \frac{\partial y}{\partial t}(x, t) \quad (19)$$

Assim como,

$$a = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}(x, t) \quad (20)$$

referente a equação Eq.(18), y só depende de t por meio da variável $x' = x - vt$.

Essas duas equações Eq.(19) e Eq.(20) servem para deduzir uma das equações fundamentais da física, conhecida como equação de onda unidimensional, que é escrita por (deduzida no APÊNDICE J):

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0 . \quad (21)$$

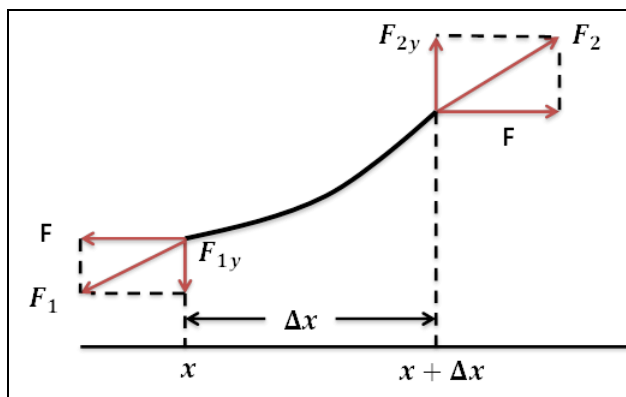
4.5 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DAS CORDAS VIBRANTES

Segundo Sears, Zemansky, Young e Freedman, (2008), aplicando a segunda lei de Newton, isto é, $\sum \vec{F} = m\vec{a}$, em um pedaço de corda, onde seu comprimento representaremos por Δx , este é o comprimento em equilíbrio, conforme é mostrado na figura 10. A corda à direita e à esquerda do segmento (não destacado) exerce

uma força F_1 e F_2 sobre o segmento, devido uma contribuição de força vertical F sobre o segmento nas duas extremidades, isto é, somando-se a contribuição da força horizontal que é zero (pois, o movimento é transversal).

Suponha que a massa da corda é dada pela relação $m = \mu \Delta x$, então o movimento é todo caracterizado na secção transversal, obtendo o resultado para a direção x em relação à aceleração igual a zero, e logo as componentes de F anulam-se nesta direção.

Figura 10- Segmento de corda em equilíbrio



Fonte: termodinâmica e ondas Young e Freedman

Para obter as componentes y das forças F_1 e F_2 , ou seja, F_{1y} e F_{2y} , o módulo da inclinação da corda é dado pela razão F_{1y}/F no ponto x . Para o caso F_{2y}/F é análogo ao raciocínio anterior. Mas, referente ao ponto $x + \Delta x$, levando o sentido de propagação e os sinais de referência obtemos

$$\frac{F_{1y}}{F} = -\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_x \quad \frac{F_{2y}}{F} = \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_{x+\Delta x} \quad (22)$$

O índice x é referente à derivada parcial obtida no ponto x e, de modo análogo o ponto $x + \Delta x$, analisando a equação Eq.(22).

A equação Eq.(22) pode ser reescrita com auxílio das Eqs.(K.1 e K.2, APÊNDICE K) pela dedução da velocidade de propagação de onda por (APÊNDICE K):

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\mu}{F} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (23)$$

O que é análogo a equação de ondas unidimensional equação Eq.(22), com

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}, \quad (24)$$

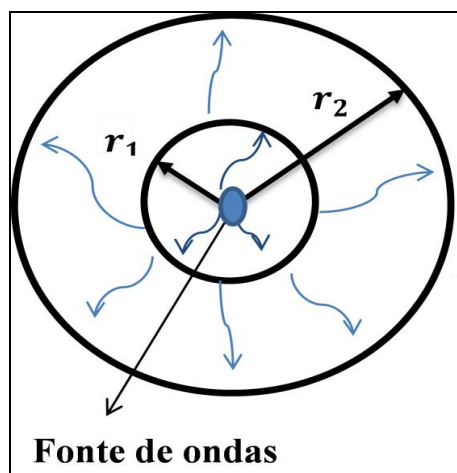
onde essa equação descreve a velocidade de propagação da onda em uma corda vibrante, sendo F a *Força restauradora devolvendo o sistema ao equilíbrio* e μ a *inércia resistindo à volta ao equilíbrio*.

4.6 INTENSIDADE DE UMA ONDA

Para Sears, Zemansky, Young e Freedman, (2008), para ondas tridimensionais é definida uma grandeza física chamada de **intensidade** (que representaremos pela letra I), como a taxa média de tempo em que a energia é transportada pela onda, por unidade de área. Segundo a lei do inverso do quadrado para intensidade, a onda se expande em todas as direções, tendo como referência uma fonte, e uma intensidade que é inversamente proporcional à distância r^2 , obtida como uma consequência da conservação de energia, de acordo com a propagação de onda, conforme é mostrado na Figura 11.

De acordo com a distância da fonte, como é mostrado na Figura 11, por exemplo, para a distância r_1 da fonte, a intensidade é I_1 , e assim, a uma distância maior, $r_2 > r_1$, a intensidade I_2 é menor que I_1 , de acordo com a lei do inverso do quadrado, e a seguir, verificaremos que a mesma potência da onda observada, se espalhará por uma área maior.

Figura 11 - Onda tridimensional se propagando



Fonte: termodinâmica e ondas Young e Freedman

Consideremos a potência P fornecida pela fonte, sendo I_1 a intensidade média, o raio é dado por r_1 , logo a área da esfera é $4\pi r_1^2$, e a intensidade média é definida, por

$$I_1 = \frac{P}{4\pi r_1^2} \quad . \quad (25)$$

A intensidade I_2 , para uma esfera de raio r_2 , é definida com uma expressão análoga. Se nenhuma energia for absorvida referente às esferas, assim a potência P é igual, isto é,

$$4\pi r_1^2 I_1 = 4\pi r_2^2 I_2 \quad (26)$$

Simplificando a expressão, temos:

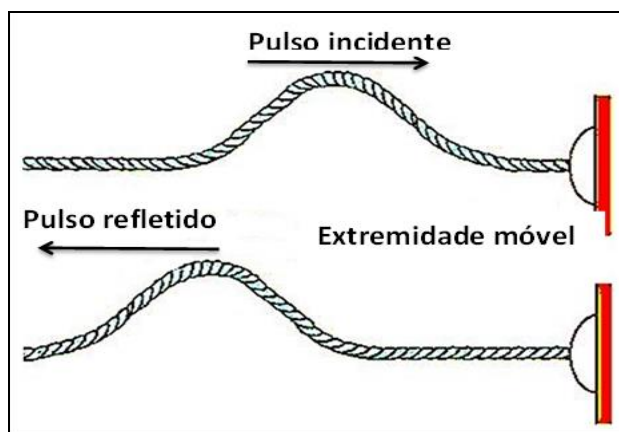
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \quad (27)$$

Nesta relação (Eq.(27), definida como lei do inverso do quadrado, a intensidade é inversamente proporcional ao quadrado da distância desde a fonte.

4.7 REFLEXÃO E REFRAÇÃO

De acordo com Gaspar (2009), a **Reflexão de um pulso** é obtida, examinando a propagação de um pulso numa corda, de acordo com a conservação da energia mecânica. À medida que a energia se propaga no meio, a corda retorna a posição de equilíbrio, essa é uma característica da energia potencial elástica. De acordo com os pressupostos da conservação da energia mecânica, essa energia não é dissipada no fim da extremidade da corda, pois, esta é devolvida ao sistema, retornando ao sentido inverso de propagação, isto é, esta é refletida, como podemos observar na Figura 12.

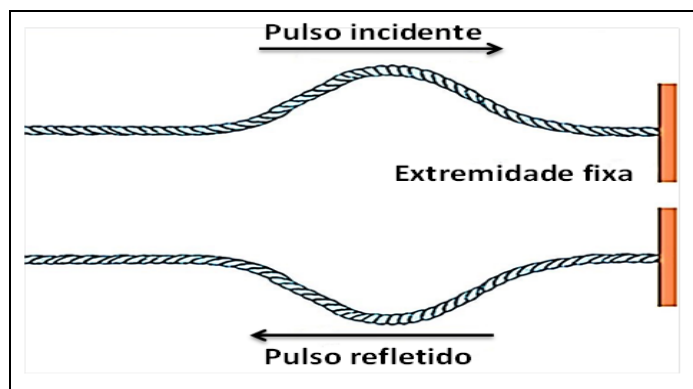
Figura 12- Reflexão de um pulso na corda



Fonte: ww.brasilecola.uol.com.br Acesso: 30/10/18

Para cordas com extremidades fixas, o pulso refletido é invertido em relação ao pulso incidente, de acordo com a Figura 13.

Figura 13 - Reflexão de um pulso na corda com inversão de fase

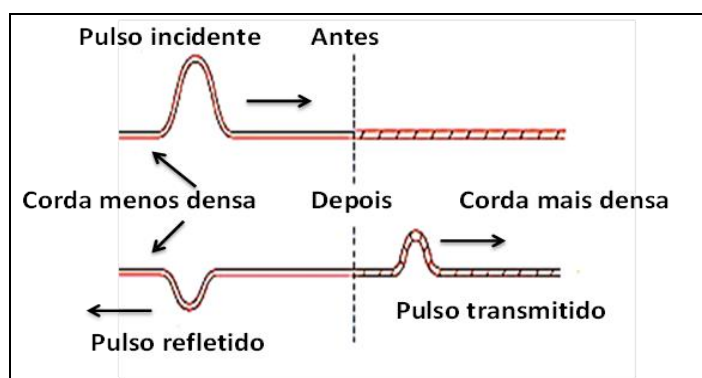


Fonte: ww.brasilecola.uol.com.br Acesso: 30/10/18

Assim, observando a Figura 13, o pulso refletido está defasado em π rad em relação ao primeiro pulso.

A **Refração de um pulso** pode ser observada, imaginando duas cordas de densidades diferentes μ_1 e μ_2 , sendo que $\mu_1 < \mu_2$ na medida que o pulso se propaga, e passa (atravessa) para a corda com maior densidade linear, ou seja, a energia se distribui em duas partes: parte é refratada no meio mais denso, e a outra parte é refletida no meio com densidade linear menor, com ou sem inversão de fase, de acordo com a Figura 14.

Figura 14 - Refração de um pulso na corda (situação 1)

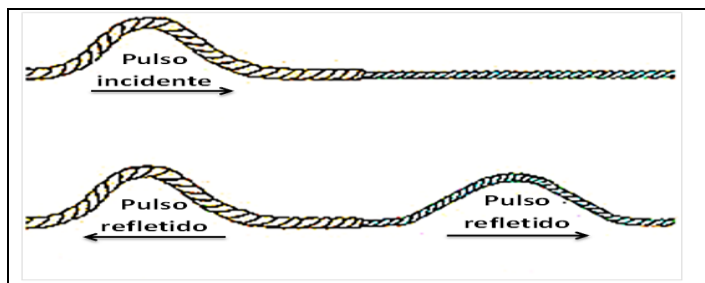


Fonte: fisicacontextoaplicacoes.blogspot.com Acesso: 30/10/18

Para o caso inverso em que $\mu_1 > \mu_2$, onde o pulso incidente se propaga no meio mais denso (corda grossa) e passa para o de densidade menor (corda fina), a

energia também se distribui em refletida e refratada, sendo a refletida sem inversão de fase, conforme podemos observar como mostra a Figura 15.

Figura 15 - Refração de um pulso na corda (situação 2)



Fonte: www.alunosonline.uol.com.br Acesso: 30/10/18

Nesse caso, pode ser mostrado, através de experiência, que a frequência não se modifica, quando a energia passa de um meio para outro, logo;

$$f_A = f_B \Rightarrow \frac{v_A}{\lambda_A} = \frac{v_B}{\lambda_B} \quad (28)$$

No entanto, a velocidade e comprimento de onda não permanecem os mesmos valores para A e B, respectivamente dos pulsos incidente e refletido, e de acordo com a relação $v = \lambda f$ Eq.(2), no meio onde a velocidade é maior o comprimento de onda também é maior. Como na refração apresenta mudança do meio onde a onda se propaga, logo a velocidade é modificada também com o comprimento de onda, pois essas grandezas são diretamente proporcionais.

Esses dois fenômenos são peculiaridades de qualquer fenômeno ondulatório, e quando encontra um obstáculo no meio de propagação, pode ou não mudar de sentido de propagação. Por exemplo, como ocorre em onda bidimensional.

O fenômeno de **Refração de onda bidimensional** ocorre quando há transposição da energia de propagação para outros meios, apresentando uma variação na velocidade. A frequência da onda depende somente da fonte, portanto, nesse caso, esta é constante. A velocidade é diretamente proporcional ao comprimento de onda, em concordância com $v = \lambda f$ Eq.(2), onde o desvio da onda

só é possível se o raio incidir obliquamente na superfície do meio, como é mostrado na Figura 16.

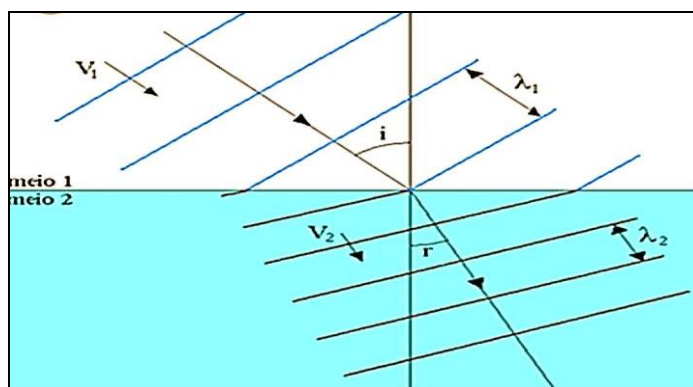
Esse fenômeno apresenta as seguintes propriedades:

1. A frequência não varia;
2. A velocidade e o comprimento de onda são diretamente proporcionais.

Para calcular o desvio da onda, precisamos da lei de Snell-Descartes.

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (29)$$

Figura 16 - Refração de onda bidimensional



Fonte: www.mundoeducacao.com.br Acesso 30/10/18

De modo que:

θ_1 - é o ângulo de incidência da onda incidente;

θ_2 - é o ângulo de refração da onda refratada;

n_1 - é o índice de refração do meio 1;

n_2 - é o índice de refração do meio 2;

v_1 - é a velocidade de propagação da onda no meio 1;

v_2 - é a velocidade de propagação da onda no meio 2;

λ_1 - é o comprimento de onda da onda incidente;

λ_2 - é o comprimento de onda da onda refratada.

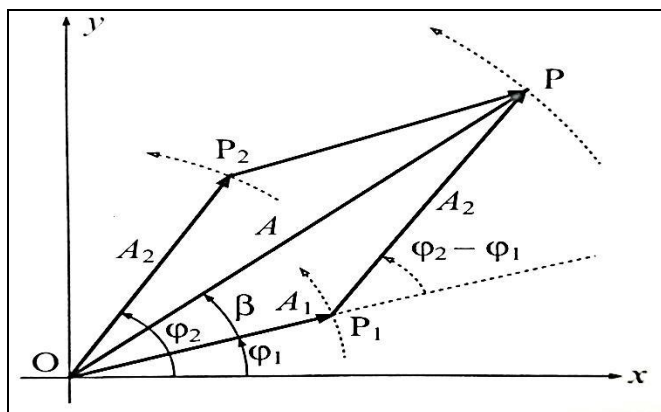
4.8 PRINCÍPIO DA SUPERPOSIÇÃO – INTERFERÊNCIA

Para Nussenzveig (2002), a superposição de dois movimentos harmônicos simples, considerando a mesma direção x e a frequência angular ω , e partindo da solução da equação do oscilador harmônico simples (no caso unidimensional), temos:

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) \begin{cases} x_1(t) = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1) \\ x_2(t) = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2) \end{cases} \quad (30)$$

Analisando a Figura 17, sendo x_1 e x_2 as projeções em x dos vetores girantes. Assim OP_2 , x será a projeção do vetor OP de ambos os vetores OP_1 e OP_2 (os dois girando em conjunto com a mesma velocidade ω). Considerando o módulo (magnitude) $A = |OP|$ do vetor resultante OP e o ângulo $\varphi_1 + \beta$. Logo, para obter a projeção em Ox , aplicaremos a lei dos senos (e cossenos) no triângulo OP_1P , temos:

Figura 17- Resultante de vetores girantes



Fonte: Fluidos, Oscilações e Ondas Calor NUSSENZVEIG (2002)

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1), \quad (31)$$

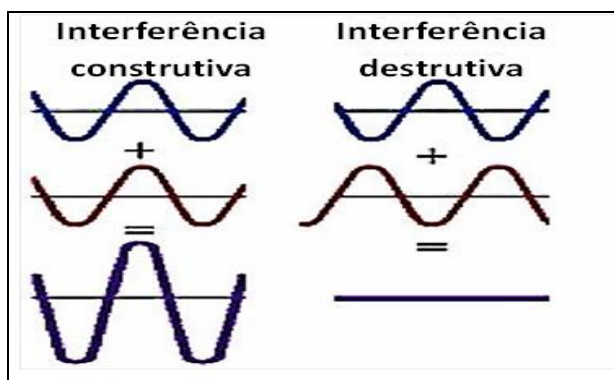
$$\frac{A^2}{\sin\beta} = \frac{A}{\sin(\varphi_2 - \varphi_1)} \left\{ \sin\beta = \frac{A_2}{A} \sin(\varphi_2 - \varphi_1) \right. . \quad (32)$$

O que resulta na solução da equação de movimento para o deslocamento da onda

$$x(t) = A\cos(\omega t + \varphi_1 + \beta) . \quad (33)$$

Para Gaspar (2009), considera-se uma corda onde são produzidos dois pulsos nas extremidades da corda, onde os pulsos se propagam em sentidos opostos. O que ocorre com as energias desses, quando se cruzam, no mesmo ponto ao mesmo tempo? Verifiquemos a situação conforme é mostrada na Figura 18. Durante o cruzamento desses dois pulsos o resultado é a soma algébrica, resultante no eixo das ordenadas, apresentando parcela de contribuição por cada pulso, no instante posterior, pois a energia total é conservada com a contribuição de cada pulso, no sentido de propagação, mantendo todas as características iniciais do pulso gerado.

Figura 18 - Princípio da superposição



Fonte: www.aprh.pt/rgci/glossario/interferondas.html Acesso: 30/10/18

Esse princípio é o de superposição de onda, onde, diferentemente das partículas, não perde sua característica inicial quando interagem. Assim, conseguimos distinguir diferentes sons mesmo propagando-se na mesma região, ao mesmo tempo.

A soma algébrica dos pulsos é classificada em dois tipos principais, as **ondas construtivas** que é a soma algébrica das amplitudes, resultando em um aumento da amplitude da onda. E as **ondas destrutivas**, que resulta no cancelamento da amplitude total reduzindo-se à zero (anulando-se), cuja situação é mostrada na Figura 18. Essa modificação temporária é chamada de **interferência**.

Segundo Nussenzveig (2002), considerando-se uma corda, a combinação linear de ondas é compreendida de acordo com o fenômeno de superposição. Analisando, algebricamente, duas ondas progressivas harmônicas que apresentam mesmas frequências, temos dois casos:

(a) Ondas propagando-se no mesmo sentido

Partindo da equação Eq.(12), temos, para duas ondas representadas por y_1 e y_2 , propagando-se para direita, que:

$$\begin{cases} y_1(x, t) = A_1 \cos(kx - \omega t + \delta_1) \\ y_2(x, t) = A_2 \cos(kx - \omega t + \delta_2) \end{cases} \quad (34)$$

Utilizando a propriedade de paridade da função cosseno (função par)

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

obteremos a onda resultante, onde $\varphi = -kx - \delta$, e observando as equações Eq.(30) e Eq.(34), temos

$$y = y_1 + y_2 = A \cos(kx - \omega t + \delta) \quad (35)$$

onde, pela equação Eq.(31), temos

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos\delta_{12}, \quad (36)$$

sendo a diferença de fase entre as duas ondas escrita por

$$\delta_{12} = \delta_2 - \delta_1 \quad . \quad (37)$$

Como a frequência de cada onda é idêntica, a equação (37) mostra que a intensidade de ambas são proporcionais aos quadrados de suas amplitudes. Então, denominando-se I_1 e I_2 as intensidades respectivas de cada onda e, sendo I a intensidade resultante, obteremos a expressão:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta_{12} \quad . \quad (38)$$

Logo, a onda resultante dessas duas ondas propagando-se na mesma direção é outra onda preservando-se características das ondas componentes iniciais, contudo a intensidade resultante I é dada pela equação Eq.(38) que, geralmente, é diferente do modulo das ondas componentes iniciais, dependendo da diferença de fase δ_{12} entre elas. Esse fenômeno denomina-se interferência.

Assim, podemos determinar a interferência máxima (interferência construtiva) para $\cos \delta_{12} = 1$, ou seja,

$$\delta_{12} = 2m\pi \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \Rightarrow I = I_{\max} = (\sqrt{I_1} + \sqrt{I_2})^2 \quad (39)$$

sendo a interferência mínima (interferência destrutiva) atingida, quando a condição $\cos \delta_{12} = -1$ é satisfeita, ou seja:

$$\delta_{12} = (2m + 1)\pi \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \Rightarrow I = I_{\min} = (\sqrt{I_1} - \sqrt{I_2})^2 \quad (40)$$

Para valores intermediários de δ_{12} , o resultado oscila dentro das intensidades mínima e máxima.

(b) Ondas propagando-se em sentidos opostos - ondas estacionárias

Agora, analisaremos duas ondas propagando-se no sentido oposto, considerando um caso particular, e para simplificar a discussão, tendo a mesma amplitude A e constante de fase $= kx - \omega t = 0$. Assim, as expressões são definidas, por:

$$\begin{cases} y_1(x,t) = A\cos(kx - \omega t) \\ y_2(x,t) = A\cos(kx + \omega t) \end{cases} \quad (41)$$

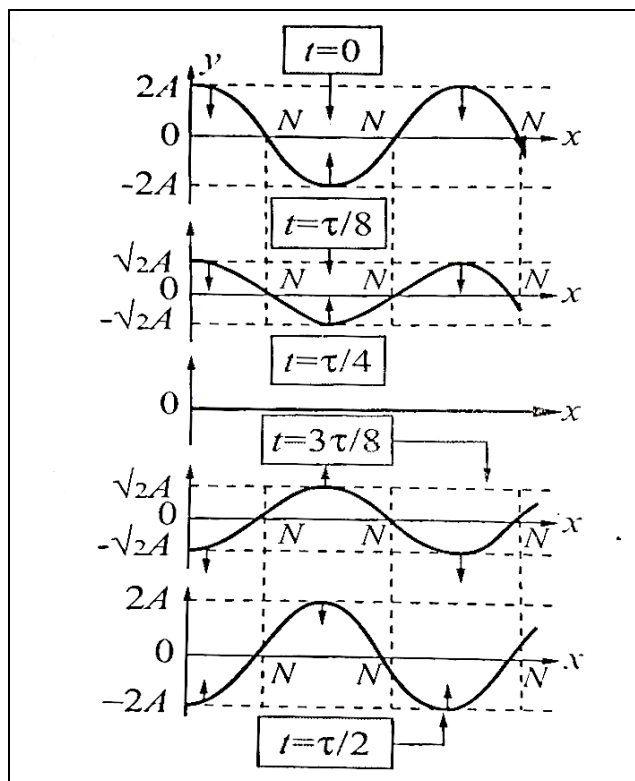
e a expressão da onda resultante, superposição de ondas, será:

$$y = y_1 + y_2 = A[\cos(kx - \omega t) + \cos(kx + \omega t)] = 2A\cos(kx)\cos(\omega t) \quad (42)$$

A equação Eq.(42) é expressa em função de x e t , isto é, a forma da corda é parecida com o deslocamento, mudando apenas a amplitude, e como consequência, o sinal do sentido da propagação.

Na Figura 19 mostra a variação de cinco (5) instantes do intervalo de t , por exemplo um instante $t = \tau/8$. Por intermédio da Figura 19 verificamos que em $t = \tau/4$ a corda passar na posição de equilíbrio ($y = 0$), em concordância com os pressupostos dos limites máximo e mínimo dessa função. O deslocamento troca de sinal ate atingir a amplitude máxima em $t = \tau/2$, e retorna as condições iniciais da corda (ponto de equilíbrio) em $t = \tau$.

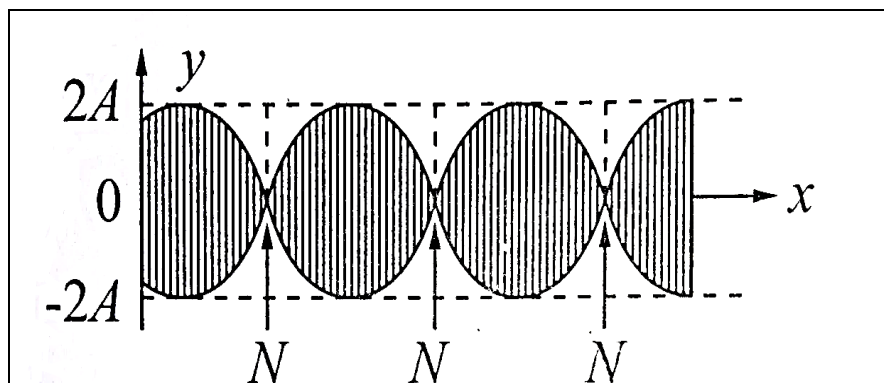
Figura 19 - Perfis instantâneos da onda



Fonte: Fluidos, Oscilações e Ondas Calor NUSSENZVEIG (2002)

A vibração da corda, com essas especificidades, são apresentadas na Figura 19. Os pontos marcados com N nas Figuras 19 e 20 são chamados de nodos, e permanecem sempre em repouso, enquanto durar as vibrações. O espaço entre dois nodos consecutivos são denominados ventres ou antinodos, e a amplitude é máxima nesses pontos, e mínima nos nodos, separando assim em segmentos que oscilam separadamente.

Figura 20 - Aspecto gráfico de onda estacionária



Fonte: Fluidos, Oscilações e Ondas Calor NUSSENZVEIG (2002)

Uma onda resultante do tipo da equação Eq.(42) é uma onda estacionária. As suas componentes são dadas pelas equações Eq.(41), onde a interferência da superposição de duas ondas de sentidos opostos produz onda estacionária, apresentando sentido oposto e fluxos de energia que se anulam nos nós.

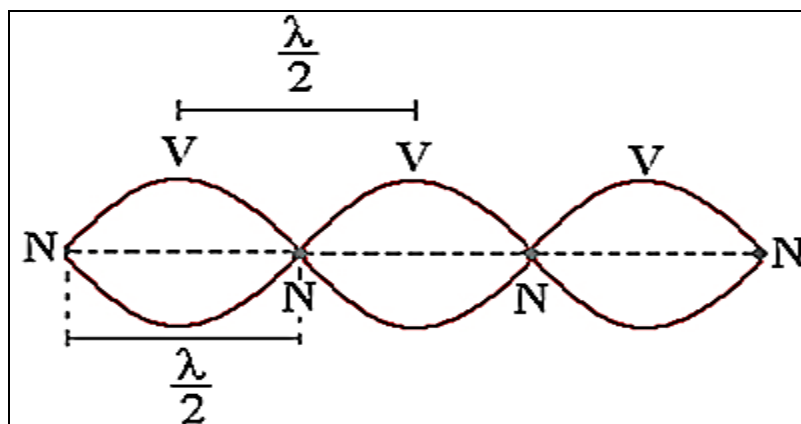
4.9 ONDAS ESTACIONÁRIAS

Segundo Tipler (2006), ondas estacionárias são formadas a partir da resultante da superposição de ondas que se propagam no sentido oposto, no mesmo meio, com a mesma característica ondulatória (amplitude, frequência e comprimento de onda).

Por exemplo (Segundo Sears, Zemansky, Young e Freedman, (2008), consideremos uma onda senoidal em uma corda, e então, esta é refletida pela extremidade fixa da corda. Examinaremos a superposição de duas ondas que se propagam através da corda. Assim, teremos uma onda representando a onda incidente, e a outra, a onda refletida na extremidade fixa, conforme mostrado na Figura 21.

Neste caso, o movimento resultante de duas ondas que se combinam (superpostas, resultado da superposição) não se parece mais, agora, com duas ondas que se propagavam em sentidos opostos. Pois, agora, a corda tem a aparência que está subdividida em diversos segmentos, conforme indica a Figura 21.

Figura 21 - Ondas estacionárias



Fonte: sliderplayer.com.br Acesso 30/10/18

Analisando as ondas incidentes e refletidas, representamos ambas pelas equações (43) e (44), relacionando $y_1(x, t)$ e $y_2(x, t)$, por:

$$y_1(x, t) = A \cos(kx - \omega t) \quad (43)$$

$$y_2(x, t) = A \cos(kx + \omega t) \quad (44)$$

Aplicando o princípio de superposição, temos

$$y'(x, t) = y_1(x, t) + y_2(x, t) = A \cos(kx - \omega t) + A \cos(kx + \omega t) \quad (45)$$

Utilizando uma relação trigonométrica, obtemos,

$$y'(x, t) = [2A \cos kx] \cos \omega t \quad (46)$$

Portanto, essa equação descreve onda estacionária, sendo $2A \cos kx$ a amplitude da onda, localizada no ponto x . Como a amplitude é sempre positiva, tomamos o modulo do argumento do colchete, pois $\cos kx$, algebricamente, admite valor negativo.

Em uma onda progressiva a amplitude é a mesma, para todos os pontos, mas, para onda estacionária esse pressuposto não é válido, como foi mostrado na (Fig.19), a amplitude varia com a posição, a amplitude é zero para valores de kx tais que $\cos kx = 0$, generalizando, temos:

$$kx = n\pi, \text{ para } n = 0, 1, 2, \dots$$

Fazendo $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, e isolando x , temos

$$x = n \frac{\lambda}{2} \quad (\text{para identificar nós}) \quad (47)$$

A equação Eq.(46) nos mostra a posição dos nós, de acordo com a Figura 22, e em relação ao nó vizinho, este se encontra em $x = \frac{\lambda}{2}$, correspondendo meio comprimento de onda.

De acordo com a equação Eq.(46), a amplitude máxima corresponde ao termo $2A \cos kx$, ou seja, $2y_m$, que depende do valor de kx , logo $\cos kx = 1$, e os valores de kx , são:

$$\begin{aligned} kx &= \frac{1\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \dots \\ &= \left(n + \frac{1}{2}\right)\pi, \quad \text{para } n = 0, 1, 2, \dots \end{aligned}$$

Fazendo $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, e isolando x , temos:

$$x = \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{2} \quad \text{para } n = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{ventres}) \quad (48)$$

A equação Eq.(48) nos revela a posição dos ventres.

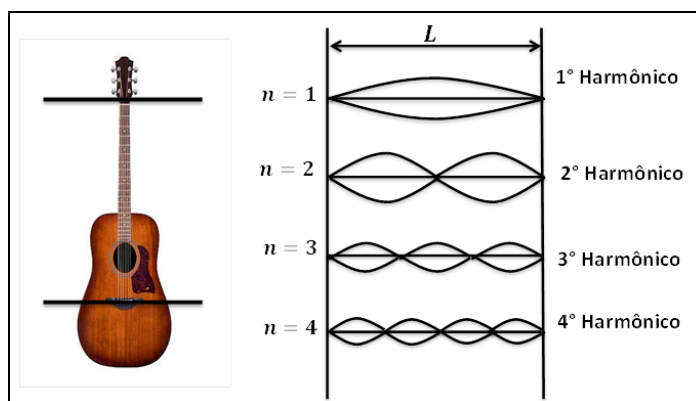
4.9.1 Ondas estacionárias em instrumento de corda

Para Tipler (2006), considera-se as cordas de um violão, que estão todas com extremidades fixas, e em cada corda tensionada, suponha que oscilamos ondas senoidais na corda. A onda se propagará até o final da corda onde sofrerá reflexão, e a onda refletida vai de encontro às outras ondas emitidas. Desse modo, temos varias ondas superpostas entre si.

Mas, somente para uma frequência específica, ou seja, determinada frequência, a interferência produz nós e ventres, isto é, ondas estacionárias. Dizemos que, uma onda estacionária desse tipo, é gerada, quando ocorre o fenômeno de **ressonância**. Essa frequência é chamada de **frequência de ressonância**.

Como no violão as extremidades das cordas estão fixas, nesses pontos existem um nó, já que não podem oscilar aí nesse lugar, apresentando as configurações da Figura 22. A configuração mais simples na formação de ondas estacionárias é a primeira ilustração de cima para baixo na Figura 22, onde existem dois nós, um em cada extremidade e um ventre. E comparando esse resultado com a Figura 21, observa-se que o comprimento da corda é igual a meio comprimento de onda, assim $L = \frac{\lambda}{2}$, ou seja, essa configuração apenas é possível se a interferência tiver um comprimento de onda $\lambda = 2L$.

Figura 22- Onda estacionária na corda



Fonte: www.brasilescola.uol.com.br Acesso: 30/10/18

Para o segundo modo de vibração, a ilustração da (Fig. 20) mostra, de cima para baixo, três nós e dois ventres, logo $\lambda = l$. Em seguida, apresenta quatro nós e três ventres, sendo assim $\lambda = \frac{2L}{3}$. E assim sucessivamente, generalizando essa observação, temos que:

$$\lambda = \frac{2L}{n}, \quad \text{para } n = 1, 2, 3 \dots$$

Utilizando a equação Eq.(2) $v = \lambda f$, e isolando f , logo a frequência de ressonância pode ser determinada pela seguinte expressão

$$f = \frac{v}{\lambda} = n \frac{v}{2L}, \quad \text{para } n = 1, 2, 3 \dots \quad (49)$$

onde v é a velocidade das ondas progressivas e n o número de harmônicos.

4.9.2 Um destaque relevante de aplicação em física quântica

Em 2015, os cientistas Fabrizio Carbone e autores (Carbone, 2015), utilizaram também **ondas estacionárias** e conseguiram capturar o primeiro instantâneo do comportamento duplo da luz, ou seja, a luz comportando-se como onda e partícula. No estudo de física quântica nos diz que a luz pode se comportar, simultaneamente, como uma partícula ou uma onda. No entanto, esse experimento mostrou as duas naturezas de luz ao mesmo tempo; antes, o mais próximo que chegamos a observar onda ou partícula, mas sempre em momentos diferentes.

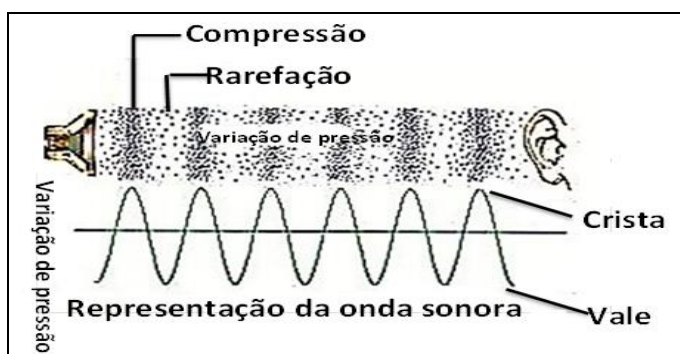
5. ONDAS SONORAS

São ondas mecânicas tridimensionais propagando-se em todas as direções, necessitando do meio, por exemplo o Ar.

Para o caso do meio Ar, essas se propagam em frentes de ondas esféricas, e as partículas que compõem o Ar, são postas em oscilação longitudinalmente (ondas que se propagam no mesmo sentido de oscilação).

A onda se propaga no Ar pela variação da pressão, apresentando regiões de compressão quando o Ar é comprimido ou puxado, e de rarefação quando é empurrado ou descomprimido. A representação algébrica dessa onda é análoga a representação de uma onda periódica, com crista, vale, comprimento de onda, de acordo como mostrado na Figura 23.

Figura 23- Ondas sonoras

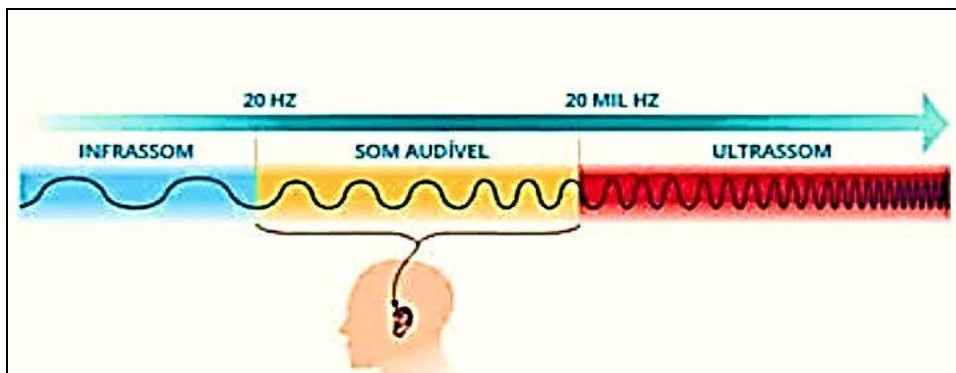


Fonte: fisicaevestibular.com.br Acesso : 30/10/18

Essas ondas são percebidas pelo aparelho auditivo, como impulsos nervosos e interpretado como som pelo cérebro. No entanto, o ser humano só é capaz de detectar parte dela, conforme mostra a Figura 24.

A frequência da onda sonora depende da fonte geradora, e o espectro **sonoro** é a faixa de som audível que é medido em hertz (Hz), conforme é mostrado na Figura 24.

Figura 24 - Espectro sonoro



Fonte: www.aulas-fisica.com/8f-07

A faixa audível é de 20 Hz a 20 kHz, onde abaixo de 20 Hz o som é chamado infrassom, e acima de 20 KHz, temos o ultrassom. A menor frequência do som não é bem definida, mas especula-se que seja de 0,02 Hz, sendo que a maior frequência registrada próxima a temperatura ambiente é cerca de 10 GHz.

O ser humano consegue identificar a frequência como **altura**, ou seja, quanto maior for à altura maior será a frequência e mais agudo (fino) será o som, e quanto menor é frequência menor será a altura e mais grave (grosso) é o som.

A **intensidade sonora** é medida quando a anatomia do ouvido do ser humano relaciona sensibilidade com volume, produzindo o som fraco e o som forte, e o fator ondulatório, responsável por essa característica, é a amplitude. Assim, quanto maior for o módulo da amplitude, mais intenso será a vibração do tímpano. Então, a intensidade é relacionada pela equação Eq.(50).

$$I = \frac{P}{A}, P = \frac{E}{\Delta t}, \quad \text{logo } I = \frac{E}{A \Delta t} \quad (50)$$

onde a unidade de medida a W/m^2

sendo que o seu valor mínimo, percebido pelo ouvido, é dado, por:

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

E seu valor máximo, suportado na eminência da dor, é:

$$I_{\text{máx}} = 1 \text{ W/m}^2$$

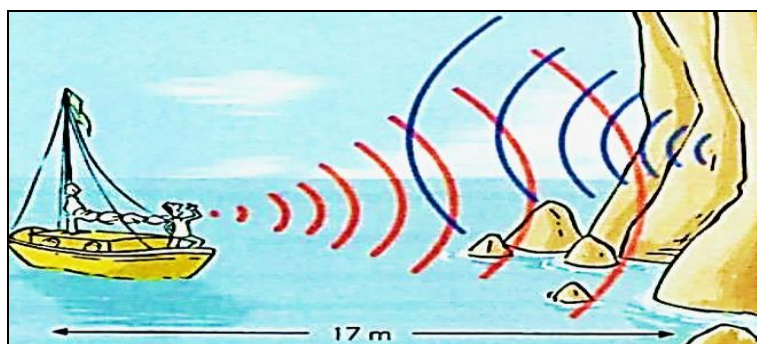
Para medir essa grandeza define-se o nível de **intensidade sonora (β)** pela relação

$$\beta = (10\text{dB}) \log \frac{I}{I_0}$$

onde **β é o nível de intensidade sonora (Bel)**, **I** a intensidade sonora (W/m^2) e **I_0** a intensidade sonora percebida pelo ouvido.

O **eco** e a **reverberação** são fenômenos ocasionados pela propriedade ondulatória do som. O som também sofre o fenômeno de reflexão quando é deparado com um obstáculo no seu sentido de propagação. Como observaremos na indicação do caminho percorrido pela onda da Figura 25. Por exemplo, ao produzir um som em frente a uma montanha, o ouvido percebe, primeiro, o som produzido e, depois de alguns instantes, o som refletido pelo obstáculo.

Figura 25 - Eco



Fonte: www.coladaweb.com Acesso: 30/10/18

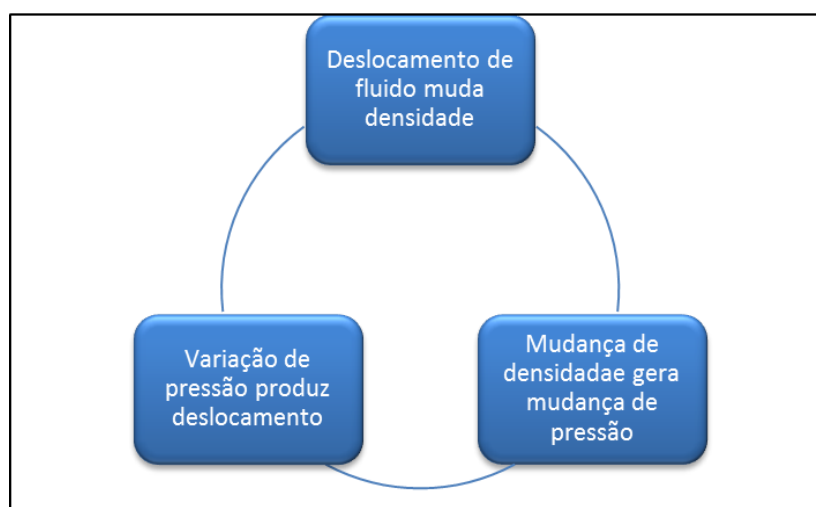
No entanto, esse fenômeno ocorre em ocasiões específicas com o tempo necessário para produzir o eco entre o emissor e o receptor, que deve ter um tempo de resposta de repetição do som de 0,1 s, sendo a velocidade do som de 340 m/s. Por exemplo, esse tempo pode ser determinado usando a relação da mecânica, em que o som deve percorrer 34 m em um décimo de segundo. Logo, a distância máxima observada para que ocorresse o fenômeno foi de 17 m, de acordo com o tempo de resposta para a onda ter que ir até o obstáculo e voltar (ver Figura 25).

A reverberação é o prolongamento do som, e para que isso ocorra, o tempo de emissão e recepção tem que ser inferior a um décimo de segundo, para que o ouvido humano possa distinguir os sons.

5.1 RELAÇÃO DENSIDADE – PRESSÃO EM FLUIDO

O som pode se propagar no Ar (Nussenzveig, 2002) pela variação da densidade nas camadas próximas a fonte (condensação ou rarefação), conforme é mostrado na Figura 23. Como consequência desse fato, induz-se uma variação de pressão (compressão ou descompressão). Essa dinâmica é responsável pelo deslocamento de Ar (fluido). Podemos associar esse fenômeno por meio do seguinte ciclo de deslocamento do som em fluido, representado na Figura 26:

Figura 26 – Ciclo de deslocamento do som em fluido



Fonte : Fluidos, Oscilações e Ondas Calor Nussenzveig (2002)

Analisando, teoricamente, o ciclo, considere um corpo de massa de fluido M , contida em um volume (V). Sabendo que um acréscimo de pressão ($\Delta P > 0$) induz uma diminuição de volume ($\Delta V < 0$). Então, o módulo da variação de volume em relação ao volume inicial (v) do corpo, é $-\Delta V/V$. Isto é, observando as causas das variações infinitesimais (quantidades elementares), temos a quantidade

$$k = -\frac{\Delta V/V}{\Delta p}, \quad (51)$$

Essa quantidade é denominada de módulo de compressibilidade do fluido, e quanto maior for a compressibilidade do fluido, maior será a variação percentual de volume induzida pela variação de pressão, logo maior será o valor de k .

O módulo de elasticidade volumétrico é considerado o inverso da compressibilidade, representado pela letra B , dado pela expressão Eq.(52).

$$B = \frac{1}{k} = -\frac{\Delta P}{\Delta V/V} \quad (52)$$

A densidade do fluido é ρ , definida, por:

$$\rho = M/V \quad (53)$$

Assim, a variação de densidade é

$$\Delta \rho = -M \frac{\Delta V}{V^2} = -\rho \frac{\Delta V}{V} \quad (54)$$

Logo, a equação (52) pode ser escrita por

$$B = \rho \left(\frac{\Delta P}{\Delta \rho} \right) \quad (55)$$

Em relação aos valores de equilíbrio da pressão e densidade, suas variações são pequenas, ou seja, considerando que na onda há uma pequena perturbação.

Denominando de P_0 e ρ_0 os valores de equilíbrio das grandezas, respectivamente, p e ρ os valores infinitesimais da onda, temos

$$\begin{aligned} P &= P_0 + p \\ \rho &= \rho_0 + \delta \end{aligned} \quad (56)$$

De modo que

$$|p| \ll P_0, \quad |\delta| \ll \rho_0 \quad . \quad (57)$$

Assim, o ouvido humano pode suportar a variação de pressão sem provocar sensação de dor, para uma onda sonora, com intensidade menor, correspondente a um milésimo da pressão atmosférica: $|p/P_0| < 10^{-3}$.

Portanto, escrevemos a relação

$$\frac{p}{\delta} = \frac{P - P_0}{\rho - \rho_0} = \frac{\Delta P}{\Delta \rho} = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0 \quad (58)$$

A derivada é calculada em torno dos valores de equilíbrio, e indicada pelo índice 0. A pressão não depende somente da densidade, sendo que há uma relação de dependência com a temperatura.

A equação de estado dos fluidos fornecerá a relação entre pressão P , densidade ρ (ou volume) e temperatura T , para fluido em equilíbrio, obedecendo a lei dos gases perfeitos, e para um gás ideal, temos

$$PV = nRT \quad (59)$$

onde R é a constante universal dos gases e n é relacionado com a massa do gás. No processo isotérmico, isto é, temperatura constante para o gás ideal, logo a pressão P torna-se diretamente proporcional à densidade ρ :

$$P = a\rho \quad (\text{isotérmico}) \quad (60)$$

Como a é proporcional a T , logo, no processo isotérmico, temos:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_T = a = \frac{P}{\rho} \left\{ \left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_{T,0} = \frac{P_0}{\rho_0} \right\} \quad (\text{isotérmico}) \quad (61)$$

Durante o processo de compressão, ou expansão, o índice T significa que a temperatura é constante.

Para o processo adiabático, onde não há troca de calor, da relação entre pressão P e densidade ρ tem as constantes b e γ . De modo que γ é a razão do calor específico do gás a pressão e volume constante. Em geral, em relação ao estudo dos gases reais, essa constante é definida como $\gamma > 1$.

$$P = b\rho^\gamma \quad (62)$$

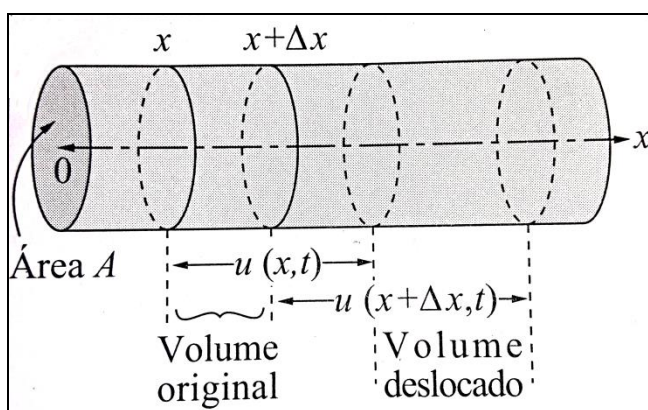
Para o processo adiabático (o sistema não troca calor) o índice S significa entropia (S , esta quantidade mede o grau de agitação das moléculas) constante, e neste caso, nos diz que o processo é reversível, logo o sistema encontra-se em equilíbrio,

$$\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_{S,0} = \gamma \frac{P_0}{\rho_0} \quad (\text{adiabático}) \quad (63)$$

5.2 RELAÇÃO DESLOCAMENTO E DENSIDADE DE FLUIDO

Consideremos que, na Figura 27, uma onda propaga-se dentro de um tubo cilíndrico com seção transversal de área A , coincidindo o eixo $0x$ com: a direção de propagação e; o eixo do tubo.

Figura 27 - Variação de volume de fluido



Fonte: Fluidos, Oscilações e Ondas Calor Nussenzveig (2002)

Representaremos o deslocamento do fluido pela função $u(x, t)$, que esse deslocou-se na secção transversal, no espaço x , e no instante t . Partindo do instante inicial (antes) do deslocamento do fluido, a expressão de variação do volume original, entre as secções x e $x + \Delta x$, é dada por:

$$V = A[(X + \Delta X) - X] = A\Delta x \quad (64)$$

Substituindo a equação Eq.(54) na equação Eq.(64), para variação da densidade, temos

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = -\frac{\Delta V}{V} = -\frac{\partial u}{\partial x}(x, t) = \frac{\rho - \rho_0}{\rho} = \frac{\delta}{\rho} \approx \frac{\delta}{\rho_0}.$$

A relação de deslocamento é deduzida no Apêndice L (APÊNDICE L), como:

$$\delta = \rho - \rho_0 = -\rho_0 \frac{\partial u}{\partial x}(x, t) \quad (65)$$

E assim, temos a relação do deslocamento e densidade do fluido (Ar, conforme utilizamos no exemplo (aplicação) da seção anterior).

5.3 RELAÇÃO DE PRESSÃO E DESLOCAMENTO DE FLUIDO

Tomando como referência a Figura 27 da seção 5.2 relacionando Deslocamento e Densidade de fluido, analisaremos o fluido de volume V do cilindro na seção x e $x + \Delta x$, sendo m a massa, e a pressão p (p_0 pressão inicial),

$$\Delta m = \rho \Delta V \approx \rho_0 A \Delta x \quad . \quad (66)$$

A relação de pressão e deslocamento é deduzida no Apêndice M (APÊNDICE M), dada por:

$$\rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\frac{\partial p}{\partial x} \quad . \quad (67)$$

Observemos que essa equação é a versão unidimensional em que a força resultante é constante.

5.4 A VELOCIDADE DO SOM

Agora, podemos obter a relação de propagação das ondas sonoras, tendo como referência o ciclo da (Figura 26).

Partindo da equação Eq.(67), com o deslocamento do fluido, temos uma variação de densidade do fluido, dada por

$$\delta = -\rho_0 \frac{\partial u}{\partial x}$$

A variação de densidade, consequentemente, provoca uma variação de pressão, e utilizando a Eq.(65), temos

$$P = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0 \delta = -\rho_0 \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0 \frac{\partial u}{\partial x} \quad (68)$$

A velocidade do som é (deduzida no APÊNDICE N):

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \delta}{\partial x^2} \quad \text{Ou} \quad \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \quad (69)$$

Isto é, as variações de densidade e pressão também atendem à expressão semelhante da equação de onda, ou seja, propagam-se com velocidade de onda, e no caso específico, ondas do som.

5.4.1 VELOCIDADE DO SOM EM GASES

A natureza do processo de compressão ou expansão do gás influencia no valor da quantidade $(\partial P / \partial \rho)_0$. Para o caso isotérmico, temos a equação (68) que resulta

$$\sqrt{(\partial P / \partial \rho)_{0,T}} = \sqrt{P_0 / \rho_0} \quad (70)$$

E, se a natureza envolvida na situação for o processo adiabático, obteremos outra relação. Partindo da equação Eq.(70), e substituindo na equação Eq.(63), teremos a relação

$$\sqrt{(\partial P / \partial \rho)_{s,0}} = \sqrt{\gamma P_0 / \rho_0} \quad (71)$$

Um gás com massa M , e de massa molecular m , o número n de moles é $n = M/m$, logo da equação Eq.(59) se escreve

$$PV = \frac{M}{m} RT \left\{ P = \frac{M}{V} \frac{RT}{m} \left\{ \frac{P}{\rho} = \frac{RT}{m} \right. \right. \quad (72)$$

O que resulta em

$$V = \sqrt{\gamma RT / m} \quad (73)$$

A expressão da velocidade do gás é dada pela equação (Eq.68), e equação (Eq.N2) do Apêndice N (APÊNDICE N), independente da pressão.

5.4.2 Velocidade do som na água

Analisando as equações Eq.(64) e Eq.(69), e simplificando as expressões, temos

$$V = \sqrt{B / \rho_0} \quad (74)$$

Considere o sistema sobre o efeito de uma pressão de 20 atm, em temperatura ambiente, decrescendo de aproximadamente 0.9 cm^3 , 1 litro de água.

Assim, a quantidade $-\Delta V/V \approx 0,09\% = 9 \times 10^{-4}$, para $\Delta P \approx 2 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$, é dada pela equação Eq.(52), resultando em

$$B = 2,2 \times 10^9 \text{ N/m}^2$$

5.5 Tubos Sonoros

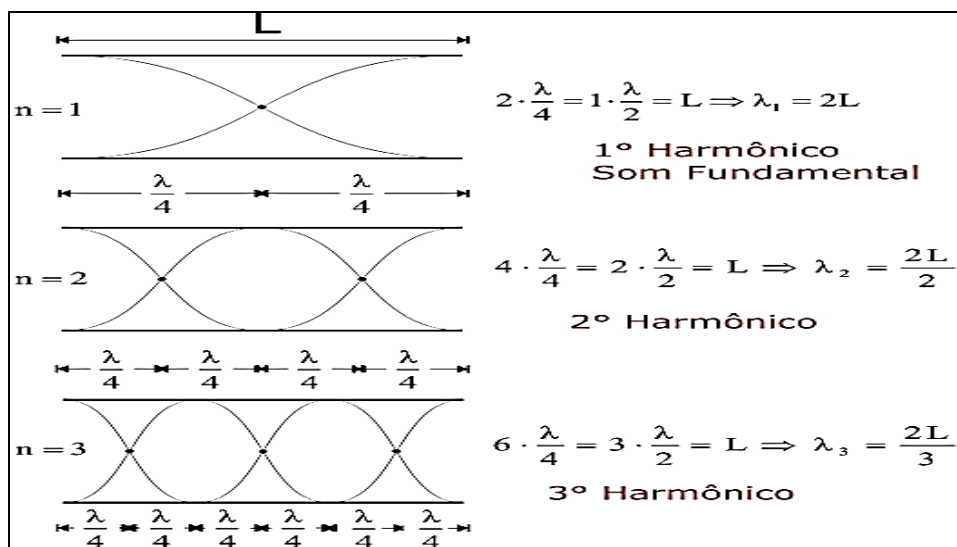
Segundo Gaspar (2009), a física ondulatória do tubo é semelhante ao da corda, pois estamos tratando do mesmo fenômeno de reflexão, e podemos produzir ondas estacionárias, dentro de um tubo cheio de Ar, ou mesmo nos tubos com duas extremidades abertas. Nesse caso, para a partícula, também há reflexão da onda sonora, mas a reflexão não é completa, pois, esse fato é o suficiente para criar as condições de onda estacionária. Essas ondas periódicas se superpõem, originando o fenômeno de reflexão.

Analogamente à corda, isso só ocorre para comprimentos de ondas específicos. Esses **comprimentos de ondas** são correspondentes (equivalentes) às **frequências de ressonâncias** no tubo. Nessas condições, o Ar passa a oscilar com amplitude máxima, e o Ar, ao redor, é movimentado, produzindo **som audível**.

5.5.1 Tubos de Extremidades Abertas

Outros aspectos semelhantes se destacam no tubo de extremidades abertas, que é um sistema semelhante a uma corda com duas extremidades móveis. Portanto, para a configuração mais simples ($n=1$, primeiro harmônico) de um tubo desse tipo, temos nesse caso, nas extremidades do tubo, dois (2) ventres (em cada extremidade, apresenta um superior e outro inferior) e um (1) só nó no ponto médio do tubo, como mostrado na figura 28. De acordo com a figura 28 essa configuração de onda é chamada de **modo fundamental** ou **primeiro harmônico**. Para sua produção, o comprimento de onda específico (correspondente ao modo fundamental) deve ser de $\lambda = 2L$.

Figura 28 - Ondas estacionárias no tubo de extremidades abertas



Fonte:sofisica.com.br Acesso: 30/10/18

Seguindo a sequência de cima para baixo da figura 28, o segundo modo necessita de um comprimento de onda $\lambda = L$. E o terceiro harmônico de $\lambda = \frac{2L}{3}$, e assim sucessivamente, generalizando, temos

$$\lambda = \frac{2L}{n}, \quad \text{para } n = 1, 2, 3 \dots$$

onde n é o número do harmônico correspondente ao modo de oscilação, e utilizando a equação Eq.(2), $v = \lambda f$, isolando f , obtemos as frequências correspondentes aos harmônicos ou modos em ordem

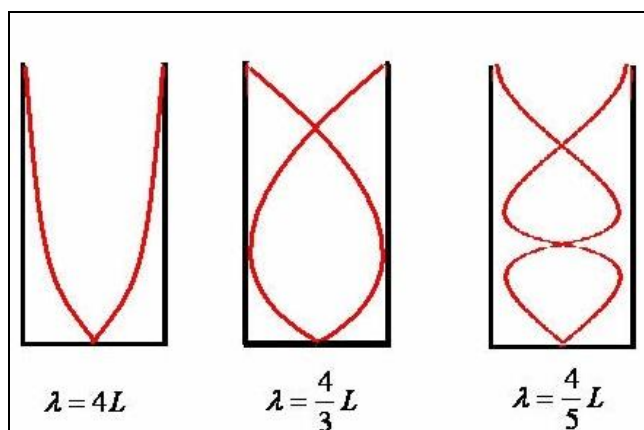
$$f = \frac{v}{\lambda} = n \frac{v}{2L}, \quad \text{para } n = 1, 2, 3 \dots \quad (75)$$

5.5.2 Tubo com uma extremidade fechada

A Figura 29 mostra as configurações possíveis para esse tubo. No primeiro caso, da esquerda para direita é apresentada a configuração mais simples. Assim,

nesse caso, a extremidade fechada apresentará um nó e na aberta um ventre, de modo que, o harmônico fundamental necessita de um comprimento de onda específico de $\lambda = 4L$, o segundo $\lambda = \frac{4L}{3}$, e assim sucessivamente.

Figura 29 - Tubo com uma extremidade fechada



Fonte: sofisica.com.br Acesso:30/10/18

Generalizando a relação dos harmônicos, temos:

$$\lambda = \frac{4L}{n} \quad \text{para } n = 1, 3, 5$$

Para **frequência de ressonância**, temos:

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{nv}{4L} \quad \text{para } n = 1, 3, 5 \dots \quad (76)$$

De modo que n é o número do harmônico. Observe que nesse tubo as frequências de número par não são possíveis, e que 3 se refere ao número três e não o terceiro harmônico possível.

6 PRODUTO EDUCACIONAL

O Tubo de ressonância de baixo custo é o Produto proposto no Projeto da Dissertação, inspirado em um tubo experimental didático para estudo de ondas em uma cavidade, com base no equipamento de laboratório RESONANCE TUBE – WA 9495, produzido pelo Laboratório PASCO. O tubo tem o objetivo de demonstrar, na prática, fenômenos que ocorrem em ondas estacionárias, assim como conceitos do estudo de ondas que estão correlacionados com os fenômenos ondulatórios.

O custo operacional da versão da proposta alternativa do autor da Dissertação para confecção do Produto, este tem valor, em média, de R\$ 55 reais, que pode variar conforme a região, de acordo com os preços dos materiais de montagem adquiridos. No caso de fabricação da versão industrial da PASCO, este foi consultado por R\$ 629 reais.

Os professores atuais são favoráveis à prática experimental nas escolas, no entanto, o custo elevado dos experimentos com kits prontos, produzidos pela indústria, ainda é um dos fatores de desafio que dificulta a aplicação dessa metodologia em escolas públicas.

O Tubo de ressonância proposto, foi desenvolvido com intuito de proporcionar o ensino e a aprendizagem de um experimento riquíssimo em fundamentação Física Ondulatória, e simples, na aplicação e manuseio, com materiais de fácil acesso, podendo-se utilizar material reciclado, ou materiais simples de se encontrar, com baixo custo, em qualquer cidade que tenha uma loja de material de construção, e uma caixa de som (vendedor ambulante, comércio informal) para teste.

Ainda assim, sabendo que o custo de R\$ 55 reais é valor, relativamente considerado, e que pode ser reduzido, apresentaremos um modelo de proposta alternativa de custo mínimo no valor de R\$ 5 reais, que consta só do tubo, sem incluir os adaptadores, e uma caixa de som.

Santos (2013), Batista (2009), Araújo (2003), demonstram que o ensino nas escolas, destacando no ensino médio, apresenta dificuldade na assimilação de conceitos da física, que são apresentados com a mesma metodologia de estudo, abordada pela maioria das escolas de forma direta, sem levar em conta o conhecimento do aluno com o fenômeno para explorar a aplicação em exercício,

além da aplicação dos conceitos no cotidiano, deixando de potencializar a aprendizagem dessa disciplina. Em busca de minimizar e oferecer um subsídio ao docente, com bases metodológicas, é que propomos esse experimento.

O experimento é uma ferramenta metodológica, subsidiada na teoria de formação por etapas de Galperin.

6.1 MATERIAIS E MONTAGEM

Apresentaremos passo a passo da montagem do equipamento (APÊNDICE I – MANUAL DE CONSTRUÇÃO E APLICAÇÃO DO TUBO DE RESSONÂNCIA), como também um exemplo da aplicação, procurando destacar a percepção dos conceitos correlacionados ao fenômeno.

Na Figura 30, mostraremos o Tubo de ressonância de baixo custo no valor de R\$ 55 reais com a caixa de som específica.

Figura 30 - Tubo de ressonância de baixo custo



Fonte: arquivo pessoal

Na Figura 31, segue o modelo equivalente alternativo, no valor de R\$ 5 reais (sem adaptadores) e substituindo a caixa de som.

Figura 31 - Modelo alternativo do tubo de ressonância



Fonte: arquivo pessoal

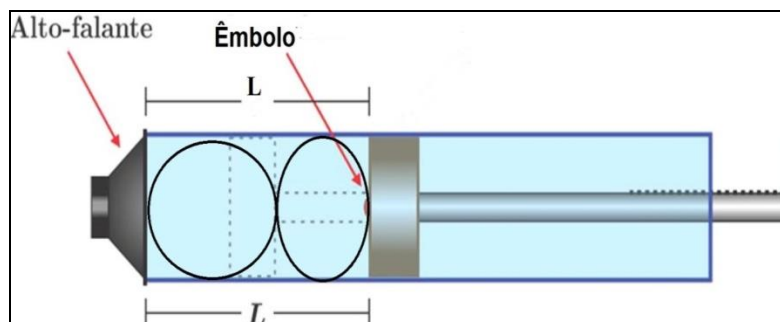
Para aplicação e verificação da aprendizagem, desenvolvemos questionários que possibilite a investigação pela intervenção do experimento, conforme metodologia sugerida por autores Costa (2018), Silva (2018) e Pereira 2018. Sugestões de questionários encontram-se nos (APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO 1 PRÉ-INTERVENÇÃO, APÊNDICE C – QUESTIONÁRIO 2 PÓS-INTERVENÇÃO e APÊNDICE D – QUESTIONÁRIO DE OPINIÃO). Também apresentamos o manual de montagem e funcionamento do produto no Apêndice I (APÊNDICE I – MANUAL DE CONSTRUÇÃO E APLICAÇÃO DO TUBO DE RESSONÂNCIA).

6.2 FÍSICA NO TUBO DE RESSONÂNCIA DE BAIXO CUSTO

Analizando a Figura 32, com as etapas de montagem (preparação do experimento) e de teste do experimento concluídas, é programado (calibrado) o emissor de ondas sonoras (alto-falante), com o auxílio de um aparelho celular via cabo auxiliar (ou via *bluetooth*) para emitir ondas, com a mesma frequência obtida pelo modulador de frequência, chamado de gerador simples de tone (aplicativo gratuito, acessado direto na loja virtual play store).

Observa-se que ondas são conduzidas pela tubulação até o êmbolo (pistão) e segundo o fenômeno de reflexão, estas ondas produzidas ao incidir no êmbolo, retornarão (voltarão) no sentido oposto ao da fonte, coincidindo em determinados pontos do espaço, ocorrendo assim, outros dois fenômenos ondulatórios (característicos de ondas), como exemplos, o princípio da superposição e o fenômeno de interferência de ondas, originando ondas construtivas e destrutivas em uma perspectiva de ondas estacionárias.

Figura 32 - Ilustração do tubo de ressonância



Fonte: www.scielo.br

A comprovação de ondas estacionárias é percebida com a movimentação do êmbolo Figura 32, onde podemos localizar os pontos de rarefação e de compressão, sendo que esse fato é típico de ondas mecânicas. Assim, apresentamos a propriedade de elasticidade por compressão e rarefação. Então, nesse caso o aparelho auditivo apontará uma diminuição na intensidade do som, nos pontos de rarefação da onda (amplitude mínima) nesses pontos. E nos pontos onde a amplitude apresenta máximos, correspondem os pontos de compressão, entretanto, o aparelho auditivo acusará uma atenuação do som.

De acordo com a fundamentação teórica de TIPLER (2006), a expressão que representa onda progressiva é a função senoidal, em símbolo, $\text{sen}(x)$ ou $\text{cos}(x)$, ambas são válidas. Em certo instante t , o deslocamento da ordenada y de um ponto de coordenadas (x, y) da onda, situado na abscissa por x , é dado pela equação Eq.(9)

$$y(x, t) = A \cos(kx - \omega t)$$

onde $y(x, t)$ é o deslocamento, A amplitude, $\cos(kx - \omega t)$ é o fator oscilatório, $(kx - \omega t)$ é o argumento do cosseno, sendo que na fase, k é o número de onda, x a

posição(m), ω frequência angular (rad/s) e t é o tempo (s). Todas essas grandezas estão de acordo com o padrão de medidas SI.

Para que ocorram ondas estacionárias no tubo é necessário se ter duas ondas progressivas com as mesmas características ondulatórias (frequência, comprimento de onda, velocidade), porém ambas propagando-se em sentido oposto. Com essas características, as ondas se superpõem, e a partir da interferência momentânea, originam-se ondas estacionárias. Assim, sua representação é dada pelas seguintes equações Eq.(43) e Eq.(44), respectivamente, onda com deslocamento para a direita e onda deslocando-se para a esquerda,

$$y_1(x,t) = A \cos(kx - \omega t)$$

$$y_2(x,t) = A \cos(kx + \omega t)$$

Aplicando o princípio de superposição, temos a equação (45)

$$y'(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t) = A \cos(kx - \omega t) + A \cos(kx + \omega t)$$

e, partindo de uma relação trigonométrica, obtemos a equação (46)

$$y'(x,t) = [2A \cos kx] \cos \omega t$$

Essa é a equação que representa uma onda estacionária, sendo que o argumento dentro do colchete representa a amplitude resultante $2A \cos kx$, onde x é a posição de um ponto da onda, e k , o número de onda.

6.3 METODOLOGIA

Nossa proposta para o ensino de física é criar uma aula que possibilite a transposição de representação externa do estudo de ondas sonoras, em linguagem

interna, por intermédio das experiências do indivíduo, e que o aprendiz desenvolva a habilidade de selecionar conhecimento específico presente na estrutura cognitiva, para solução de exercícios, e ter-se a noção (o domínio) das aplicações de onda presente no cotidiano.

A metodologia dessa dissertação foi desenvolvida na teoria de formação por etapas de Galperin, onde desenvolvemos aulas teóricas e práticas, junto com a aplicação do experimento, seguindo os cinco estágios que fundamentam essa teoria:

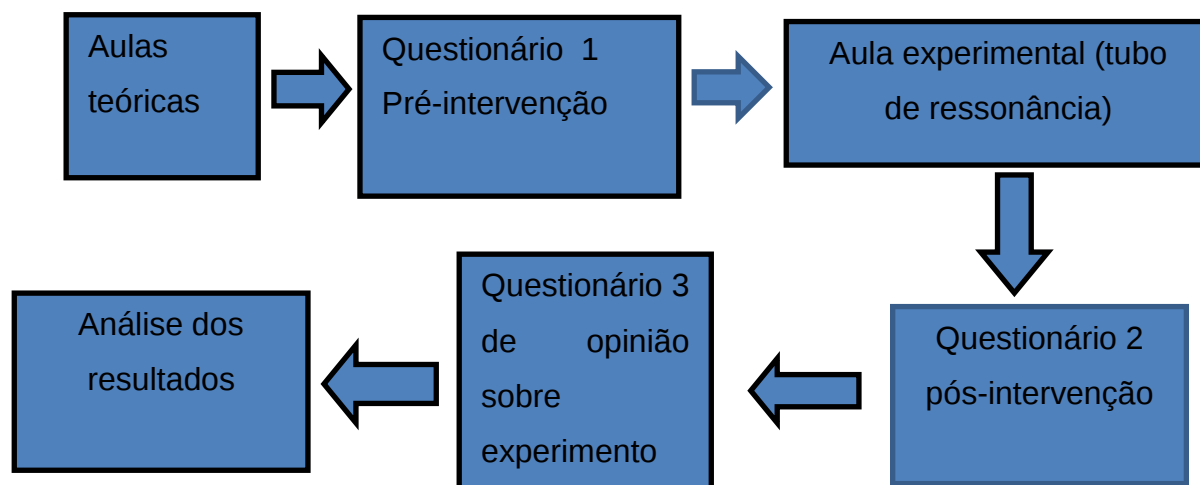
- Motivacional;
- Desenvolvimento da base orientadora de ação (B.O.A III);
- Ações do plano material ou materializado;
- Ações do plano de linguagem externa;
- Mental.

Essa metodologia foi desenvolvida em duas escolas, a primeira escola **A**, situada na cidade de Boa Vista, estado de Roraima, com 25 alunos da 2ª série do ensino médio, turma 201, turno matutino, aplicada pelo professor Eduardo Moraes Costa, titular da turma. Foi entregue ao docente o manual de aplicação do produto, e é importante salientar que o professor, autor da Dissertação, não influenciou em nada a respeito da aplicação do produto, como sugestões ou ajuste de manuseio do produto.

A segunda instituição foi à escola **B** Indígena, localizada na vicinal taboca, distante 37 km do município de Cantá, estado de Roraima, com 15 alunos da 2ª série do ensino médio, turma A, turno vespertino. O produto aplicado, nessa instituição, foi manuseado pelo professor autor da Dissertação Ranylson Gomes Leocádio. A faixa de idade dos discentes, em ambas as instituições, foi de 18 a 20 anos.

A metodologia aplicada, nesta etapa da prática de ensino, segue o fluxograma da Figura 33.

Figura 33 – Fluxograma referente à metodologia



Fonte: autor

A metodologia segue organizada no cronograma:

Etapas do fluxograma	Quantidade de aula	Tempo
Aulas teóricas	10	50 mim cada
Questionário 1	1	50 mim
Aula experimental	1	50 mim
Questionário 2	1	50 mim
Questionário 3	0	Para domicílio

No primeiro momento, procuramos, de forma verbal, identificar se o discente tinha alguma experiência com o conteúdo, para determinar um ponto de partida para introdução do fenômeno, além de aguçar a curiosidade dos aprendizes sobre o tema, iniciando-se, assim **o primeiro estágio (etapa motivacional)** da teoria de Galperin. Na sequência, foram ministradas 6 aulas sobre o conteúdo de ondas (APÊNDICE A – PLANEJAMENTO DE AULAS MINISTRADAS), para aprofundar o conhecimento prévio do aluno (conhecimento de experiências sociais). Esse apêndice, foi elaborado também a motivar o aluno a estudar o fenômeno, para se obter melhor resultados com a primeira etapa (motivacional), destacando-se as curiosidades sobre o tema, expondo exemplos encontrados na natureza, como por exemplo: tsunamis, ondas sonoras etc.

Com relação às aulas, utilizamos a seguinte estratégia de metodologia:

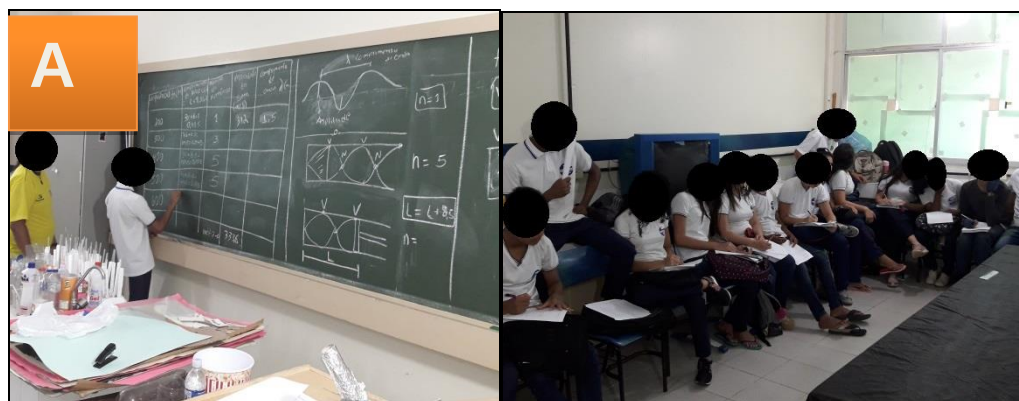
- Aula expositiva com a utilização de livros, mídia PowerPoint, vídeos e pequena demonstração sobre os conceitos de onda e suas características;
- Exemplos de resolução de exercícios expostos no quadro e no PowerPoint, com aplicação de relações matemáticas;
- Resolução de listas de exercícios pelo discente;
- Aplicação do tubo de ressonância de baixo custo, cálculo da velocidade do som, e percepção das características do fenômeno de ressonância (APÊNDICE I – MANUAL DE CONSTRUÇÃO E APLICAÇÃO DO TUBO DE RESSONÂNCIA).

Veja, nas Figuras 34 e 35, os momentos da aplicação das aulas teóricas (APENDICE A - PLANEJAMENTO DE AULAS MINISTRADAS), sendo que a figura 34 mostra momentos da aula de título Ressonância mecânica (APÊNDICE A / PLANO DE AULA 6), ministrada nas Escolas **A** e **B**.

Na Figura 34, mostra o professor Eduardo executando a ação, reforçando a primeira etapa (motivacional) da teoria de Galperin, com orientações para a atividade do exercício (1) da aula 6, isto é, que se resume em uma simulação de dados hipotéticos para determinar a velocidade do som, e calcular o comprimento de onda, antes da aula de intervenção do tubo de ressonância de baixo custo.

E, na Figura 35, são apresentados momentos da aula de título Reflexão e Refração de pulsos (APÊNDICE A / PLANO DE AULA 2), lecionada pelo professor autor da Dissertação (Ranylson Leocádio). Isto é, a Figura 35 mostra o professor revendo os conceitos da aula 2 (Reflexão e Refração de pulsos), para que os alunos internalizem os conceitos, e no momento posterior, consistirá em entender a Física no tubo de ressonância, sendo que, nesse momento, os docentes potencializam a primeira etapa (motivacional), com ilustrações de exemplos do fenômeno e auxílio de vídeos experimentais.

Figura 34 - Aula Teórica na Escola A



Fonte: autor

Figura 35 - Aula Teórica na Escola B



Fonte: autor

Com a execução das aulas teóricas e discussão de resolução de exercícios (APÊNDICE A – PLANEJAMENTO DE AULAS MINISTRADAS), foi proposto uma lista de exercícios ao discente, esta foi apresentada no final de cada aula específica, conforme disponível no Apêndice A (APÊNDICE A).

No segundo momento, com o conteúdo lecionado (APÊNDICE A) e a correção de todos os exercícios (APÊNDICE A) observados pelo docente na sala, foi que aplicamos o Questionário 1 (APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO 1 PRÉ-INTERVENÇÃO). Este foi elaborado para verificar que, de que maneira, os discentes assimilaram os conceitos e, analisaram o desenvolvimento da habilidade (interpretação e manipulação algébrica) de resolução do problema proposto pela

atividade experimental (APÊNDICE A), observando lacunas que necessitam de conhecimento específico para atingir o objetivo.

Em seguida, apresentaremos um gráfico referente ao índice de acertos, e de erros, para verificação do efeito da aprendizagem.

A Figura 36 mostra o momento da aplicação do Questionário 1 (APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO 1 PRÉ-INTERVENÇÃO) nas instituições de ensino denominadas de A e B.

Figura 36 - Aplicação do Questionário 1 pré-intervenção



Fonte: autor

No terceiro momento, aplicaremos o produto educacional. A proposta dessa aula é aprender os conceitos na prática, manipulando relações físicas e esperando verificar as consequências, de acordo com a teoria ondulatória. O produto tem como objetivo, calcular a velocidade do som no Ar, em temperatura ambiente, e comparar com o valor teórico esperado na literatura. Além deste, poder explorar conceitos e fenômenos como diferencial da proposta inovadora, deve também, propiciar a percepção fisiológica de peculiaridades do fenômeno (nós, ventres, amplitude e frequência, etc.).

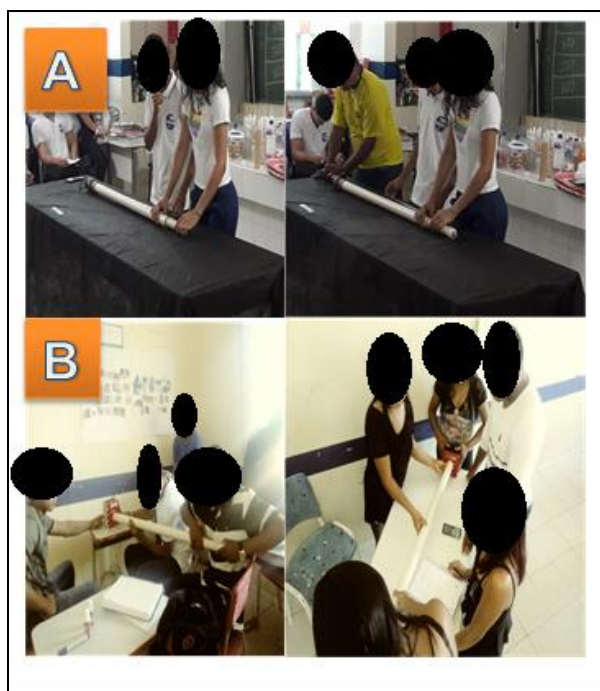
A apresentação do produto ao aprendiz, vem potencializar, significativamente, o primeiro estágio da teoria de formação de etapas de Galperin, pois a maioria das aulas são ministradas com excessiva exposição de conteúdo e resolução de exercícios, o aluno é forçado abstrair o fenômeno, e aplicar, sem antes ter contato

concreto com o fenômeno. A parte operacional (**segunda etapa de Galperin**) e de controle é a base orientadora de ação B.O.A **III**, ou manual do produto (APÊNDICE I – MANUAL DE CONSTRUÇÃO E APLICAÇÃO DO TUBO DE RESSONÂNCIA), que são as condições e orientações da ação para atingir o objetivo específico da ação.

E, nesse momento, da **terceira etapa**, observamos **o plano material - o materializado**, que é a apresentação de um objeto que contém as essências fenomenológicas (Produto), conforme mostra a Figura 37. A aplicação do produto nas escolas A e B, nessa imagem da Figura 37, ambos os professores orientam o aluno com referência na base orientadora de ação (B.O.A III), que é o conjunto de orientações para o manuseio e controle do experimento, conforme é apresentado no Apêndice I (APÊNDICE I – MANUAL DE CONSTRUÇÃO E APLICAÇÃO DO TUBO DE RESSONÂNCIA).

Portanto, esta terceira etapa é também a ação conjunta dos alunos de ambas instituições, com base nas orientações repassadas desde do início do processo, e também contida na etapa BOA III (B.O.A III). Nesse momento, o aluno coletará os dados para a atividade experimental da aula 6 (atividade experimental).

Figura 37- Aplicação do Produto



Fonte: autor

No quarto momento, aplicaremos o Questionário 2 (APÊNDICE C – QUESTIONÁRIO 2 PÓS-INTERVENÇÃO), observe que o Questionário 2 apresenta as mesmas questões do Questionário 1, e a aplicação deste, é para analisar o modo como os conceitos foram compreendidos ou reinterpretados, demonstrando assim a riqueza e a evolução da assimilação dos conceitos da turma, gerando um gráfico pós-intervenção, referente erros e acertos, assim como a evolução na manipulação algébrica.

Vamos observar, na Figura 38, momentos da aplicação do Questionário 2, nas escolas A e B.

Figura 38 - Aplicação do Questionário 2 pós-intervenção



Fonte : Autor

Sabendo que, no estágio três, da teoria de Galperin, permite ao aprendiz desenvolver um plano material ou materializado. Isto é, possibilita, ao indivíduo, associar experiências concretas com a parte abstrata, e como o mesmo teve acesso a uma representação objetual, acreditando-se que ele vai apresentar uma maior facilidade na interpretação dos exercícios que, na maioria das ocasiões, apresenta um substituto do objeto, uma imagem ou representação gráfica, entre outros.

É também nessa etapa, que observaremos a **quarta etapa, a ação do plano de linguagem externa**, que é a formulação dos conceitos pelos signos. Ou seja, um conjunto de símbolos que segue uma sequência lógica de representação da ação dos conceitos. E, o desafio, agora, consiste em formular questões que necessite de conceitos que foram trabalhados durante a aplicação do produto, onde o aprendiz

não tem mais acesso ao objeto, e sim, estará diante de um modelo representante que auxiliará na resolução das questões.

A **quinta etapa** de Galperin, a **ação mental**, é analisada no Questionário 2 com exercícios, que exigem habilidades de manipulação algébrica, ou situação problema. É nesse momento, que o discente seleciona conceitos específicos, para a solução do exercício, e o objetivo, só será alcançado, se as experiências estiverem corretas, contendo a essência, junto com suas especificidades, presentes na estrutura cognitiva do indivíduo.

O quinto momento, será aplicado o Questionário 3, de opinião (APÊNDICE D – QUESTIONÁRIO DE OPINIÃO). Esse questionário tem o objetivo de evidenciar o primeiro estágio, a motivação, para verificar o grau de aceitação dos discentes dessa metodologia aplicada.

A análise dos resultados será representada graficamente, comparando os resultados dos Questionários 1 pré-intervenção, pós-intervenção Questionário 2, e a representação gráfica do Questionário 3, de opinião de cada instituição A e B, onde foi aplicado o produto. Assim, também apresentamos, em seguida, uma discussão paralela dos gráficos entre as instituições.

As discussões realizadas pela intervenção do produto nas instituições, vem demonstrar a eficiência e a eficácia deste recurso metodológico.

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesse capítulo analisaremos as consequências das aulas experimentais, subsidiadas pela teoria de formação por estágio de Galperin, na qual a pesquisa visa atingir 100% dos alunos matriculados na turma. No entanto, algumas divergências dificultaram a aplicação do produto. Por exemplo, observando no ano de 2018, em que o estado de Roraima passou por uma grave crise, impactando toda máquina pública, inclusive a educação, onde a falta de merenda escolar provocou alteração no horário de aulas, e os tempos de aulas foram reduzidos. Outro caso, foi a falta de transporte escolar, e isso contribuiu para um índice elevado de desistência. No entanto, a pesquisa é válida, pois o número de alunos manteve-se constante durante a aplicação do produto em ambas instituições.

Antes de realizar uma análise qualitativa e quantitativa dos questionários (Pré-intervenção e Pós-intervenção), apresentaremos os resultados da pergunta norteadora da atividade experimental, que é a pergunta (1) do Apêndice A (APÊNDICE A / AULA 6), que se refere aos valores encontrados para a velocidade do som no Ar, e desse modo, verificar a eficiência do produto.

A Figura 39 mostra resultados de ação experimental de um aluno para a determinação da velocidade do som. O aluno desenvolveu essa atividade pela intervenção do produto, e observa-se que, os resultados encontrados para a velocidade do som no Ar, estão próximos do valor esperado na literatura, pela teoria, que é 330 a 343 m/s, dependendo dos fatores variantes (temperatura, observação do foco de cada aluno...) de cada região, o que reforça a eficácia na obtenção de dados experimentais para os estudos.

Figura 39 – Valores encontrados experimentalmente da velocidade do som /aluno A

Sugestões de atividades				
1. Calcule a velocidade do som.				
Frequência de onda f_n (Hz)	Comprimento do tubo L (m)	Número do harmônico	Velocidade do som (m/s)	Comprimento de onda λ (m)
200	0,405m	1n	324m/s	0,62
300	0,86m	3n	344m/s	1,14
400	0,63m	3n	336m/s	0,84
500	0,85m	5n	340m/s	0,68
600	0,69m	5n	331,2m/s	0,552

Fonte: arquivo pessoal

O aluno foi capaz de desenvolver técnicas e habilidades específicas para realizar essa atividade, assim, ressaltando a última etapa (etapa mental) da teoria de Galperin, onde o aluno é capaz de realizar atividades específicas depois de realizar as outras quatro etapas.

Observe na Figura 40, em outro exemplo. Podemos observar que esse aluno diverge em alguns cálculos da resposta teórica. Isso ocorre porque o aluno não coletou, corretamente, os dados do plano material. Entretanto, esse também apresentou um bom rendimento no aproveitamento de estudo, conforme mostra o número de respostas, próximo do valor teórico.

Figura 40 – Valores encontrados experimentalmente da velocidade do som /aluno B

Sugestões de atividades				
1. Calcule a velocidade do som.				
Frequência de onda f_n (Hz)	Comprimento do tubo L (m)	Número do harmônico	Velocidade do som (m/s)	Comprimento de onda λ (m)
200	0,40(m)	1	320(m/s)	1,6
300	0,86(m)	3	344(m/s)	1,14
400	0,83(m)	3	442(m/s)	1,10
500	0,85	5	340(m/s)	0,68
600	0,69	5	131(m/s)	0,55

Fonte: autor

Apresentaremos, também, dados recolhidos, a partir do tubo de ressonância de baixo custo (produto), pelo professor, autor da Dissertação, Ranylson leocádio, conforme mostra a Figura 41. Observa-se que, os valores são bem próximos do valor esperado na literatura, pela teoria, verificado pela média aritmética, o que comprova a eficácia do produto. Esses dados foram obtidos seguindo o manual de manuseio do produto, sendo disponível em endereço da internet com um roteiro passo a passo da análise dos dados da Figura 41, no linkin <www.youtube.com/watch?v=xgRwdS_xueA&t=3s>

Figura 41 – Dados experimentais do tubo de ressonância de baixo custo/ professor

ATIVIDADE EXPERIMENTAL				
Utilizando o tubo de ressonância de baixo custo calcule a velocidade do som.				
1) Calcule a velocidade do som.				
Frequência de onda f_n (Hz)	Comprimento do tubo L (m) $L + 8 \text{ cm}$	Número do harmônico	Velocidade do som (m/s)	Comprimento de onda λ (m)
200	0,41	1	328	1,6
300	0,83	3	332	1,1
400	1,04	5	332,8	0,8
500	0,85	5	340	0,6
600	0,89	7	339	0,5
			(334,36 m/s)	

Fonte: autor

Esses dados comprovam que o objetivo de calcular a velocidade do som pela intervenção do produto foi atingido, assim como, a aprendizagem dos discentes, onde, para atingir a meta, passaram pelas cinco etapas de Galperin, desenvolvendo habilidades previstas como manipulação de dados, e a reutilização (ação e reflexão de ação) do conhecimento, quando necessário.

Apresentaremos uma análise quantitativa e qualitativa, em relação ao número de acertos, das perguntas dos Questionários pré e pós-intervenção do produto, onde cada pergunta tem um sentido que busca destacar aspectos relevantes da teoria de

Galperin, evidenciando, detalhadamente, o processo de percepção, controle, internalização psíquica e extrapsíquica.

No primeiro momento, os alunos sentiram dificuldades em assimilação dos conceitos, fato observado pelo Questionário 1 (pré-intervenção), conforme representado graficamente, em ambas instituições. Foi observado que, durante a aplicação das aulas teóricas, os discentes se desfocavam do assunto facilmente.

Com a aplicação do produto, percebemos uma curiosidade em relação a prática experimental e ao fenômeno, pois, graficamente, o número de acertos evidencia uma melhora na assimilação dos conceitos, indicando que o conceito foi internalizado.

Apresentaremos os resultados graficamente, em paralelo, para observarmos a evolução e a internalização dos conceitos nas instituições A e B.

De acordo com os Questionários 1 e 2, a primeira pergunta é:

1. Defina o que é som? De que maneira o som pode se propagar?

A primeira pergunta foi elaborada para observar a forma que os discentes estão assimilando os conceitos físicos fundamentais no estudo de ondas. Identificaremos as instituições pelas seguintes letras respectivamente, escolas **A** e **B**.

Apresentaremos exemplos de perguntas consideradas corretas, de acordo com a Figura 42.

Figura 42 - Resposta correta da pergunta 1

Resposta

1 - São ondas longitudinais que se propagam em sólidos, líquidos e gases. A onda sonora não arrasta as partículas de ar por onde passa, ela apenas faz com que estas vibrem em torno de sua posição de equilíbrio.

Fonte: autor

Essa resposta está de acordo com definição de Moysés Nussenzveig para onda sonora, no livro curso de física básica p. 122.

O som se propaga em fluidos, tanto na atmosfera como em líquidos: sons continuam audíveis debaixo da água. Também se propaga em sólidos [...] o fato de que o som se propaga através de um meio material, sem que haja transporte de matéria de um ponto a outro, já é uma indicação de sua natureza ondulatória. (Moysés Nussenzveig, p.122)

Essa resposta foi considerada certa, pois ela apresenta as características essenciais da definição, de fato, ondas longitudinais necessitam de um meio para se propagar, sem que haja transporte de matéria.

A seguir, observaremos exemplos de respostas consideradas incorretas, de acordo com a Figura 43.

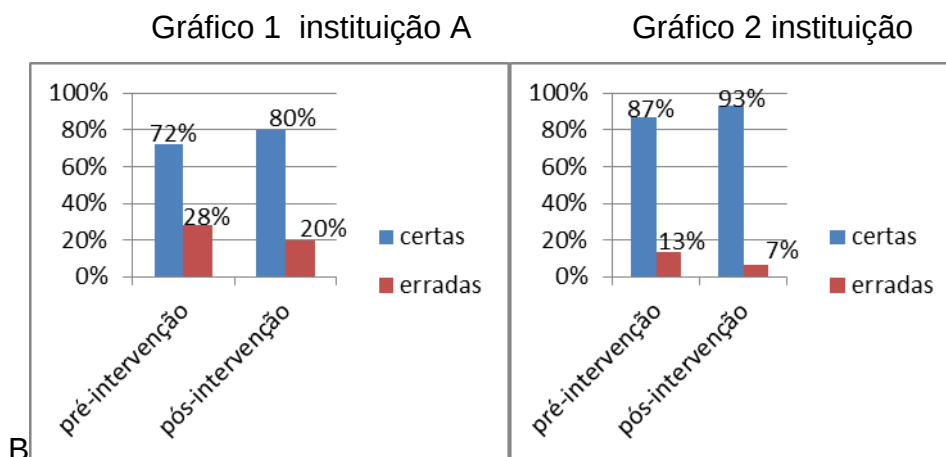
Figura 43 - Resposta incorreta da pergunta 1

Pode se propagar em todos direções e também através do ar, em todas ondas esféricas, também é possível que as moléculas através do ar e do som.

Fonte: autor

Essa resposta apresenta partes da definição de ondas, no entanto, o discente usa um exemplo para responder a pergunta, ou seja, o aluno deixa oculto a essência do fenômeno, que são ondas mecânicas longitudinais e o transporte de energia em um meio, e se confunde nas ultimas linhas. Embora ele esteja errado, percebemos um conhecimento prévio que pode ser reestruturado com a participação de um mediador.

Veremos, nos gráficos 1 e 2, a quantidade de acertos e erros para a pergunta 1 nas instituições. De acordo com os gráficos 1 e 2, os números de acertos e erros, nas respectivas escolas **A** e **B**, foram:



Fonte: autor

O Questionário Pré - intervenção mostra a quantidade de acertos e erros dos alunos das duas instituições, e o Questionário pós - intervenção evidencia a evolução, ou aprimoramento dos conceitos, presente na estrutura cognitiva do aprendiz. Na escola **A**, de acordo com o gráfico 1, 72% dos discentes responderam corretamente a questão, e 28% destes não estavam de acordo com as definições físicas, que foram dados coletados antes da prática experimental, após a aplicação do produto. E por esta razão, percebemos um aumento no percentual de acertos cerca de 8% destes.

No gráfico 2, temos a quantidade de acertos e erros para a segunda instituição **B**, onde no pré, temos 87% das questões respondidas corretamente, e 13% não estão de acordo com as definições físicas. Com a intervenção, o Questionário pós mostra um aumento percentual referente as questões respondidas corretamente de 6%.

Nas aulas tradicionais, baseadas na exposição de conceitos, fenômenos e aplicação na resolução de exercícios, a fundamentação teórica é assimilada pelo discente, de forma abstrata, o que dificulta o processo de ensino dessa disciplina. Esse processo tem, como resultado, alunos desestimulados pelos constantes sentimentos de fracasso na resolução de exercícios. No entanto, essa metodologia possibilita que uma parte dos alunos pode compreender, de forma superficial, o conteúdo.

Dessa forma, podemos justificar o número de acertos no Questionário pré, como indicam os gráficos 1 e 2. Analisando o Questionário pré-intervenção parcial, esse basicamente, apresenta característica de aulas tradicionais, somente com

aulas teóricas, e aplicação de exercício, não sendo suficiente para garantir que a maioria da turma assimile os conceitos.

Com a implementação da prática experimental, fundamentada por estágios de Galperin, abrangemos maior número de alunos, como são mostrados pelos gráficos 1 e 2 no Questionário pós. Pois, o produto possibilita uma experiência com o fenômeno, de forma científica, onde observamos, que os estágios possibilitam ao discente, o que Vygostyky denomina de Zona de Desenvolvimento Proximal, isto é, uma região cognitiva que está entre o problema e a sua resolução. O discente não tem a solução pronta, mas ele possui subsídio de experiência, que pode ser reestruturado, com a intervenção do professor ou de colegas. O que permite maiores chances de solução dos exercícios.

De acordo com Questionários 1 e 2, a segunda pergunta foi:

2. Classifique onda sonora em mecânica ou em eletromagnética? Justifique?

A pergunta de número 2 foi elaborada com intuito de aprofundar o estudo do conceito de onda, evidenciando a distinção dos tipos de ondas.

As respostas, consideradas corretas, estão em concordância com a definição de Sears, Zemansky, Young e Freedman, (2008) .

Uma onda mecânica é uma perturbação que se desloca através de um material chamado meio, no qual a onda se propaga. À medida que a onda se propaga através do meio, as partículas que o constituem sofrem o deslocamento de diversas espécies, dependendo da natureza da onda. (Sears, Zemansky, Young e Freedman p. 144).

Para onda eletromagnética, também usaremos a definição de Sears, Zemansky, Young e Freedman, (2008). No entanto, essa definição é a mais simples, abordada no próprio capítulo de ondas mecânicas. Segundo os autores:

“As ondas eletromagnéticas que incluem a luz, as ondas de rádio, a radiação infravermelha, a radiação ultravioleta e os raios X – propagam-se até no espaço vazio, onde não há nenhum meio.”

Continuando a análise de dados, veremos na Figura 44 outro exemplo de respostas consideradas corretas.

Figura 44 - Resposta correta da pergunta 2

Ela é mecânica, porque ela precisa de um meio para se propagar.

Fonte: autor

Essa resposta está correta, pois, apresenta característica da essência do fenômeno.

Em outro exemplo de respostas consideradas erradas, analisaremos a resposta da pergunta 2, de acordo como mostra a Figura 45.

Figura 45 - Resposta incorreta da pergunta 2

As ondas em corda, na água, no ar ou em qualquer elástico que torne possível na sua propagação que são ondas mecânicas. A luz não depende de meio para se propagar no ar, como, Vócuo.

Fonte: autor

O aprendiz confunde as definições, e apresenta seu relato de forma desorganizada, embora o conhecimento não esteja relacionado de forma concisa. Essa estrutura psíquica, com as devidas orientações, torna-se subsídio para aprendizagem do novo conhecimento.

Analisaremos os gráficos referentes à pergunta 2 para as instituições A e B

Gráfico 3 da instituição A

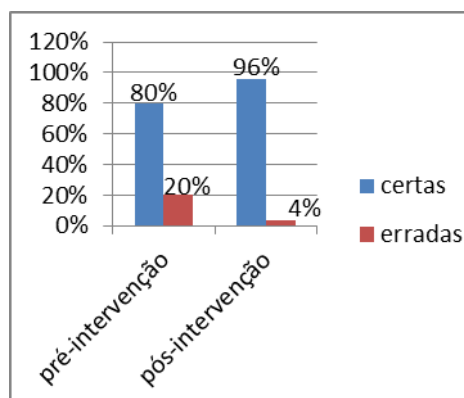
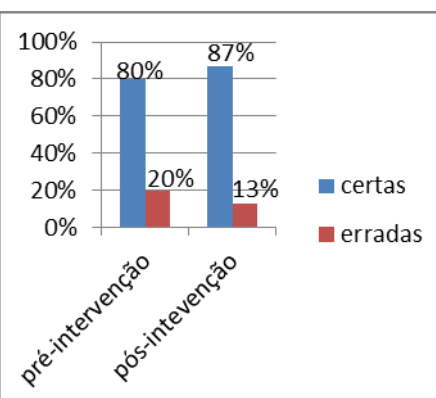


Gráfico 4 da instituição B



Fonte: Autor

Podemos verificar que, no gráfico 3, para a instituição **A**, em relação ao Questionário pré-intervenção, 80% dos discentes responderam corretamente a questão, e 20% não estavam de acordo com as definições de Sears, Zemansky, Young e Freedman. Com a intervenção do produto, houve um aumento de 16% em relação ao número de acertos.

Analisando o gráfico 4 percebemos que, para a instituição **B**, no Questionário pré, 80% dos discentes acertaram a questão, e 20% não estavam corretas. Com implemento da prática, houve um aumento percentual de 7% para essa pergunta.

Essa pergunta é mais um indicativo da eficácia do produto em relação ao ensino, conforme mostra o gráfico 4. Sabendo que, ao planejar uma aula, o docente procura meios de ensinar para a aprendizagem atingir toda a turma, mesmo que não conseguimos eficiência na formação de conceitos em toda turma, porém, os gráficos 3 e 4 atestam que atingimos a maioria da turma, o que é um êxito para o ensino.

Continuando a análise dos questionários, a terceira pergunta é:

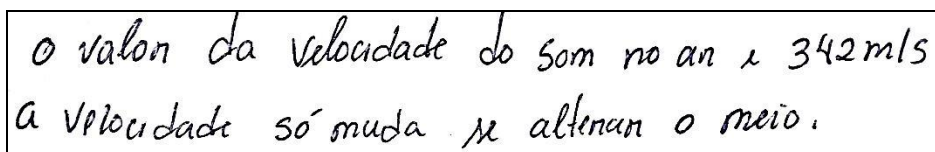
3. Qual é o valor da velocidade do som? Esse valor é constante? Justifique?

A terceira pergunta finaliza um conjunto de questões com foco na aprendizagem. Para essa pergunta consideramos corretas as respostas que estão de acordo com Gaspar (2009), segundo ele

A velocidade de propagação da onda depende apenas das propriedades do meio em que ela se propaga. Se o meio for isotrópico – tiver as mesmas propriedades físicas em todas as direções –, a velocidade da onda é constante (Gaspar, 2009 p.218).

Veremos, na figura 46, um exemplo de respostas consideradas corretas.

Figura 46 - Resposta correta da pergunta 3



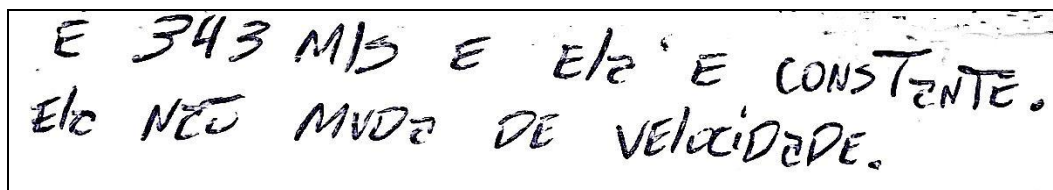
o valor da velocidade do som no ar é 342m/s
a velocidade só muda se alterarmos o meio.

Fonte: autor

Apesar de ser apresentada de uma maneira mais simples, essa resposta, foi considerada correta, pois está de acordo com as definições de Gaspar, onde é apontado que a velocidade da onda é dependente das propriedades do meio.

Observe, na Figura 47, um exemplo de perguntas consideradas incorretas.

Figura 47 - Resposta incorreta da pergunta 3



É 343 m/s e é 1/2 e constante.
Ele não muda de velocidade.

Fonte: autor

Essa pergunta está incompleta, pois apresenta parcialmente parte da definição, no entanto, o aprendiz deixa de relatar a justificativa para que a quantidade física medida em questão seja constante. Observe que, em ambas as respostas o discente, estipula-se um módulo aproximado para a velocidade do som, esse fato é justificável com as aulas teóricas que foram lecionadas, onde abordava essa observação de valor estipulado. Outro catalizador para explorar essa questão é observar um dos objetivos específicos do produto, isto é, determinar a velocidade do som, o que resultou nessas respostas com um valor específico que varia dependendo da condição do ambiente.

Analisaremos, nos gráficos 5 e 6, o quantitativo de respostas certas e erradas para as instituições **A** e **B**, referente a terceira pergunta.

Gráfico 5 Resposta da instituição A

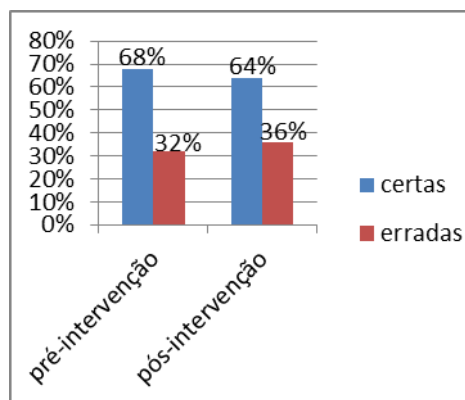
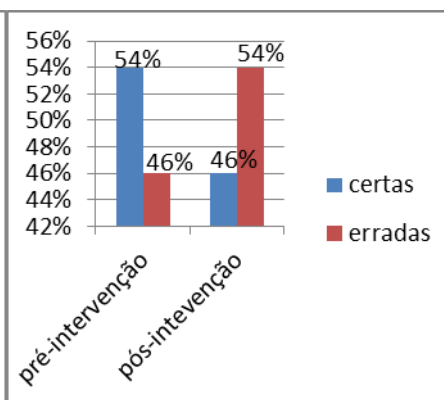


Gráfico 6 Resposta da instituição B



Fonte: Autor

É mostrado, pelo gráfico 5, que 68% dos alunos da escola **A** acertaram a questão, e 32% não responderam corretamente. Com a intervenção do produto educacional houve uma redução no percentual de acertos, e um aumento para as questões erradas. Na instituição **B** é observado que 54% responderam corretamente, e 46% não corresponderam êxito, isto foi no primeiro momento. Ou seja, antes da intervenção do produto, nesse período, quase da metade dos dados são 46% que acertaram e a outra metade, 54% não satisfizeram a aprendizagem.

Ocorre um decaimento no percentual de acertos para essa pergunta, e o fato é justificável através de diálogos entre docente e discente, indicando o efeito e a influência da implementação do produto nas aulas tradicionais, onde os alunos assimilaram a informação de que o valor da velocidade do som é de 342 m/s, e é constante. Ou seja, não varia, e essa definição, geralmente, é apresentada em livros do ensino médio, como por exemplo, por Gaspar (2009), atribuindo-se o fato, ao realizar o estágio do plano material (experimentação) com suas sugestões de atividades, em especial, a atividade 1 mostrada na Figura 48.

Figura 48 - Sugestões de atividade do produto

Sugestões de atividades				
1. Calcule a velocidade do som.				
Frequência de onda f_n (Hz)	Comprimento do tubo L (m)	Número do harmônico	Velocidade do som (m/s)	Comprimento de onda λ (m)
200	0,405m	1n	324 m/s	0,62
300	0,86m	3n	344 m/s	1,14
400	0,63m	3n	336 m/s	0,84
500	0,85m	5n	340 m/s	0,68
600	0,69m	5n	331,2 m/s	0,552

Fonte: Autor

A atividade exigiu coleta de dados e manuseio do produto, e foi designada como atividade educacional, onde realizou-se o cálculo de cinco tentativas da velocidade do som, variando apenas fatores que influenciam no cálculo, o que resulta em valores diferentes para a velocidade do som. Esse aspecto relevante, foi percebido através de diálogo do professor e aluno, como um fator causador de dúvidas para essa questão, e também, resultante da declividade no quantitativo do número de acertos nos gráficos 5 e 6.

Embora na B.O.A esteja descrito todas as etapas das ações (orientação, execução e controle), essa não é perfeita, o que destaca o papel fundamental do mediador para garantir que o aluno consiga atingir o estágio final, isto é, a etapa mental da teoria de Galperin.

Na quarta pergunta, temos

4. O que são ondas construtivas e destrutivas?

Essa pergunta inicia um processo de aprofundamento ao tema, procurando destacar os fenômenos, relacionando ao estudo de ondas. Desse modo, verificam-se as consequências da B.O.A, essa base orientadora de ação, que tem como característica, a generalização dos conceitos, embora a pergunta seja um caso particular, para respondê-la, o discente tem como subsidio, e ponto de partida, os conceitos, generalizando, conforme explorados (trabalhados) nas três primeiras perguntas.

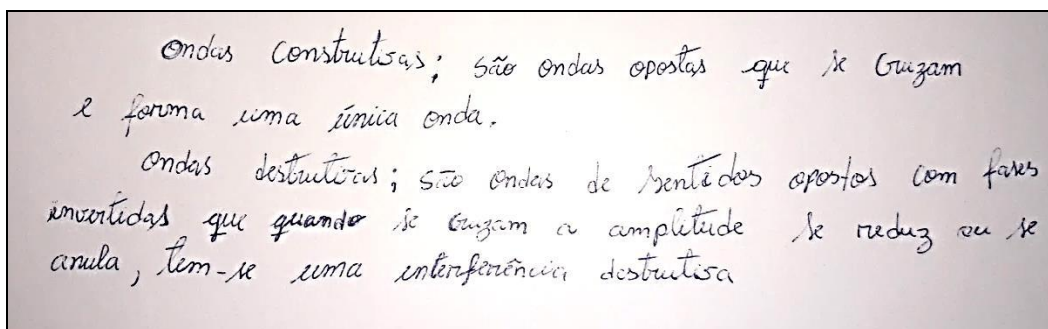
Para a análise quantitativa dessa questão, foram consideradas corretas as respostas que estão de acordo com a definição de BONJORN (2010).

No caso de superposição em que a amplitude da onda resultante é aumentada, classificamos essa interferência como construtiva. É o que acontece quando ambas as ondas possuem a mesma fase (para cima ou para baixo).

Quando a superposição resulta numa onda menor do que ambas as ondas interferentes, dizemos que ocorreu uma interferência destrutiva. Isso ocorre quando suas fases de propagação são invertidas. (BONJORN 2010 P.335).

Um dos exemplos de respostas consideradas corretas para esse caso vejamos na Figura 49.

Figura 49 - Resposta correta da pergunta 4



Fonte: autor

Essa resposta não apresenta os termos técnicos esperados, porém seu significado é coerente com a definição de BONJORN.

O aluno apresenta ideia clara de onda e consegue compreender a causa e o efeito do fenômeno, mesmo com suas particularidades. A resposta é exemplo de linguagem externa, ou seja, essa habilidade é desenvolvida com a experimentação, sendo o elo do concreto (representação do fenômeno) e a abstração, e para solucionar a questão, o discente é desafiado a colocar em prática os mecanismos mentais.

Para mostrar exemplos de respostas consideradas erradas, foi feito um recorte de um caso particular de relato da amostra de observações e mostrado na Figura 50.

Figura 50 - Resposta incorreta da pergunta 4

A rectangular box containing handwritten text in black ink. The text is written in a cursive, somewhat informal script. It reads: "Quando causa uma interferencia o primeiro construtivas e a destrutiva e que cria varias ondas". The word "ondas" is written on a new line at the bottom left of the box.

Fonte: autor

A resposta apresenta divergência em relação à definição de Bonjorno. Assim, observemos, que na resposta do aluno, faz referência a onda estacionária, quando a resposta é justificada, e o aluno é submetido às representações do fenômeno. Então, essa aula tem como ponto positivo a exploração da riqueza visual que é apontada por pesquisadores, como um método eficaz na internalização da ideia. Indícios dessa questão nos revela que, quando o aluno não dispõe de conceitos, ele recorre a relacionar com algo que foi manuseado, ou que teve contato visual, isto é, suas experiências sociais, o que direciona para uma possível resposta correta.

É evidente, na resposta, o recurso utilizado, pois, na etapa mental de Galperin o aprendiz não se satisfaz da representação de toda a ação, e na estrutura cognitiva do indivíduo.

Analisando os gráficos 7 e 8, temos o número de acertos e erros do público pesquisado.

Gráfico 7: Resposta da instituição A

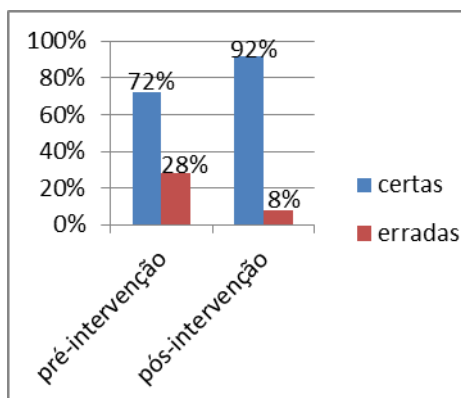
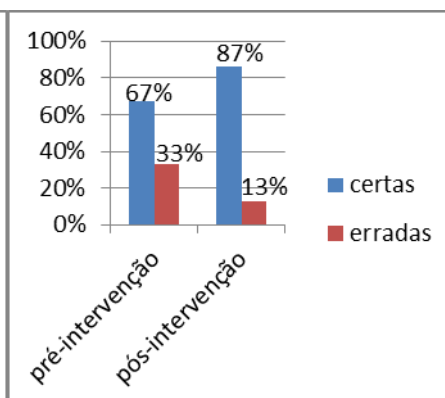


Gráfico 8: Resposta da instituição B



Fonte: Autor

Na escola **A**, 72% responderam corretamente, e 28% erraram no primeiro momento. Com a intervenção, o gráfico varia positivamente, onde 92% responderam corretamente, e 8% não estavam de acordo com a definição. Para a segunda escola **B**, 67% responderam de acordo com a definição, e 13% não corresponderam resultados esperados. Com o Questionário de pós intervenção houve um acréscimo de 20% em relação ao número de acertos.

Os resultados são satisfatórios porque a maioria dos discentes conseguiu êxito na atividade, onde o mesmo desenvolveu habilidades e técnicas específicas para realizar atividades com especificidades.

Seguindo o Questionário, para a quinta pergunta, temos

5. Como se origina ondas estacionárias em um tubo com uma das extremidades fechada?

Essa questão tem intuito de mostrar a influência direta do produto educacional na aprendizagem do aluno em um conteúdo específico.

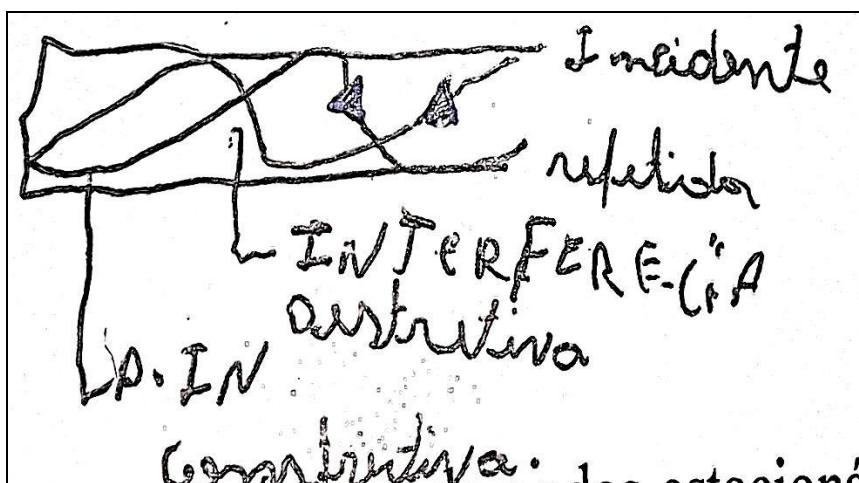
As respostas consideradas corretas são as que estiverem de acordo com a definição TIPLER (2006). Segundo ele

Num tubo de órgão fechado (com uma extremidade aberta e outra fechada), há um nó de pressão próximo à abertura e um antinó de pressão na extremidade fechada. A condição de onda estacionária para esse sistema é a mesma da corda de uma extremidade livre, e a outra, fixa.[...] o comprimento de onda do modo fundamental é 4 vezes o comprimento

efetivo do tubo, e somente os harmônicos ímpares estão presentes. (TIPLER 2006, p.580)

Um dos exemplos de resposta considerada correta é encontrada na Figura 51.

Figura 51- Resposta correta da pergunta 5



Fonte: autor

A resposta está correta porque TIPLER (2006) ressalta que a condição, para que haja ondas estacionárias no tubo, nessas especificações, é semelhante, em comparação com uma corda de uma extremidade fixa e outra livre.

Nessa resposta, podemos perceber como o produto influenciou na formação do conceito, pois, o discente não dissertou sobre as condições para que se tenham ondas desse tipo. No entanto, sua representação, pela imagem, está correta porque detalha o processo, e ressalta características importantes, como os pontos onde a amplitude é máxima e mínima, mostra que a amplitude é variável de ponto para ponto, e temos, envolvidas no estudo, ondas incidentes e refletidas. Nessa resposta, mesmo que não seja escrito uma frase sobre a questão, podemos observar que o aluno compreende causa e efeito de fenômenos específicos do estudo de onda, um conhecimento científico importante para a aprendizagem.

Nesse contexto, podemos afirmar que o aluno recorreu a uma experiência social para resolver a questão. Esse fato, Galperin destaca na etapa motivacional interna, ou seja, que a aprendizagem se torna mais sólida e duradoura quando a

interna está sendo utilizada, que geralmente, essa etapa está correlacionada com a experiência social do aprendiz.

Veremos, na Figura 52, um dos exemplos de perguntas que não concorda com a definição de TIPLER (2006).

Figura 52 - Resposta incorreta da pergunta 5

Se origina no tubo fechado que tem ondas estacionárias que dentro se forma o (nó) e o (ventre)

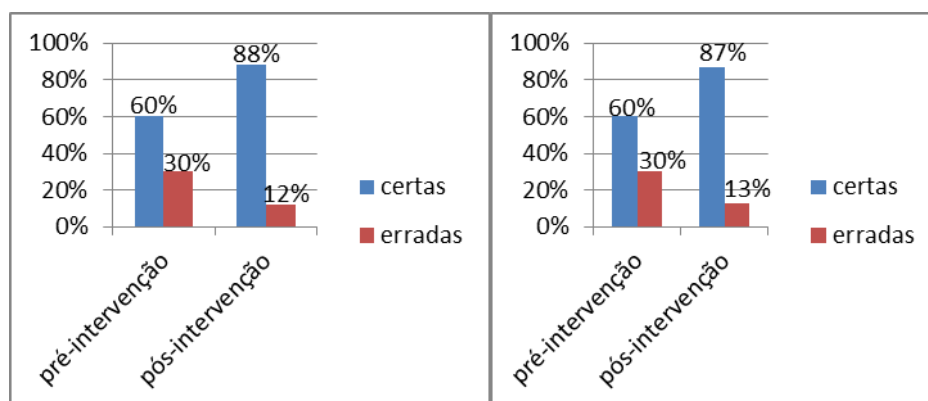
Fonte: autor

Nessa resposta, embora incorreta, podemos verificar uma certa semelhança a resposta correta, em relação a técnica utilizada para responder a questão, por que fica evidente que esse aluno recorreu a experiência que ele teve com o fenômeno, sendo que, em particular, a experimentação o influenciou com bases sólidas, e o discente assimilou, parcialmente, os conceitos, porem, apresenta-se de maneira confusa.

Os gráficos 9 e 10 vão dimensionar a eficácia da metodologia no ensino e aprendizagem do público alvo.

Gráfico 9: Resposta da instituição A

Gráfico: Resposta da 10 instituição B



Fonte: Autor

Na primeira escola **A**, no gráfico 9, para a questão 5, 60% dos alunos responderam certo a pergunta, e 30% não estavam de acordo com a definição de TIPLER (2006). Com a prática das aulas, a turma apresentou um crescimento de 28%, em relação as respostas consideradas corretas.

Para escola **B**, o gráfico 10 apresenta, no primeiro momento, ou seja, no Questionário de pré-intervenção, observando uma porcentagem de 60% para respostas certas e 30% para incertas. Com aplicação da prática, subsidiada pela teoria de Galperin, a turma conseguiu um aumento de 27% para a quantidade de resposta certas.

Seguindo o Questionário, a sexta pergunta é

6. De acordo com as características de ondas estacionárias explique o que é ventre no tubo com uma extremidade fechada?

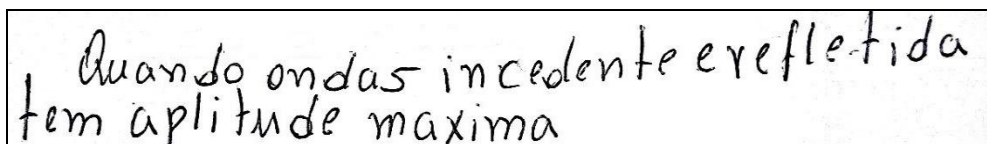
As aulas tradicionais são executadas, de maneira exaustiva e muito comum, por uma boa parte dos docentes no Brasil, influenciando na didática, de modo a deixar de discutir características importantes para atividade humana do cotidiano, como exemplo, propriedades fisiológicas do fenômeno, destacando exemplos de elementos básicos de nó e ventre, do estudo de ondas, para a formação (construção) do conceito de amplitude (A) de onda. Embora, o conceito é mencionado, mas de forma simples e rápida, podendo assim, discutir dúvida na aprendizagem desse conteúdo.

Nesse contexto, essa pergunta foi elaborada para destacar as consequências desse efeito em onda, assim como suas influências fisiológicas, aprofundando, e discutindo a temática. Para essa pergunta, vamos considerar certas as respostas que estão de acordo com a definição de BONJORNO (2010).

“Ao longo da corda existem pontos em que a amplitude é máxima, e os ventres, postos com interferência constante construtiva (BONJORNO 2010, P.336).”

Na Figura 53, observaremos exemplos de resposta que estão em concordância com BONJORNO.

Figura 53 - Resposta da certa da pergunta 6



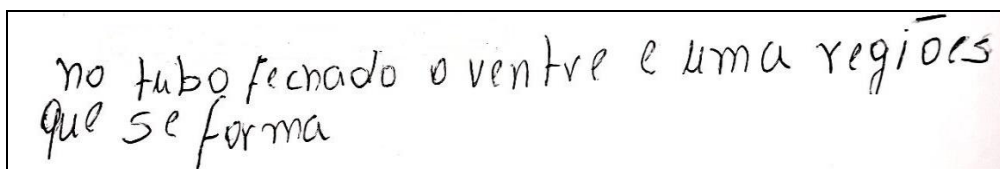
Quando ondas incidentes e refletidas tem amplitude máxima

Fonte: autor

Nessa resposta, o aluno, internalizou os conceitos certos, pois, dispõe de segurança na escrita de elementos específicos do fenômeno e, compreende as causas e os efeitos do fenômeno. Desse modo, acredita-se que essa resposta é uma perfeita combinação da teoria e prática, onde a aula experimental proporciona ao aluno uma internalização eficaz, utilizando-se das riquezas visuais e manipulação.

Seguindo a Figura 54, observaremos um exemplo de respostas consideradas incertas.

Figura 54 - Resposta incerta para a pergunta 6



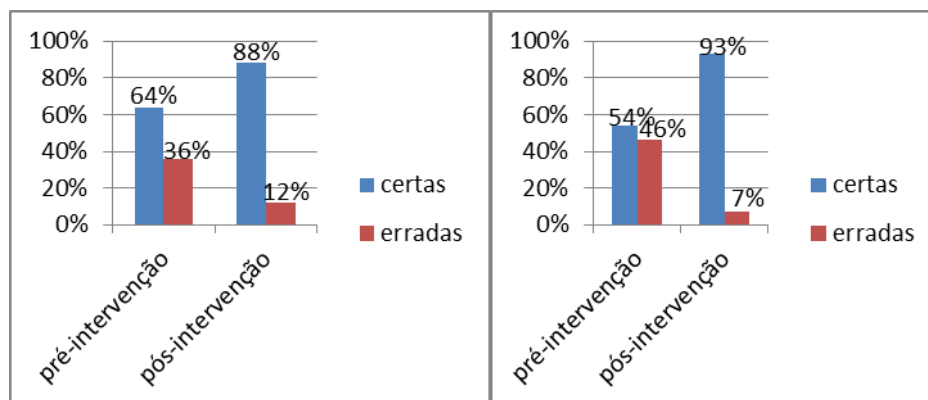
no tubo fechado o ventre e uma região que se forma

Fonte: autor

Na Figura 54 fica evidente que para essa resposta ser considerada correta faltou a especificação da região, essa resposta demonstra indícios das influências da B.O.A **III**, a B.O.A ela é a toda ação operacional (orientação, execução e controle) com foco na generalização do problema, nessa perspectiva os erros são menores possibilitando uma maior transferência de conhecimento para estrutura cognitiva do aprendiz. A resposta tende a generalização mesmo sendo incompleta.

Os gráficos 11 e 12 apresentam um panorama da sexta pergunta nas escolas **A e B**.

Gráfico 11: Resposta da sexta pergunta instituição A Gráfico 12 instituição B



Fonte: autor

Segundo o gráfico 11, para escola **A**, no momento pré-intervenção, 64% responderam certo a sexta pergunta, e 36% não estavam de acordo com a definição padrão. Após a implementação das aulas experimentais, na perspectiva das ações mentais de Galperin, o gráfico evidencia um acréscimo no percentual de 88% que responderam certos e, 12% incertos. O gráfico 12 analisará a segunda escola **B**, onde no pré-questionário, 54% acertaram e 46% erraram. Com a intervenção experimental, 93% responderam de acordo com a definição, e 7% não satisfizeram o resultado esperado.

Os gráficos 11 e 12 apresentam características semelhantes, quando observamos uma leitura percentual acima dos 50% no Questionário pré. Com a intervenção experimental, o Questionário pós mostra o salto positivo para as respostas certas. Esse fenômeno é justificável com as aulas de discussão do conteúdo, e resolução de exercícios, as quais são importantes para um primeiro contato, porém, com o complemento de aulas experimentais, essas são organizadas com teorias de aprendizagem, obtendo aulas com eficácia.

Para a sétima pergunta, temos:

7. De acordo com as características de ondas estacionárias explique o que é nó no tubo com uma extremidade fechada?

Essa pergunta segue a sequência de destaque na discussão de aspectos importantes, que são explorados de forma simples e rápida, sendo mais um reforço para as discussões abordadas na sexta pergunta.

Nessa questão, usaremos, como padrão, a seguinte definição de BOJORNO 2010:

“[...] e os pontos em que a amplitude é nula, os nós, postos com interferência constante destrutiva. (BONJORNO 2010, P.336)”

Um dos exemplos de perguntas consideradas certas para esse relato é encontrado na Figura 55.

Figura 55- Resposta certa da pergunta 7

Quando ondas incidente e refletida
tem amplitude minima

Fonte: autor

A pergunta está certa por que apresenta todas as características definidas por BORJONO (2010). Quando se estuda fenômeno em Física são destacados os agentes, as causas, e os efeitos, conforme observamos na figura 55, onde o aluno apresenta uma linguagem científica, usando definições do próprio fenômeno.

Um dos exemplos de respostas consideradas incertas, vemos na Figura 56.

Figura 56 - Resposta incerta pergunta 7

NO TUBO FECHADO O (NÓ) É UMA REGIÃO
QUE FECHA E TAMBÉM LOGO FORMA O VENTRE

Fonte: autor

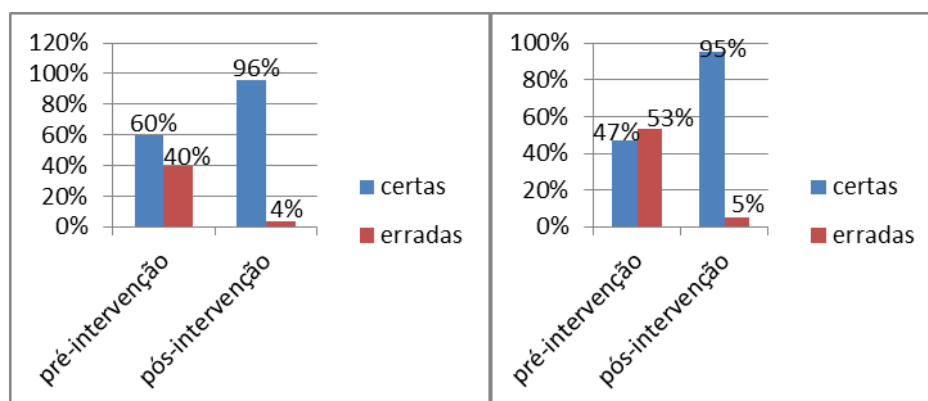
O aluno apresenta ideia do fenômeno em questão, porém, apresenta-se de forma confusa em sua escrita de relato, pois ele não é claro de acordo com as ideias de BONJORNO (2010). Observe que, na resposta, o aluno recorre à experiência com o fenômeno, pois a resposta é referente a uma imagem ou um padrão desenhado na mente do indivíduo.

Em exercício da docência, o profissional é sujeito a essa situação, quando o aluno assimila parte dos conteúdos, e relatos de dissertações. O professor supõe que, nos primeiros minutos, os aprendizes estão focados na aula em questão. Após os 40 minutos, especialistas indicam um desinteresse, e atribuem esse fato, a divisão da atenção com focos distintos de desvios. Por exemplo, celular, conversas paralelas, ou pensamentos que não estão relacionados à aula etc.

No entanto, com aplicação de um objeto (plano material ou materializado), que pode ser manuseado e controlado, o tempo de foco é aumentado nos discentes. E, mesmo que o aluno não esteja, completamente, com sua atenção na aula, percebemos que a aula experimental, utilizando-se de recursos visuais, influencia nas interpretações do aluno com essas peculiaridades.

Os gráficos 13 e 14 apresentam uma estimativa percentual das respostas público alvo.

Gráfico 13: Resposta da Instituição A Gráfico 14: Resposta da Instituição B



Fonte: autor

Segundo o gráfico 13, para a escola **A**, temos uma leitura de 60% dos alunos que responderam certos e 40% não estavam de acordo com as definições estabelecidas como padrão. Com a implementação do plano material ou materializado, o gráfico apresenta a seguinte leitura: 96% responderam certos, e 4% dos alunos indicaram respostas incertas.

No gráfico 14, para a escola **B**, aplicando-se somente a instrução do conteúdo e a resolução de exercícios, o Questionário pré dispõem da seguinte leitura: 47% responderam de acordo com as definições e 53% responderam incertos. O

Questionário pós indica um crescimento de 48% do número de respostas consideradas certas.

Seguindo os Questionários 1 e 2, a oitava pergunta é:

8. (UFRJ) o canal que vai do tímpano à entrada do ouvido pode ser considerado um tubo cilíndrico de 2,5 cm de comprimento, fechado em uma extremidade e aberta em outra. Considere a velocidade do som no ar igual 340 m/s. calcule a frequência fundamental de vibração da coluna de ar contida nesse canal.

De acordo com a teoria de formação por etapas de Galperin, a etapa motivacional é dividida em duas etapas interna e externa, sendo que a aprendizagem é adquirida com sucesso, quando a etapa interna intervém no processo. Esse estágio motivacional-interna é a relação do conteúdo com a experiência e situação problema do cotidiano, e a externa é o oposto.

É nessa perspectiva que a oitava pergunta surge, na tentativa de relacionar experiência do dia a dia com o conhecimento adquirido. Esse tipo de questão expõe como o aluno assimilou o conhecimento, e de que maneira ele selecionará, e organizará o conhecimento para resolução da situação-problema. Além de demonstrar os conhecimentos prévios matemáticos, assimilados no decorrer de sua vida educacional.

A questão tem como característica um tubo sonoro, com uma extremidade fechada. Logo, segundo Gaspar 2009, na pagina 242, a relação que utilizaremos para a resolução da questão é definida pela seguinte fórmula:

$$f_n = \frac{n}{4l} \cdot v$$

Esse é o padrão estabelecido para o ensino médio, quando se refere a questões dessa natureza, com essa peculiaridade.

Um exemplo de respostas consideradas certas, pode ser observado na Figura 57.

Figura 57 - Resposta certa da pergunta 8

$$f_n = \frac{v}{4 \cdot l}$$

$$f_n = \frac{1}{4 \cdot 0,25} \cdot 340$$

$$f_n = \frac{340}{1}$$

$$f_n = 340 \text{ Hz}$$

$$25 \text{ cm} \left(\frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right)$$

$$\frac{25}{100} = \frac{250}{1000} = 0,25$$

$$f_n = \frac{v}{4 \cdot l}$$

$$f_n = \frac{340}{4 \cdot 0,25}$$

$$f_n = 340 \text{ Hz}$$

Fonte: autor

Analisando a resolução das operações algébricas, verificamos que o aluno respondeu corretamente, é importante destacar que esse aluno adquiriu o conhecimento proposto pelas aulas, assim como foi capaz de selecionar e usar corretamente o conhecimento internalizado. Assim, temos um resultado das exposições teóricas e manuseio de um representante do fenômeno, e consenso que as experiências sociais do indivíduo é um facilitador na aprendizagem do conteúdo assim como um detector de problemas de mesma natureza, já que os problemas tendem a apresentar a mesma característica, o que induz ao aprendiz para um conjunto de soluções possíveis presentes na estrutura cognitiva.

Exemplos de respostas consideradas incorretas na Figura 58.

Figura 58 - Resposta incorreta pergunta 8

$$\lambda = 2,5$$

$$v = 340$$

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

$$f = \frac{340}{2,5} \Rightarrow f = 136 \text{ Hz}$$

Fonte: autor

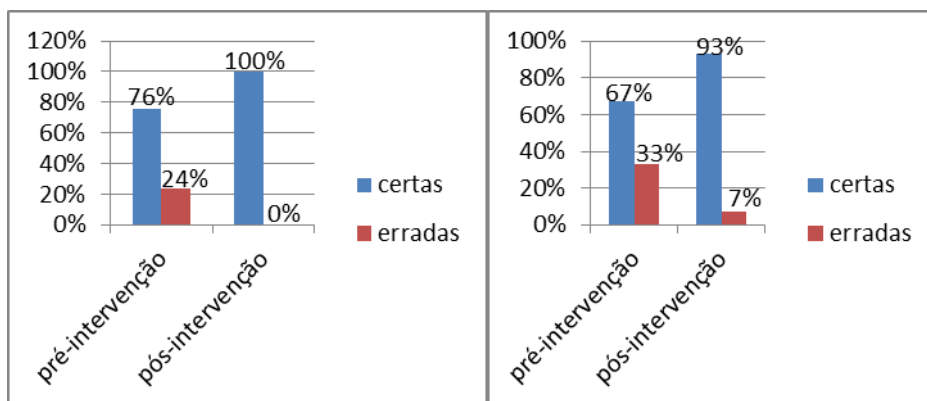
Essa resposta não está de acordo com o padrão estabelecido por Gaspar (2009), e o fato, é que o aluno apresenta uma resolução, que se encontra dentro da esfera do conteúdo de ondas, porém ele se confunde na hora de aplicar.

Nesse caso, o aluno internalizou os conceitos, porém ele não desenvolveu astúcia para saber a hora de utilizar o conhecimento adquirido.

Ao analisar os gráficos 15 e 16, para as instituições de ensino A e B, referente a pergunta, temos:

Gráfico 15: Resposta da Instituição A

Gráfico 16: Resposta da Instituição B



Fonte: autor

Segundo o gráfico 15, na escola **A**, para o Questionário 1 pré-intervenção, temos a leitura de 76% para as respostas consideradas certas e 24% para as erradas. Com a intervenção, é percebido um resultado positivo com 100% de respostas consideradas certas.

Para a segunda instituição **B**, o gráfico 16 demonstra que 67% das respostas estão de acordo com o padrão de Gaspar, e 33% não correspondem às expectativas. Com a intervenção, o gráfico indica um acréscimo positivo de 26% em relação as respostas consideradas certas.

Seguindo os Questionários 1 e 2, a nona pergunta a ser observada, é:

9. Suponha que a velocidade do som em determinada região seja 336 m/s. Qual a frequência fundamental que um boiadeiro pode conseguir com um berrante de 1,2 m de comprimento nessa região? Obs: (considere o berrante como um tubo com uma das extremidades fechada)

Essa pergunta é uma situação problema que desafiará o discente, a colocar em prática, o conhecimento assimilado. Nesse estágio da teoria de Galperin, o aluno não dispõe do experimento para manipulá-lo. O desafio consiste no plano cognitivo de seleção de ideias e mecanismos para solução do problema.

Nessa pergunta, por motivo desta apresentar as mesmas características da oitava questão, mudando apenas as condições, também utilizaremos a definição de Gaspar (2009) para essa questão.

Um dos exemplos de respostas consideradas certas pode ser observado na Figura 59.

Figura 59 - Resposta certa da pergunta 9

$$\begin{aligned}
 v &= 336 \text{ m/s} \\
 \lambda &= 5,2 \text{ m} \\
 f_1 &= \frac{v}{\lambda} \\
 f_1 &= \frac{336}{5,2} \\
 f_1 &= 64,615 \text{ Hz} \\
 f_1 &\approx 64,6 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

Fonte: autor

Podemos observar que, com a experiência similar (experimental), a situação problema ficou mais fácil de selecionar-se, e redirecionar-se, as ideias para atingir o objetivo. O tubo de ressonância de baixo custo é um material que possibilita um contato visual, além de manipulação, observando causa e consequência das ações. Com essas ações, hierarquizadas por estágios fundamentais, é que temos um maior número de acertos, embora erros e tentativas aumentam cada vez mais a chance de sucesso.

Um dos exemplos de respostas que não concorda com o padrão estabelecido, é encontrado em uma amostra de recorte na Figura 60.

Figura 60 - Resposta incerta da pergunta 9

$$\begin{aligned}
 v &= 336 \text{ m/s} \\
 \lambda &= 1.2 \text{ m} \\
 v &= \lambda \cdot f \\
 \frac{v}{\lambda} &= f \\
 \frac{336}{1.2} &= f \\
 280 \text{ Hz} &= f
 \end{aligned}$$

Fonte: autor

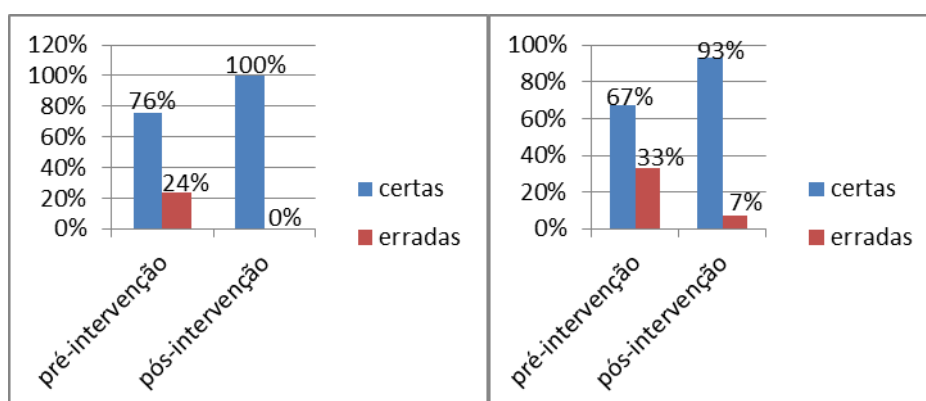
A solução apresentada pela Figura 60 não concorda com as diretrizes estabelecidas anteriormente, logo esta é considerada incerta.

Observamos nas oitava e nona questões um padrão de respostas consideradas erradas, pois ambas apresentam o uso de definição para um caso particular. Dessa maneira, acredita-se que a semelhança das questões, assim como a semelhança de fatores relacionados nas expressões, torna-se confusa a assimilação, como também a utilização do conhecimento. Em diálogos entre docente e discente, verificou-se que recorria-se a essa fórmula, por apresentar menor complexidade em manipulação algébrica.

Esse fato, vem reforçar a ideia de trabalhar cada definição cuidadosamente, procurando exemplificar, e demonstrar, onde cada recurso será utilizado. Assim, a teoria que preenche essa lacuna é a de Galperin.

Os gráficos 17 e 18 apresentaram o quantitativo de erros e acertos para essa questão.

Gráfico 17: Resposta da Instituição A. Gráfico 18: Resposta da Instituição B



Fonte: autor

Na etapa pré-intervenção, segundo o gráfico 17, para a escola **A**, observamos que 76% estão de acordo com o padrão, e 24% responderam incertos com a intervenção do produto. E o Questionário pós, este evidencia 100% que responderam certos, o que resulta em um percentual de 0% para resposta erradas, apresentando um crescimento de 24%.

No gráfico 18, para o público alvo da escola **B**, apresentaram no pré 67% de acertos, e de 33% de erros para a questão. Com a intervenção do produto, houve um acréscimo de 26% no número de acertos, e um decaimento de 33% para 7% no número de questões erradas.

De acordo com os Questionários 1 e 2, a décima questão é:

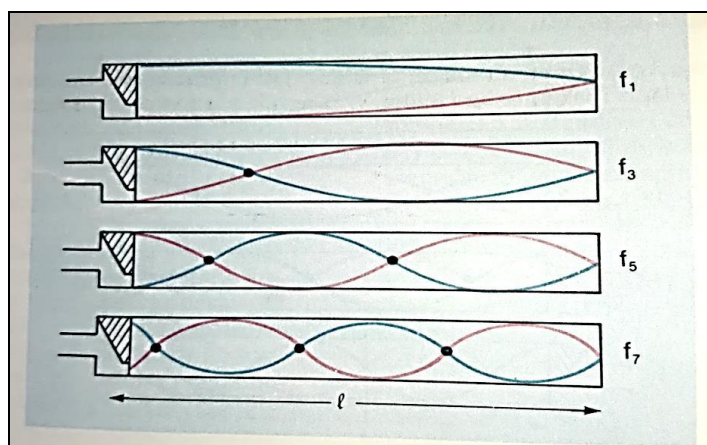
10. (Ufes) em determinada flauta faça um esboço dos três primeiros modos de vibração.

O fenômeno, causa e formas ficam definidas em fatores (frequência, velocidade), em sua maioria, no plano abstrato, e suas consequências, no plano concreto (sentir, perceber). Seguindo esse panorama, é importante entender como o fenômeno é representado pela ótica dos discentes, para que possamos traçar planos para ajustá-lo, se assim for necessário. Com essa pergunta, podemos perceber essas questões.

Essa pergunta também está relacionada com o item encontrado no cotidiano do indivíduo, o que aguça a curiosidade de entender o funcionalismo do item, ou seja, do instrumento.

Para essa pergunta serão considerados corretos os esboços que estão de acordo com a definição da Figura 61, de BONJORNIO (2010), p.300.

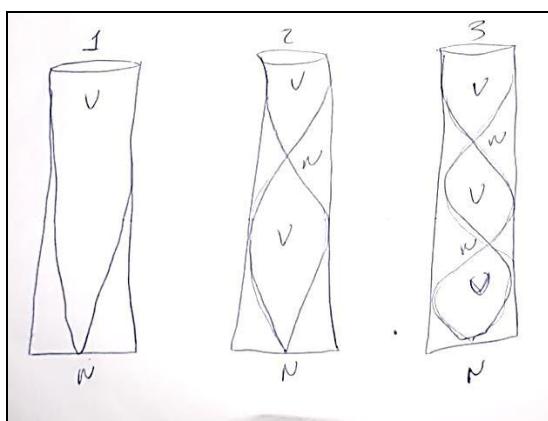
Figura 61- Esboço dos 4 Primeiros Modos de Vibração



Fonte: Bonjorno

Apresentaremos na figura 62 um dos exemplos de respostas consideradas corretas.

Figura 62 - Resposta considerada certa para a pergunta 10

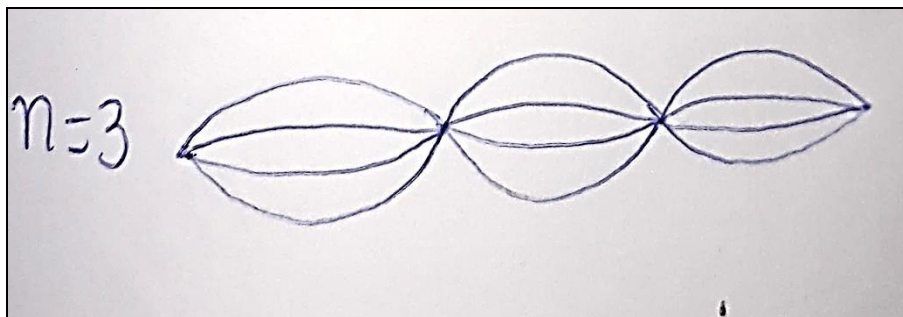


Fonte: autor

Fazendo um paralelo do padrão estabelecido, com o desenhado, percebemos que o aluno consegue representar o fenômeno facilmente, descrevendo característica abstrata. Esse resultado é previsto na teoria da aprendizagem de Galperin na etapa motivacional interna. A aprendizagem é motivada com representações do cotidiano, isto é, experiências do aprendiz. O produto educacional tem como pressupostos, apresentar um contato com o fenômeno de onda e analisar suas influências na aprendizagem. Portanto, podemos destacar que, na ausência da representação objetual (experimentação), quando os conceitos são internalizados corretamente, o aluno é perspicaz a recorrer as suas experiências estudantis para a solução de problemas de mesma esfera.

Apresentaremos, na Figura 63, um dos exemplos de respostas consideradas incertas.

Figura 63 - Resposta incerta da pergunta 10



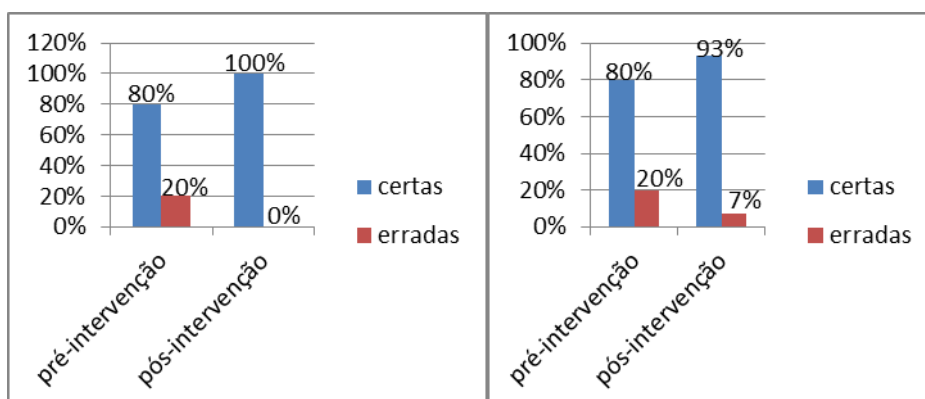
Fonte: autor

Esse padrão é estabelecido para uma corda, o que resulta na invalidação da resposta para a pergunta em questão. Nessa perspectiva, mesmo sendo incorreta, percebemos o recurso que o aprendiz utilizou. Esta é resultante de experiências, provavelmente, do conteúdo lecionado tradicionalmente. Fica evidente que o aluno internalizou o conceito, porém, não sabe o momento de aplicar.

Com a aplicação do produto, essa experiência é raizada fortemente, trazendo exemplos de suas aplicações, assim como suas influências, o que facilita a aprendizagem.

Os gráficos 19 e 20 demonstram o quantitativo de respostas certas e erradas para cada público das instituições.

Gráfico 19: Resposta da Instituição A Gráfico 20: Resposta da Instituição B



Fonte: autor

Segundo o gráfico 19, para a escola **A**, no primeiro momento, no Questionário pré, 80% responderam corretamente, e 20% não estavam de acordo. Com a intervenção do produto, temos 100% de aproveitamento do número de respostas. Esse resultado é uma resposta justificável de maneira proporcional a utilização da experiência com o fenômeno, e sua abstração.

O gráfico 20 analisa a segunda escola **B**, onde 80% responderam corretamente, e 20% não estavam de acordo com o padrão. Após a intervenção, tivemos um aumento de 7% na primeira leitura em relação ao número de acertos. Esse fato evidencia a eficácia do produto na aprendizagem, pois ambas as escolas obtiveram sucesso na aprendizagem e na seleção de conceitos para a resolução de problemas de onda.

Dando continuidade a análise dos questionários, vamos analisar o Questionário 3. Esse tem como objetivo verificar a motivação quantitativa do aluno em relação a prática experimental.

Esse questionário ajuda a entender como a prática é percebida para os alunos, e dependendo dos resultados, elaborando-se metas para aperfeiçoar a aula. Os gráficos dos públicos alvos serão apresentados em paralelo, o que permite uma melhor compreensão do percentual de aceitação em cada escola.

Segundo o Questionário 3, a primeira pergunta é:

Questão 1: A respeito do tubo de ressonância marque de acordo com sua opinião:

- I. O tubo de ressonância é um experimento interessante, de fácil manuseio, permitiu melhor compreensão de frequência de ressonância, nó, ventre, velocidade do som no estudo de ondas estacionárias. Deve ser aplicado nas aulas de física. ()
- II. O tubo de ressonância é um experimento interessante, no entanto seu manuseio é confuso, não consegui aprender sobre ondas estacionárias. Portanto, o experimento deve assumir papel de caráter demonstrativo, tornando a aula mais interessante. ()
- III. O experimento não é interessante e não consegui compreender com o mesmo. ()

Essa pergunta tem o intuito de analisar o produto educacional dessa dissertação na visão dos discentes, referente a aceitação, para termos uma leitura quantitativa e, evitar desvio do objetivo da pergunta. Logo, procuramos direcionar essa questão com três opções. A primeira opção resume bem o objetivo do produto, que ele seja interessante, e de fácil manuseio e para entender o fenômeno.

A segunda pergunta, permite chamar a atenção da importância e interesse do experimento, no entanto, seu manuseio era confuso sem intervenção, o que dificultaria a aula.

A terceira pergunta, faz referência a negação total, ou seja, não é interessante e não se compreende nada dos efeitos fenomenológicos apresentados pelo produto.

Veremos, nos gráficos 21 e 22, uma análise quantitativa de aceitação do método de aprendizagem pelo aprendiz.

Gráfico 21: Resposta da Instituição A

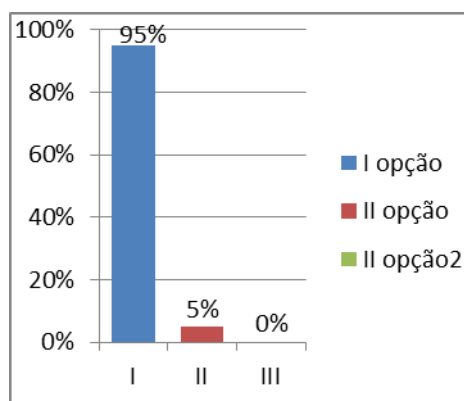
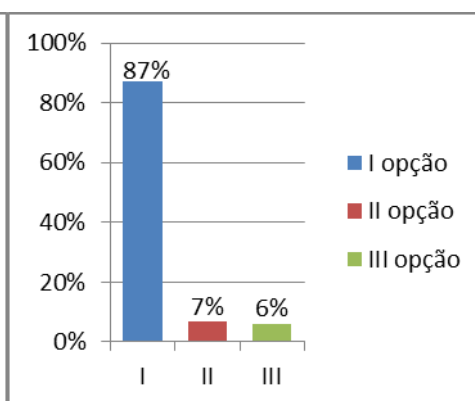


Gráfico 22: Resposta da Instituição B



Fonte: autor

Segundo a leitura do gráfico 21 para escola **A**, 95% marcaram a primeira opção e 5 % a segunda. E na terceira, obteve-se 0% de percentual. De acordo com o gráfico 22, para a segunda escola **B**, temos 87% na primeira e 7% para a segunda e na terceira 6%.

Com interpretação desses gráficos da primeira opção, podemos reconhecer essa aula experimental, fundamentada pela teoria de Galperin, que foi bem aceita pela maioria dos estudantes, o que proporciona uma aprendizagem eficaz, pois segundo a teoria de Galperin, a aprendizagem é possível, quando o aluno estiver

motivado a aprender. Sabendo que o ensino tem como objetivo alcançar 100% dos alunos, esse método é eficiente, pois conseguimos atingir a maioria em ambas as instituições.

O percentual das segunda e terceira observações apresenta um resultado negativo para o objetivo da dissertação. O fator que pode ser atribuído, é apontado como o causador desse dado estatístico, devido aos cálculos matemáticos envolvidos, embora propostos pela metodologia, mas considera-se um fato observado em discussão entre docente e discente.

Continuando a análise, de acordo com o Questionário 3, a segunda pergunta é:

Questão 2: Essa aula de física foi lecionada de forma diferente, considerando as aulas de física dos anos anteriores?

() sim () não

Essa pergunta tem o objetivo específico de demonstrar a carência de metodologia nas aulas de física, sendo que já apontamos que aulas tradicionais dominam a maioria dos ambientes escolares.

Uma análise quantitativa pode ser interpretada melhor, de acordo com os gráficos 23 e 24.

Gráfico 23: Resposta da Instituição A

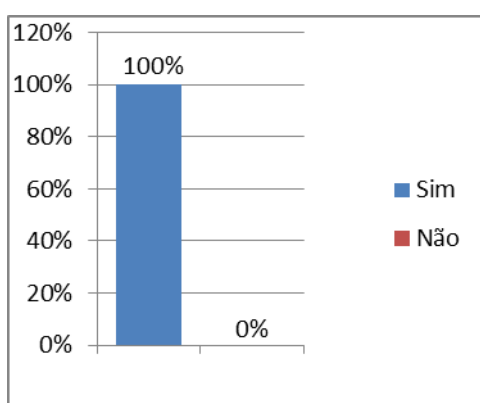
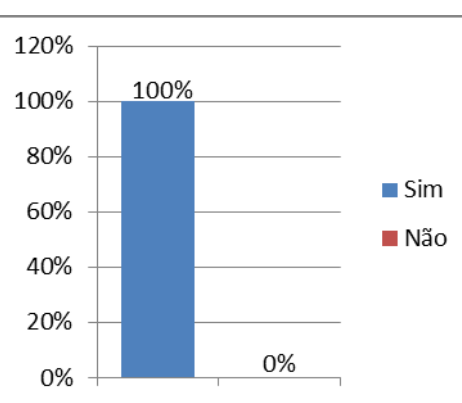


Gráfico 24: Resposta da Instituição B



Fonte: autor

Os gráficos 23 e 24 apontam resultados unânimes nas duas instituições de ensino, mostrando que necessitamos de aplicação de novas metodologias, pois os discentes estão designados na rotina, que pode ser estressante, implementada pela

metodologia tradicional, dificultando a aprendizagem. Nesse sentido, é que disponibilizamos essa dissertação aos docentes, como um dos recursos alternativos para a resolução desse problema.

A terceira pergunta do Questionário 3 é:

Questão 3: a respeito da prática experimental, eu, professor, devo introduzir mais aulas desse tipo? porquê?

() sim não()

Essa questão procura destacar o quantitativo, assim como, a justificativa de alunos que são influenciados pela metodologia experimental, a fim de entender os pontos relevantes positivos e negativos da experimentação, subsidiada pela teoria de Galperin.

Analisaremos, pelos gráficos 25 e 26 abaixo, o percentual para a terceira pergunta.

Gráfico 25: Resposta da Instituição A

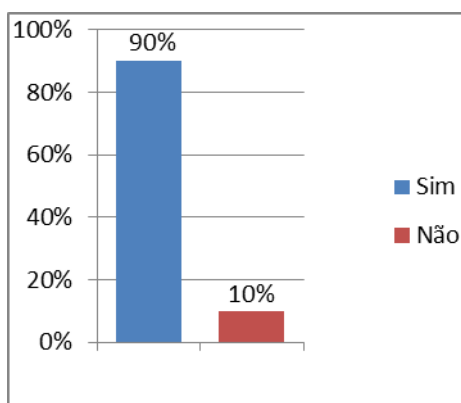
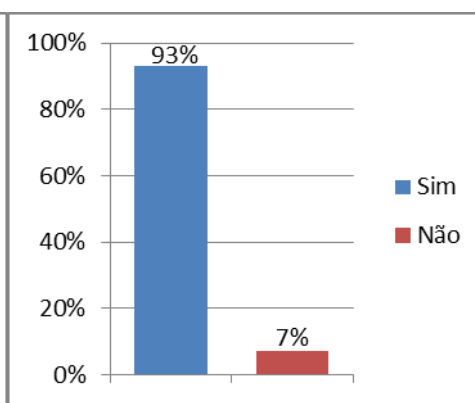


Gráfico 26: Resposta da Instituição B



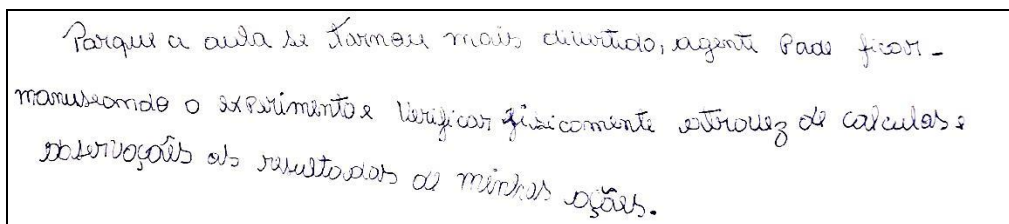
Fonte: autor

Do ponto de vista crítico e reflexivo, fazendo a leitura dos gráficos para a escola **A**, 90% responderam sim, e apenas 10% responderam negativamente. Para a segunda escola **B**, temos que 93% responderam sim, e 7% afirmaram a opção não. Podemos concluir que, os próprios alunos recomendam a aplicação dessa aula interativa, porém, devemos reconhecer que a aplicação rotineira, pode transformar a

aula em desinteressante, por que uma proposta normal, é manter um equilíbrio de aplicação entre as metodologias utilizadas.

Apresentaremos, nas figuras 64 e 65, exemplos de justificativas respectivamente, para as opções sim e não. Desse modo, em destaque na Figura 64, encontramos uma justificativa para a resposta sim.

Figura 64 - Justificativa para opção sim



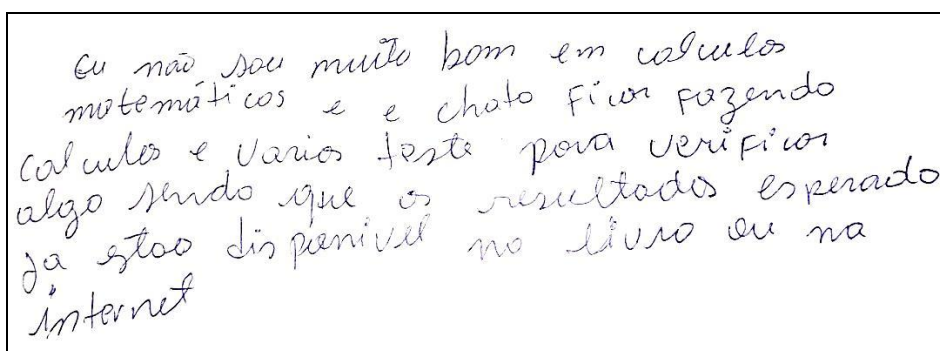
Porque a aula se tornou mais divertida, agente pode ficar manipulando o experimento e verificar fisicamente através de cálculos e observações os resultados de minhas opções.

Fonte: autor

Na Figura 64, podemos observar que é notável o entusiasmo do aluno com metodologia diferenciada, onde ele pode manipular e verificar a comprovação da teoria.

Um dos exemplos de justificativas para a opção não, é feito um recorte das amostras coletadas, e o dado é apresentado, conforme é mostrado na Figura 65.

Figura 65 - Justificativa para opção não



Eu não sou muito bom em cálculos matemáticos e é chato ficar fazendo cálculos e vários testes para verificar algo sendo que os resultados esperados já estão disponíveis no livro ou na internet.

Fonte: autor

É observável que a diferenciação em execução, manipulação, e controle, são fundamentais para motivar o aluno. Porém, considerando o longo período na mesma atividade, e devido as várias tentativas, na coleta e manipulação de dados, pode-se tornar a aula desinteressante. Esse comportamento negativo poder ser corrigido com discussões paralelas entre mestre e aprendiz, desde que se explique a importância da atividade, e sua finalidade educacional como o desenvolvimento de habilidades, e explique a sua utilização.

A falta de informação da finalidade educacional da atividade, resulta em aulas desinteressantes, o que é ruim para o processo de ensino e aprendizagem.

Percebemos aspectos diretos das aulas tradicionais, de tanto expor o conteúdo e resolução de exercícios de maneira sucinta. Esse fator desenvolve no aluno uma situação de acomodação, por que o aluno não é desafiado a testar e nem integrar seu conhecimento internalizado na sua estrutura cognitiva. Dessa forma, acaba-se desenvolvendo no indivíduo uma ansiedade (estímulo, inquietação, aguçar a pensar) pela resposta, o que resulta em alunos preocupados em pesquisar, ou efetuar uma busca mais simplificada e rápida em livros ou na internet.

O Produto Tubo de ressonância propõe inovação da abordagem de ensino, desafiando o aluno a manipular, coletar dados, e verificar o fenômeno, de acordo com a teoria, por intermédio de sua representação objetiva. Assim, desenvolvendo habilidades de aprender conceitos e seleciona-los na sua estrutura cognitiva, e hierarquizar, por etapas, para a resolução de problemas específicos.

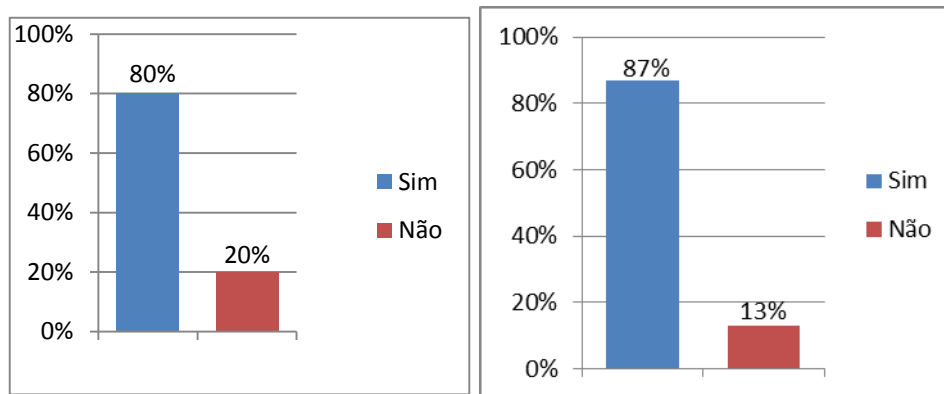
Continuando a análise do Questionário 3, a quarta pergunta, é:

Questão 4: O experimento tornou a aula mais atrativa para essa disciplina?

() sim não()

Essa pergunta pode demonstrar os indícios da motivação, observados nas questões anteriores, e mostrados através dos gráficos 27 e 28.

Gráfico 27: Resposta da Instituição A Gráfico 28: Resposta da Instituição B



Fonte: autor

Para a primeira escola **A**, 80% dos alunos responderam que as aulas se tornaram mais atrativas com o experimento, e 20%, responderam não. Na segunda escola **B**, 87% dos alunos, responderam sim sobre essa qualidade atrativa das aulas, e 13%, responderam não. Acreditasse que esse fato é justificável porque a experimentação é baseada na utilização da coleta de dados, e na manipulação destes, o que assusta o aluno que não é muito familiarizado com esse tipo de exercício. Mas, realizando uma análise detalhada e rigorosa, pode-se dizer que os resultados são satisfatórios, pois conseguimos atender a maioria.

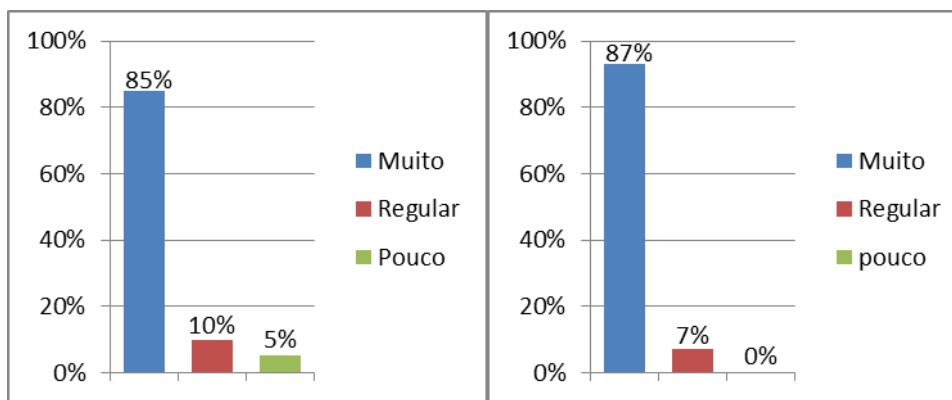
De acordo com o Questionário 3, a quinta pergunta, é:

Questão 5: O experimento ajudou de alguma forma na resolução de exercícios?

Pouco () regular () muito ()

Nessa pergunta, podemos ter melhor leitura dos pontos percentuais em que a metodologia auxiliou o aluno na resolução de exercícios. Nos gráficos 29 e 30 veremos esse quantitativo para análise mais elaborada.

Gráfico 29: Resposta da Instituição A Gráfico 30: Resposta da Instituição B



Fonte: autor

Para a escola **A**, 85% marcaram a primeira opção, 10% a segunda, e 5% na terceira, segundo o gráfico 29. O gráfico 30 nos permite observar a escola **B**, onde 87% marcaram a primeira opção, 7% na segunda, e nenhum aluno marcou a terceira opção.

Esses dois gráficos comprovam o que era esperado pelo objetivo da dissertação, e ao mesmo tempo, destacam os indícios motivacionais de cada pergunta dos questionários. Podemos observar que o produto auxilia na resolução de problemas, embora já citado, mas o aluno, ao resolver problemas, ele recorre a conceitos presentes na sua estrutura cognitiva. Segundo a teoria de Galperin, esse fato é devido a introdução de conceitos que são abstraídos com suas experiências individuais. O produto é uma representação material do fenômeno, que permite um contato com a finalidade de abstração do fenômeno, em relação à causa e o efeito deste.

Os gráficos evidenciam que, a maioria do público alvo teve êxito na resolução de exercícios, na situação problema, com o auxílio de uma representação material, ou materializada.

E evidente que o aluno, para atingir esse patamar, ele passou pelos cinco estágios da teoria de Galperin, e esse gráfico traduz, em quantidade de alunos, que tiveram êxito, segundo o objetivo da dissertação, observando exatamente a etapa mental, onde o aluno não dispõe da representação do fenômeno, e a ação é interna e individual no seu intelecto, enquanto que a seleção de conhecimentos permite o desenvolvimento das habilidades, para que ele possa usufruir do conhecimento

científico em ondas, quando necessário. Esse fato é comprovado, resumidamente, e positivamente, pelos gráficos 29 e 30.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante da análise de dados, e avaliação dos resultados da dissertação, observamos a aplicação da metodologia experimental, em uma perspectiva na teoria de formação por etapas de Galperin, com foco no dispositivo tubo de ressonância de baixo custo. A dissertação apresenta resultados satisfatórios para os discentes da 2ª série das escolas A e B.

O produto é uma versão que apresenta baixo custo, e proporcionando, o ensino e a aprendizagem do conceito de onda e, fenômenos consequentes dessa temática de Física, ao aluno. Com a implementação do dispositivo nas aulas, observa-se que o objetivo da dissertação foi atingido, com eficiência, que consiste em verificar a formação do conceito de ondas estacionárias e o fenômeno de ressonância, através da metodologia experimental, subsidiada na teoria de formação por etapas de Galperin.

O dispositivo aplicado desse modo, como ferramenta pedagógica, possibilitou ao aluno absorção de conhecimento, entendimento mais sólido de conceitos, reflexão sobre ondas estacionárias, assim como o desenvolvimento de habilidades (recolher, e manusear resultados para verificar ou comprovar hipótese) para resolução de situação problema.

Da análise geral, também observou-se que as respostas consideradas erradas não apresentam muita divergência das respostas consideradas certas. Esse conhecimento, é parcialmente absorvido, com o auxílio de um professor, que pode transformar (reconstruir) respostas erradas em certas, e esse processo funciona como um conhecimento base para modificar e atingir o objetivo geral.

Para que o processo de aprendizagem seja eficiente, o professor deve seguir as cinco etapas propostas na teoria de formação de conceitos, por etapas de Galperin, onde o aluno é orientado pela Base Orientadora de Ação (B.O.A). Dessa forma, o discente executa, de modo inconsciente, as outras quatro etapas que estavam previstas no planejamento do docente.

O papel do docente, ao programar o experimento na aula, é de demonstrar o manuseio, evidenciando os pontos específicos do fenômeno, como causa e

consequência, e explorar o objetivo do experimento, como sendo uma fonte para tirar dúvidas e orientação da atividade.

Observando a importância do dispositivo para aula de Física sobre onda, o dispositivo é indispensável, facilita a compreensão e propicia a experiência com o fenômeno, de forma concreta, o que se mantém por mais tempo na estrutura cognitiva do indivíduo.

Espera-se desenvolver no processo de ensino do discente a reflexão sobre os conceitos apresentados, de acordo com a finalidade do dispositivo, e que pode-se aperfeiçoar, ou agregar conhecimentos específicos, abordados nas aulas. E com o auxílio de orientação da B.O.A III (Base Orientadora de Ação), pode-se desenvolver, as outras quatro etapas, desenvolvendo uma autonomia pedagógica ao aluno por intermédio de erros e tentativas.

Diante dessas perspectivas do dispositivo, como ferramenta pedagógica, verificou que o percentual de acertos para as questões norteadoras de formação de conceito, foi satisfatório, pois, de dez perguntas (Questionários 1 e 2), nove apresentaram uma diferença de percentual positivo, quando comparado os questionários pré e pós intervenção, com variações de 10% a 40% no número de perguntas respondidas certas.

Portanto, nesse sentido, sugerimos o dispositivo como uma ferramenta pedagógica, elaborada e executada, de acordo com as etapas de Galperin, para as aulas de Física sobre ondas estacionárias, de maneira que todas as escolas podem criar o seu próprio experimento, uma vez que o experimento apresenta um baixo custo e alta eficiência na formação de conceitos. Com esses pressupostos, fica evidente que esse tipo de aula atingirá um público alvo maior, desenvolvendo assim, as competências e habilidades, de modo a utilizar o conhecimento quando necessário.

Assim, elaboramos aulas com foco no Produto educacional Tubo de ressonância de baixo custo, subsidiado na teoria da aprendizagem de Galperin, e apresentamos sua eficácia na dissertação. E, para sua aplicação, disponibilizamos um manual de funcionamento e manipulação do equipamento, para que seja inserido nas propostas de aulas de ensino de Física, direcionando o aprendiz a observar, refletir, e discutir, para a elaboração de hipótese, gerando conhecimento para o indivíduo, de modo que interprete e modifique o ambiente, de acordo com suas necessidades.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABBOLTT, B.P. e autores physical review letter v.116, P. 061102-1 (2016).
 ABNT NBR 14724:2011, Informação e documentação - Trabalhos acadêmicos
 - Apresentação, disponível em
<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=86662>

ABNT NBR 10520:2002, Informação e documentação - Citações em documentos -
 Apresentação, disponível em
<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=2074>

ALVARENGA, B.; MÁXIMO, A. Curso de física, v. 2, 4. ed. Scipione, 1997, p. 397 – 903

ARAÚJO, M, S,T; ABIB,M, L V, S Atividades Experimentais no Ensino de Física: Diferentes Enfoques, Diferentes Finalidades, Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 25, no. 2, Junho, 2003.

BARROSO, M. F. Geração de ondas sonoras (applet em Flash), 2005. Disponível em <http://www.if.ufrj.br/~marta/aplicativos/diapasao.html>. Acesso em 20 de janeiro de 2018.

BATISTA, M. C., FUSINATO, P. A. e BLINI, R. B. Reflexões sobre a importância da experimentação no ensino de Física. Acta Scientiarum Human and Social Sciences, 2009.

BERLONI, A. A. P. Uma nova abordagem de conceitos de física e astronomia a partir do diagrama HR.Universidade Federal do Mato Grosso. MT 2015.

BONJORNO, J. R. Termologia óptica geométrica ondulatória, vol. 2, 1992.

BORGES A. T.Novos rumos para o laboratório escolar de ciências, Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 19, n. 3, pp. 291 – 313, 2002.

CARBONE, F, e autores Nature Communications volume 6, Article number: 6407 (2015)

CERBARO, B. de Q. Experimentos Para Ensino Médio de Física: compilando e testando experimentos didáticos no contexto curricular. In: X Salão de Iniciação Científica – PUCRS, 2009.

COUTO, F. Atividades Experimentais Em Aula de Física: repercussões na motivação dos estudantes, na dialogia e nos processos de modelagem. 29 de outubro de 2009. 155 f. dissertação em mestre em educação – Universidade Federal de Minas Gerais. Universidade federal de Minas, Minas 2009.

DELGADO, O, T; MENDOZA, H, J,G Uma Aproximação das Teorias de Aprendizagem Significativa e Formação por Etapas das Ações Mentais. Aprendizagem Significativa. Revista/Meaningful Learning Review – V2(2), pp. 1-13, 2012.

FUNDAMENTAL, S, E. Parâmetros curriculares nacionais ciências naturais. Brasília, V. 1. MEC/SEF, 1997. 136p.

GALIAZZI, M. C. et al. Objetivos das atividades experimentais no ensino médio: a pesquisa coletiva como modo de formação de professores de ciências. Ciência & Educação, v.7, n.2, p.249-263, 2001

GALPERIN, P.I. Organization of mental activity and effectiveness of learning. *Soviet Psychology*, Moscou, v. 27, n. 3, p. 65-82, may/june 1989c.

GASPAR, A. Física volume único, p.214-247, 2009.

HALLIDAY, D; RESNOCL, R.; WALKER, J. Fundamentos de Física, volume 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica; Rio de Janeiro: LTC, 2012.

JUNIOR, F., R.; FERRARO, N., G.; SOARES, P., A., T. Os fundamentos da física, v. 2, 9. ed. Editora Moderna Ltda, 2007, p. 2 – 532.

LEOCADIO, R, G. Aula 3 parte 1, calculando a velocidade do som com auxílio do tubo, 2019. Disponível em: < <http://youtu.be/fFjGZSPxwxA> > Acesso em: 19 jul.2019.

LEOCADIO, R, G. Aula 3 parte 2, calculando a velocidade do som com auxílio do tubo, 2019. Disponível em: < http://youtu.be/xgRwdS_xueA > Acesso em: 19 jul.2019.

LEOCADIO, R, G. Montagem do tubo de ressonância de baixo custo, 2019. Disponível em: < <http://youtu.be/ITERTJ-KV5o> > Acesso em: 19 jul.2019.

NICOLAU, G. F.; TOLEDO, P.; RAMALHO JR., F.; IVAN, J. Os Fundamentos da Física. 7. ed. São Paulo: Moderna, 1999. Volume 2.

NUÑES, I, B.; PACHECO, O, G. Formação de conceitos segundo a teoria de assimilação de Galperin, vol. 1, n,105, p. 92-109 novembro 1998.

NUSSENZVEIG, H.; M. Curso de física básica: fluidos, oscilações e ondas e calor. 4ª ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2002

PCN+, Ensino Médio Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais Física, Ministério da Educação e do Desporto / Secretaria de Educação Fundamental, 2002.

REIS, E. M. SILVA, Otto H M. Atividades experimentais: uma estratégia para o ensino da física. Cadernos Intersaberes, vol. 1, n.2, p.38-56, 2013.

SAAB, Sérgio da Costa, Cássaro, Fabio Augusto Meira, Brinatti, André Maurício. Laboratório caseiro: Tubo de ensaio adaptado como tubo de kundt para medir a velocidade do som no ar. Cad. Brás. Ens. Fís., v. 22, n. 1: p. 112-120 abr. 2005.

SANTOS, E.I; PIASSI, L. P. C.; FERREIRA, N. C. Atividades Experimentais de baixo custo como estratégia de construção da autonomia de professores de Física: uma experiência em formação continuada. In: IX Encontro Nacional de Pesquisa de Física. Belo Horizonte, 2004.

SÉRÉ, M, G ; DIDA, S, C, O; COELHO M, S ; MUNES , A, D. O papel da experimentação no ensino da física. Cad.Bras.Ens.Fís., v.20, n.1: 30-42, abr. 2003.

SILVA, M, N, M. O papel atual da experimentação no ensino de física. XI Salão de Iniciação Científica – PUCRS, V. 1, P. 3, 09 a 12 de agosto de 2010.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA, <www.sbfisica.org.br>, acessado em 20/08/2018.

SOUZA, A. R; AGUIAR, E. A pressão e deslocamento nas ondas sonoras. Instituto de Física/UFRJ e Colégio Pedro II. XIX Simpósio Nacional de Ensino de Física (SNEF) . 2011, Manaus, AM.

SILVA, J. L. P. Um ensino facilitador da aprendizagem significativa da Termodinâmica básica. Salvador: IF/UFBA, 1999. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufba.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=155>, Acesso em: 09 de janeiro de 2018.

TALÍZINA, N. F. psicología de la enseñanse. Moscú: Progreso, 1988.

TIPLER, Paul Allen. Física para cientistas e engenheiros. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1995. 4v.

THOMAZ, M. F. A experimentação e a formação de professores: uma reflexão. Cad. Cat. Ens. Fís., 17 (3): 360-369, 2000.

VIENNOT, L. Reasoning in Physics: The Part of Common Sense, Kluwer, Dordrecht, 2001.

VEIT, E. A.; TEODORO, V. D. Modelagem no ensino/aprendizagem de física e os novos parâmetros curriculares para o ensino médio. Revista Brasileira de Ensino Física, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 87-96, Junho.2002.

VILLATORRE, A.M; HIGA, I; TYCHANOWICZ, S. D. Didática e Avaliação em Física. Curitiba: IBPEX, 2008. p 107 – 119.

VYGOTSKY, Lev S. A formação social da mente. São Paulo: Martins Fontes, 1987.

YOUNG, Hugh. Física II : Termodinâmica e ondas / Young e Freedman, 12ª edição, São Paulo, Adisson Wesley Editora, 2008.

WITTMANN, M. C.; STEINBERG, R. N.; REDISH, E. F. Making sense of how students make sense of mechanical waves. The Physics Teacher, v. 37, p. 15-21, 1999.

APÊNDICE A – PLANEJAMENTO DE AULAS MINISTRADAS



Plano de aula 1

Professor: Ranylson Gomes Leocádio

Disciplina: Física

Serie: 2

Título da aula: ondas

Objetivo Geral: compreender o conceito de ondas e sua classificação

Objetivos específicos:

- Compreender a ideia intuitiva de onda;
- Compreender as características de classificação de onda;
- Praticar a ideia de tipos de onda longitudinal e transversal.

Conteúdo programático:

Conceito de onda, classificação de onda: quanto a natureza; quanto a dimensão de propagação: onda longitudinal; onda transversal

Metodologia:

A aula será ministrada de forma dialógica e contextualizada, auxiliada por texto com roteiro didático (livro), slides, vídeos sobre o assunto, pincel e quadro branco.

No primeiro momento, a aula iniciará com uma pequena sondagem dos conceitos de ondas, iniciada de acordo com as perguntas chave do tipo: o que é onda? Cite exemplos de onda? Você já teve alguma experiência com onda? Quais são os tipos de ondas ?

No segundo momento, com as indagações feitas, podemos iniciar a discussão, de acordo com as respostas dos discentes, apresentando o conceito de forma clara, com exposição no quadro e slides. Com a explicação do conceito de onda, reforçaremos o conceito, mostrando um vídeo que explica, de forma animada, o conceito. Seguindo esse roteiro, podemos aplicar na classificação de onda, e distinguir os tipos de onda.

No terceiro momento, realizará uma lista de exercícios, abordando os conceitos apresentados na aula.

Conteúdo

Segundo. S. Pilling:

Ondas - São perturbações do meio envolvido, ou distúrbios, sendo transmitidas através do vácuo, ou de um meio material (sólido, líquido ou gasoso) que carregam alguma forma de energia. Existe uma variedade (muito grande) de ondas, por exemplo, ondas do mar, ondas numa corda, numa mola, ondas sonoras, ondas eletromagnéticas. Essas ondas podem diferir em muitos aspectos, mas todas têm uma mesma característica: transportam energia de um ponto a outro. Cada tipo de onda, pode ser caracterizada pela oscilação de uma ou mais variáveis físicas que se propagam através do espaço.

Um tipo especial de ondas são as eletromagnéticas. Nestas, as variáveis físicas que oscilam são os vetores campo elétrico e campo magnético. Os olhos são receptores especiais, que detectam as ondas eletromagnéticas, com comprimentos de ondas variando entre 4000 e 7000 Å. Veremos mais detalhes sobre as ondas eletromagnéticas nas próximas aulas.

Nas ondas sonoras, uma variável física que sofre oscilação é a pressão (ou densidade do meio). Os ouvidos constituem receptores especiais de ondas sonoras com frequências de 20 a 20000 Hz.

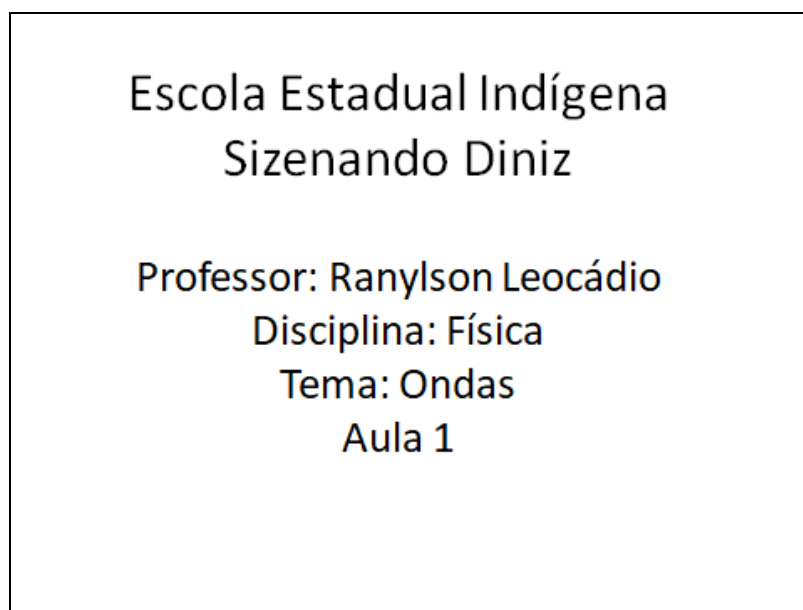
Tipos de ondas - As ondas podem ser do tipo mecânicas (propagam-se em meios materiais) e não mecânicas (não necessitam de um meio material para se propagar).

As ondas sonoras, ondas numa corda, ondas na água são exemplos de ondas mecânicas que se propagam em meios deformáveis ou elásticos. Durante a propagação de ondas mecânicas, as partículas que constituem o meio vibram somente ao redor de suas posições de equilíbrio, sem deslocarem, como um corpo todo, juntamente com a onda. Ondas eletromagnéticas, como é o caso das ondas de rádio, ou a luz visível, são ondas do tipo não-mecânicas, pois estas podem se propagar até mesmo no vácuo.

Analisando a relação entre as direções da perturbação e da propagação, as ondas ainda podem ser divididas em transversais (a perturbação é perpendicular a direção de propagação da onda) e longitudinais (a direção da perturbação é a mesma da propagação da onda).

Esses conceitos foram apresentados em forma de slides, o que resulta em uma aula mais dinâmica, por exemplo, observando o slide da aula1:

Figura 1 – Roteiro da aula

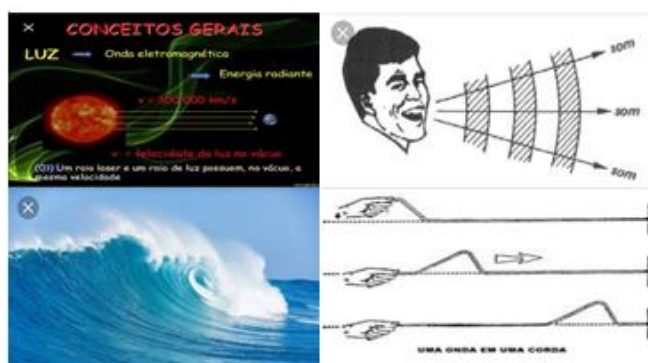


Fonte autor

Figura 2 – Conceito de onda

Segundo S. Piling.

- **Ondas** são perturbações transmitidas através do vácuo ou de um meio gasoso, líquido ou sólido.



- Transmitem energia de um ponto a outro; algumas vezes por grandes distâncias sem necessariamente haver transporte de matéria.

Fonte: autor

Figura 3 – Classificação de onda

Classificação de onda

Ao analisar a classificação de ondas no livro termodinâmica e ondas, de Sears, Zemansky, Young e Freedman, (2008). Observa-se que a onda pode ser classificada:

Quanto a natureza:

- Mecânica
- Não mecânica (eletromagnética)
- E a recente verificação de ondas gravitacional

Quanto a dimensão de propagação

- Unidimensional
- Bidimensional
- Tridimensional

Quanto ao sentido de Propagação e de Perturbação

- Transversal
- Longitudinal

Fonte: autor

Figura 4 – Classificação quanto a natureza



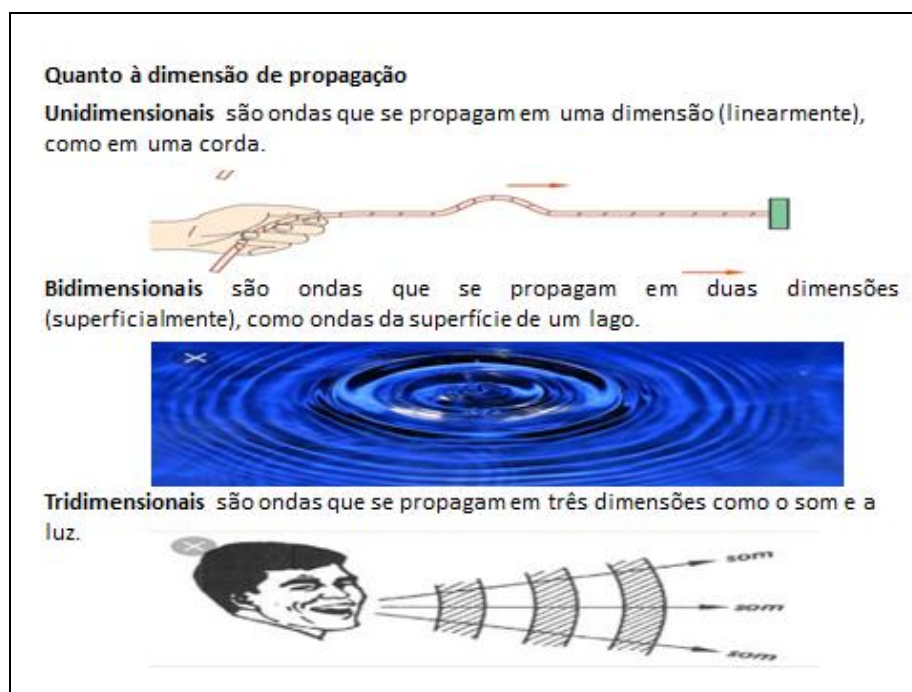
Fonte: autor

Figura 5 – Ondas gravitacionais



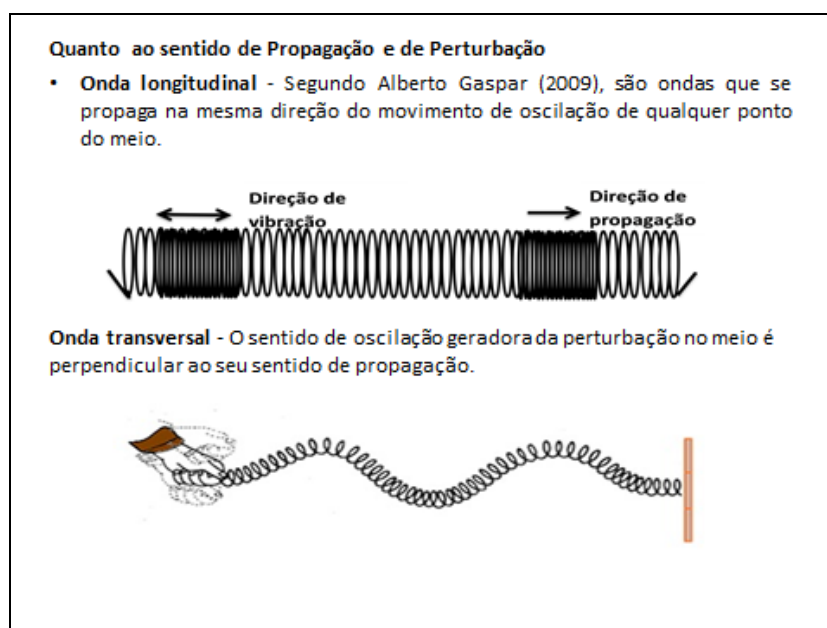
Fonte: autor

Figura 6 – Quando a dimensão de propagação



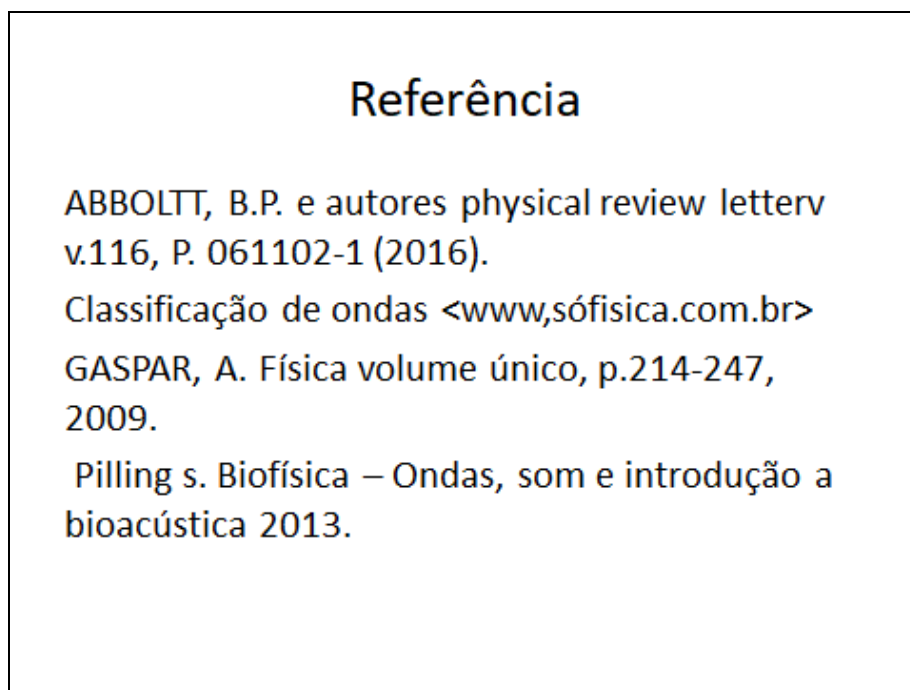
Fonte: autor

Figura 7 - Quanto ao sentido de propagação e perturbação



Fonte: autor

Figura 8 – Referência



Fonte: autor

Confira o vídeo 1

Figura 9 - vídeo 1 classificação de onda



Fonte: Brasil Escola

Exercício

- 1) Com base na aula sobre onda, defina o que é onda?
- 2) Classifique tipos de ondas, ressaltando características diferentes das demais.
- 3) Tsunami é uma das forças poderosas da natureza, e todos sabemos que esse fenômeno é caracterizado como onda gigante. Com base nas aulas, classifique esse tipo de onda.
- 4) Cite os tipos de ondas que você teve alguma experiência, classificando-os.
- 5) Relate, qual é a principal característica que distingue, ondas mecânicas de não – mecânicas.

Plano de aula 2

Professor: Ranylson Gomes Leocádio

Disciplina: Física

Serie: 2

Título da aula: Reflexão e Refração de pulsos

Objetivo geral: Aprender os fenômenos de reflexão e refração de pulso

Objetivos específicos:

- Compreender quais são as condições necessárias para que ocorra o fenômeno reflexão de pulso e suas características;
- Compreender quais são as condições necessárias para que ocorra o fenômeno refração de pulso e suas características;
- Analisar causa e efeito.

Conteúdo programático:

Reflexão e refração de pulsos.

Metodologia:

A aula será ministrada de forma dialógica e contextualizada, auxiliada por texto com roteiro didático (livro), vídeos sobre o assunto, pincel e quadro branco.

No primeiro momento, iniciaremos a aula com indagações que retrata o fenômeno, por exemplo: pergunta-se ao discente se este teve experiência com cordas na infância ou molas de algum brinquedo. As chances são altas para as respostas positivas, assim, a próxima pergunta seria, se este já sacudiu material, e o que este observou depois da ação.

Esse método é recorrente para os professores de física, facilita a introdução ao assunto, pois, o aluno em sua vida, vive cercado de fenômenos físicos, porém sem a orientação correta, este, as vezes, não é capaz de identificar ou explicar o fenômeno.

No segundo momento, utilizaremos o livro didático para elucidar exemplos demonstrados pela ferramenta pedagógica, e se necessário, desenvolver demonstrações no quadro.

E no terceiro momento, reforçaremos os conceitos apresentados com dois vídeos, Ondulatória para reflexão em cordas e Física – Ondas: refração de um pulso de onda, os quais apresentam, de forma clara e animada, os exemplos do livro, possibilitando melhor compreensão dos fenômenos.

E no quarto momento, propomos a resolução de uma lista de exercícios, abordando o conteúdo da aula 2.

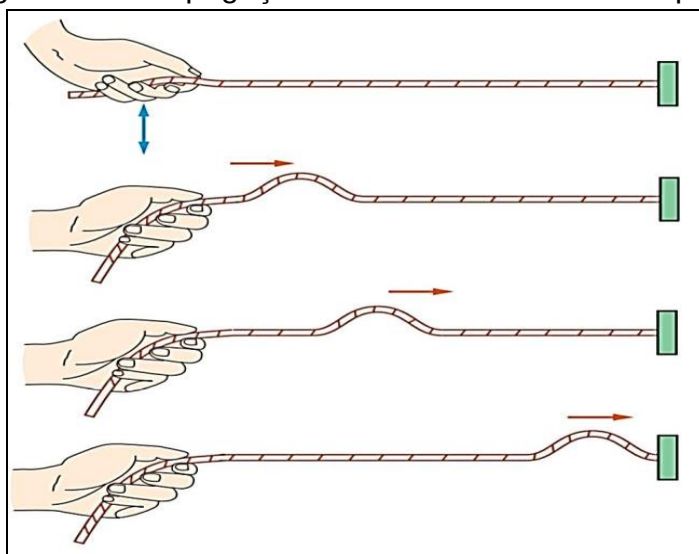
Conteúdo

Segundo Gaspar (2008):

Reflexão de pulsos

Observe a Figura 10 sobre a propagação instantânea de um único pulso.

Figura 10 – Propagação instantânea de um único pulso



Fonte: Alberto Gaspar

O que acontece quando o pulso atinge a outra extremidade da corda?

À medida que o pulso se propaga, a corda deforma-se e depois volta à posição inicial. Trata-se de uma deformação elástica, à qual está associada uma energia potencial. A propagação do pulso equivale, portanto, à propagação da energia potencial elástica fornecida à corda no pulso inicial.

Pelo princípio da conservação da energia mecânica, essa energia potencial elástica não pode desaparecer quando o pulso atinge a outra extremidade da corda. Mas, a corda acaba. O que acontece? Se não há mais

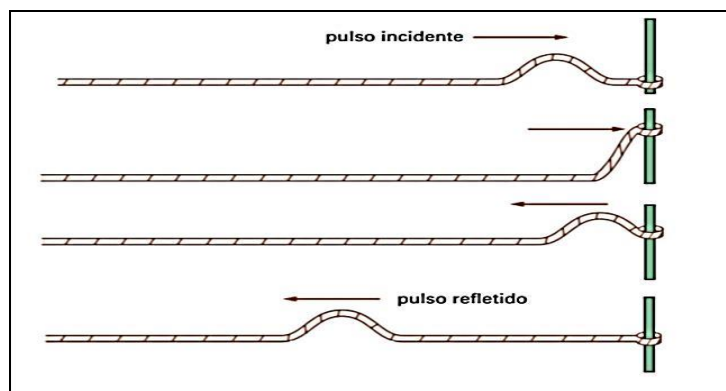
corda para o pulso percorrer para a frente, ele passa a percorrê-la para trás. O pulso volta, ele se reflete.

O fenômeno da reflexão é característico de qualquer propagação ondulatória que encontra uma alteração no meio em que se propaga, o limite desse meio, ou um obstáculo.

Assim, como os pulsos ou as ondas se refletem ao atingir a extremidade da corda. Também, as ondas sonoras ou luminosas se refletem ao atingir qualquer anteparo, ou o limite do meio em que se propagam. A reflexão tem, entretanto, características específicas em cada tipo de propagação ondulatória.

Os pulsos que se propagam em cordas, refletem-se mantendo a mesma forma do pulso original, chamado de **pulso incidente**, se essa corda tiver a **extremidade livre**. Dizemos que a reflexão ocorre **sem inversão de fase**. Na Figura 11, o pulso refletido tem a mesma fase do pulso incidente (ao chegar e ao voltar, a crista se mantém para cima).

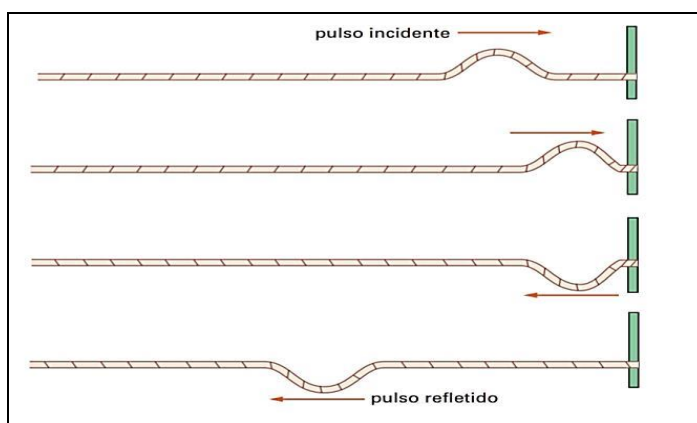
Figura 11 – Reflexão de um pulso na corda



Fonte: Alberto Gaspar

Quando a corda tiver a **extremidade fixa**, o pulso refletido será **invertido** em relação ao pulso incidente. Na Figura 12, a fase do pulso refletido é invertida em relação à fase do pulso incidente (ao atingir a extremidade fixa, a crista está voltada para cima; ao refletir-se, está voltando para baixo).

Figura 12 – Reflexão de pulso em cordas com uma extremidade fixa

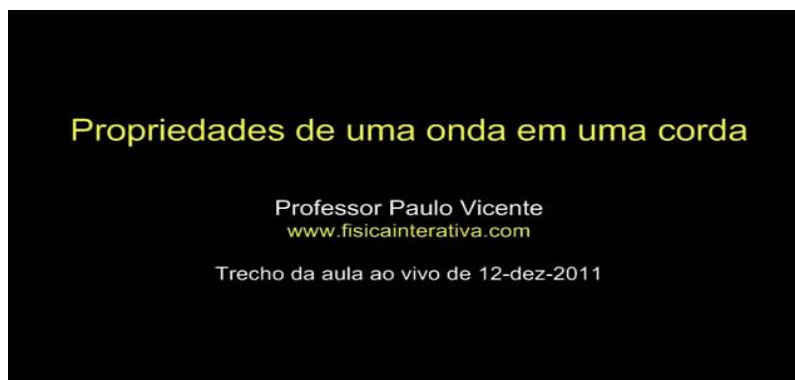


Fonte: Alberto Gaspar

Note que, enquanto na reflexão em uma extremidade fixa o pulso é preso para refletir-se, na extremidade livre, este pode refletir-se mesmo estando completamente solto. A haste e o anel, em torno dos quais, a extremidade da corda oscila, não são necessários; estes costumam ser colocados apenas para facilitar a representação gráfica do fenômeno.

Confira a demonstração animada apresentada no vídeo 2

Figura 13: Vídeo 2 demonstração animada das propriedades de uma onda em uma corda



Fonte: www.fisicainterativa.com

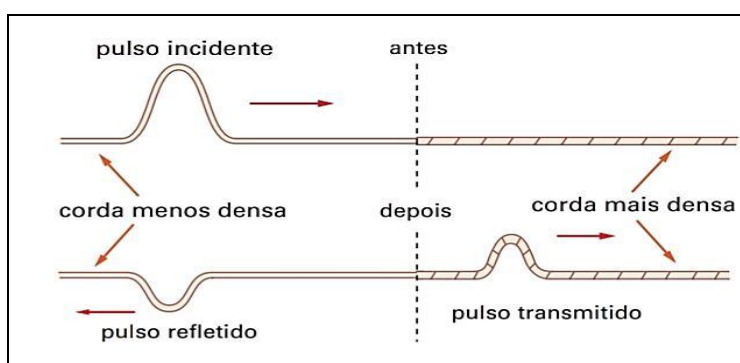
Refração de pulsos

Suponha que duas cordas diferentes estejam ligadas e estendidas horizontalmente. O que ocorre quando o pulso passa de uma corda para outra? Há duas situações possíveis, dependendo da **densidade linear** de cada corda.

Para entender o fenômeno, basta examinar as situações representadas na Figura 14.

Quando o pulso passa da corda menos densa para a mais densa, “parte do pulso” passa para a corda mais densa – é o pulso refratado ou transmitido – enquanto outra “parte do pulso”, invertida, se reflete:

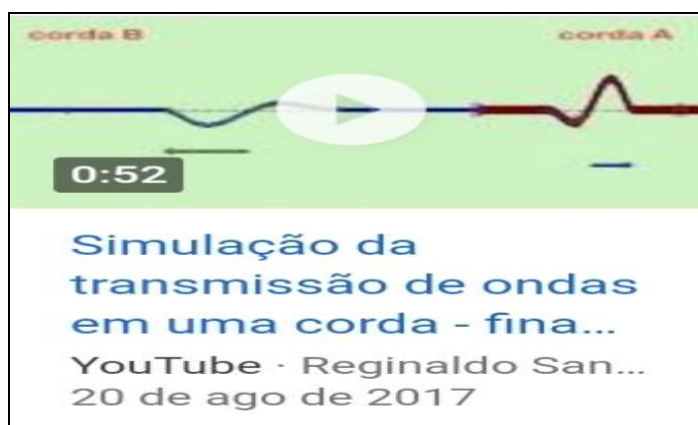
Figura 14 – Refração de um pulso em uma corda situação 1



Fonte: Alberto Gaspar

Confira a simulação animada apresentada no vídeo 3.

Figura 15 - Simulação da transmissão de ondas em uma corda - fina para grossa

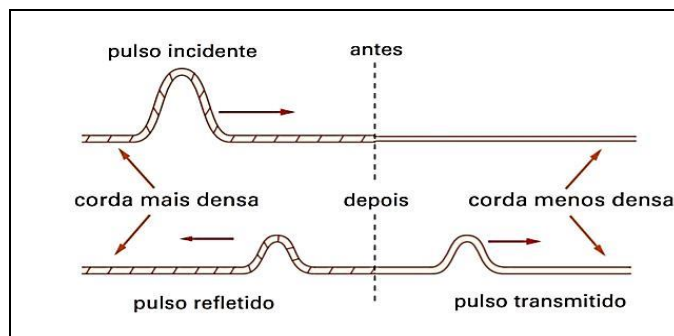


Fonte: you tube Reginaldo Santos

Quando o pulso passa da corda mais densa para a menos densa, “parte do pulso” passa para a corda menos densa – é o pulso refratado ou

transmitido, enquanto outra “parte do pulso” se reflete, sem inversão de fase. Configura na Figura 16.

Figura 16 – Refração de um pulso em uma corda situação 2

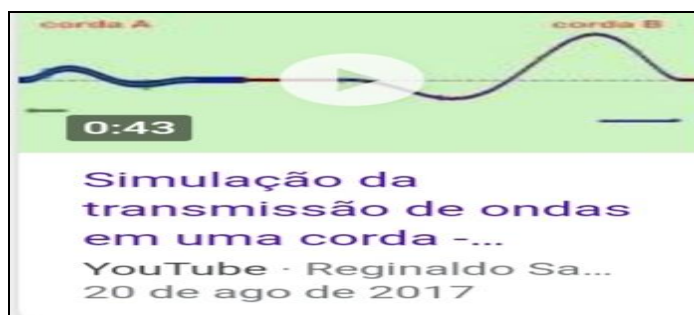


Fonte: Alberto Gaspar

Em ambos os casos, a energia do pulso se distribue, parte é **refratada** ou **transmitida** para a outra corda, e parte é refletida para a corda, onde se propaga o pulso incidente, com ou sem inversão de fase. Essa é uma característica da refração nos movimentos ondulatórios. Sempre que a onda passa de uma corda para outra, ou de um meio para outro, parte da energia é refletida.

Confira animação da transmissão de onda o vídeo 4.

Figura 17 - Simulação da transmissão de ondas em uma corda - grossa para fina



Fonte: You tube Reginaldo santos

Exercícios

- 1) Quando a primeira pedra de uma fileira de pedras, o dominó cai, todas as demais caem sucessivamente. Esse fenômeno pode ser classificado como ondulatório? Discuta.

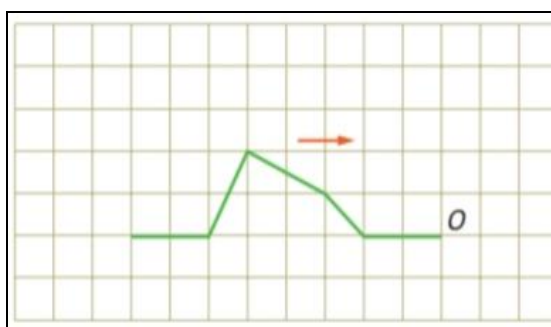
Figura 18 – Fileira de jogo de dominó



Fonte: Albert Gaspar

- 2) Um pulso hipotético, com a forma apresentada na Figura 19, se propaga numa corda.

Figura 19 - pulso hipotético



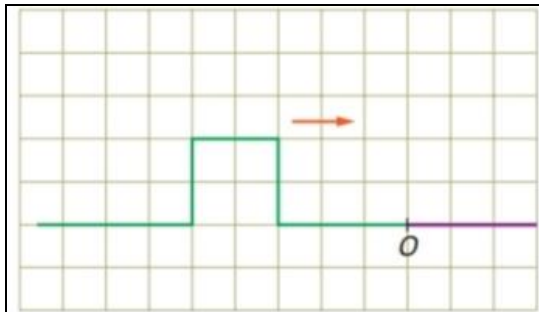
Fonte: Albert Gaspar

Faça um esboço do pulso refletido correspondente, quando, a extremidade O, for:

- a) Livre;
- b) Fixa.

3) Suponha que exista um pulso, com a forma apresentada na Figura 20, propagando-se de uma corda para outra.

Figura 20 – pulso hipotético



Fonte: Albert Gaspar

Faça um esboço dos pulsos refletidos e refratados quando o pulso incidente passar, no ponto O, para outra corda cuja densidade linear é:

- a) Menor;
- b) Maior.

Plano de aula 3

Professor: Ranylson Gomes Leocádio

Disciplina: Física

Serie: 2

Título da aula: Ondas periódicas

Objetivo geral: Compreender característica de ondas periódicas

Objetivos específicos:

- Compreender frequência e período;
- Entender conceito de amplitude, fase e comprimento de onda;
- Analisar a velocidade de propagação.

Conteúdo programático:

Ondas periódicas, frequência e período, amplitude, fase e comprimento de onda, velocidade de propagação.

Metodologia:

A aula será ministrada de forma dialógica e contextualizada, auxiliada por texto com roteiro didático (livro), vídeos sobre o assunto, pincel e quadro branco.

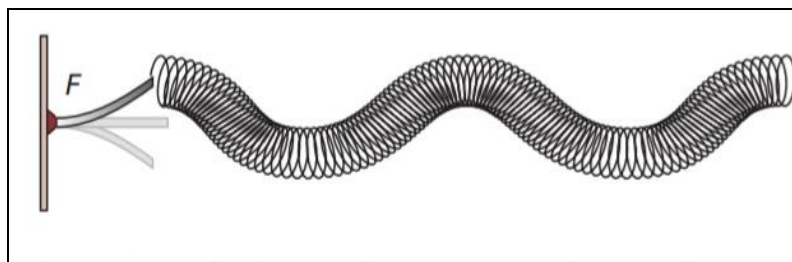
No primeiro momento, iniciaremos a aula ressaltando aos alunos que aprofundaremos o assunto, de modo a dispor um olhar mais científico para o fenômeno. O segundo, apresentaremos os conceitos de acordo com o conteúdo programático. E, no terceiro, uma lista de exercícios que aborde o conteúdo.

Conteúdo

Ondas periódicas

Embora a propagação de pulsos seja de natureza ondulatória, o seu estudo não permite a abordagem de todas as características desse momento. Para isso, é necessário considerar uma série contínua de pulsos. A figura 21 representa uma foto instantânea de uma onda gerada em uma mola por uma fonte oscilante F .

Figura 21 – Onda em uma mola

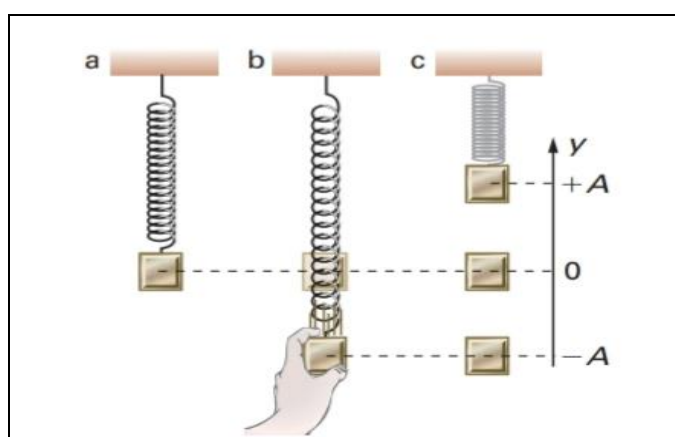


Fonte: Alberto Gaspar

Se F produzir oscilações regulares, de período constante, a mola será percorrida por **ondas periódicas**. Se as oscilações forem harmônicas simples, ou seja, cada ponto da mola oscilar como movimento harmônico simples (MHS), vão se propagar **ondas harmônicas simples** pela mola.

Para observar o que é (MHS), veja a Figura 22.

Figura 22- Movimento harmônico simples

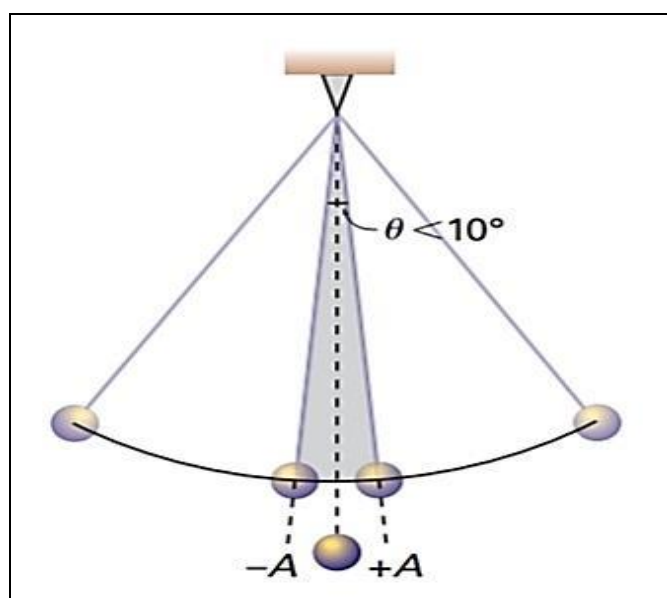


Fonte: Alberto Gaspar

Quando o bloco preso á mola (**a**) é puxado e solto (**b**), este adquire um movimento oscilante, periódico, chamado de **movimento harmônico simples**

(MHS). Se associarmos, a esse movimento, um referencial vertical com origem (O) no ponto de repouso, as posições extremas serão $+A$ e $-A$ (**c**) (amplitude (**A**) do movimento). O intervalo de tempo, gasto pelo bloco para descrever uma oscilação completa –, é definido quando este passar duas vezes sucessivas pela mesma posição –, ou seja, é o **período (T)** do movimento. O inverso do período corresponde à **frequência (f)**: número de oscilações completas descrita pelo bloco em uma unidade de tempo. Há sistemas oscilantes que executam um MHS aproximado. É o caso do pêndulo simples, quando oscila com pequena amplitude, limitada a ângulo $\theta < 10^\circ$ (Veja a Figura 23).

Figura 23 – Pêndulo simples

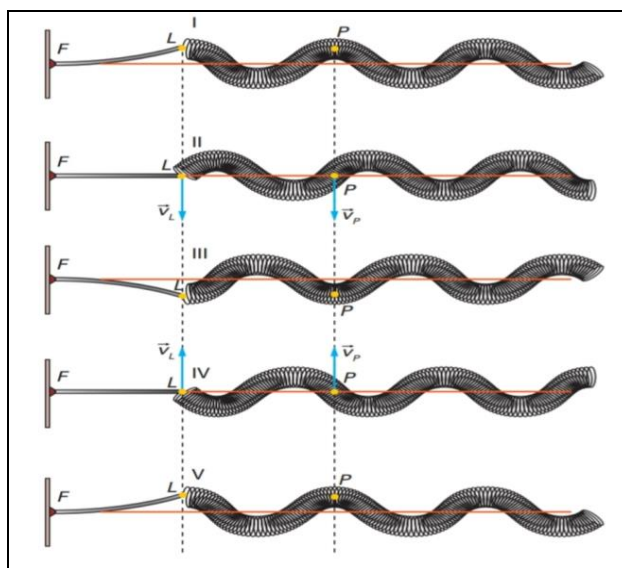


Fonte : Alberto Gaspar

Frequência e período

Observe a sequência de movimentos em instantes t de uma onda, conforme é mostrado na figura 24.

Figura 24 – Onda em uma mola



Fonte: Alberto Gaspar

Esta representa uma onda gerada por uma lâmina vibrante propagando-se em uma mola, em cinco instantes sucessivos. Em I, III e V, os pontos L e P estão, momentaneamente, em repouso; em II e IV, suas velocidades são máximas.

Consideremos um ponto L na extremidade da lâmina (supõe-se que as oscilações, nesse ponto, sejam suficientemente pequenas para que ele se movimente em um pequeno segmento de reta), e um ponto P na mola, na mesma fase de L (veremos o conceito de fase logo a seguir). A oscilação vertical da extremidade L, vinculada à extremidade da mola gera a onda que nela se propaga e faz o ponto P da mola oscilar, também verticalmente.

Observa-se, então, na Figura 23, que os pontos L e P descrevem uma oscilação completa (de I a V), no mesmo intervalo de tempo. Assim, podemos concluir que o período (T), e a frequência (f) da oscilação, da extremidade L da lâmina (fonte da onda), são iguais ao período e a frequência da própria onda, sendo, para ambos, válidas as relações:

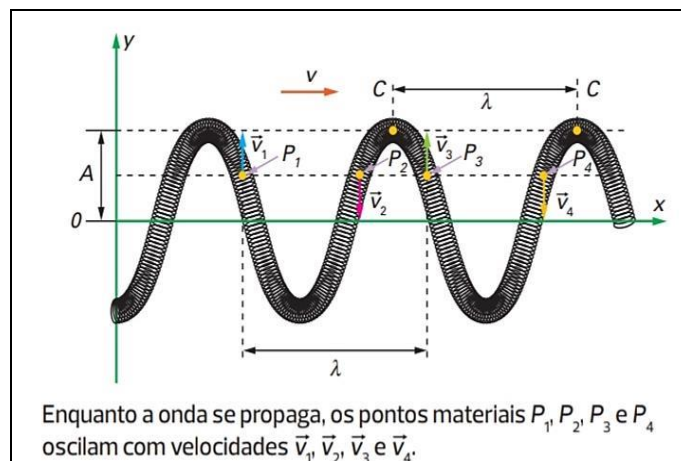
$$T = \frac{1}{f}$$

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

Amplitude, fase e comprimento de onda

Observe a Figura 25.

Figura 25 – Onda periódica em uma mola



Fonte: Alberto Gaspar

Estabelecido o referencial representado na Figura 24, a **amplitude** A de uma onda é, por definição, o módulo da ordenada máxima de um ponto dessa onda.

Para definir **comprimento de onda**, é preciso entender a ideia de **fase** de um ponto em movimento oscilatório. Observe novamente a Figura 24.

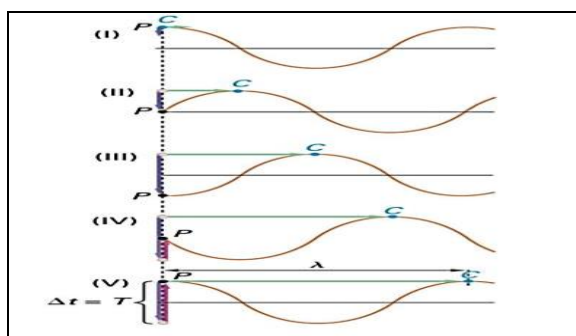
Os pontos P_1, P_2, P_3 e P_4 têm a mesma ordenada y , mas não têm velocidades de mesmo sentido. Enquanto P_1 e P_3 sobem, P_2 e P_4 descem. Por essa razão, só os pares (P_1, P_3) e (P_2, P_4) estão na mesma fase. A distância entre eles é o **comprimento de onda**, representado pela letra grega λ (lambda). Em qualquer onda existem muitos pontos na mesma fase, como os pontos C da crista (pontos de ordenada máxima). Assim, define-se comprimento de onda (λ) como a menor distância entre dois pontos na mesma fase.

Velocidade de propagação

Para a propagação ondulatória, só tem sentido utilizar o conceito de velocidade escalar média. Assim, da expressão $V_m = \frac{\Delta s}{\Delta t}$, **obtemos a velocidade de propagação**, dividindo o espaço que a onda percorre pelo correspondente intervalo de tempo. A velocidade de propagação de uma onda não é a mesma grandeza que expressa a velocidade de uma partícula. A grande diferença entre esses conceitos reside no caráter vetorial da velocidade da partícula, que não existe na velocidade de propagação da onda. É possível decompor a Velocidade de um projétil, em um lançamento oblíquo, para determinar o alcance ou a altura máxima que ele atinge; é possível somar vetorialmente a velocidade de um barco com a velocidade da correnteza, mas nada disso é possível com movimentos ondulatórios. E, se duas ondas atravessam a mesma região do espaço, suas velocidades não se somam nem algébrica nem vetorialmente. As ondas se cruzam sem sofrer nenhuma alteração.

A razão física para essas diferenças é simples: enquanto a velocidade de uma partícula se relaciona a algo que efetivamente se desloca — a partícula —, a velocidade de propagação não se relaciona a nenhum deslocamento de partículas — em uma onda elas apenas oscilam, não se deslocam nem, a rigor, “fazem parte” da onda, mas do meio em que ela se propaga. O que se desloca é a forma da onda. É por meio da forma que a onda transmite a energia para o ambiente. Por isso a velocidade de propagação é também chamada de velocidade de fase, pois a fase é uma grandeza estritamente ligada à forma da onda. Observe a Figura 26.

Figura 26 – Frente de onda



Fonte: Alberto Gaspar

Na sequência de I a V, enquanto a crista C percorre a distância correspondente a um comprimento de onda, o ponto P efetua uma oscilação completa. Portanto, o intervalo de tempo correspondente desse percurso é igual ao período T da onda. Assim, voltando à expressão da velocidade escalar média, enquanto a crista C da onda percorre a distância $\Delta e = \lambda$, o intervalo de tempo transcorrido é $\Delta t = T$. Portanto, a velocidade de propagação da onda é:

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

Ou, lembramos que $T = \frac{1}{f}$:

$$v = \lambda f$$

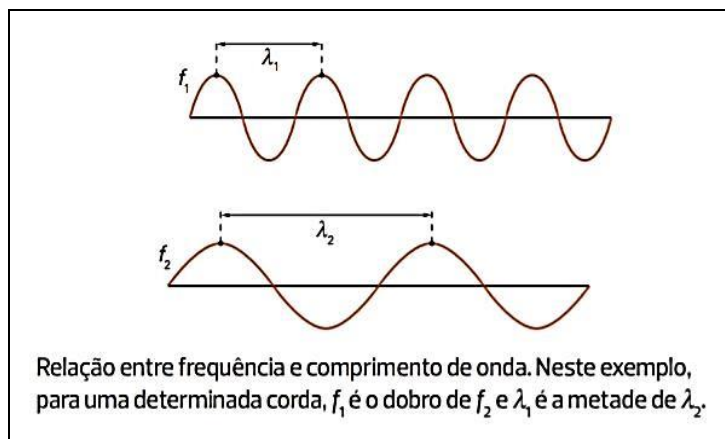
Se a fonte é harmônica simples, o período e a frequência são constantes. O comprimento de onda também é constante, porque a velocidade de propagação da onda é constante, pois depende apenas das propriedades do meio em que ela se propaga. Assim, pode-se demonstrar que a velocidade de propagação de uma onda numa corda é dada por:

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

em que F é o módulo da tensão na corda e μ a sua densidade linear.

Se a velocidade de propagação da onda é constante, a partir da expressão $v = \lambda f$, concluímos que **frequência** e **comprimento de onda** são sempre grandezas **inversamente proporcionais**. Assim, quando a frequência da fonte geradora de uma onda dobra, triplica ou quadruplica, o comprimento de onda se reduz, respectivamente, à metade, a um terço ou a um quarto. Veja a Figura 27:

Figura 27 – Relação entre frequência e comprimento de onda



Fonte: Alberto Gaspar

Confira ondas periódicas vídeo 5



Ondas periódicas

Vídeoaulas

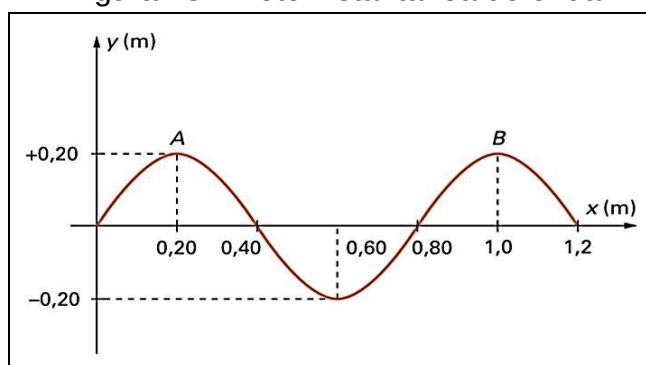
6 anos atrás · 2,4 mil visuali...

Fonte: <http://bit.ly/exercicioOnda>

Exercício

- 1) A Figura 28 foi obtida a parti de uma foto instantânea de ondas que percorrem uma corda com velocidade de propagação $v = 0,16 \text{ m/s}$.

Figura 28 – Foto instantânea de onda



Fonte: Alberto Gaspar

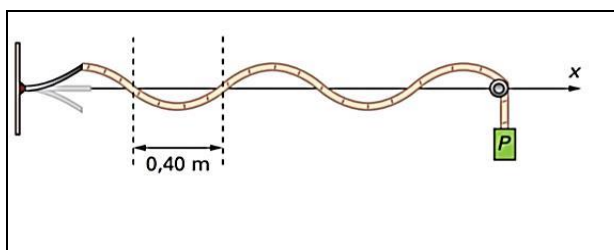
A partir da observação dessa figura, determine:

- a amplitude e o comprimento dessa onda;
- a frequência e o período da onda.

- Uma fonte oscilante harmônica simples gera um trem de ondas numa corda de densidade linear $\mu = 0,20$ kg/m, tracionada pela carga de peso $P = 5,0$ N. A figura 29 (Fig.29) mostra a distância entre dois pontos sucessivos em que essa onda corta o eixo x. Determine:

- a velocidade de propagação dessa onda;
- a frequência de oscilação da fonte.

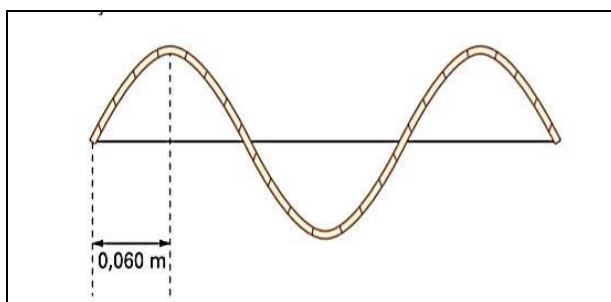
Figura 29 – Onda em uma corda



Fonte: Alberto Gaspar

- Na Figura 30 está representado um trecho de uma onda que percorre com velocidade de propagação $v = 0,12$ m/s, a corda homogênea submetida à tração constante.

Figura 30 – Trecho de uma corda



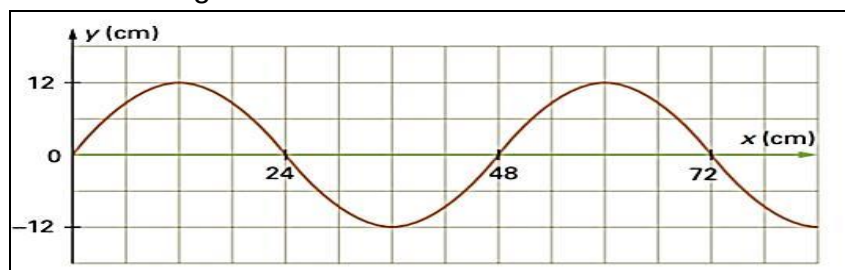
Fonte: Alberto Gaspar

Determine:

- o comprimento de onda e a frequência;
- o comprimento de onda nessa corda se a frequência da fonte tornar-se dez vezes maior.

- Uma onda que se propaga em uma corda homogênea e é submetida à tração constante pode ser acelerada? Explique.
- A proporcionalidade inversa entre a frequência e o comprimento de onda de uma onda é sempre válida? Justifique.
- A figura 31 foi obtida a partir de uma foto instantânea de ondas que percorrem uma corda. A frequência da fonte é de 120 Hz.

Figura 31- Foto instantânea de ondas



Fonte: Alberto Gaspar

Determine:

- a amplitude e o comprimento de onda dessa onda;
- a velocidade de propagação da onda.

Plano de aula 4

Professor: Ranylson Gomes Leocádio

Disciplina: Física

Serie: 2

Título da aula: Cordas vibrantes e ondas bidimensionais

Objetivo geral: Compreender o conceito de cordas vibrantes e ondas bidimensionais

Objetivos específicos:

- Compreender princípio da superposição: interferência;
- Entender a ideia de onda estacionária;
- Compreender os conceitos de onda bidimensional.

Conteúdo programático:

Princípio da superposição: interferência, ondas estacionárias, ondas estacionárias em cordas vibrantes: ressonância.

Metodologia:

A aula será ministrada de forma dialógica e contextualizada, auxiliada por texto com roteiro didático (livro), slide, vídeos sobre o assunto, pincel e quadro branco.

No primeiro momento apresentaremos o conteúdo com auxílio de slide, e exemplificando cada slide.

No segundo no decorrer das apresentações inserimos vídeos que reforçaram conceitos apresentados, assim como demonstrações pelo intermédio de vídeo (experimento) do fenômeno.

No terceiro apresentaremos uma lista de exercício para verifica-se o conteúdo foi assimilado.

Conteúdo

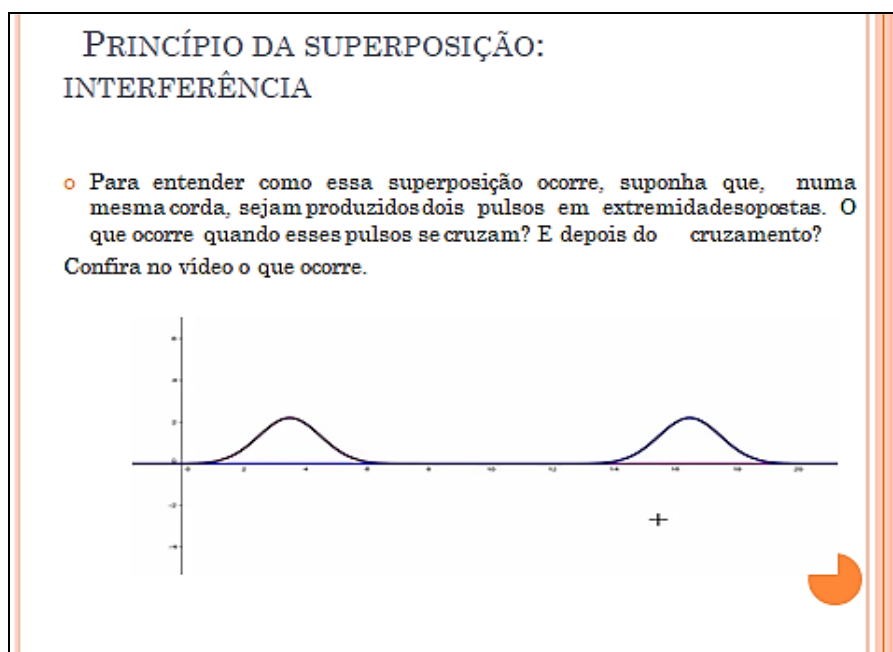
Confira o slide com o conteúdo da aula 4.

Figura 32 – Apresentação da aula 4



Fonte: autor

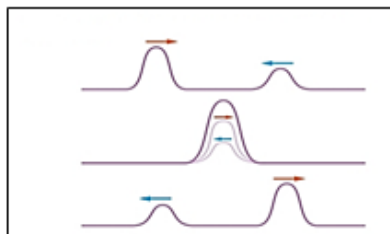
Figura 33 – Princípio da superposição (com vídeo 6 de título princípio da superposição)



Fonte: autor

Figura 34 – Princípio da superposição (instantâneo frisado)

Durante o cruzamento, a ordenada de cada ponto do pulso resultante é a soma algébrica das ordenadas de cada um dos pontos que se cruzam nesse instante. Essa afirmação denomina-se **princípio da superposição**.



Depois do cruzamento, no entanto, cada pulso continua com suas próprias características, como se nada houvesse acontecido.

Fonte: autor

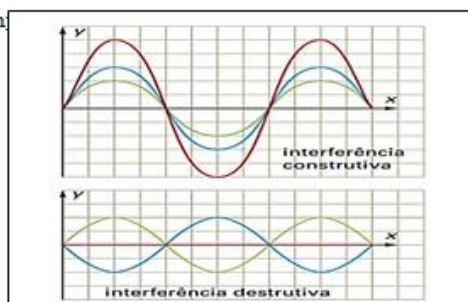
Figura 35 – Interferência

INTERFERÊNCIA

Segundo Gaspar.

- **interferência construtiva** - Quando a onda resultante tem sua amplitude aumentada, ocorre uma interferência construtiva.
- **interferência destrutiva** - quando a amplitude se reduz ou se anula.

Veja o exem



Fonte: autor

Figura 36 – Exemplificação de interferência

As ondas componentes são representadas em verde e azul; a interferência, resultante da superposição, está representada em vermelho.

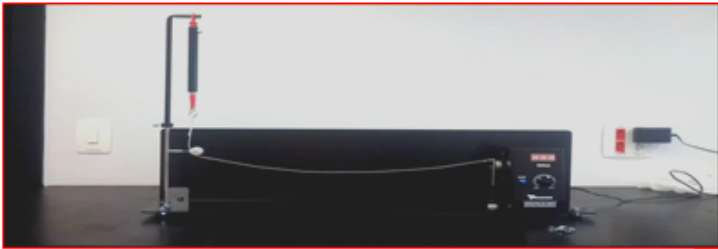
- A interferência e o princípio da superposição podem ser entendidos como consequência do princípio da conservação da energia. Uma onda só poderia alterar a outra se dela absorvesse ou para ela perdesse energia. Isso não acontece porque o meio — nesse caso, a corda — é único.
- Mas a configuração de uma onda é a manifestação visível da energia potencial elástica que se propaga pela corda. Se a corda não perde a energia potencial elástica total para o meio externo, nada se altera; depois da superposição, onde ocorre a interferência, cada onda continua manter a sua configuração anterior.

Fonte: autor

Figura 37 – Ondas estacionária (Com vídeo experimental 7)

ONDAS ESTACIONÁRIAS

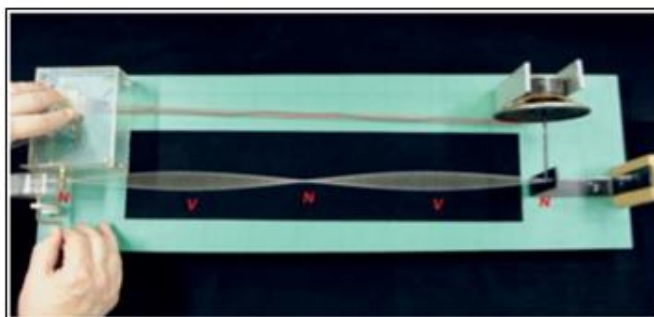
Suponha agora que, na mesma corda, presa nas duas extremidades, em vez de dois pulsos, propaguem-se duas ondas em sentidos opostos. Nesse caso, não é possível observar o que ocorre antes ou depois do cruzamento, pois só existe o cruzamento. O único efeito visível é o resultado da interferência entre essas ondas, que recebeu o nome, aparentemente contraditório, de **ondas estacionárias**.



Fonte: autor

Figura 38 – Ondas estacionaria (imagem frisada do experimento)

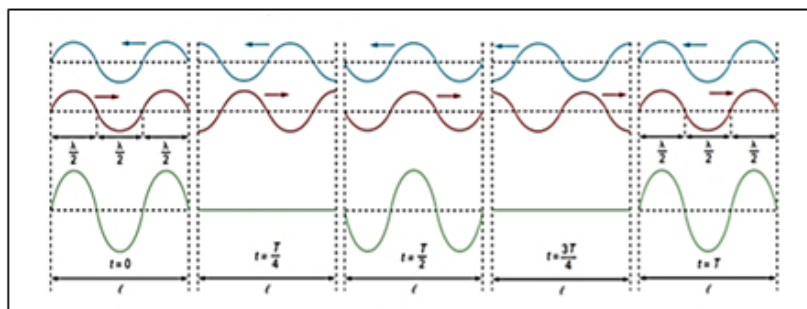
Ela mostra ondas estacionárias geradas por um dispositivo de demonstração experimental. A letra V indica as regiões onde a oscilação é máxima — chamada ventre — e a letra N indica os pontos onde a oscilação é mínima — chamada nó.



Fonte: autor

Figura 39 – Perfis instantâneo de ondas estacionárias

As figuras a seguir podem oferecer uma explicação desse fenômeno, onde se formam ondas de frequência f e período T . Vamos considerar cinco instantes sucessivos, frações do período: $t = 0$; $t = \frac{T}{4}$; $t = \frac{T}{2}$; $t = \frac{3T}{4}$ e $t = T$.

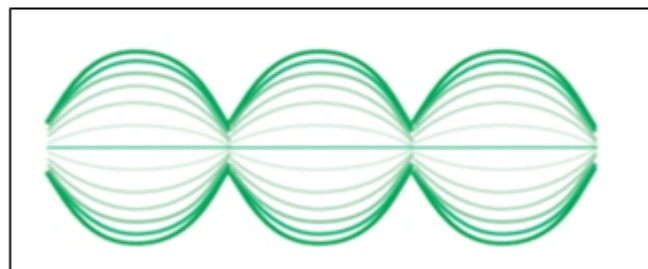


Fonte: autor

Figura 40 – Resultante da Superposição de ondas (ondas estacionárias)

Considere, nessa corda, ondas incidentes (em azul) propagando-se da direita para a esquerda e ondas refletidas (em vermelho) propagando-se da esquerda para a direita. De acordo com o princípio da superposição, nesse movimento as ondas incidentes e as ondas refletidas ora se reforçam (instantes $t = 0$; $t = \frac{T}{2}$ e $t = T$), ora se anulam (instantes $t = \frac{T}{4}$ e $t = \frac{3T}{4}$).

Como o período de ondas em cordas é muito pequeno, em geral de milésimos de segundo, a configuração da onda resultante é demonstrada a seguir (verde).



Fonte: autor

Figura 41 – Relação de comprimento de onda e o comprimento da corda

Note que, para construir a figura, consideramos um trecho de comprimento $l = \frac{2\lambda}{2}$, isto é um ventre para cada meio comprimento de onda, generalizando temos:

$$\lambda_n = 2 \cdot \frac{l}{n}$$

Que nos dá o comprimento de onda (λ_n) das ondas que compõem uma configuração de ondas estacionárias em uma corda fixa nas extremidades a partir do seu comprimento, e do número n de ventres observados.

Confira na tabela a seguir as principais configurações.

Fonte: autor

Figura 42– Configurações de ondas estacionária

<i>n</i> (número de ventres)	Configuração (limitada pelo comprimento <i>ℓ</i>)	Relação entre <i>ℓ</i> e <i>λ</i>
1		$\ell = 1 \cdot \frac{\lambda}{2}$
2		$\ell = 2 \cdot \frac{\lambda}{2}$
3		$\ell = 3 \cdot \frac{\lambda}{2}$
4		$\ell = 4 \cdot \frac{\lambda}{2}$
1	1	1
<i>n</i>		$\ell = n \cdot \frac{\lambda}{2}$

Fonte: autor

Figura 43 – Relação entre frequência e comprimento da corda

Da expressão da velocidade de propagação $v = \lambda f$, vista no capítulo anterior, podemos escrever, para cada valor de *n*, $v_n = \lambda_n f_n$. Assim, da expressão acima, obtemos uma expressão para a frequência correspondente a cada valor de *n*:

$$f_n = \frac{n}{2\ell} v_n$$

Onde *n* é conhecido como modo de vibração; o modo *n* = 1 é chamado de modo fundamental

Fonte: autor

Figura 44 – Ondas estacionárias em cordas vibrantes ressonância

ONDAS ESTACIONARIAS EM CORDAS VIBRANTES RESSONÂNCIA

Duas maneiras de ser gerada

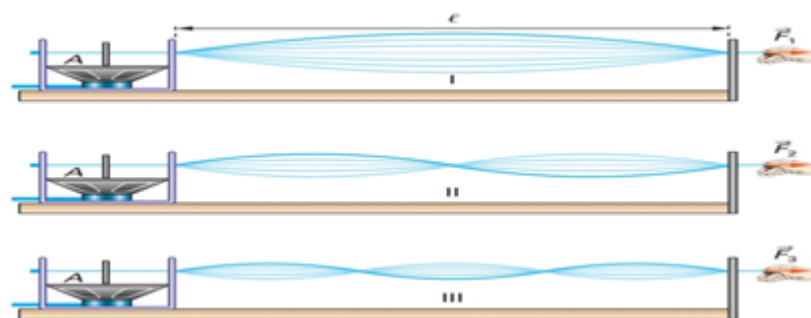
- A primeira, por meio de ação externa isolada (em geral, toque, batida ou fricção); nesse caso, a corda passa a vibrar nas várias frequências dos seus modos de vibração, as quais se sobrepõem.
- A segunda, por meio da ação excitadora de uma fonte oscilante externa, ou seja, por ressonância.

Um agente externo traciona a corda com força de módulo F variável, o que resulta na variação da frequência das ondas estacionárias que podem ser geradas nessa corda. Isso porque, como vimos no capítulo anterior, a velocidade de propagação da onda, v , em uma corda depende da tração sobre ela exercida, de acordo com a expressão.

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

Fonte: autor

Figura 45 – Exemplo de configurações na corda



- Elas representam uma montagem experimental semelhante ao experimento do vídeo. É uma fonte de frequência constante (no caso, um alto-falante) que faz a corda (em azul), de densidade linear μ , oscilar entre duas extremidades separadas pela distância.

Fonte: autor

Figura 46 – Relação entre o modo de vibração e frequência

De modo que para cada modo de vibração, n , f_n (frequência), é definida pela expressão:

$$f_n = \frac{n}{2l} \cdot \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

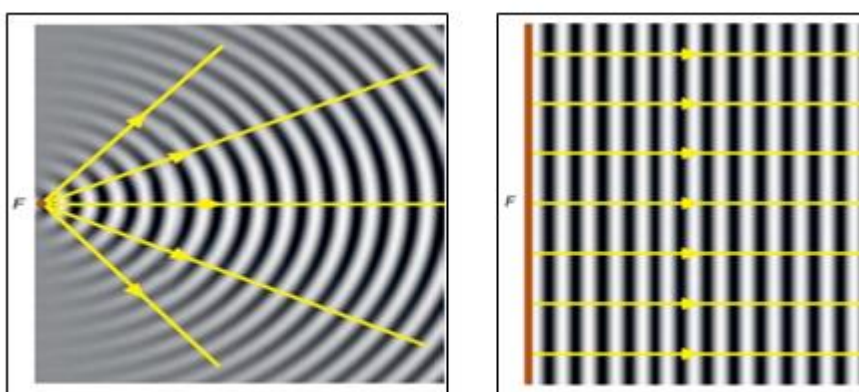
Fonte: autor

Figura 47 – Ondas bidimensionais e o princípio de Huygens

ONDAS BIDIMENSIONAIS E O PRINCÍPIO DE HUYGENS

As ondas bidimensionais têm características específicas decorrentes de sua bidimensionalidade, como frentes de ondas planas e raios de propagação.

Confira suas especificidades nas imagens a seguir:



Fonte: autor

Figura 48 – Exemplificação do princípio de Huygens

Na primeira foto, a fonte oscilante plana F (segmento marrom) gera frentes de ondas planas que se propagam na direção e sentido indicados pelos raios amarelos.

Na segunda foto, a fonte pontual F gera frentes de ondas circulares que se propagam na direção e sentido indicados pelos raios radiais amarelos.



Fonte: autor

Figura 49 – Enunciado do princípio de Huygens

o princípio de Huygens

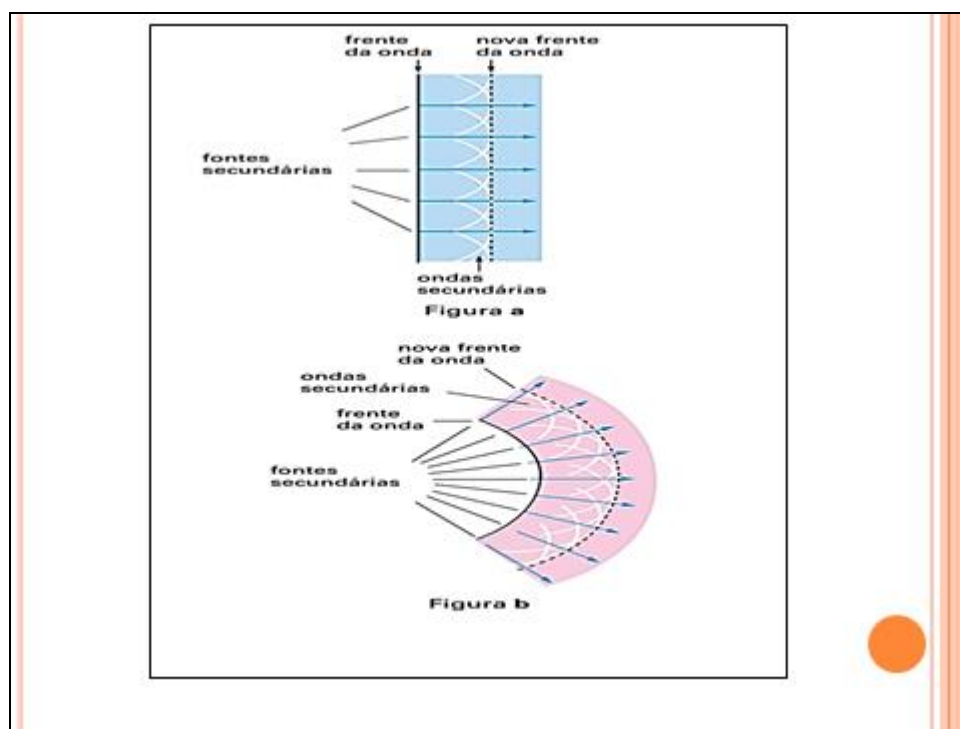
Esse princípio pode ser enunciado da seguinte forma:

Cada ponto de uma frente de onda pode ser considerado uma nova fonte de ondas secundárias que se propagam em todas as direções. Em cada instante, a curva ou superfície que envolve a fronteira dessas ondas secundárias é a nova frente de onda.

As figuras a seguir mostram duas aplicações desse princípio. Em (a), frentes de ondas planas AB dão origem a novas frentes de ondas planas. Em (b), frentes de ondas circulares dão origem a novas frentes de ondas circulares

Fonte: autor

Figura 50 – Demonstração do princípio de Huygens



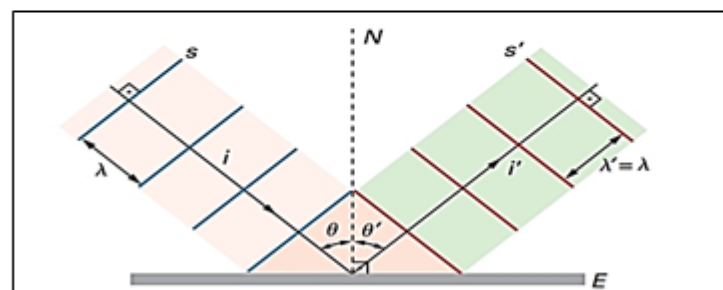
Fonte: autor

Figura 51 – Reflexão (Ondas bidimensionais)

REFLEXÃO

- As ondas bidimensionais, assim como as ondas unidimensionais em cordas, se refletem ao atingir qualquer obstáculo, ou se refletem e refratam quando mudam de meio de propagação.

Observe a imagem:



Fonte : autor

Figura 52 – Lei da reflexão

- As frentes de ondas planas, representadas por s , estão separadas pelo comprimento de onda λ ; ao atingirem um anteparo plano E , se refletem e dão origem a novas frentes de ondas, representadas por s' , separadas pelo mesmo comprimento de onda λ .
- O raio incidente i é perpendicular às frentes de ondas incidentes e o raio refletido i' é perpendicular às frentes de ondas refletidas. O ângulo formado entre o raio incidente i e a normal N ao anteparo E é o ângulo de incidência θ .
- Entre a normal N e o raio refletido i' , forma-se o ângulo de reflexão θ' .
- De acordo com a lei da reflexão, o ângulo de incidência θ é igual ao ângulo de reflexão θ .

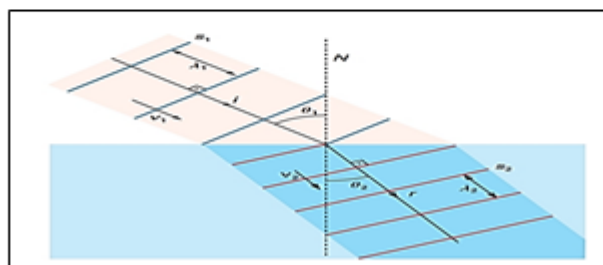
$$\theta = \theta'$$

Fone: autor

Figura 53 – Refração (Ondas bidimensionais)

REFRAÇÃO

- A refração ocorre sempre que a onda atravessa a superfície de separação de meios em que a velocidade de propagação da onda é diferente (nesse caso a reflexão também acontece, embora seja pouco perceptível; não a representamos para não sobrecarregar a figura).



Fonte : autor

Figura 54 – Expressão matemática do desvio

- O desvio pode ser determinado matematicamente pela lei da refração. Ela relaciona o seno do ângulo de incidência (θ_1) e a velocidade de propagação da onda incidente (v_1) no meio 1 com o seno do ângulo de refração (θ_2) e a velocidade de propagação (v_2) no meio 2. A expressão matemática da lei da refração é:

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Ou substituindo $v = \lambda f$, para λ_1 e λ_2 temos:

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

Fonte: autor

Figura 55 – Referência

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

ALGUSTO H. Interferência construtiva e destrutivas <www.youtube.com.br> acessado em 30/04/2018

GASPAR, A. Física volume único, p.214-247, 2009.

InforEscola.Ondas estacionária <www.inforescola.com.br> acessado em 30/04/2018>

Fonte: autor

Exercício

- 1) A Figura 56 representa uma configuração de ondas estacionárias em uma corda, vibrando com frequência de 600 Hz. A distância entre as extremidades é de 0,60 m.

Figura 56 – Configuração de ondas estacionárias



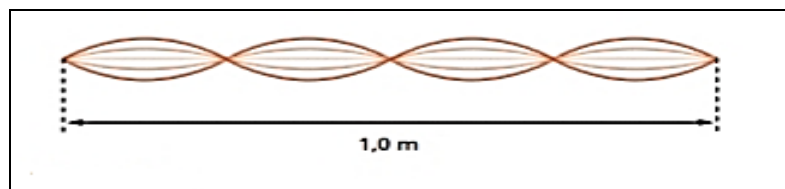
Fonte: Alberto Gaspar

Determine:

- a) o comprimento de onda das ondas componentes dessa configuração;
- b) a velocidade de propagação na corda das ondas componentes dessa configuração.

- 2) A Figura 57 representa uma configuração de ondas estacionárias numa corda de densidade linear 0,015 kg/m, sob tração de módulo igual a 1,5 N. A distância entre as extremidades é de 1,0 m.

Figura 57 - Configuração de ondas estacionárias



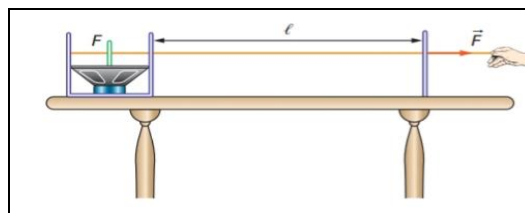
Fonte: Alberto Gaspar

Determine:

- a) o comprimento de onda das ondas que formam essa configuração de ondas estacionárias;
- b) a frequência dessas ondas componentes;
- c) a velocidade de propagação na corda das ondas componentes dessa configuração.

- 3) No sistema representado na figura 58, o fio pode vibrar entre duas extremidades separadas pela distância $l = 0,50 \text{ m}$. Sabe-se que um rolo de comprimento $\Delta l = 10 \text{ m}$ desse fio tem massa $\Delta m = 120 \text{ g}$.

Figura 58 – Fio vibrante

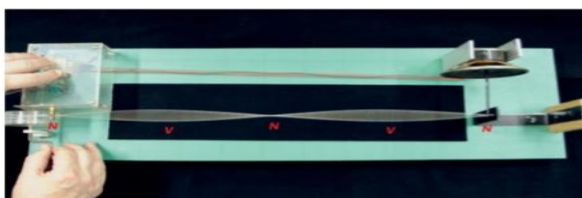


Fonte: Alberto Gaspar

Determine:

- a densidade linear desse fio em kg/m;
 - as frequências naturais de oscilação dessa corda quando submetida a uma tração de módulo 30 N;
 - a tração na corda para que se produza uma onda estacionária de três ventres, sabendo que a frequência de oscilação do alto-falante é $f_0 = 60 \text{ Hz}$.
- 4) No dispositivo da Figura 59 a fonte excitadora é um alto falante que vibra com frequência de 60 Hz. Sabe-se que um rolo de comprimento $\Delta l = 100 \text{ m}$ do fio utilizado tem massa $\Delta m = 400 \text{ g}$ e que a distância entre as extremidades A e B é $l = 0,60 \text{ m}$.

Figura 59 – Dispositivo



Fonte: Alberto Gaspar

Determine:

- a densidade linear do fio;

b) a tração no fio nessa configuração;
c) a tração no fio para que nele apareça uma configuração de quatro ventres.

4) Diz-se que a onda transporta energia sem transportar matéria, mas os surfistas navegam nas ondas do mar. Como você explica esse movimento?

5) Qual a grandeza ondulatória que permanece constante na refração? Por quê?

Plano de aula 5

Professor: Ranylson Leocádio

Disciplina: Física

Serie: 2

Título da aula: Som

Objetivo geral: Entender o conceito de som

Objetivos específicos:

- Compreender como se classifica o som;
- Entender as propriedades do som;
- Compreender os fenômenos relacionados ao som.

Conteúdo programático:

Princípio da superposição: interferência, onda.

Metodologia:

A aula será ministrada de forma dialógica e contextualizada, auxiliada por texto com roteiro didático (livro), pincel e quadro branco.

No primeiro momento apresentaremos o conteúdo com auxílio de pincel e quadro branco subsidiado no livro de Gaspar.

No segundo apresentaremos uma lista de exercício para verificar se o conteúdo foi assimilado.

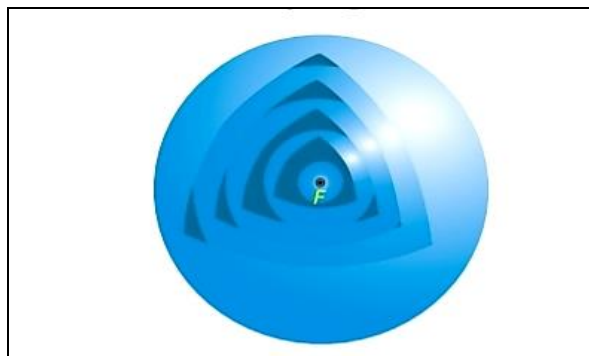
Conteúdo

Som: ondas mecânicas tridimensionais e longitudinais

Suponha que um ponto material F oscile imerso em um meio elástico e homogêneo; o ar ou a água, por exemplo. Essas oscilações dão origem a ondas mecânicas tridimensionais longitudinais que tendem a se propagar

uniformemente em todas as direções por meio de frentes de ondas esféricas. O exemplo típico são as ondas sonoras. Veja a Figura 60.

Figura 60 – Aspecto visual do som

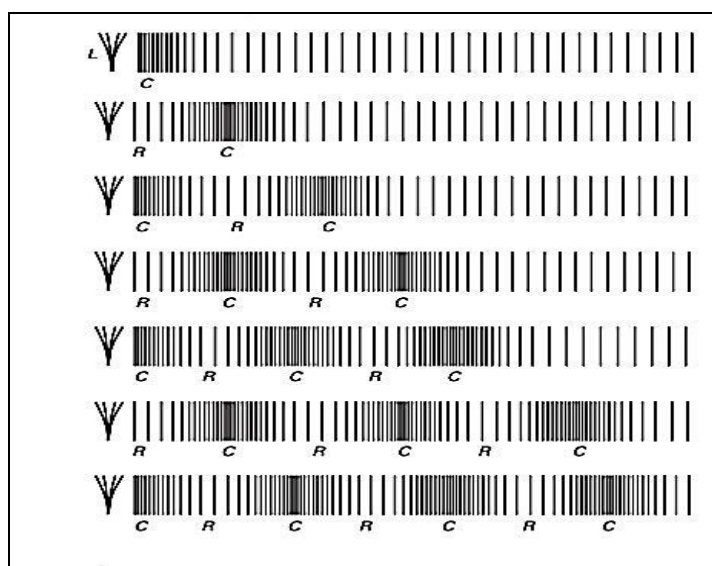


Fonte: Alberto Gaspar

A fonte pontual F gera ondas sonoras que se propagam através do ar em frentes de ondas esféricas, centradas no ponto onde está a fonte (elas estão representadas com uma abertura para facilitar a visualização). As partículas que compõem o ar, ou que nele estão presentes, oscilam longitudinalmente, na mesma direção em que as ondas sonoras se propagam.

Para entender melhor a natureza longitudinal das ondas sonoras, veja a Figura 61.

Figura 61- Propagação do som



Fonte; Alberto Gaspar

A lâmina L, posta a vibrar, “empurra” e “puxa” o ar sucessivamente. Dessa forma, criam-se regiões de compressão (C), quando a lâmina avança ou “empurra” o ar, e de rarefação (R), quando “puxa” o ar. Nas regiões de compressão, as moléculas dos gases que compõem o ar oscilam com pequena amplitude; nas regiões de rarefação oscilam com grande amplitude, mas sempre na direção de propagação da onda. Essas regiões se alternam e se propagam longitudinalmente como ondas numa mola. Quando atingem nosso sistema auditivo, essas vibrações são detectadas e traduzidas em impulsos nervosos, elétricos, que o cérebro decodifica como som.

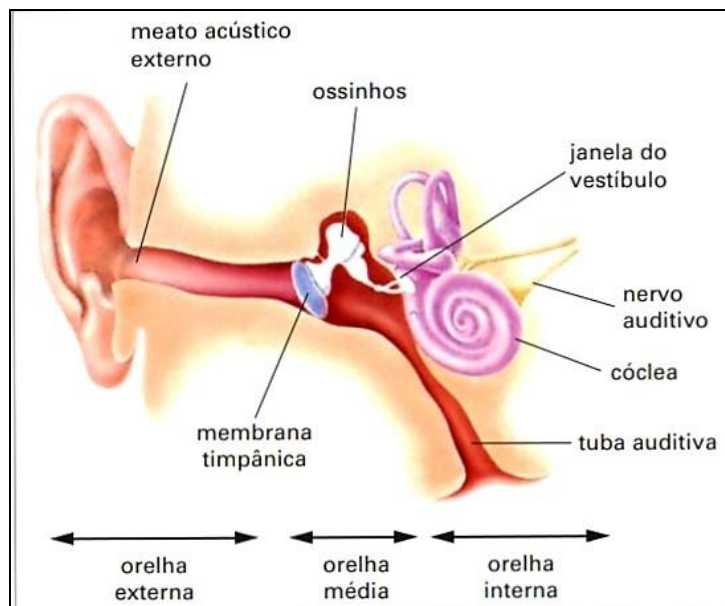
Conexões: biologia

A orelha é composta de três compartimentos distintos: a orelha externa, a orelha média e a orelha interna.

Quando um som de determinada frequência atinge a orelha, suas vibrações, captadas na orelha externa, são transmitidas à orelha média pela membrana timpânica (ou tímpano), passando pelos três ossinhos, que as comunicam à orelha interna. Esta contém uma estrutura semelhante à concha de um caracol, denominada caracol ou cóclea, onde se localiza o labirinto ósseo, que é revestido internamente pelo labirinto membranoso, semelhante a uma escova com cerca de 30 mil terminações nervosas (dendrites). O labirinto membranoso está cheio de um líquido que recebe as vibrações transmitidas pelos ossinhos.

Então as vibrações são amplificadas pela janela do vestíbulo, que produz vibrações no líquido contido no labirinto membranoso. A região do labirinto membranoso de mesma frequência de vibração entra em ressonância — as dendrites dessa região são excitadas e enviam o sinal correspondente ao cérebro, que decodifica o sinal e nos faz ouvir o som emitido, veja o sistema auditivo na Figura 62.

Figura 62 – Sistema auditivo



Fonte: Alberto Gaspar

Propriedades da propagação do som

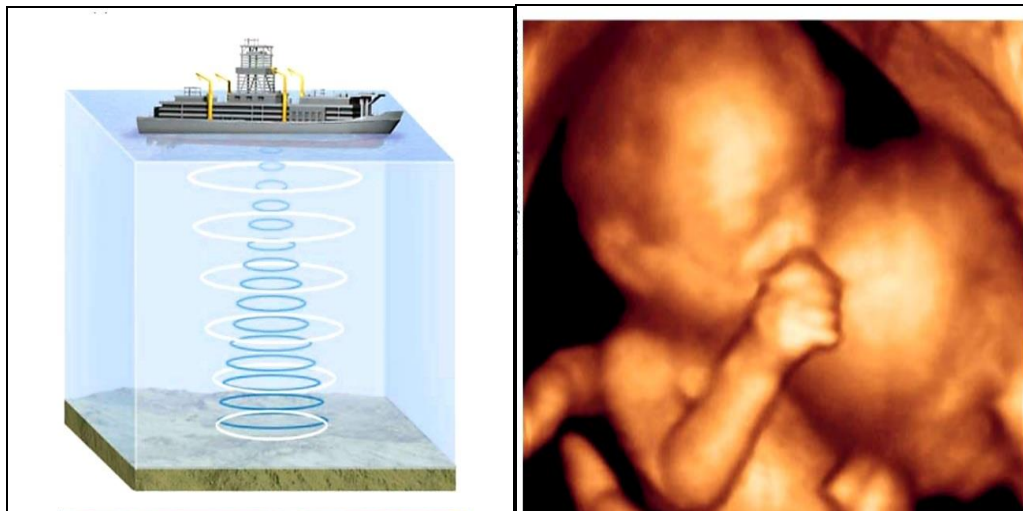
O som é uma propagação ondulatória tridimensional e longitudinal; como tal, tem todas as propriedades que caracterizam esse tipo de propagação — reflexão, refração, difração e interferência.

Reflexão

A **reflexão** é certamente a propriedade mais conhecida por causa do eco, mas a sua maior importância decorre de suas aplicações tecnológicas. Veja a Figura 63.

]

Figura 63 – Exemplos da aplicação da reflexão



A Figura 63 (lado esquerdo) representa o sonar: a reflexão de uma onda sonora enviada do navio traz informações sobre o fundo do mar. A segunda (lado direito) a figura 63 mostra uma ultrassonografia de um feto: ondas sonoras de alta frequência refletidas no útero materno são captadas por dispositivos eletrônicos que as decodificam e constroem a imagem correspondente visualizada por meio de um computador.

O **eco** caracteriza-se pela percepção distinta do mesmo som emitido e refletido. Como a orelha humana só consegue distinguir dois sons quando o intervalo entre eles for de no mínimo 0,1 s, o eco também só é percebido dentro dessa condição.

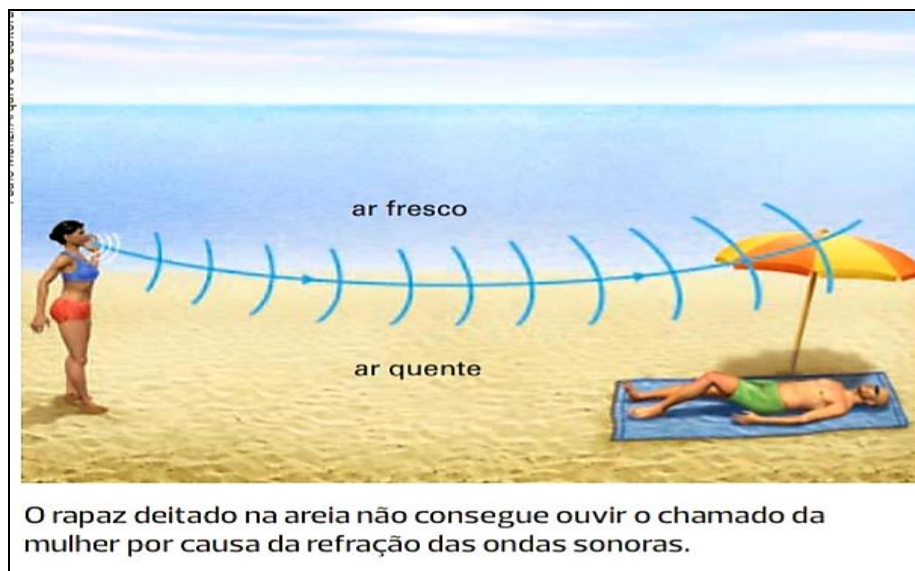
Para que se perceba o eco, a distância entre o ponto em que o som é emitido (e recebido) e o obstáculo em que ele se reflete depende da velocidade do som no local.

Refração

A refração do som é um fenômeno difícil de ser notado, embora ocorra como em qualquer propagação ondulatória. Ela pode ser percebida em dias quentes, na praia, por exemplo. Veja a Figura 64. As linhas circulares representam esquematicamente o trajeto das frentes de onda do som emitido

pela mulher. O rapaz está numa região onde há uma espécie de sombra sonora.

Figura 64 – Refração



Fonte: Alberto Gaspar

Com o sol, a areia da praia se aquece, o ar próximo a ela se expande e sua densidade diminui. Então a velocidade do som aumenta, ocasionando a refração. Como vimos na aula 2 e 4, se a velocidade aumenta, o ângulo de refração torna-se maior do que o ângulo de incidência, o que pode provocar a sua reflexão total. É um fenômeno semelhante ao da miragem, que vamos abordar no estudo de Óptica. Na verdade, não há uma sombra sonora muito nítida nem absoluta, mas, como a mulher na ilustração pode comprovar, qualquer pessoa deitada na areia da praia num dia quente tem a sensação de desfrutar de um estranho silêncio entrecortado.

Difração e interferência

A **difração** sonora é facilmente comprovada. Basta deixar a porta de um quarto entreaberta: tudo o que se diz lá dentro passa a ser ouvido fora, porque o som se propaga por difração.

É verdade que, mesmo com a porta fechada, é possível ouvir o som produzido dentro do quarto, sobretudo se ele for gerado por uma banda de rock.

Mas, nesse caso, o som se transmite através da porta e das paredes. Isso ocorre porque as vibrações sonoras do ar fazem vibrar também a porta e as paredes, que reemitem o som para fora do quarto.

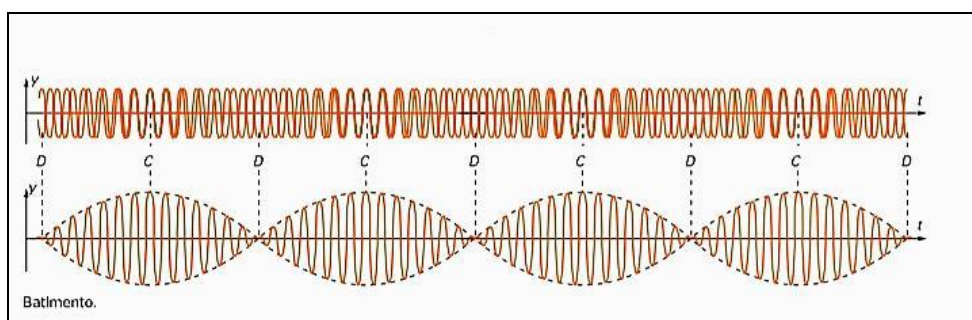
É um fenômeno semelhante à transparência de alguns materiais às ondas luminosas.

A interferência sonora é, também, um fenômeno familiar. Em shows ao ar livre, ou em ambientes inadequados, é muito comum existirem regiões onde há interferência destrutiva e nada se ouve, ou se ouve muito mal, e regiões onde há interferência construtiva e o som é muito intenso e, às vezes, distorcido.

Inconvenientes como esses são evitados em ambientes adequadamente projetados e construídos. A tecnologia da edificação de ambientes desse tipo faz parte da **Acústica**.

A interferência de ondas sonoras de frequências muito próximas produz ainda um efeito particularmente interessante. Veja a Figura 65.

Figura 65 – Ondas superpostas



Fonte: Alberto Gaspar

Na Figura 65 a interferência entre duas ondas sonoras (representadas esquematicamente como ondas transversais) de frequências próximas dá origem a regiões de interferência construtiva (C), que reforçam o som resultante, e de interferência destrutiva (D), que tendem a anular o som resultante.

A sucessão de interferências construtivas e destrutivas entre essas ondas resulta em um som de intensidade oscilante — a esse fenômeno dá-se o nome de **batimento**.

Essa oscilação de intensidade sonora tem uma frequência bem definida, chamada **frequência de batimento**, f_B .

Pode-se demonstrar que, sendo f_1 e f_2 as frequências das ondas sonoras que interferem entre si, em que $f_1 > f_2$, a frequência de batimento é dada por:

$$f_B = f_1 - f_2$$

Empiricamente admite-se que a frequência $f_B = 25$ Hz é o limite para a percepção humana do batimento; acima desse valor essas oscilações de intensidade se tornam muito próximas entre si e deixam de ser perceptíveis ao nosso sistema auditivo.

Propriedades físicas da propagação ondulatória

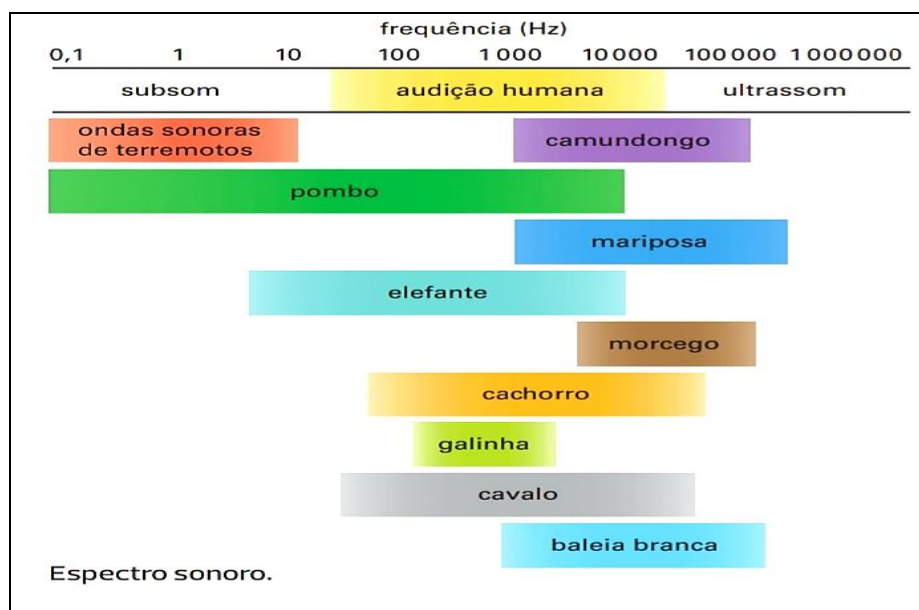
As ondas sonoras têm propriedades ondulatórias que dependem exclusivamente de suas características físicas — velocidade, frequência e comprimento de onda. Mas têm também propriedades relacionadas à capacidade do nosso sistema auditivo de detectá-las, que costumam ser denominadas **propriedades fisiológicas**.

Frequência, altura e espectro sonoro

A frequência da onda sonora, como de qualquer movimento ondulatório, é determinada pela frequência da fonte geradora. A faixa de frequências em que existem ondas sonoras — audíveis, ou não, pelo ser humano — é chamada de **espectro sonoro**.

A figura 66 representa o espectro sonoro. As faixas coloridas mostram o espectro audível médio do ser humano e de alguns animais. A escala de frequências está expressa em potências sucessivas de 10. A razão dessa escolha é discutida logo adiante, no tópico “Intensidade e nível de intensidade”.

Figura 66 – Espectro sonoro



Fonte: Alberto Gaspar

A menor frequência de uma onda sonora não está bem definida, mas admite-se que tremores de terra gerem vibrações de até 1 ciclo por minuto, cerca de $2 \cdot 10^{-2}$ Hz. À temperatura ambiente, as frequências mais altas chegam a ultrapassar 109 Hz.

Sabe-se que a orelha humana só é capaz de detectar, em média, a estreita faixa de frequências compreendida entre 20 Hz e 20.000 Hz. Sons acima de 20.000 Hz são conhecidos como ultrassons, por não serem detectados pela orelha humana.

Para a fisiologia humana, a frequência sonora é identificada com a altura do som: quanto maior a frequência, maior a altura e mais agudo é o som. Quanto menor a frequência, menor a altura e mais grave é o som.

Velocidade de propagação

A velocidade de propagação do som tem as mesmas características da velocidade de qualquer propagação ondulatória; ela depende das propriedades do meio em que o som se propaga.

A expressão matemática da velocidade de propagação do som, em determinado meio, é obtida a partir da generalização da expressão da velocidade de propagação de ondas em cordas:

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

Para o ar e os gases em geral, essa expressão assume a forma:

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

Em que ρ é a densidade do ar e B é o valor de uma grandeza conhecida como módulo de elasticidade volumar do meio.

Essas grandezas dependem das condições de temperatura e da pressão em que o meio se encontra condições que determinam, portanto, a velocidade do som. Veja na Figura 67 a velocidade do som em diferentes meios

Figura 67 – velocidade do som em diferentes meios

Velocidade de propagação do som em diferentes meios à pressão $1,0 \cdot 10^5$ Pa			
Meio	Velocidade (m/s)	Meio	Velocidade (m/s)
Gases		Sólidos	
Ar	331	Borracha	54
Ar (20 °C)	343	Polietileno	920
Hélio	972	Chumbo	1300
Hidrogênio	1280	Prata	2700
Líquidos		Ouro	3240
Alcool metílico (25 °C)	1140	Cobre	3560
Água	1400	Alumínio	5000
Água (20 °C)	1480	Aço	5940
Água do mar (3,5% de salinidade)	1520	Granito	6000
Mercúrio (20 °C)	1450	Diamante	12000

Onde não há indicação, a temperatura é 0 °C; todos os valores estão expressos com três algarismos significativos.

Fonte: Alberto Gaspar

Intensidade e nível de intensidade

Observe a Figura 68.

Figura 68 – Ondas sonoras

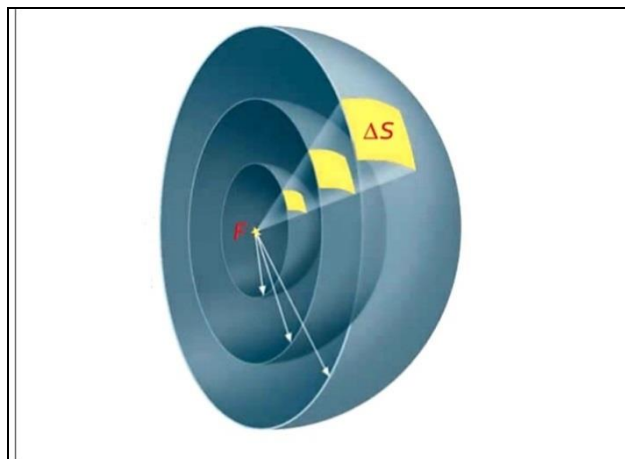


Figura: Alberto Gaspar

As ondas sonoras originárias da fonte F se propagam em frentes de ondas esféricas. Em consequência, a energia que essas ondas transportam, originárias dessa fonte, também se propaga e se distribui por meio dessas frentes de onda. Assim, uma região de área ΔS , localizada em uma frente de onda sonora, é atravessada por uma parcela ΔE dessa energia em um intervalo de tempo Δt . A razão entre essa parcela de energia e a área que ela atravessa nesse intervalo de tempo é definida como a intensidade sonora média (I_m) dessa onda sonora nessa região. Matematicamente, temos:

$$I_m = \frac{\Delta E}{\Delta t \cdot \Delta S}$$

Da definição de potência e da relação entre potência e energia, podemos concluir que a razão $\frac{\Delta E}{\Delta t}$ corresponde à parcela ΔP_m da potência média que atravessa essa região. Então, temos:

$$I_m = \frac{\Delta P_m}{\Delta S}$$

Quando a razão $\frac{\Delta E}{\Delta t}$ for constante, a potência também será constante, representada apenas por P. Nessas condições, podemos nos referir apenas à intensidade sonora I, definida pela expressão:

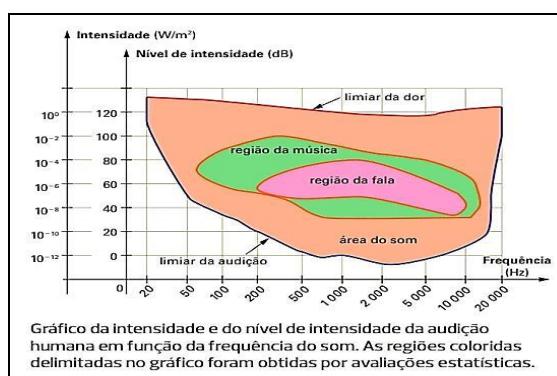
$$I = \frac{P}{\Delta s}$$

A unidade da intensidade, no SI, é watt por metro quadrado (W/m^2).

A intensidade sonora é definida a partir de grandezas físicas e se relaciona à emissão e distribuição de energia da fonte, mas não é adequada para definir a intensidade sonora que nossas orelhas percebem. Nosso sistema auditivo reduz drasticamente a intensidade sonora que detecta. Exemplificando: para determinada frequência, se a intensidade do som ouvido torna-se dez vezes maior, a nossa sensação auditiva é, em média, apenas duas vezes maior. Essa redução, que caracteriza a nossa “sensação auditiva”, só pode ser medida por meios indiretos, estatísticos, mais relacionados à Biofísica do que à Física.

Por essa razão define-se uma medida relacionada à intensidade sonora, mas voltada ao ser humano — o nível de intensidade β . Chama-se nível de intensidade à intensidade sonora média percebida ou detectada pelo sistema auditivo humano. Observe na Figura 69 os níveis de intensidade.

Figura 69 – Intensidade de audição



Fonte: Alberto Gaspar

A definição matemática dessa medida e da unidade correspondente, ao contrário da maioria das grandezas físicas, é baseada em padrões fisiológicos médios. Para tanto, admite-se que:

- a intensidade sonora mínima percebida pelo ser humano seja, em média, $I_0 = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ W/m}^2$ para a frequência de 1000 Hz;
- o nível de intensidade β varie em escala logarítmica de base 10. Isso significa que sons de intensidade 10n vezes maior que a intensidade mínima (I_0) sejam percebidos com nível de intensidade n vezes maior; por exemplo, um som de intensidade mil (103) vezes maior que I_0 é percebido, em média, como se tivesse intensidade três vezes maior.

Traduzindo matematicamente essas condições, obtemos a definição nível de intensidade sonora β :

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

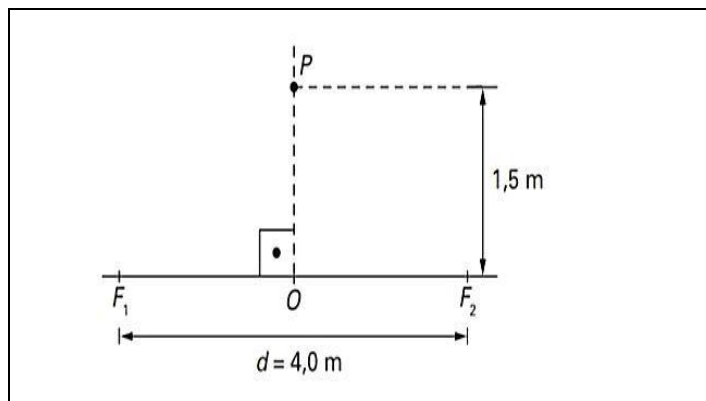
A unidade de nível de intensidade é o **decibel (dB)**, em homenagem a Alexander Graham Bell.

Exercício

- 1) Defina o que é som?
- 2) Suponha que a velocidade do som no ar numa determinada região seja 340 m/s. Qual a menor distância entre uma pessoa e um obstáculo em que o som se reflete para que ela ouça o eco de sua própria voz?
- 3) O sonar de um navio detectou um objeto no fundo do mar a 175 m de profundidade. Sabendo-se que o tempo entre o sinal emitido e o eco desse sinal captado pelo sonar é de 0,250 s, qual a velocidade do som na água?
- 4) Alguém está deitado na areia quente de uma praia e grita. Ele é ouvido? Explique.

- 5) Duas fontes F_1 e F_2 , separadas pela distância $D = 0,40 \text{ m}$, emitem, em fase, ondas sonoras de mesmo comprimento de onda, λ . Um ouvinte, ao se colocar no ponto médio de O do segmento F_1F_2 , percebe que está em um máximo de interferência. Ao se afastar de O, na direção perpendicular ao segmento F_1F_2 , ele percebe o máximo de interferência seguinte no ponto P, a 1,5 m de O, conforme mostra a Figura 70.

Figura 70 – Duas fontes de onda

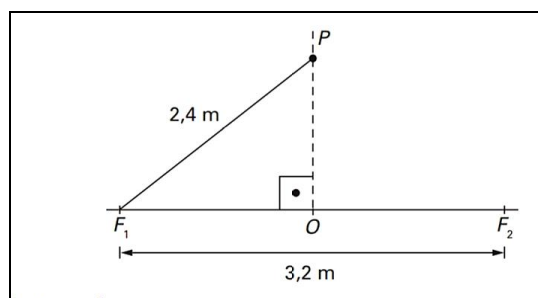


Fonte: Alberto Gaspar

Com base nas informações dadas, responda:

- Qual o comprimento de onda dessas ondas?
 - Se o ouvinte continuar se afastando na mesma direção, a que distância de O estará o ponto P' em que ele perceberá o próximo máximo de interferência?
- 6) Duas fontes F_1 e F_2 , alinhadas e separadas pela distância $d = 3,2 \text{ m}$, emitem, em fase, ondas sonoras de mesmo comprimento de onda. Suponha que um ouvinte se afaste delas a partir do ponto médio O do segmento F_1F_2 , onde percebe um máximo de interferência, perpendicularmente a esse segmento, e encontre o máximo seguinte no ponto P a 2,4 m de F_1 . Veja a Figura 71.

Figura 71 – Duas fontes



Fonte: Alberto Gaspar

- 7) Sabe-se que, à temperatura de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e à pressão normal $p_0 = 1,0 \cdot 10^5$ Pa, o ar tem densidade $\rho = 1,3 \text{ kg/m}^3$ e módulo de elasticidade volumar $B = 1,4 \cdot 10^5$ Pa. Determine a velocidade do som no ar, nessas condições.
- 8) Uma fonte sonora pontual emite um som com potência constante $P = 10\text{ W}$. Suponha que o som se propague uniformemente em todas as direções. Determine a intensidade desse som a:
- a) 2,0 m da fonte; b) 20 m da fonte.
- 9) Um técnico mede a intensidade do som gerado por uma fonte sonora pontual a 6,0 m de distância dela. Obtém $I = 0,40 \text{ W/m}^2$. Qual a potência da fonte, admitindo-se que ela seja constante e que o som se propague uniformemente em todas as direções?
- 10) A potência constante de uma fonte sonora pontual é de 12 W. Suponha que o som se propague uniformemente em todas as direções. Determine a intensidade desse som a:
- a) 0,50 m da fonte; b) 100 m da fonte.
- 11) O nível de intensidade de uma fonte pontual que propaga o som em todas as direções, a 30 m de distância, é 60 dB.
- a) Qual a potência dessa fonte?
- b) A que distância da fonte a intensidade será de 30 dB

Plano de aula 6

Professor: Ranylson Leocádio

Disciplina: Física

Serie: 2

Titulo da aula: Ressonância mecânica

Objetivo geral: Entender o conceito de ressonância sonora: produção de harmônicos (ondas estacionárias) pela intervenção do dispositivo.

Objetivos específicos:

- Compreender o tipo de ressonâncias no tubo;
- Entender os conceitos relacionados a produção dos harmônicos no tubo de ressonância de baixo custo;
- Calcular a velocidade do som.

Conteúdo programático:

- Modos normais em uma corda:
- Modos de vibração na corda e nos tubos aberto e fechado.

.

Metodologia:

A aula será ministrada de forma dialógica e contextualizada, auxiliada por texto com roteiro didático (livro), vídeos sobre o assunto, pincel, quadro branco e experimento.

No primeiro momento apresentaremos o conteúdo com auxílio de livros de pincel e quadro branco.

No segundo momento será proposto um experimento (tubo de ressonância de baixo custo) com objetivo de calcular a velocidade do som, assim como aborda na prática os conceitos dos tubos sonoros, explorando a riqueza visual e fisiológica.

No terceiro apresentaremos uma lista de exercício explorando os principais conceitos.

Conteúdo

Modos normais de uma corda

Segundo Sears, Zemansky, Young e Freedman, (2008), Quando descrevemos ondas estacionárias em uma corda com uma das extremidades mantidas fixas em certas extremidades rígidas, não fizemos nenhuma hipótese sobre o comprimento da corda ou sobre a extremidade que não estar fixa. Vamos agora considerar uma corda comprimento fixo L , preso rigidamente a ambas as extremidades. Esse tipo de corda é encontrado em muitos instrumentos musicais, inclusive em violino, piano e guitarra. Quando você puxa a corda de uma guitarra, uma onda se propaga na corda; essa onda se reflete sucessivamente nas duas extremidades, produzindo-se uma onda estacionária. Essa onda estacionária dá origem à onda sonora que se propaga no ar, com a frequência determinada com as propriedades das cordas.

As ondas estacionárias resultante deve possuir nós em ambas extremidades da corda. Vimos na seção precedente que a distância entre dois nós adjacente é igual a meio comprimento de onda ($\lambda/2$), de modo que o comprimento da corda deve ser igual a $\lambda/2$, ou $2(\lambda/2)$, ou $3(\lambda/2)$, ou de um modo geral igual a um número inteiro múltiplo de meio comprimento de onda:

$$L = n \frac{\lambda}{2} \quad (n= 1,2,3...)$$

(corda fixa nas duas extremidades)

Ou seja, se uma corda de comprimento L possui as duas extremidades fixas, uma onda estacionária só pode existir quando seu comprimento de onda satisfizer à equação a cima.

Exemplificando λ nessa equação e identificando os valores possível de λ com o símbolo λ_n encontramos

$$\lambda_n = \frac{2l}{n} \quad (n= 1,2,3...)$$

(corda fixa nas duas extremidades)

É possível a existência de onda na corda que não possuem esses comprimentos de onda, porém tais ondas não podem formar ondas estacionárias com nós e ventre, e a onda resultante não pode ser estacionária.

Correspondendo a uma série de valores possível de λ_n há uma série de frequência f_n , cada uma delas relacionadas aos respectivos comprimentos de onda por meio da relação $f_n = v/\lambda_n$. A menor frequência f_1 corresponde ao maior comprimento de onda (o caso $n=1$), $\lambda_1 = 2l$;

$$f_1 = \frac{v}{2l}$$

(cordas fixas nas duas extremidades)

É esse valor e chamado de **frequência fundamental**. As outras frequências das ondas estacionárias são $f_2 = 2v/2l$, $f_3 = 3v/2l$, e assim por diante. Esses valores múltiplos inteiro da frequência fundamental f_1 , tais com $2f_1$, $3f_1$, $4f_1$ e assim por diante, generalizando:

$$f_n = n \frac{v}{2l}$$

(cordas fixas nas duas extremidades)

Essas frequências são chamadas de **harmônico**, a série desses valores denomina-se **série harmônica**.

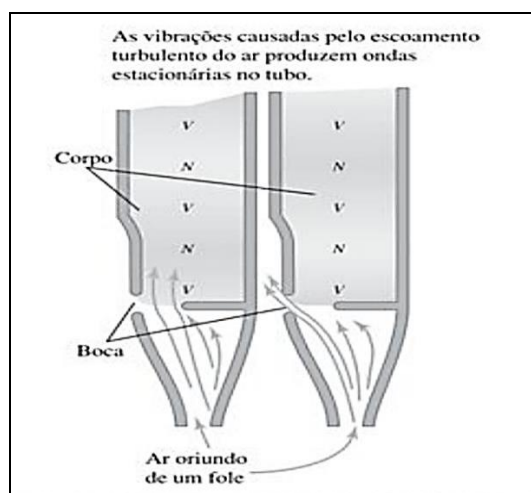
Um **modo normal** de um sistema oscilante é um movimento no qual todas as partículas do sistema se movem senoidal com a mesma frequência. Para um sistema constituído por uma corda de comprimento L que possui duas extremidades fixas, cada um dos comprimentos de onda é fornecido pela equação $\lambda_n = \frac{2L}{n}$ corresponde a uma configuração com modo normal possível e uma dada frequência. Cada modo com sua configuração de vibração e suas frequências características.

Na seção seguinte continuaremos nosso estudo sobre os modos, porem veremos essa aplicação em tubos específicos com condições específicas (tubos aberto e tubo fechado), o fenômeno no tubo de ressonância de baixo custo.

Modos normais em tubos

Segundo Sears, Zemansky, Young e Freedman, (2008), Considere o tubo da Figura 72, O ar é fornecido por foles e ventoinhas, com uma pressão manométrica de ordem de 10^3 Pa ($10^{-2} atm$) na extremidade inferior do tubo da. Uma corrente de ar emerge da abertura estreita da superfície e a seguir é direcionada para a parte superior da abertura chamada boca do tubo.

Figura 72- Condições do tubo

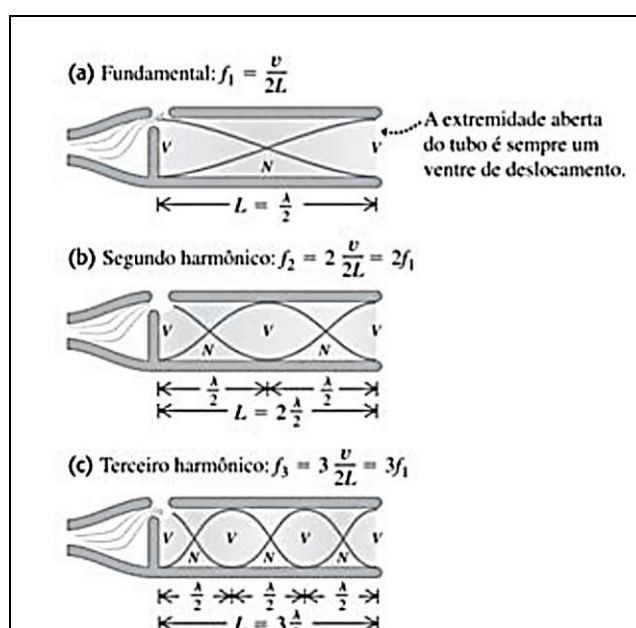


Fonte: Yong e Freedman

A coluna de ar no tubo começa a vibrar e ocorrem diversos modos normais possíveis, tal como de uma corda esticada. A boca sempre funciona como uma extremidade aberta; logo, ela é um nó de pressão e ventre de deslocamento. A outra extremidade do tubo pode estar fechada ou aberta.

Observe que na Figura 73 as duas extremidades do tubo estão abertas, de modos que elas são nó de pressão e ventre de deslocamento.

Figura 73 – Tubo aberto



Fonte: Yong e Freedman

Um tubo de órgão que possui as duas extremidades abertas é chamado de tubo aberto. A frequência fundamental f_1 corresponde a uma configuração de ondas estacionárias com um ventre em cada extremidade e um nó de deslocamento no meio do tubo. Na (Figura 73 - a) mostrar que a distância entre dois ventres adjacentes é sempre igual a meio comprimento de onda e, neste caso, ele é igual o comprimento L do tubo $L = \lambda/2$. A frequência fundamental correspondente, obtida da relação $v = \lambda f$ é dada por;

$$f_1 = \frac{v}{2l} \text{ (tubo aberto)}$$

As (Figura 73 – b, c) mostra o segundo e o terceiro harmônico respectivamente seus padrões de vibração apresenta dois e três nós de deslocamento, respectivamente. Para estes, meio comprimento de onda é igual a $L/2$ e $L/3$, respectivamente, e as frequências são o dobro e o triplo da fundamental respectivamente. Ou seja $f_2 = 2f_1$ e $f_3 = 3f_1$. Para qualquer modo normal de um tubo de comprimento L deve existir um múltiplo inteiro de meio comprimento de onda, e os comprimentos de ondas λ_n possíveis e dado por

$$L = n \frac{\lambda_n}{2} \text{ ou } \lambda_n = \frac{2L}{n} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

(tubo aberto)

As frequências correspondentes f_n são obtidas $f_n = v/\lambda_n$, de modo que todas as frequências dos modos normais para um tubo aberto nas duas extremidades são dadas por

$$f_n = \frac{nv}{2L} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \text{ (tubo aberto)}$$

O valor $n = 1$ fornece a frequência fundamental, $n = 2$ fornece o segundo harmônico, e assim por diante. Alternativamente podemos escrever

$$f_n = nf_1 \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \text{ (tubo aberto)}$$

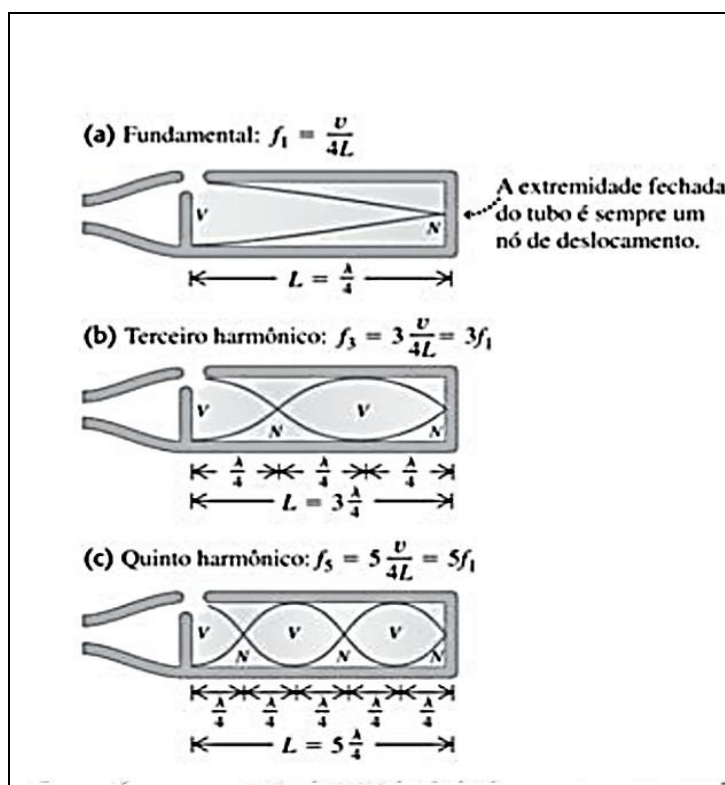
Onde f_1 é dada pela equação da frequência fundamental $f_1 = \frac{v}{2l}$.

A Figura 74 mostra um tubo aberto na extremidade esquerda, mais fechada na extremidade da direita. Este tubo é chamado de tubo fechado em

uma extremidade, ou simplesmente tubo fechado. A extremidade esquerda (aberta) é um ventre de deslocamento (nó de pressão), porém a extremidade da direita (fechada) corresponde a um nó de deslocamento (ventre de pressão).

A distancia entre um nó e um ventre adjacentes é sempre igual a um quarto do comprimento de onda. A (Figura 74 - a) mostra o modo com a frequência mais baixa.

Figura 74 – Tubo fechado



Fonte: Yong e Freedman

Antes de prosseguir observa-se que o comprimento do tubo é igual a um quarto do comprimento de onda ($\lambda/4$). A frequência fundamental é $f_1 = v/\lambda_1$ ou

$$\boxed{f_1 = \frac{v}{4L}} \quad (\text{tubo fechado})$$

Este valor é a metade da frequência fundamental de um tubo aberto de mesmo comprimento. A (Figura 74- b) mostra o modo seguinte, em que o comprimento de onda do tubo é três quartos do comprimento de onda, correspondendo a uma frequência $3f_1$. Na (Figura 74 - c), $L = 5\lambda/4$ e a frequência é igual a $5f_1$. Os comprimentos de onda possíveis são

$$L = n \frac{\lambda_n}{4} \quad \text{ou} \quad \lambda_n = \frac{4L}{n} \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \quad (\text{tubo fechado})$$

As frequências de modos normais são dadas por $f_n = v/\lambda_n$, ou

$$f_n = \frac{nv}{4L} \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \quad (\text{tubo fechado})$$

Ou

$$f_n = nf_1 \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \quad (\text{tubo fechado})$$

Onde f_1 é dado pela equação $f_1 = \frac{v}{4L}$. Vimos que todos os harmônicos pares não estão presentes. Em um tubo fechado em uma das extremidades a frequência fundamental é $f_1 = v/4L$ e somente os harmônicos de ordem ímpar na série ($3f_1, 5f_1, \dots$) são possíveis.

Com todos os conceitos fundamentais elucidados podemos agora explicar o que é o fenômeno de ressonância na seção a seguir.

5 Ressonância nos tubos

Muitos sistemas mecânicos têm modos normais de oscilações. Como vimos esse modo incluem colunas de ar (como em um órgão de tubo) e cordas esticadas (como em guitarra). Em cada modo cada partícula do sistema descreve um MHS com a mesma frequência deste modo. Colunas de ar e

cordas esticadas possuem uma série infinita de modos normais, porem o conceito básico está intimamente relacionado com oscilador harmônico simples, que possui um único modo normal (ou seja, uma única frequência com o qual ele oscilar depois de ser perturbado).

Suponha que você aplique uma força variando periodicamente sobre um sistema que pode oscilar. O sistema então é forçado a oscilar com a mesma frequência da força aplicada (chamada de força propulsora). Este movimento denomina-se oscilação forçada de um oscilador harmônico. Em particular descrevemos o fenômeno de **ressonância mecânica**. Um exemplo simples de ressonância é quando se empurra uma criança em um balanço. O balanço é um pêndulo; ele possui apenas um modo normal cuja frequência é determinada pelo comprimento do pêndulo. Quando empurramos o pêndulo periodicamente com essa frequência, podemos fazer a amplitude do movimento aumentar. Porem quando empurramos o balanço com uma frequência diferente, este praticamente não se move.

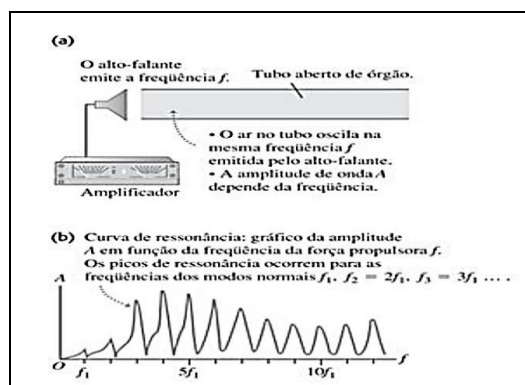
A ressonância também ocorre quando uma força periódica é aplicada a um sistema com muitos modos normais de vibração.

Um tubo aberto de um órgão é colocado nas proximidades de um alto-falante alimentado por um amplificador, emitindo ondas senoidal puras com frequência f que pode variar ajustando-se o amplificador. O ar no interior do tubo aberto é forçado a oscilar com a mesma frequência f da força propulsora produzida pelo alto-falante de acordo com a Figura 75 - a. Em geral, a amplitude desse movimento é relativamente pequena, e ao no interior no interior do tubo não se move em nenhum dos modos normais mostrados. Entretanto, quanto a frequência f da força propulsora tiver um valor próximo ao de uma frequência de modos normais, o ar no interior do tubo oscilará com a mesma frequência do modo normal, e a amplitude aumentará consideravelmente. A Figura 75 - b mostra a amplitude das oscilações no ar no tubo em função da frequência f da força propulsora, a forma desse gráfico é chamada de **curva de ressonância** do tubo; ela forma **picos** quando o valor

da frequência f é igual a uma das frequências dos modos normais do tubo.

Observe a figura 75.

Figura -75 Curvas de ressonância



Fonte: Yong e Freedman

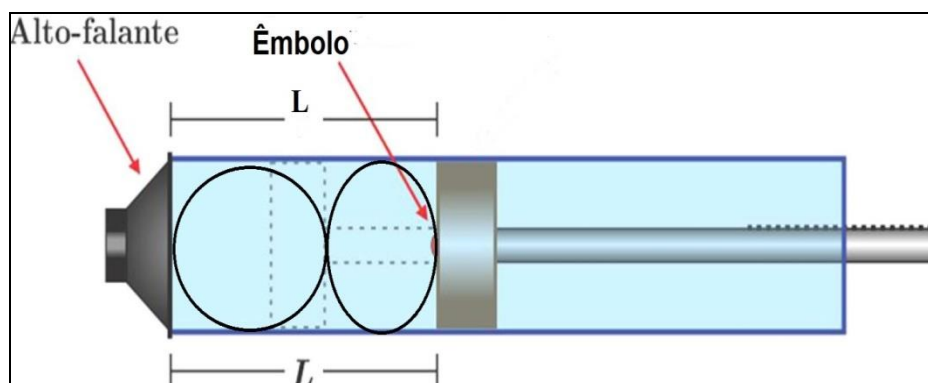
A forma detalhada da curva de ressonância depende da geometria do tubo.

Os mesmo princípio físico se aplicar ao tubo fechado a diferença é que na extremidade fechada tem um nó, porém não alteram as características do fenômeno.

Observe na Figura 76 que é inserido na extremidade de um tubo uma fonte (alto-falante) que emite ondas sonoras com frequência f , produzindo ondas incidentes e refletidas que resultam em ondas estacionárias dentro do tubo. Na outra extremidade, é inserido um êmbolo (pistão) variável, o que permite aumentar ou diminuir o comprimento l do tubo.

Com esse mecanismo podemos detectar os modos de vibrações que se formam nos múltiplos da frequência fundamental, com o movimento do êmbolo, pois na região de picos (amplitude máxima ou mínima) segundo o referencial teórico teremos uma acentuação (aumento) na intensidade das ondas sonoras, isto é, detectar os pontos de ressonância do sistema mecânico.

Figura 76 – Ressonância no tubo fechado



Fonte: www.scielo.br

.Na Figura 77 é apresentado um modelo de tubo fechado, denominado Tubo de Ressonância de Baixo Custo, desenvolvido com a finalidade de detectar os modos de vibrações e calcular a velocidade do som.

Figura 77 – Tubo de ressonância de baixo custo



Para reforça os conceitos de ondas estacionária e ressonância sugerimos o vídeo dos procedimentos de montagem e manuseio com atividade experimental desse tubo, segue o linkin <www.youtu.be/ITERTJ-KV5o>

Exercício

1 Considere a situação da tabela abaixo para frequência , comprimento do tubo, número do harmônico. Calcule a velocidade do som e o comprimento de onda.

Frequência de onda f_n (Hz)	Comprimento do tubo L (m)	Número do harmônico	Velocidade do som (m/s)	Comprimento de onda λ (m)
200	0,45	1		
300	0,86	3		
400	0,63	3		
500	0,85	5		
600	0,69	5		

- 2) Defina o que é som? De que maneira o som pode se propagar?
- 3) Classifique onda sonora em mecânica ou em eletromagnética? Justifique?
- 4) Qual é o valor da velocidade do som? Esse valor é constante? Justifique?
- 5) O que são ondas construtivas e destrutivas?
- 6) Como se origina ondas estacionárias em um tubo com uma das extremidades fechada?
- 7) De acordo com as características de ondas estacionárias explique o que é ventre no tubo com uma extremidade fechada?

- 8) De acordo com as características de ondas estacionárias explique o que é nó no tubo com uma extremidade fechada?
- 9) (UFRJ) o canal que vai do tímpano à entrada do ouvido pode ser considerado um tubo cilíndrico de 2,5 cm de comprimento, fechado em uma extremidade e aberta em outra. Considere a velocidade do som no ar igual 340 m/s. calcule a frequência fundamental de vibração da coluna de ar contida nesse canal.
- 10) Suponha que a velocidade do som em determinada região seja 336 m/s. Qual a frequência fundamental que um boiadeiro pode conseguir com um berrante de 1,2 m de comprimento nessa região? Obs: (considere o berrante como um tubo com uma das extremidades fechada)
- 11) (Ufes) em determinada flauta faça um esboço dos três primeiros modos de vibração.

ATIVIDADE EXPERIMENTAL

Utilizando o tubo de ressonância de baixo custo calcule a velocidade do som.

- 1) Calcule a velocidade do som.

Frequência de onda f_n (Hz)	Comprimento do tubo L (m)	Número do harmônico	Velocidade do som (m/s)	Comprimento de onda λ (m)

Para calcular a velocidade do som precisamos das informações acima sendo assim:

Figura 78 – Tubo de ressonância de baixo custo (com adaptador)



Fonte: autor

Figura 79 – Modelo Alternativo do tubo (sem adaptador)



Fonte: autor

O experimento é composto basicamente por três materiais:

- Um celular com aplicativo (simples gerador de tone)
- Caixa de som de preferência as da figura 78 e 79
- Um tubo de 1 m de comprimento com um pistão variável

Manuseio

- O preenchimento da coluna da frequência é determinada pelo aplicativo simples gerador de tone (ao digita-la no espaço apropriado), de preferência na faixa de 200 a 600 Hz, sempre aumentando 100 Hz até 600 Hz
- Calibre o dispositivo na primeira frequência 200 Hz, varie o comprimento do tubo ao movimentar o pistão, procure a última oscilação, isto é aumento do som (ventre), que será detectado de acordo com a teoria uma acentuação (aumento) na amplitude do som detectado pelo aparelho auditivo.

- O último ventre determinará o comprimento L do tubo, o tubo é equipado com uma fita métrica que ao variar o comprimento demonstrará o comprimento final que será preenchido na coluna do comprimento, observe que o comprimento esta em cm, será necessário transforma para m antes dos cálculos.
- No modelo com adaptador será necessário que se acrescente mais 8 cm no final de cada comprimento l , referente a distância interna dos adaptadores entre o pistão e caixa de som. No modelo alternativo o comprimento l não é necessário o acréscimo de 8 cm no comprimento final do tubo.
- Para preencher a coluna número do harmônico representado pela letra n , que significa o número de ventres ou rarefação. De acordo com os fundamentos nesse caso partícula $n = 1, 3, 5, 7, \dots$ confira a tabela: ou seja, para uma frequência determinada:

Pico de atenuação do som	(n) número de ventre
1	1
2	3
3	5

E assim sucessivamente, observando que n ocorrem somente para valores ímpares.

- Com os dados coletados usando a expressão $f_n = \frac{n \cdot v}{4L}$, e isolando v obtemos $v = \frac{f_n \cdot 4L}{n}$ onde v e a velocidade, L comprimento do tubo, f_n a frequência e n o número de ventre.
- Para calcular o comprimento de onda λ basta utilizar $v = \lambda \cdot f_n$ correspondente a cada modo de vibração.
- Após a anotação de todas as velocidades do som anotadas de cada frequência, calcule a média aritmética, e esse será o resultado final da experiência e argumente suas conclusões.

Observação: QUALQUER dúvida pertinente confira o uso desse dispositivo no <www.youtube.com/watch?v=ITERTJ-KV5o&t=58s>.

Comprovação de produção e percepção de ondas estacionárias

Com o experimento concluído o emissor de ondas sonoras (caixa de som) é programado para emitir ondas com a mesma frequência pelo modulador de frequência. As ondas são conduzidas pela tubulação até o pistão que, segundo o fenômeno de reflexão, estas ondas produzidas retornarão (voltarão) no sentido oposto ao da fonte, coincidindo em determinados pontos do espaço, ocorrendo assim outros dois fenômenos ondulatórios (característicos de ondas), o princípio de superposição e o fenômeno de interferência de ondas, originando ondas construtivas e destrutivas em uma perspectiva de ondas estacionárias.

A comprovação de ondas estacionárias é percebida com a movimentação do pistão, onde podemos localizar os pontos onde a onda apresenta propriedade de elasticidade por compressão e rarefação, o aparelho auditivo apontará uma diminuição na intensidade do som, nos pontos de rarefação da onda (amplitude mínima) nesse ponto, nos pontos onde a amplitude é máximos os de compressão o aparelho auditivo acusará uma atenuação do som.

2) Defina o que é som? De que maneira o som pode se propagar?

3) Classifique onda sonora em mecânica ou em eletromagnética? Justifique?

4) Qual é o valor da velocidade do som? Esse valor é constante? Justifique?

- 5) O que são ondas construtivas e destrutivas?
- 6) Como se origina ondas estacionárias em um tubo com uma das extremidades fechada?
- 7) De acordo com as características de ondas estacionárias explique o que é ventre no tubo com uma extremidade fechada?
- 8) De acordo com as características de ondas estacionárias explique o que é nó no tubo com uma extremidade fechada?
- 9) (UFRJ) o canal que vai do tímpano à entrada do ouvido pode ser considerado um tubo cilíndrico de 2,5 cm de comprimento, fechado em uma extremidade e aberta em outra. Considere a velocidade do som no ar igual 340 m/s. calcule a frequência fundamental de vibração da coluna de ar contida nesse canal.
- 10) Suponha que a velocidade do som em determinada região seja 336 m/s. Qual a frequência fundamental que um boiadeiro pode conseguir com um berrante de 1,2 m de comprimento nessa região? Obs: (considere o berrante como um tubo com uma das extremidades fechada)
- 11) (Ufes) em determinada flauta faça um esboço dos três primeiros modos de vibração.

APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO 1 PRÉ-INTERVENÇÃO

- 1) Defina o que é som? De que maneira o som pode se propagar?
- 2) Classifique onda sonora em mecânica ou em eletromagnética? Justifique?
- 3) Qual é o valor da velocidade do som? Esse valor é constante? Justifique?
- 4) O que são ondas construtivas e destrutivas?
- 5) Como se origina ondas estacionárias em um tubo com uma das extremidades fechada?
- 6) De acordo com as características de ondas estacionárias explique o que é ventre no tubo com uma extremidade fechada?
- 7) De acordo com as características de ondas estacionárias explique o que é nó no tubo com uma extremidade fechada?
- 8) (UFRJ) o canal que vai do tímpano à entrada do ouvido pode ser considerado um tubo cilíndrico de 2,5 cm de comprimento, fechado em uma extremidade e aberta em outra. Considere a

velocidade do som no ar igual 340 m/s. calcule a frequência fundamental de vibração da coluna de ar contida nesse canal.

- 9) Suponha que a velocidade do som em determinada região seja 336 m/s. Qual a frequência fundamental que um boiadeiro pode conseguir com um berrante de 1,2 m de comprimento nessa região? Obs: (considere o berrante como um tubo com uma das extremidades fechada)
- 10) (Ufes) em determinada flauta faça um esboço dos três primeiros modos de vibração.

APÊNDICE C – QUESTIONÁRIO 2 PÓS-INTERVENÇÃO

- 1) Defina o que é som? De que maneira o som pode se propagar?
- 2) Classifique onda sonora em mecânica ou em eletromagnética? Justifique?
- 3) Qual é o valor da velocidade do som? Esse valor é constante? Justifique?
- 4) O que são ondas construtivas e destrutivas?
- 5) Como se origina ondas estacionárias em um tubo com uma das extremidades fechada?
- 6) De acordo com as características de ondas estacionárias explique o que é ventre no tubo com uma extremidade fechada?
- 7) De acordo com as características de ondas estacionárias explique o que é nó no tubo com uma extremidade fechada?
- 8) (UFRJ) o canal que vai do tímpano à entrada do ouvido pode ser considerado um tubo cilíndrico de 2,5 cm de comprimento, fechado em uma extremidade e aberta em outra. Considere a

velocidade do som no ar igual 340 m/s. calcule a frequência fundamental de vibração da coluna de ar contida nesse canal.

- 9) Suponha que a velocidade do som em determinada região seja 336 m/s. Qual a frequência fundamental que um boiadeiro pode conseguir com um berrante de 1,2 m de comprimento nessa região? Obs: (considere o berrante como um tubo com uma das extremidades fechada)
- 10) (Ufes) em determinada flauta faça um esboço dos três primeiros modos de vibração.

APÊNDICE D – QUESTIONÁRIO 3 DE OPINIÃO



Questão 1: A respeito do tubo de ressonância marque de acordo com sua opinião:

- I. O tubo de ressonância é um experimento interessante, de fácil manuseio, permitiu melhor compreensão de frequência de ressonância, nó, ventre, velocidade do som no estudo de ondas estacionárias. Deve ser aplicado nas aulas de física. ()
- II. O tubo de ressonância é um experimento interessante, no entanto seu manuseio é confuso, não consegui aprender sobre ondas estacionárias. Portanto, o experimento deve assumir papel de caráter demonstrativo, tornando a aula mais interessante. ()
- III. O experimento não é interessante e não consegui compreender com o mesmo. ()

Questão 2: Essa aula de física foi lecionada de forma diferente, considerando as aulas de física dos anos anteriores?

() sim () não

Questão 3: a respeito da prática experimental, eu, professor, devo introduzir mais aulas desse tipo? porquê?

() sim não()

Questão 4: O experimento tornou a aula mais atrativa para essa disciplina?

() sim não()

Questão 5: O experimento ajudou de alguma forma na resolução de exercícios?

Pouco () regular () muito ()

APÊNDICE E – TERMO DE CONSENTIMENTO DA ESCOLA

Pelo presente instrumento que atende às exigências legais, a Escola Estadual INDÍGENA SIZENANDO DINIZ, ciente dos procedimentos propostos, não restando quaisquer dúvidas a respeito do lido e do explicado, firma seu **CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO** de concordância quanto à realização da pesquisa sobre ondas mecânicas, onda sonora, elaborada pelo acadêmico Ranylson Gomes Leocádio. Fica claro que a instituição a qualquer momento, retirar seu **CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO** e deixar de participar do estudo alvo da pesquisa, caso haja alguma divergência dos objetivos ou finalidade do projeto ora apresentado, ficando ciente que todo trabalho realizado torna-se informação confidencial, guardada por força do sigilo profissional.

Por ser a expressão da verdade, assino o presente para que possa surtir os efeitos legais desejados. Boa Vista-RR,.....de.....2018

Assinatura e carimbo do representante da instituição

APÊNDICE F – TERMO DE CONSENTIMENTO DOS PAIS OU RESPONSÁVEIS



Senhor pai/responsável, meu nome é Ranylson Gomes Leocádio, residente e domiciliado na rua 05, nº 38, Bairro Monte Das Oliveiras, na cidade de Boa Vista-RR (Fone: 95 99151-4849). Atualmente, sou Acadêmico de física, estudo na Universidade Federal de Roraima, cursando o mestrado profissional em física. Para a obtenção do diploma, a universidade exige que façamos uma dissertação, com o objetivo de apresentar ações de estratégias em aulas práticas com experimento para a disciplina de física, nesse caso sobre ondas mecânicas o som, para alunos do Segundo Ano do Ensino Médio, buscando auxiliar a compreensão e aprendizagem de modo diferenciado, como um fator relevante e determinante para o aprendizado. Para tanto, gostaria de realizar alguns experimentos na sala de aula e fazer algumas perguntas, ao seu(a) filho(a), por meio de dois questionários, um avaliativo sobre o tema acima citado. Aproveitando o ensejo, informo que as respostas obtidas através dos questionários, servirão único e exclusivamente para a concretização da pesquisa, pois para a conclusão do mestrado, faz-se necessário a tabulação e exposição das respostas para posterior defesa da dissertação, no entanto, para resguardar identidade do(a) aluno(a) pesquisado(a), irei identificá-lo (a) através de códigos, com a finalidade de não expor o(a) educando(a).

Informo ainda que seu(a) filho (a) estará sob os meus cuidados e ,para elaborar a pesquisa necessito de seu consentimento. Gostaria que assinassem o campo abaixo e devolvessem este termo para escola.

Nome do aluno (a):.....

() Autorizo meu (a) filho (a) a participar da pesquisa.

() Não autorizo meu (a) filho (a) a participar da pesquisa.

Boa Vista - RR,dede 2018

Pai ou responsável– Fone: (95)

.....

APÊNDICE G – TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE USO DE IMAGEM (menor)



....., brasileiro(a), menor de idade, neste ato devidamente representado por seu (sua) (responsável legal), (), brasileiro(a),, portador(a) da Cédula de identidade RG no. /SSP-....., inscrito(a) no CPF sob no-, residente à Av/Rua....., no. Bairro, na cidade de Boa Vista-RR. AUTORIZO o uso da imagem de meu/minha filho (a) para fins educacionais na dissertação do acadêmico Ranylson Gomes Leocádio da Universidade Federal de Roraima, cujo título de pesquisar é: ondas estacionárias no tubo com uma extremidade fechada em uma perspectiva na teoria de formação por etapas de Galperin, contendo experimento de ondas sonoras, orientado pelo Prof. Dr. Ijanílio Gabriel de Araújo. A presente autorização é concedida a título gratuito, abrangendo o uso da imagem acima mencionada em todo território nacional, exterior, inclusive em qualquer tipo de mídia.

Fica ainda autorizada, de livre e espontânea vontade, para os mesmos fins, a cessão de direitos da veiculação das imagens não recebendo para tanto qualquer tipo de remuneração.

Por esta ser a expressão da minha vontade declaro que autorizo o uso acima descrito sem que nada haja a ser reclamado a título de direitos conexos à imagem ou a qualquer outro, e assino a presente autorização em 02 vias de igual teor e forma. Boa Vista - RR,dede 2018.

Por seu Responsável Legal

Telefone

APÊNDICE H – TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE USO DE IMAGEM (maior)



_____, brasileiro(a),
 maior de idade, portador(a) da Cédula de identidade RG
 nº. _____/SSP-_____, inscrito no CPF sob nº
 _____, residente à
 Av/Rua _____,
 nº. _____, Bairro _____, na cidade de Boa vista. AUTORIZO o uso
 da minha imagem para fins educacionais na Dissertação do Prof. RANYLSON
 GOMES LEOCÁDIO, Mestrando no Ensino Profissional de Física, na UFRR –
 Universidade Federal de Roraima, cujo título de pesquisa é: TUBO DE
 RESSONÂNCIA DE BAIXO CUSTO EM UMA PERSPECTIVA NA TEORIA DE
 FORMAÇÃO DE AÇÕES MENTAIS POR ETAPAS DE GALPERIN
 , orientado pelo Prof. Dr. Ijanilio Gabriel de Araújo. A presente autorização é
 concedida a título gratuito, abrangendo o uso da imagem acima mencionada
 em todo território nacional, exterior, inclusive em qualquer tipo de mídia. Fica
 ainda autorizada, de livre e espontânea vontade, para os mesmos fins, a
 cessão de direitos da veiculação das imagens não recebendo para tanto
 qualquer tipo de remuneração. Por esta ser a expressão da minha vontade
 declaro que autorizo o uso acima descrito sem que nada haja a ser reclamado
 a título de direitos conexos à imagem ou a qualquer outro, e assino a presente
 autorização em 02 vias de igual teor e forma.

Boa Vista - RR, ___ de Setembro de 2018

_____ Assinatura
 Telefone p/ contato: _____

APÊNDICE I – MANUAL DE APLICAÇÃO E CONSTRUÇÃO DO PRODUTO

MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



MANUAL

De construção e aplicação do TUBO DE RESSONÂNCIA DE BAIXO CUSTO



SUMÁRIO

1 APRESENTAÇÃO.....	3
2 INTRODUÇÃO	4
3 PLANO DE AULA.....	5
4 ONDAS	7
5 ONDAS MECÂNICAS.....	9
5.1 REFLEXÃO DE UM PULSO.....	12
5.2 ONDAS PERIÓDICAS.....	14
5.3 FREQUÊNCIA E PERÍODO.....	16
5.4 AMPLITUDE, FASE E COMPRIMENTO DE ONDA	17
5.5 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO.....	18
5.6 PRINCÍPIO DE SUPERPOSIÇÃO: INTERFERÊNCIA	21
5.7 ONDAS ESTACIONÁRIAS EM UMA CORDA.....	23
5.8 MODOS NORMAIS DE UMA CORDA	26
5.9 MODOS NORMAIS EM TUBO.....	28
6 RESSONÂNCIA NOS TUBOS	32
7 DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES E MONTAGEM DO TUBO DE RESSONÂNCIA.....	35
8 ATIVIDADE EXPERIMENTAL	44

1. Apresentação

O tubo de ressonância de baixo custo é um tubo baseado no equipamento de laboratório RESONANCE TUBE – WA 9495, uma versão industrializada que foi produzida pela empresa PASCO. O tubo tem o objetivo de demonstrar, na prática, o fenômeno de ondas estacionárias, assim como os conceitos do estudo de ondas que estão correlacionados com o fenômeno.

Santos (2013), Batista (2009), Araújo (2003), demonstram que o ensino nas escolas, principalmente no ensino médio, apresenta dificuldade na assimilação de conceitos da física que são apresentados com a mesma metodologia de estudo, abordada pela maioria das escolas de forma direta, sem levar em conta o conhecimento do aluno com o fenômeno para explorar a aplicação em exercício, além da aplicação dos conceitos no cotidiano, deixando de potencializar a aprendizagem dessa disciplina. Em busca de minimizar e oferecer um subsídio ao docente com bases metodológicas é que propomos esse experimento.

O experimento é uma ferramenta metodológica baseada na teoria de formação por etapas de Galperin.

Apresentaremos passo a passo a montagem, como também um exemplo da aplicação, procurando destacar a percepção dos conceitos correlacionados ao fenômeno.

Professor Ranylson Gomes leocádio

Introdução

A Física de acordo com os PCNs e a lei de diretrizes e bases da educação (LDB) garantem o estudo no currículo para que o aluno desenvolva competências e habilidades específicas da disciplina, de modo que o ser humano possa compreender e modificar a natureza em benefício social. Reis (2013), Cerbaro (2009), Libânio(2006), Santos (2004) demonstram que os discentes têm dificuldade na abstração dos conceitos. Na teoria de formação por etapas de Galperin e seus colaboradores, ele institui ações hierárquicas que garantem a formação de conceitos científicos na estrutura cognitiva do indivíduo e possibilita mecanismo para verificar a formação do mesmo. A ideia central é que há representações externas da estrutura psíquica e vice-versa, intermediada por um objeto e ações no objeto, que garantam a transposição das ações externas para internas, ou seja, a intrapsíquica.

Esses estágios serão aplicados na experiência realizada com o tubo de ressonância para que possamos compreender o estudo de ondas estacionárias e os conceitos correlacionados, por exemplo, velocidade do som, frequência, comprimento de onda, fenômeno de superposição, número de harmônicos.

2. Plano de aula

Professor: Ranylson Leocádio

Disciplina: Física

Serie: 2

Título da aula: Ressonância mecânica

Objetivo geral: Entender o conceito de ressonância sonora: produção de harmônicos (ondas estacionárias) pela intervenção do dispositivo.

Objetivos específicos:

- Compreender o tipo de ressonância no tubo;
- Entender os conceitos relacionados a produção dos harmônicos no tubo de ressonância de baixo custo;
- Calcular a velocidade do som.

Conteúdo programático:

- Conceito de ondas;
- Onda mecânica;
- Modos de vibração na corda e nos tubos aberto e fechado.

Metodologia:

A aula será ministrada de forma discussiva e contextualizada, auxiliada por texto com roteiro didático da aula do professor Ranylson sob título ressonância mecânica, com auxílio das referências Alberto Gaspar (2009), Nussenzveig (2002), apostilha ressonância do autor J.S.Y oneda (1882) e Sears, Zemansky, Young e Freedman, (2008), vídeo de título tubo ressonante, pincel, quadro branco e o experimento sob título tubo de ressonância de baixo custo. O procedimento metodológico da aula do produto está organizada em seis momentos, conforme descrevemos a seguir.

No primeiro momento da aula sobre o assunto a ser abordado, para determinar um ponto de partida para aplicação das aulas propostas, iniciaremos a discussão com um questionamento de forma verbal: já ouviram

falar sobre a palavra ressonância? cite um exemplo comum de ressonância encontrada no cotidiano?

No segundo momento, após ter elucidado cada subtítulo, isto é, ressonância, tipos de ressonância e ressonância no tubo, apresentaremos um vídeo de título tubo ressonante para reforçar os principais conceitos abordados.

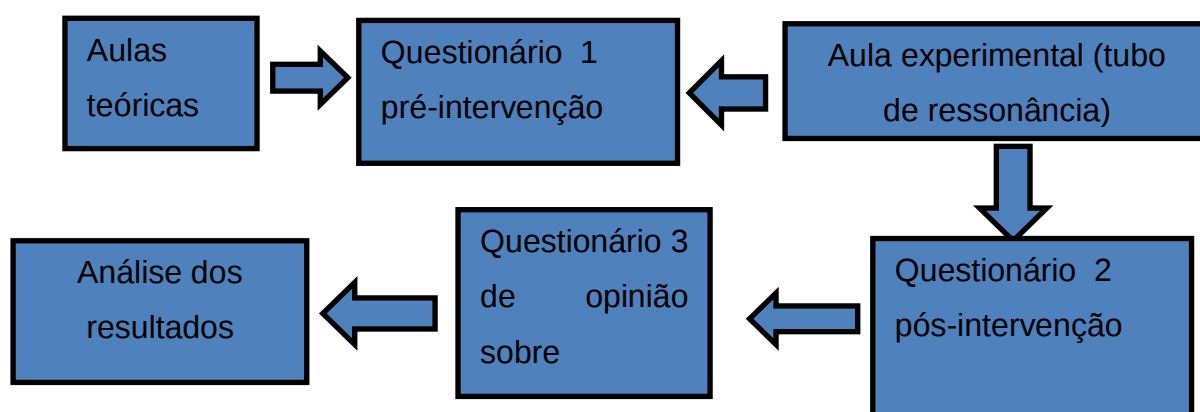
No terceiro momento, aplicaremos o Questionário 1 Pré-intervenção (APENDICE B) para verificar de que forma foram absorvidos os conceitos.

No quarto momento, correspondente a quarta ação, temos a aplicação do experimento tubo de ressonância de baixo custo, com o objetivo de calcular a velocidade do som. Assim vamos abordar, na prática, os conceitos dos tubos sonoros, procurando trabalhar as relações entre os conceitos e a percepção na prática dos fundamentos, isto é, a associação física do fenômeno com a parte fisiológica do ser humano.

No quinto momento, trata-se da aplicação do Questionário 2 Pós-intervenção (APENDICE C) para analisar de que forma os conceitos foram reformulados, evidenciando, por gráfico, o número de acertos dos conceitos em relação ao Questionário 1 Pré-intervenção (APENDICE B), destacando os efeitos e as influências do produto educacional, bem como a eficácia de determinação da velocidade do som no ar.

No sexto momento, aplicaremos o Questionário 3 Sobre opinião do discente (APÊNDICE D) para analisar as opiniões dos discentes sobre o produto.

Em resumo, os seis momentos podem ser organizados no seguinte fluxograma:



O fluxograma segue o cronograma a seguir:

Etapas do fluxograma	Quantidade de aula	Tempo
Aulas teóricas	10	50 mim cada
Questionário 1	1	50 mim
Aula experimental	1	50 mim
Questionário 2	1	50 mim
Questionário 3	0	Para domicílio

Conteúdo

Para compreender o fenômeno de ressonância, é necessário entender todos os conceitos que influenciam no fenômeno, quais sejam, abordaremos nessa aula um roteiro para que possamos trilhar esse caminho. E após os conceitos elucidados, propomos uma aula experimental de título tubo de ressonância de baixo custo, com o objetivo de dispor a experiência de percepção e manuseio da ressonância, e assim, coletar dados necessários para calcular experimentalmente a velocidade do som.

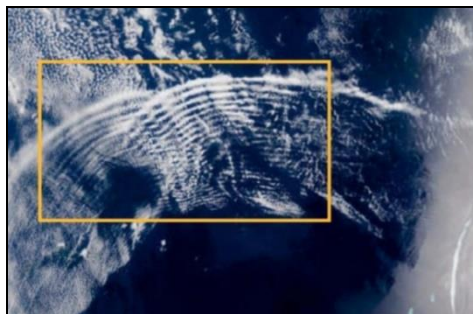
Iniciaremos a aula abordando os estudos de ondas mecânicas para entender conceitos fundamentais como comprimento de onda, frequência, amplitude e período. E depois, trataremos de fenômenos relacionados às ondas mecânicas, características de onda, como destacaremos reflexão de pulsos, refração de pulsos, princípio da superposição, interferência e ondas estacionárias, conforme estudos a seguir.

2. Onda

Segundo Nussenzveig (2002), onda é uma perturbação, gerada de um pulso que se transmite de um ponto a outro em um meio sólido, líquido, ou gasoso, com velocidade definida. Tem como característica intrínseca o transporte de energia sem que haja transporte de matéria de um desses pontos em relação ao outro.

Exemplos de ondas podem ser observados na Figura 1 apresentando ondas marítimas, ou seja, o movimento de vaivém das ondas do mar por uma garganta entre as rochas (destaque em amarelo) dá origem a ondas mecânicas que se propagam pela água (o meio elástico, água, nesse caso).

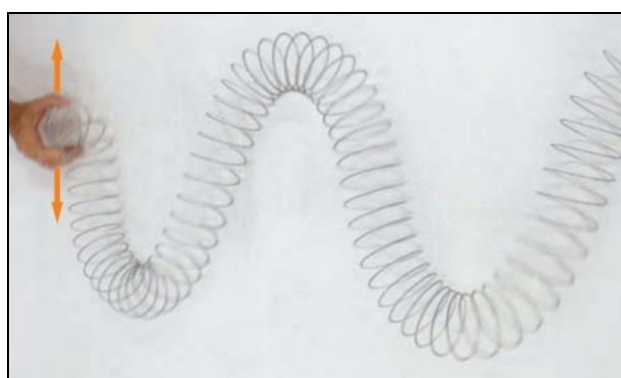
Figura 1 – ondas no mar



Fonte: Alberto Gaspar

Outro exemplo, a propagação de ondas em uma mola, observamos a Figura 2, quando se faz oscilar a mola a partir de um pulso vertical provocado em uma das extremidades da mola, através de uma sacudida rápida da mola para cima e para baixo, conforme é indicado pela dupla seta, a oscilação gera uma onda mecânica que se propaga pela mola (meio elástico).

Figura 2 - Ondas propagando-se em uma mola



Fonte: Alberto Gaspar

Esses exemplos mostram propagações ondulatórias que, por serem visíveis, torna mais fácil o estudo de comportamento do movimento do

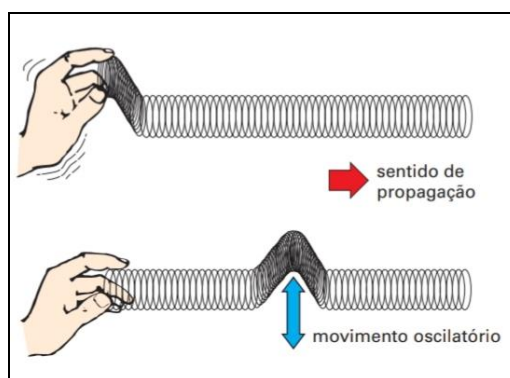
sistema físico. Por isso, serão apresentadas as medidas físicas fundamentais logo a seguir.

3. Ondas mecânicas

Segundo Alberto Gaspar (2009), Consideremos que alguém faça um único movimento de vaivém, vertical, na extremidade de uma mola estendida horizontalmente. Então, observa-se um pulso propagando-se ao longo da mola.

Enquanto o pulso se propaga horizontalmente, cada ponto da mola executa um movimento oscilatório vertical. A oscilação que gera o pulso, produzida na extremidade da mola, é perpendicular (ou transversal) à direção em que ela se propaga: trata-se de um **pulso transversal**. A Figura 3 ilustra e destacam os pontos ressaltados com essas características, uma mão aplica um movimento oscilatório no sentido horizontal na extremidade da mola, o pulso é gerado e se propaga no sentido horizontal indicado pela seta vermelha, e ao mesmo instante observado, o pulso é também transversal em relação a direção e sentido de oscilação.

Figura 3 – pulso transversal

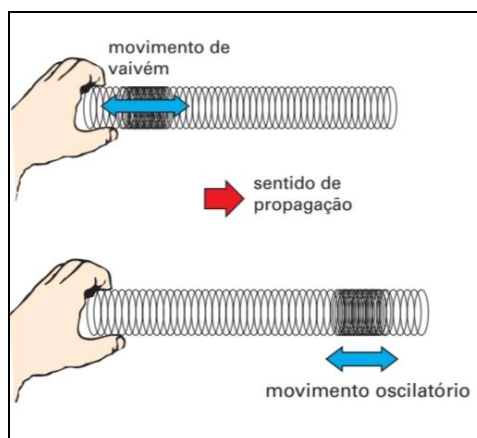


Fonte: Alberto Gaspar

Se o movimento for feito na mesma direção em que a mola está estendida, temos um **pulso longitudinal**. Figura 4 ilustra pulsos dessa natureza, e destacando os pontos relevantes ressaltados, uma mão exerce uma força em uma das extremidades da mola em um movimento denominado

vai e vêm, indicado pela primeira seta em azul de cima para baixo. O resultado é um pulso que se propaga no mesmo sentido do movimento de vaivém, o que é indicado pela segunda seta em azul de cima para baixo, e essa seta mostra o movimento oscilatório (ver Figura 4).

Figura 4 - Pulso longitudinal



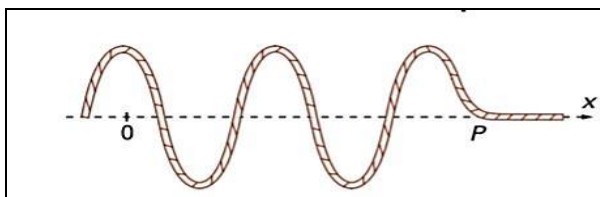
Fonte: Alberto Gaspar

Uma sequência de pulsos transversais ou longitudinais dá origem respectivamente, **ondas transversais** ou **ondas longitudinais**. A oscilação geradora do movimento ondulatório tem também a mesma direção da propagação.

A seguir, ressaltaremos outra característica de onda. Referente à dimensão de propagação, a onda, é classificada como unidimensional, bidimensional ou tridimensional

No exemplo da Figura 5, os pulsos e as ondas são **unidimensionais** porque é possível determinar a posição da frente da perturbação, chamada de **frente de onda**, por meio de um único eixo de coordenadas (eixo das abscissas x). Nas ondas unidimensionais a frente de onda é um **ponto material**, representado pelo ponto P, conforme mostra aspectos relevantes na Figura 5.

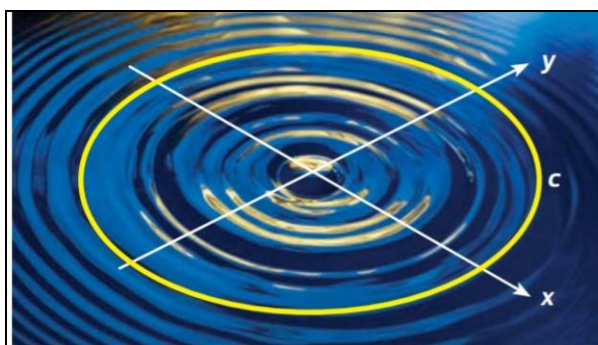
Figura 5 – Ondas unidimensionais



Fonte: Alberto Gaspar

Outro exemplo, as ondas na superfície da água que são **bidimensionais**. Para a sua descrição matemática são necessários dois eixos coordenados (eixos da abscissa x e da ordenada y) sua frente de onda é uma **curva plana**. Na figura 6, a frente de onda é representada pelo círculo C , em amarelo, em que a posição de cada ponto material é determinada pelas coordenadas medidas nos eixos x e y .

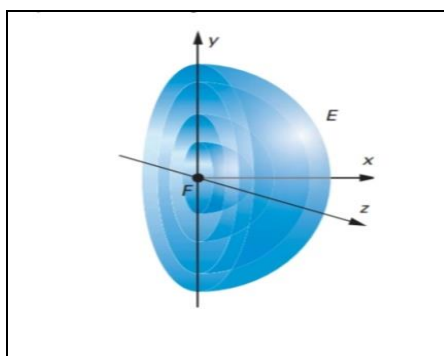
Figura 6 - Ondas bidimensionais



Fonte: Alberto Gaspar

Outro exemplo, são ondas sonoras que propagam-se por todo o espaço (ver Figura 7). São ondas **tridimensionais**, ou seja, a sua descrição matemática exige um sistema de três coordenadas (x , y e z). A frente de ondas tridimensionais é sempre uma **superfície**. No caso das ondas sonoras, podem ser superfícies esféricas. A Figura 7 representa ondas tridimensionais, e para o caso da onda sonora (está representada por semiesferas por razões didáticas). A frente de onda é a superfície esférica - E , de centro em F (fonte), descrita pelos eixos x , y e z . A figura 6 vem reforçar esses aspectos ressaltados.

Figura 7 – ondas tridimensionais



Fonte: Alberto Gaspar

Existem outras características, porém, para atingir o objetivo do projeto focaremos nas características necessárias para compreender o fenômeno de ressonância.

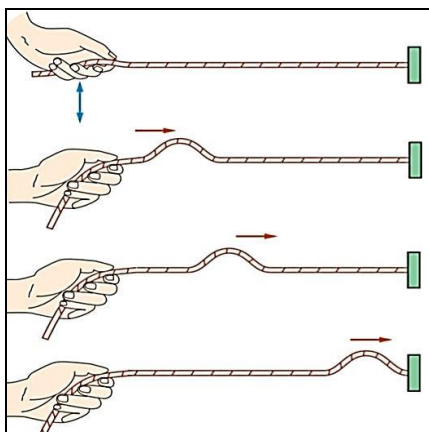
Apresentaremos a seguir conceitos e fenômenos relacionados as ondas mecânicas que é fundamental para o estudo físico de ressonância.

5.1 Reflexão de um pulso

Para Alberto Gaspar (2009), observe o exemplo de um pulso provocado em uma corda, mostrado na Figura 8. Como podemos observar, temos um pulso que é produzido em uma das extremidades da corda pelo movimento (sacudida) feito pela mão indicado com a seta em azul na Figura 8.

O que acontece quando o pulso atinge a outra extremidade da corda?

Figura 8 – Reflexão de um pulso



Fonte: Alberto Gaspar

À medida que o pulso se propaga, a corda se deforma (indicado pela seta vermelha em Figura 8) e depois volta à posição inicial. Trata-se de uma deformação elástica, à qual está associada uma energia potencial. Portanto, a propagação do pulso equivale à propagação da energia potencial elástica fornecida à corda no pulso inicial.

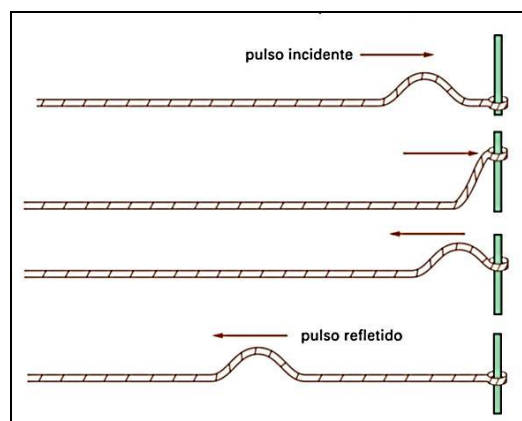
Pelo princípio da conservação da energia mecânica, essa energia potencial elástica não pode desaparecer quando o pulso atinge a outra extremidade da corda. Mas a corda acaba. O que acontece? Se não há mais corda para o pulso percorrer para frente, ele passa a percorrê-la para trás. O pulso volta, ele se **reflete**.

O fenômeno da reflexão é característico de qualquer propagação ondulatória que encontra uma alteração no meio em que se propaga o limite desse meio, ou um obstáculo.

Assim como os pulsos ou as ondas se refletem ao atingir a extremidade da corda, também as ondas sonoras ou luminosas se refletem ao atingir um anteparo ou o limite do meio em que se propagam. No entanto, a reflexão tem características específicas em cada tipo de propagação ondulatória. Demonstraremos a seguir dois casos particulares da reflexão.

Como primeiro exemplo, temos os pulsos que se propagam em cordas, esses refletem-se mantendo a mesma forma do pulso original, como ilustrado na figura 9, também chamado de **pulso incidente** para corda com uma **extremidade móvel**. Assim, dizemos que a reflexão ocorre **sem inversão de fase** (quando a crista se mantém para cima, e de modo análogo, para baixo). Observe que na Figura 9, o pulso refletido tem a mesma fase do pulso incidente (ao chegar e ao voltar, a crista se mantém para cima).

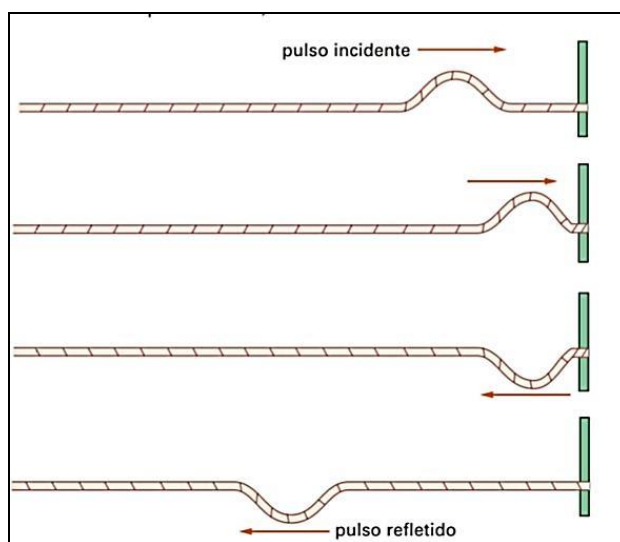
Figura 9 – pulso incidente



Fonte: Alberto Gaspar

Outro exemplo é quando a corda tiver a **extremidade fixa**, dessa forma, o pulso refletido será **invertido** em relação ao pulso incidente. Na Figura 10, a fase do pulso refletido é invertida em relação à fase do pulso incidente (ao atingir a extremidade fixa, a crista está voltada para cima; e ao refletir-se, voltada para baixo).

Figura 10 - Reflexão pulso invertido



Fonte: Alberto Gaspar

Note que, enquanto na reflexão em uma extremidade fixa o pulso tem que está preso para refletir-se, na extremidade livre, ele pode refletir-se mesmo estando completamente solto. A haste e o anel em torno dos quais a

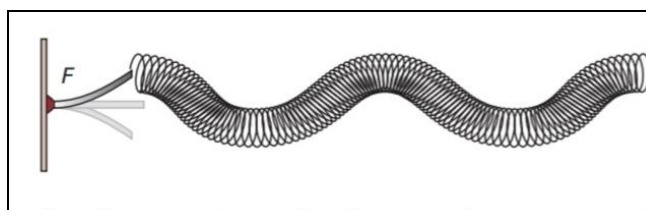
extremidade da corda oscila não são necessários, pois eles costumam ser colocados apenas para facilitar a representação gráfica do fenômeno.

A seguir abordaremos os conceitos de amplitude, período, frequência, que são fundamentais para entender o conceito de ressonância.

5.2 Ondas periódicas

Segundo Alberto Gaspar (2009), Embora a propagação de pulsos seja de natureza ondulatória, o seu estudo não permite a abordagem de todas as características desse movimento. Para isso, é necessário considerar uma série contínua de pulsos. A Figura 11 representa uma foto instantânea de uma onda gerada em uma mola por uma fonte oscilante F (diapasão, uma régua vibrando, lâmina vibrante...).

Figura 11 – Onda gerada em uma mola



Fonte: Alberto Gaspar

Se a fonte F produzir oscilações regulares, de período constante, a mola será percorrida por **ondas periódicas**. Se as oscilações forem harmônicas simples, ou seja, no caso em que cada ponto da mola pode oscilar com **movimento harmônico simples (MHS)**, onde vão gerar pulsos que se propagam pela mola em ondas harmônicas simples.

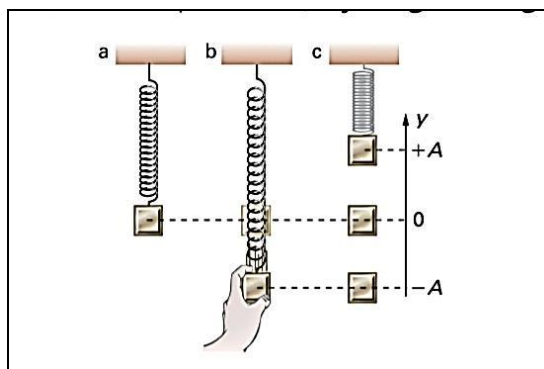
Para entender o que é MHS, considere a situação na Figura 12, isto é, uma mola presa por uma das extremidades, e na outra extremidade tem um bloco que é puxado por uma mão no sentido vertical e solto, então, o sistema passa a oscilar com MHS.

Quando o bloco estiver preso à mola (Figura12-a), este é puxado e solto (Figura 12-b), assim, este adquire um movimento oscilante, periódico, chamado de **movimento harmônico simples (MHS)**. Acrescentando ao movimento um

referencial vertical Oy , com origem (O) no ponto de repouso, as posições extremas serão $+A$ e $-A$ (Figura 12-c) (**amplitude A** do movimento).

O intervalo de tempo gasto pelo bloco para descrever uma oscilação completa é o **período (T)** do movimento. Isto é, a mola passará duas vezes sucessivas pela mesma posição de equilíbrio. O inverso do período corresponde à **frequência (f)**, ou seja, número de oscilações completas descritas pelo bloco em uma unidade de tempo

Figura 12- Movimento harmônico simples

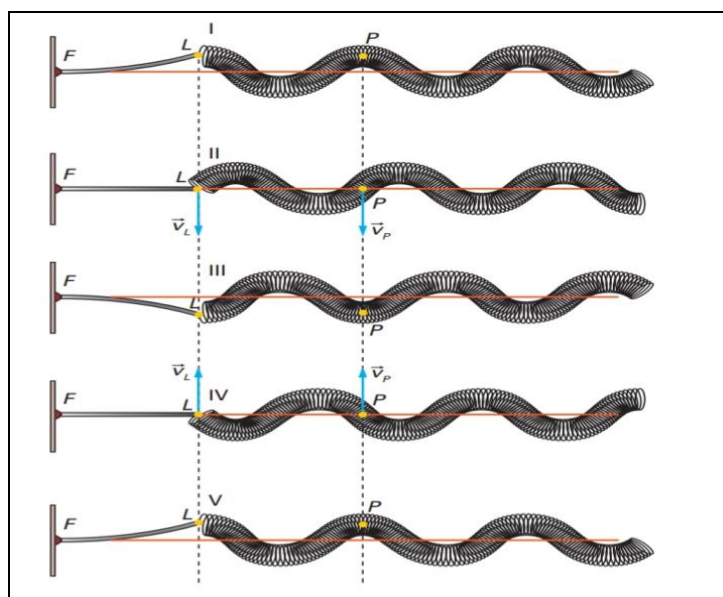


Fonte: Alberto Gaspar

5.3 Relação entre frequência e período

Segundo Alberto Gaspar (2009), Na Figura 13 é apresentado perfis instantâneos sucessivos (I, II, III, IV, V) de onda em uma mola, posto a oscilar por uma fonte oscilante F (lâmina vibrante). A onda gerada propaga-se em uma mola, em cinco instantes sucessivos. Nos perfis instantâneos II e IV, os pontos L e P estão momentaneamente em repouso. E nos perfis I, III e V, suas velocidades são máximas (observe a Figura 13).

Figura 13 – Perfis instantâneos sucessivos de ondas



Fonte: Alberto Gaspar

Consideremos um ponto L na extremidade da lâmina (supõe-se que as oscilações nesse ponto sejam suficientemente pequenas para que ele se movimente em um pequeno segmento de reta) e um ponto P na mola, na mesma fase de L (veremos o conceito de fase logo a seguir). A oscilação vertical da extremidade L, vinculada à extremidade da mola, gera a onda que nela se propaga e faz o ponto P da mola oscilar também verticalmente.

Então observa-se, na (Figura13), que os pontos L e P descrevem uma oscilação completa (de I a V) no mesmo intervalo de tempo. Assim, podemos concluir que o período (T) e a frequência (f) da oscilação da extremidade L da lâmina (fonte da onda) são iguais ao período e à frequência da própria onda, sendo, para ambas, válidas as relações:

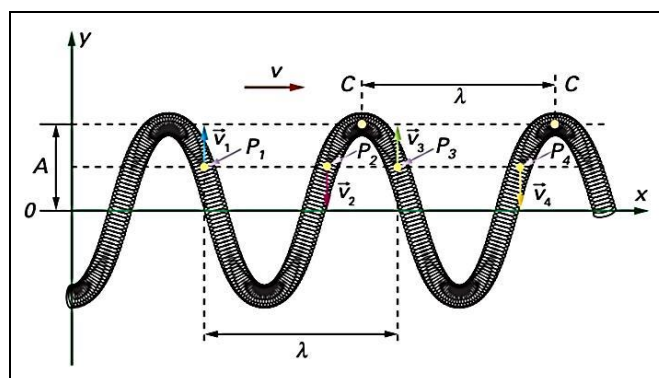
$$T = \frac{1}{f} \quad \text{ou} \quad f = \frac{1}{T}$$

A seguir, vamos ver outras características fundamentais de ondas mecânicas para originar o fenômeno de ressonância.

5.4 Amplitude, fase e comprimento de onda

Na Figura 14 é mostrado o referencial, assim como a amplitude A de uma onda. O módulo da ordenada máxima de um ponto dessa onda corresponde a amplitude.

Figura 14 – Ondas na mola



Fonte: Alberto Gaspar

Os pontos P_1 , P_2 , P_3 e P_4 têm a mesma ordenada y (observando a figura 14), mas não têm velocidades de mesmo sentido. Enquanto os pontos P_1 e P_3 sobem, P_2 e P_4 descem. Por essa razão, só os pares (P_1, P_3) e (P_2, P_4) estão na mesma fase. A distância entre eles é o comprimento de onda, representado pela letra grega λ (lambda). Em qualquer onda existem muitos pontos na mesma fase, como exemplo o ponto C que se repete na crista (pontos de ordenada máxima) da onda mostrada na Figura 14. Assim, observa-se o **comprimento de onda** (λ) como a menor distância entre dois pontos na mesma fase.

5.5 Velocidade de propagação

Segundo Alberto Gaspar (2009), para a propagação ondulatória, os conceitos de velocidade média (vetorial), velocidade instantânea (vetorial), e

velocidade escalar média são distintos. Assim, da expressão $v_m = \frac{\Delta x}{\Delta t}$, obtemos a **velocidade de propagação**, dividindo o espaço que a onda percorre pelo intervalo de tempo correspondente.

A velocidade de propagação de uma onda não é a mesma quantidade que expressa a velocidade de uma partícula. A grande diferença, entre esses conceitos, reside no caráter vetorial da velocidade da partícula, o que não existe na velocidade de propagação da onda.

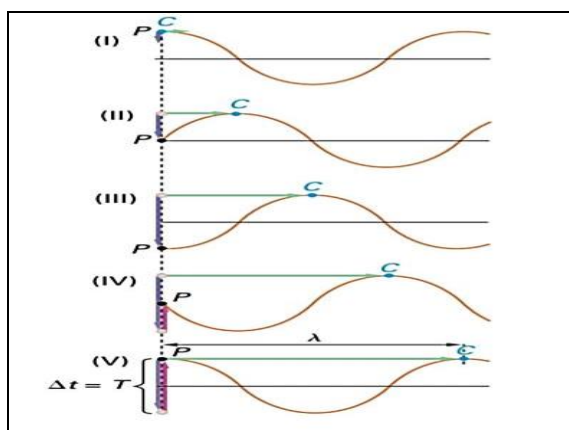
Por exemplo, considere o sistema de lançamento de projétil, é possível decompor a velocidade de um projétil, em um lançamento oblíquo, para determinar o alcance ou a altura máxima que ele atinge.

Em outro exemplo, considere o sistema de movimento de um barco e correnteza. Assim, pode-se somar, vetorialmente, a velocidade do barco com a velocidade da correnteza, mas não é possível somar assim (dessa forma) com movimentos ondulatórios.

Logo, se duas ondas atravessam a mesma região do espaço, suas velocidades não se somam, nem algébrica e nem vetorialmente. A razão física para essas diferenças é simples: enquanto a velocidade de uma partícula se relaciona a algo que efetivamente se desloca — a partícula —, a velocidade de propagação não relaciona-se a nenhum deslocamento de partículas — em uma onda, essa apenas oscila, não desloca-se, em uma análise rigorosa, essa “não faz parte” da onda, mas do meio em que a onda se propaga. O que se desloca é a forma da onda. É, por meio da forma, que a onda transmite a energia para o ambiente. Por isso, a velocidade de propagação é também chamada de **velocidade de fase**, pois a fase é uma grandeza estritamente ligada à forma da onda.

Na Figura 15, são mostrados perfis instantâneos, em cinco momentos sucessivos de uma onda unidimensional, evidenciando pontos relevantes P (ponto a oscilar da corda) e C (crista da corda) para determinar uma relação de velocidade de propagação da onda, conforme observamos movimentos na Figura 15.

Figura 15 - Onda unidimensional



Fonte: Alberto Gaspar

Na sequência de I a V da Figura 15, enquanto a crista C percorre a distância correspondente a um comprimento de onda, o ponto P efetua uma oscilação completa. Portanto, o intervalo de tempo correspondente a esse percurso é igual ao período T da onda. Assim, voltando à expressão da velocidade escalar média, enquanto a crista C da onda percorre a distância $\Delta x = \lambda$, o intervalo de tempo transcorrido é $\Delta t = T$. Portanto, a velocidade de propagação da onda é:

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

ou, lembrando que $T = \frac{1}{f}$:

$$v = \lambda f$$

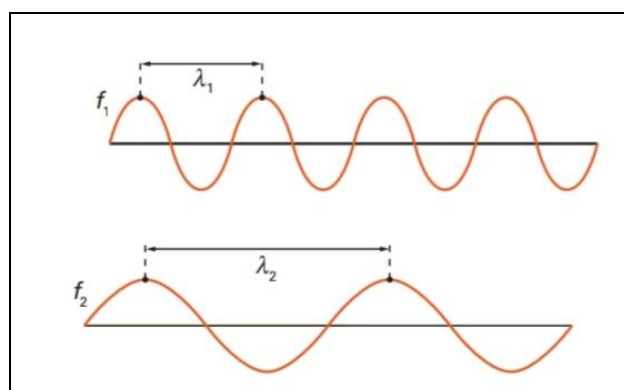
Se a fonte é harmônica simples, o período e a frequência são constantes. O comprimento de onda também é constante, porque a velocidade de propagação da onda é constante, pois depende apenas das propriedades do meio em que ela se propaga. Assim, pode-se demonstrar que a velocidade de propagação de uma onda numa corda é dada por:

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

Em que F é o módulo da tensão na corda e μ a sua densidade linear.

Se a velocidade de propagação da onda é constante, a partir da expressão $v = \lambda f$, concluímos que frequência e comprimento de onda são sempre grandezas inversamente proporcionais. Assim, quando a frequência da fonte geradora de uma onda dobra, triplica ou quadruplica, o comprimento de onda se reduz, respectivamente, à metade, a um terço ou a um quarto. Veja a figura 16 que ilustra essa relação, comparando as duas imagens da figura 16 $f_1 > f_2$ logo para o comprimento de onda segundo o inverso da proporcionalidade temos $\lambda_1 < \lambda_2$, o que é ilustrado na Figura 16 observe:

Figura 16 - proporcionalidade entre frequência e comprimento de onda



Fonte: Alberto Gaspar

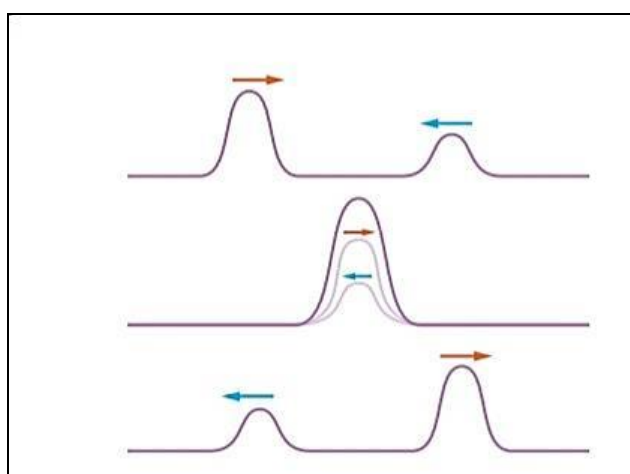
Na seção a seguir, elucidaremos dois conceitos: princípio da superposição - interferência e as ondas estacionárias que auxilia fundamentar e explicar o fenômeno de ressonância.

Segundo o site só física, todo sistema físico oscilante, possuem uma frequência natural, quando uma frequência igual a de sua frequência natural, fornece energia ao sistema, suas amplitudes aumentam consideravelmente

5.6 Princípio da superposição: interferência

Para Alberto Gaspar (2009), O que ocorre quando esses pulsos se cruzam? E depois do cruzamento? A Figura 17 ilustrará os momentos antes do cruzamento dos pulsos, durante e posterior. Observe que dois pulso (indicado pelas setas vermelhas e azul) se propagam no mesmo meio e no mesmo sentido, em um instante posterior os pulsos se encontrar-se no mesmo espaço ao mesmo tempo, no instante seguinte ambos os pulsos continua sua trajetória permanecendo com suas mesma característica , veja na Figura 17.

Figura 17 – Princípio da superposição

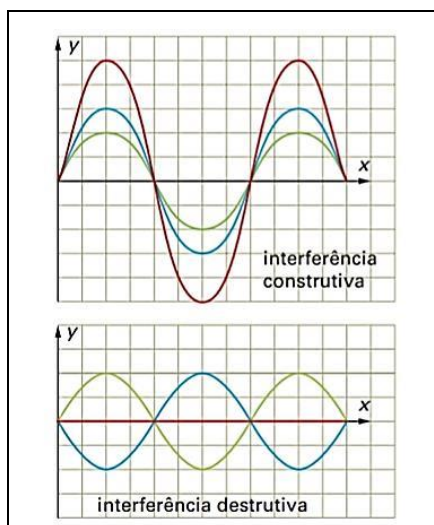


Fonte: Alberto Gaspar

Durante o cruzamento, a ordenada de cada ponto do pulso resultante é a soma algébrica das ordenadas de cada um dos pontos que se cruzam nesse instante. Essa afirmação denomina-se **princípio da superposição**. Depois do cruzamento, no entanto, cada pulso continua com suas próprias características (frequência, comprimento de onda...), como se nada houvesse acontecido. Ao fenômeno e à configuração resultante dessa soma algébrica das ordenadas de cada ponto dá-se o nome de **interferência**. Veja na Figura 18 que as ondas componentes são representadas em verde e azul; a interferência, resultante da superposição, está representada em vermelho.

Quando a onda resultante tem sua amplitude aumentada, ocorre uma **interferência construtiva**; quando a amplitude se reduz ou se anula, tem-se uma **interferência destrutiva**.

Figura 18 – interferência e destrutiva



Fonte: Alberto Gaspar

Outro fenômeno que é uma consequência dos fenômenos de reflexão e do princípio de superposição, é o de ondas estacionárias, sendo que esses fenômenos é o objeto de estudo para explorar o fenômeno de ressonância. Veja a seguir como se origina as ondas estacionárias em uma corda.

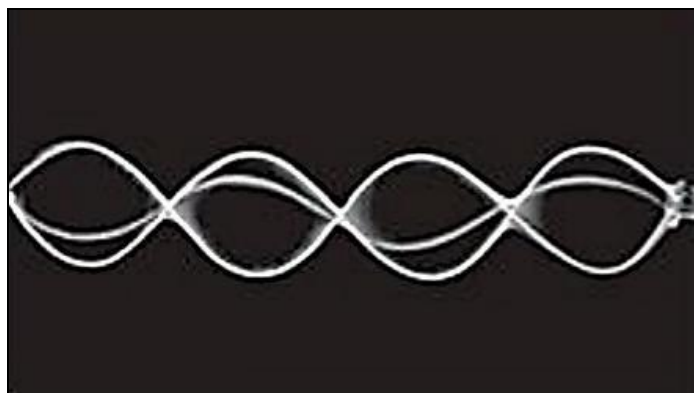
5.7 Ondas estacionárias em uma corda

Segundo Sears, Zemansky, Young e Freedman, (2008), examinaremos o que ocorre quando uma onda senoidal é refletida pela extremidade fixa de uma corda, vamos novamente considerar a superposição de duas ondas que se propagar através da corda, uma representando a onda incidente e a outra a onda refletida na extremidade fixa.

A Figura 19 mostra uma corda que estar presa em sua extremidade esquerda, sua extremidade direita oscila de cima para baixo em MHS e produz uma onda que se propaga para a esquerda; a onda refletida pela extremidade fixa se desloca para a direita.

O movimento resultante quando as duas ondas se combinam não mais se parece com duas ondas que se propagam em sentidos opostos. A corda parece estar subdividida em diversos segmentos, conforme indica a Figura 19.

Figura 19 – Ondas em uma corda de extremidades presas

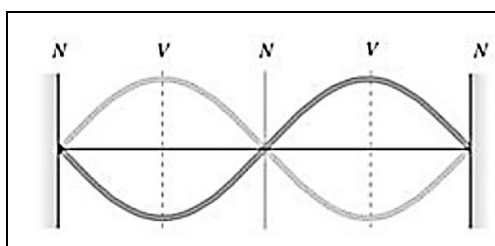


Fonte: Yong e Freedman

Em uma onda em que se propaga em uma corda, a amplitude é constante e a configuração da onda se desloca com a velocidade igual à velocidade da onda. No caso presente, ao contrário, a configuração da onda permanece inalterada ao longo da corda e sua amplitude flutua.

Na Figura 20 é apresentado um diagrama das ondas resultantes da (Fig.19). Observe que existem pontos particulares que nunca se movem; cada um desses pontos constitui um **nó** (indicado pela letra N na Figura 20). No meio de dois nós consecutivos existe um ponto chamado **ventre** (indicado pela letra V na Figura 20), onde a amplitude do movimento é máxima.

Figura 20 - Representação de ondas estacionárias



Fonte: Yong e Freedman

Como a configuração da onda não parece mover-se ao longo da corda, ela é chamada de **ondas estacionária** (para acentuar a diferença, uma onda que se move ao longo da corda denomina-se **onda progressiva**).

Esse sistema oscilante possui uma frequência mínima (modos de vibração) para determina o estado estacionário.

Destacaremos na seção seguinte, os modos de vibração para que possamos entender que os modos de vibração resultam no fenômeno de ressonância, em um estado físico oscilante.

5.8 Modos normais de uma corda

Segundo Sears, Zemansky, Young e Freedman, (2008), Quando descrevemos ondas estacionárias em uma corda com uma das extremidades mantidas fixas em certas extremidades rígidas, como indicado na Figura 19, não fizemos nenhuma hipótese sobre o comprimento da corda ou sobre a extremidade que não estar fixa. Vamos agora considerar uma corda comprimento fixo l , preso rigidamente a ambas as extremidades. Esse tipo de corda é encontrado em muitos instrumentos musicais, inclusive em violino, piano e guitarra. Quando você puxa a corda de uma guitarra, uma onda se propaga na corda; essa onda se reflete sucessivamente nas duas extremidades, produzindo-se uma onda estacionária. Essa onda estacionária da origem a onda sonora que se propagar no ar, com a frequência determinada com as propriedades das cordas.

As ondas estacionárias resultante deve possuir nós em ambas extremidades da corda. Vimos na seção precedente que a distância entre dois nós adjacente é igual a meio comprimento de onda ($\lambda/2$), de modo que o comprimento da corda deve ser igual a $\lambda/2$, ou $2(\lambda/2)$, ou $3(\lambda/2)$, ou de um modo geral igual a um número inteiro múltiplo de meio comprimento de onda:

$$l = n \frac{\lambda}{2} \quad (n= 1,2,3...)$$

(corda fixa nas duas extremidades)

Ou seja, se uma corda de comprimento L possui as duas extremidades fixas, uma onda estacionária só pode existir quando seu comprimento de onda satisfizer à equação acima.

Exemplificando λ nessa equação e identificando os valores possíveis de λ com o símbolo λ_n encontramos

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

(corda fixa nas duas extremidades)

É possível a existência de onda na corda que não possuem esses comprimentos de onda, porem tais ondas não podem formar ondas estacionárias com nós e ventre, e a onda resultante não pode ser estacionária.

Correspondendo a uma serie de valores possível de λ_n há uma serie de frequência f_n , cada uma delas relacionadas aos respectivos comprimentos de onda por meio da relação $f_n = v/\lambda_n$. A menor frequência f_1 corresponde ao maior comprimento de onda (o caso $n=1$), $\lambda_1 = 2l$;

$$f_1 = \frac{v}{2l}$$

(cordas fixas nas duas extremidades)

É esse valor e chamado de **frequência fundamental**. As outras frequências das ondas estacionárias são $f_2 = 2v/2l$, $f_3 = 3v/2l$, e assim por diante. Esses valores múltiplos inteiro da frequência fundamental f_1 , tais com $2f_1$, $3f_1$, $4f_1$ e assim por diante, generalizando:

$$f_n = n \frac{v}{2l}$$

(cordas fixas nas duas extremidades)

Essas frequências são chamadas de **harmônico**, a série desses valores denomina-se **série harmônica**.

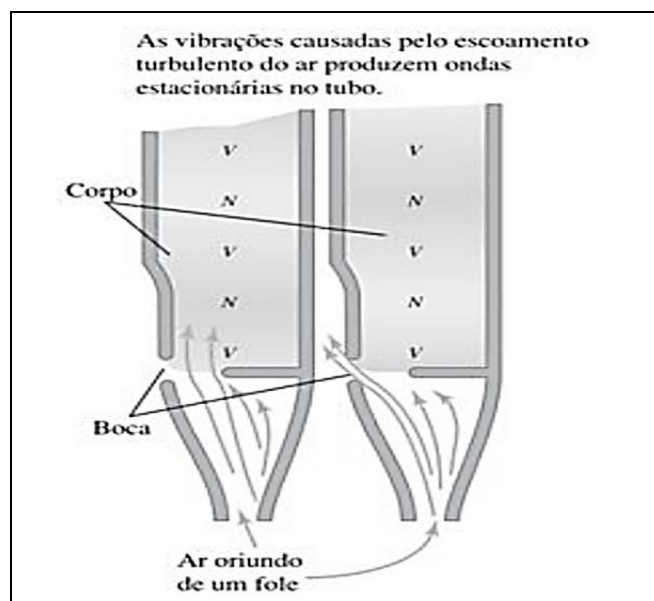
Um **modo normal** de um sistema oscilante é um movimento no qual todas as partículas do sistema se movem senoidal com a mesma frequência. Para um sistema constituído por uma corda de comprimento L que possui duas extremidades fixas, cada um dos comprimentos de onda é fornecido pela equação $\lambda_n = \frac{2L}{n}$ corresponde a uma configuração com modo normal possível e uma dada frequência. Cada modo com sua configuração de vibração e suas frequências características.

Na seção seguinte continuaremos nosso estudo sobre os modos, porem veremos essa aplicação em tubos específicos com condições específicas (tubos aberto e tubo fechado), o fenômeno no tubo de ressonância de baixo custo.

5.9 Modos normais em tubos

Segundo Sears, Zemansky, Young e Freedman, (2008), Considere o tubo da figura 21, O ar é fornecido por foles e ventoinhas, com uma pressão manométrica de ordem de 10^3 Pa ($10^{-2} atm$) na extremidade inferior do tubo da Figura 21. Uma corrente de ar emerge da abertura estreita da superfície e a seguir é direcionada para a parte superior da abertura chamada boca do tubo.

Figura 21- Condições do tubo

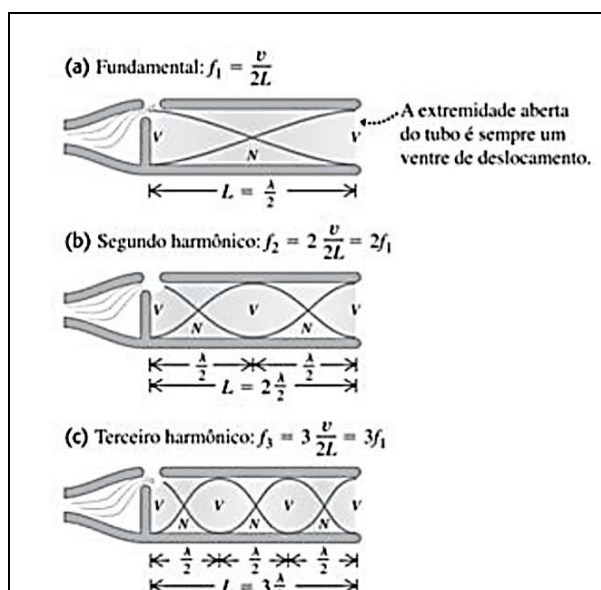


Fonte: Yong e Freedman

A coluna de ar no tubo começa a vibrar e ocorrem diversos modos normais possíveis, tal como de uma corda esticada. A boca sempre funciona como uma extremidade aberta; logo, ela é um nó de pressão e ventre de deslocamento. A outra extremidade do tubo pode estar fechada ou aberta.

Observe que na Figura 22 as duas extremidades do tubo estão abertas, de modos que elas são nó de pressão e ventre de deslocamento.

Figura 22 – Tubo aberto



Fonte: Yong e Freedman

Um tubo de órgão que possui as duas extremidades abertas é chamado de tubo aberto. A frequência fundamental f_1 corresponde a uma configuração de ondas estacionárias com um ventre em cada extremidade e um nó de deslocamento no meio do tubo. Na Figura 22 - a mostra que a distância entre dois ventres adjacentes é sempre igual a meio comprimento de onda e, neste caso, ele é igual o comprimento L do tubo $L = \lambda/2$. A frequência fundamental correspondente, obtida da relação $v = \lambda f$ é dada por;

$$f_1 = \frac{v}{2L} \text{ (tubo aberto)}$$

As Figuras 22 – b, c mostram respectivamente, o segundo e o terceiro harmônico, seus padrões de vibração apresentam dois e três nós de deslocamento, respectivamente. Para estes, meio comprimento de onda é igual a $L/2$ e $L/3$, respectivamente, e as frequências são, o dobro e o triplo da fundamental, respectivamente. Ou seja, $f_2 = 2f_1$ e $f_3 = 3f_1$. Para qualquer modo normal de um tubo de comprimento L deve existir um múltiplo inteiro de meio comprimento de onda, e os comprimentos de ondas possíveis, são dados, por

$$L = n \frac{\lambda_n}{2} \text{ ou } \lambda_n = \frac{2L}{n} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

(tubo aberto)

As frequências correspondentes f_n são obtidas $f_n = v/\lambda_n$, de modo que todas as frequências dos modos normais para um tubo aberto nas duas extremidades, são dadas, por

$$f_n = \frac{nv}{2L} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (\text{tubo aberto})$$

O valor $n = 1$ fornece a frequência fundamental, $n = 2$ fornece o segundo harmônico, e assim por diante. Alternativamente, podemos escrever

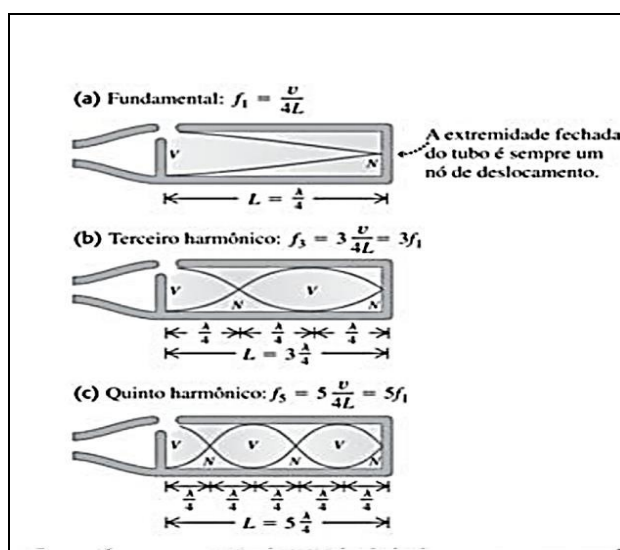
$$f_n = n f_1 \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (\text{tubo aberto})$$

onde esta é dada pela equação da frequência fundamental $f_1 = \frac{v}{2L}$.

A Figura 23 mostra um tubo aberto na extremidade esquerda, mais fechada na extremidade da direita. Este tubo é chamado de tubo fechado em uma extremidade, ou simplesmente tubo fechado. A extremidade esquerda (aberta) é um ventre de deslocamento (nó de pressão), porém a extremidade da direita (fechada) corresponde a um nó de deslocamento (ventre de pressão).

A distância entre um nó e um ventre adjacentes é sempre igual a um quarto do comprimento de onda. A (figura 23 - a) mostra o modo com a frequência mais baixa.

Figura 23 – Tubo fechado



Fonte: Yong e Freedman

Antes de prosseguir observa-se que o comprimento do tubo é igual a um quarto do comprimento de onda ($\lambda/4$). A frequência fundamental é $f_1 = v/\lambda_1$ ou

$$f_1 = \frac{v}{4L} \quad (\text{tubo fechado})$$

Este valor é a metade da frequência fundamental de um tubo aberto de mesmo comprimento. A Figura 23 - b mostra o modo seguinte, em que o comprimento de onda do tubo é três quartos do comprimento de onda, correspondendo a uma frequência $3f_1$. Na (Figura 23 - c), $L = 5\lambda/4$ e a frequência é igual a $5f_1$. Os comprimentos de onda possíveis são

$$L = n \frac{\lambda_n}{4} \quad \text{ou} \quad \lambda_n = \frac{4L}{n} \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \quad (\text{tubo fechado})$$

As frequências de modos normais são dadas por $f_n = v/\lambda_n$, ou

$$f_n = \frac{nv}{4L} \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \quad (\text{tubo fechado})$$

Ou

$$f_n = nf_1 \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \quad (\text{tubo fechado})$$

onde f_1 é dado pela equação $f_1 = \frac{v}{4L}$. Vimos que todos os harmônicos pares não estão presentes. Em um tubo fechado em uma das extremidades a frequência fundamental é $f_1 = v/4L$ e somente os harmônicos de ordem ímpar na série ($3f_1, 5f_1, \dots$) são possíveis.

Com todos os conceitos fundamentais elucidados, podemos agora explicar o fenômeno de ressonância, na seção a seguir.

6 Ressonância nos tubos

Muitos sistemas mecânicos têm modos normais de oscilações. Como vimos esse modo incluem colunas de ar (como em um órgão de tubo) e cordas esticadas (como em guitarra). Em cada modo cada partícula do sistema descreve um MHS com a mesma frequência deste modo. Colunas de ar e cordas esticadas possuem uma série infinita de modos normais, porém o conceito básico está intimamente relacionado com oscilador harmônico simples, que possui um único modo normal (ou seja, uma única frequência com o qual ele oscilar depois de ser perturbado).

Suponha que você aplique uma força variando periodicamente sobre um sistema que pode oscilar. O sistema então é forçado a oscilar com a mesma frequência da força aplicada (chamada de força propulsora). Este movimento denomina-se oscilação forçada de um oscilador harmônico. Em particular descrevemos o fenômeno de **ressonância mecânica**. Um exemplo simples de ressonância é quando se empurra uma criança em um balanço. O balanço é um pêndulo; ele possui apenas um modo normal cuja frequência é determinada pelo comprimento do pêndulo. Quando empurrarmos o pêndulo periodicamente com essa frequência, podemos fazer a amplitude do movimento aumentar. Porém quando empurrarmos o balanço com uma frequência diferente, este praticamente não se move.

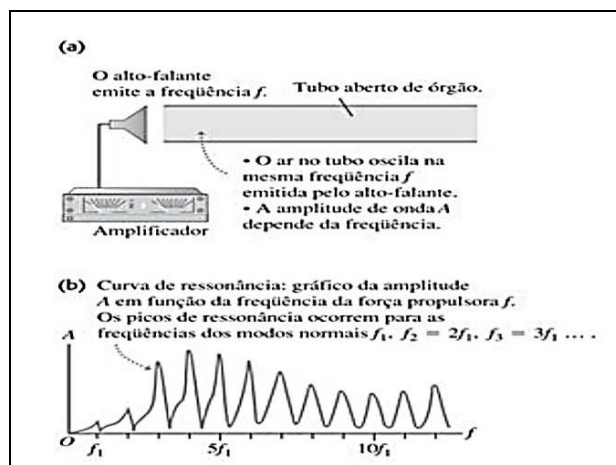
A ressonância também ocorre quando uma força periódica é aplicada a um sistema com muitos modos normais de vibração.

Um tubo aberto de um órgão é colocado nas proximidades de um alto-falante alimentado por um amplificador, emitindo ondas senoidais puras com frequência f que pode variar ajustando-se o amplificador. O ar no interior do tubo aberto é forçado a oscilar com a mesma frequência f da força propulsora produzida pelo alto-falante de acordo com a Figura 21 - a. Em geral, a amplitude desse movimento é relativamente pequena, e ao longo do interior do tubo não se move em nenhum dos modos normais mostrados.

Entretanto, quanto a frequência f da força propulsora tiver um valor próximo ao de uma frequência de modos normais, o ar no interior do tubo oscilará com a mesma frequência do modo normal, e a amplitude aumentará consideravelmente. A Figura 24 - b mostra a amplitude das oscilações no ar no tubo em função da frequência f da força propulsora, a forma desse gráfico é chamada de **curva de ressonância** do tubo; ela forma **picos** quando o valor da frequência f é igual a uma das frequências dos modos normais do tubo.

Observe a Figura 24

Figura -24 Curvas de ressonância



Fonte: Yong e Freedman

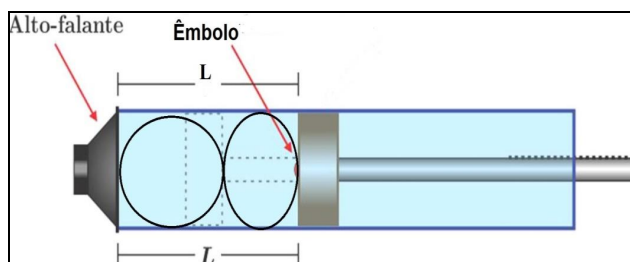
A forma detalhada da curva de ressonância depende da geometria do tubo.

O mesmo princípio físico se aplica ao tubo fechado a diferença é que na extremidade fechada tem um nó, porém não alteram as características do fenômeno.

Observe na Figura 25 que é inserido na extremidade de um tubo uma fonte (alto-falante) que emite ondas sonoras com frequência f , produzindo ondas incidentes e refletidas que resultam em ondas estacionárias dentro do tubo. Na outra extremidade, é inserido um êmbolo (pistão) variável, o que permite aumentar ou diminuir o comprimento l do tubo.

Com esse mecanismo podemos detectar os modos de vibrações que se formam nos múltiplos da frequência fundamental, com o movimento do êmbolo, pois na região de picos (amplitude máxima ou mínima) segundo o referencial teórico teremos uma acentuação (aumento) na intensidade das ondas sonoras, isto é, detectar os pontos de ressonância do sistema mecânico.

Figura 25 – Ressonância no tubo fechado



Fonte: www.scielo.br

.Na Figura 26 é apresentado um modelo de tubo fechado, denominado Tubo de Ressonância de Baixo Custo, desenvolvido com a finalidade de detectar os modos de vibrações e calcular a velocidade do som.

Figura 26 – Tubo de ressonância de baixo custo



Para reforçar os conceitos de ondas estacionária e o fenômeno de ressonância sugerimos o vídeo dos procedimentos de montagem e manuseio com atividade experimental desse tubo, segue o linkin <www.youtube.com/watch?v=ITER TJ-KV5o&t=58s>

Descrição dos componentes e Montagem do tubo de ressonância

Um problema na aplicação da metodologia experimental é que a maioria dos experimentos produzidos por empresa tem custo elevado, dificultando a implementação, de metodologia, uma alternativa acessível é explorar experimentos de baixo custo para resolver o problema, portanto esse tópico é dedicado a construção e manuseio de um guia de fabricação do experimento:

O tubo de ressonância necessita:

Três canos de comprimentos e diâmetros assim descritos:

Figura 27 - Tubos



Fonte: Arquivo pessoal

- ✓ 1 Cano de 50 mm de diâmetro e 1 m de comprimento;
- ✓ 1 Cano de 40 mm de diâmetro e 1 m de comprimento;
- ✓ 1 Cano de 20 mm de diâmetro e 1,05 m de comprimento.

Duas tampas:

Figura 28 -Tampões

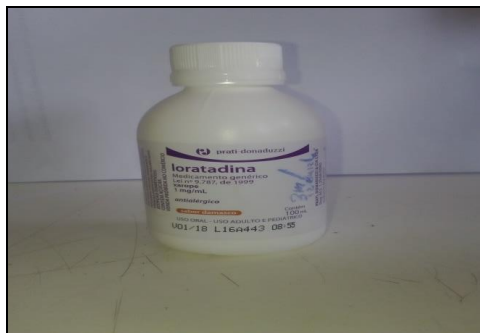


Fonte: Arquivo pessoal

- ✓ 1 tampão para cano de 40 mm de diâmetro;
- ✓ 1 tampão para cano de 20 mm de diâmetro.

Um frasco pequeno, semelhante ao de medicamento, sugerindo-se:

Figura 29 - Frasco de remédio loratadina



Fonte: Arquivo pessoal

- ✓ 1 um frasco do medicamento loratadina.

Uma fita métrica:

Figura 30 - Fita métrica



Fonte: Arquivo pessoal

- ✓ 1 fita métrica.

Dois adaptadores de rosca um de um de 60 mm e outro de 50 mm

Figura 31 - Adaptadores de redução



Fonte: Arquivo pessoal

Uma mini caixa de som speaker.

Figura 32 - Mini caixa de som



Fonte: Arquivo pessoal

Procedimento de montagem do tubo de ressonância:

1 ° passo - construção do 1° tubo interno: com auxílio de utilização de fogo, aquecer a ponta do cano de 20 mm para amolecer e dilatar-se, ajustando-se ao tamanho da ponta do frasco. E para a montagem do tubo interno, colocar a ponta do frasco, sem a tampa, do medicamento loratadina, por dentro do cano de 20 mm de 1,05 m de comprimento.

Figura 33 - Introdução do frasco no cano 20 mm, 1° tubo interno



Fonte: Arquivo pessoal.

2° passo - construção do 2° tubo interno (coaxial, eixo central paralelos): fazer um furo no tampão de cano de 40 mm, onde o orifício tem que ser de tamanho suficiente para a outra ponta do cano de 20 mm ultrapassá-lo.

Figura 34 - Tampão de 40 mm furado



Fonte: Arquivo pessoal

3° passo - montagem do conjunto de 1° e 2° tubos internos: insira no cano de 40 mm o cano de 20 mm, em seguida coloque na outra ponta o tampão, sendo que o cano de 20 mm vai passar por dentro do orifício, em seguida coloque o tampão de 20 mm.

Figura 35 - Montagem do 2° tubo interno



Fonte: Arquivo pessoal

4º passo - introdução de escala métrica: firme (fixar) uma fita métrica com fita adesiva transparente sobre o cano de 40 mm, e o restante da fita métrica deve-se inserir por dentro do cano de 40 mm, observando que o início da escala métrica definida deve coincidir com a extremidade do cano de 50mm.

Figura 36 - Finalização do 2º tubo interno



Fonte: Arquivo pessoal

5º passo - montagem do conjunto de 2 tubos internos e 1 externo: insira o cano de 40 mm dentro do cano de 50 mm

Figura 37 - Introdução do cano interno de 40 mm no externo de 50 mm



Fonte: Arquivo pessoal

6º encaixe os adaptadores pela rosca, com o auxílio de um isqueiro aqueça a parte interna do adaptador de 60 mm de modo que o plástico fique maleável em

seguida introduza a caixa de som e retire rapidamente antes do pvc retorna ao estado natural.

Figura 38 - Encaixe dos adaptadores e caixa de som



Fonte: Arquivo pessoal

7° com auxilio de uma chave de fenda aquecida fure o adaptador de 60 mm.

Figura 39 - Adaptador de 60 mm furado



Fonte: Arquivo pessoal

8° passo encaixe os adaptadores na extremidade do tubo.

Figura 40 - Tubo completo



Fonte: Arquivo pessoal

9º passo - o tubo está concluído, no entanto, para funcionamento deste, necessitamos de um modulador de frequência que pode ser baixado gratuito na loja (www.playstore.com) play store.

Figura 41 - Simple tone generator



Fonte: Arquivo pessoal

Em conclusão, com a condução dos procedimentos, o kit completo fica de acordo com a Figura 42.

Figura 42 - Produto tubo de ressonância



Fonte: Arquivo pessoal

Modelo alternativo sem os adaptadores, Figura 43.

Figura 43 - Modelo alternativo



Fonte: Arquivo pessoal

Observação qualquer dúvida sobre montagem confira a processo no linkin <www.youtube.com/watch?v=ITERTJ-KV5o&t=58s>.

Comprovação de produção e percepção de ondas estacionárias

Com o experimento concluído o emissor de ondas sonoras (caixa de som) é programado para emitir ondas com a mesma frequência pelo modulador de frequência. As ondas são conduzidas pela tubulação até o pistão que, segundo o fenômeno de reflexão, estas ondas produzidas retornarão (voltarão) no sentido oposto ao da fonte, coincidindo em determinados pontos do espaço, ocorrendo assim outros dois fenômenos ondulatórios (característicos de ondas), o princípio de superposição e o fenômeno de interferência de ondas, originando ondas construtivas e destrutivas em uma perspectiva de ondas estacionárias.

A comprovação de e ressonância por ondas estacionárias é percebida com a movimentação do pistão, onde podemos localizar os pontos onde a onda apresenta propriedade de elasticidade por compressão e rarefação, o aparelho auditivo apontará uma diminuição na intensidade do som, nos pontos de rarefação chamados de nós da onda (amplitude é igual zero) nesse ponto, nos pontos onde a amplitude é máximos os de compressão chamados de ventre o aparelho auditivo acusará uma atenuação do som o que detecta os modos de vibração de ressonância.

ATIVIDADE EXPERIMENTAL

Utilizando o tubo de ressonância de baixo custo (Figura 43 ou 44) calcule a velocidade do som.

1) Calcule a velocidade do som.

Frequência de onda f_n (Hz)	Comprimento do tubo L (m)	Número do harmônico	Velocidade do som (m/s)	Comprimento de onda λ (m)

Para calcular a velocidade do som precisamos das informações acima sendo assim:

Figura 43 – Tubo de ressonância de baixo custo (com adaptador)



Fonte: autor

Figura 44 – Modelo Alternativo do tubo (sem adaptador)



Fonte: autor

O experimento é composto basicamente por três materiais:

- Um celular com aplicativo (simples gerador de tone)
- Caixa de som de preferência as da figura 42 e 43

- Um tubo de 1 m de comprimento com um pistão variável

Manuseio

- O preenchimento da coluna da frequência é determinada pelo aplicativo simples gerador de tone (ao digita-la no espaço apropriado), de preferência na faixa de 200 a 600 Hz, sempre aumentando 100 Hz até 600 Hz
- calibre o dispositivo na primeira frequência 200 Hz, varie o comprimento do tubo ao movimentar o pistão, procure a última oscilação, isto é aumento do som (ventre), que será detectado de acordo com a teoria uma acentuação (aumento) na amplitude do som detectado pelo aparelho auditivo.
- O último ventre determinará o comprimento L do tubo, o tubo é equipado com uma fita métrica que ao variar o comprimento demonstrará o comprimento final que será preenchido na coluna do comprimento, observe que o comprimento esta em cm, será necessário transforma para m antes dos cálculos.
- No modelo com adaptador será necessário que se acrescente mais 8 cm no final de cada comprimento l , referente a distância interna dos adaptadores entre o pistão e caixa de som. No modelo alternativo o comprimento l não é necessário o acréscimo de 8 cm no comprimento final do tubo.
- Para preencher a coluna número do harmônico representado pela letra n , que significa o número de ventres ou rarefação. De acordo com os fundamentos nesse caso partícula $n = 1, 3, 5, 7, \dots$ confira a tabela: ou seja, para uma frequência determinada:

Pico de atenuação do som (modos normais)	(n) número de ventre
1	1
2	3
3	5

E assim sucessivamente, observando que n ocorrem somente para valores ímpares.

- Com os dados coletados usando a expressão $f_n = \frac{n \cdot v}{4L}$, e isolando v obtemos $v = \frac{f_n \cdot 4L}{n}$ onde v é a velocidade, L comprimento do tubo, f_n a frequência e n o número de ventre.
- Para calcular o comprimento de onda λ basta utilizar $v = \lambda \cdot f_n$ correspondente a cada modo de vibração.
- Após a anotação de todas as velocidades do som anotadas de cada frequência, calcule a média aritmética, e esse será o resultado final da experiência e argumente suas conclusões.

Observação: QUALQUER dúvida sobre manuseio pertinente confira o uso desse dispositivo no linkin <www.youtube.com/watch?v=xgRwdS_xueA>

Comprovação de produção e percepção de ondas estacionárias

Com o experimento concluído o emissor de ondas sonoras (caixa de som) é programado para emitir ondas com a mesma frequência pelo modulador de frequência. As ondas são conduzidas pela tubulação até o pistão que, segundo o fenômeno de reflexão, estas ondas produzidas retornarão (voltarão) no sentido oposto ao da fonte, coincidindo em determinados pontos do espaço, ocorrendo assim outros dois fenômenos ondulatórios (característicos de ondas), o princípio de superposição e o fenômeno de interferência de ondas, originando ondas construtivas e destrutivas em uma perspectiva de ondas estacionárias.

A comprovação de ondas estacionárias é percebida com a movimentação do pistão, onde podemos localizar os pontos onde a onda apresenta propriedade de elasticidade por compressão e rarefação, o aparelho auditivo apontará uma diminuição na intensidade do som, nos pontos de rarefação da onda (amplitude mínima) nesse ponto, nos pontos onde a amplitude é máximos os de compressão o aparelho auditivo acusará uma atenuação do som.

- 2) Defina o que é som? De que maneira o som pode se propagar?
- 3) Classifique onda sonora em mecânica ou em eletromagnética? Justifique?
- 4) Qual é o valor da velocidade do som? Esse valor é constante? Justifique?
- 5) O que são ondas construtivas e destrutivas?
- 6) Como se origina ondas estacionárias em um tubo com uma das extremidades fechada?
- 7) De acordo com as características de ondas estacionárias explique o que é ventre no tubo com uma extremidade fechada?
- 8) De acordo com as características de ondas estacionárias explique o que é nó no tubo com uma extremidade fechada?
- 9) (UFRJ) o canal que vai do tímpano à entrada do ouvido pode ser considerado um tubo cilíndrico de 2,5 cm de comprimento, fechado em uma extremidade e aberta em outra. Considere a velocidade do som no ar igual 340 m/s. calcule a frequência fundamental de vibração da coluna de ar contida nesse canal.
- 10) Suponha que a velocidade do som em determinada região seja 336 m/s. Qual a frequência fundamental que um boiadeiro pode conseguir com um berrante de 1,2 m de comprimento nessa região? Obs: (considere o berrante como um tubo com uma das extremidades fechada)
- 11) (Ufes) em determinada flauta faça um esboço dos três primeiros modos de vibração.

APÊNDICE J – DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO FUNDAMENTAL DA ONDA



referente a equação (18), y só depende de t por meio da variável $x' = x - vt$, calculando a derivada pela regra da cadeia temos,

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{df}{dx'} \frac{\partial x'}{\partial t} = -v \frac{df}{dx'}$$

Utilizado $\frac{\partial x'}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t}(x - vt) = -v$, semelhante,

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

Sabendo que $\frac{\partial x'}{\partial t} = -v$, logo

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = v^2 \frac{d^2 f}{dx'^2} \quad (\text{J.1})$$

Como $\frac{\partial x'}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t}(x - vt) = 1$, temos

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{df}{dx'} \frac{\partial x'}{\partial x} = \frac{df}{dx'} \left\{ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{d^2 f}{dx'^2} \frac{\partial x'}{\partial x} = \frac{d^2 f}{dx'^2} \right\} \quad (\text{J.2})$$

Comparando as equações (J.1) e (J.2) vemos que $y(x, t)$ resulta na equação

$$\boxed{\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0}$$

Essa equação é uma das equações fundamentais da física e é conhecida como equação de onda unidimensional

APÊNDICE K – DEDUÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDA



Podemos escrever a componente y da força, dada pela seguinte expressão.

$$F_y = F_{1y} + F_{2y} = F \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_{x+\Delta x} - \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_x \right]$$

Substituindo a expressão da massa $m = \mu \Delta x$ a componente y da aceleração $\partial^2 y / \partial t^2$ e a componente da força F_y , na segunda lei de Newton temos,

$$F \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_{x+\Delta x} - \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_x \right] = \mu \Delta x \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (\text{K.1})$$

Dividindo a equação (28) por $F \Delta x$,

$$\frac{\left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_{x+\Delta x} - \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_x}{\Delta x} = \frac{\mu}{F} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (\text{K.2})$$

Fazendo $\Delta x \rightarrow 0$. Neste limite, o lado esquerdo da equação (K.2), é concebida a derivada $\partial y / \partial x$ em relação a x para t constante, isto é, sua derivada parcial de segunda ordem de y em consonância a x :

$$\boxed{\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\mu}{F} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}}$$

APÊNDICE L – RELAÇÃO DESLOCAMENTO E DENSIDADE



$$\text{Partindo do volume } V = A[(X + \Delta x) - X] = A\Delta x \quad (\text{L.1})$$

e depois, observando o deslocamento do fluido, tomamos Δx infinitesimal, então a variação do volume original será expressa por

$$\begin{aligned} V + \Delta V &= A\{[(x + \Delta x) + u(x + \Delta x, t)] - [x + u(x, t)]\} \\ &= A\{\Delta x + [u(x + \Delta x, t) - u(x, t)]\} \\ &= A\Delta x \left\{ 1 + \left[\frac{u(x + \Delta x, t) - u(x, t)}{\Delta x} \right] \right\} \approx A\Delta x \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \end{aligned}$$

O que dá

$$\Delta V = A\Delta x \frac{\partial u}{\partial x}(x, t)$$

Fazendo o quociente pela equação (L.1), obtemos

$$\Delta V = \Delta x \frac{\partial u}{\partial x}(x, t)$$

Simplificando a expressão,

$$\delta = \rho - \rho_0 = -\rho_0 \frac{\partial u}{\partial x}(x, t)$$

APÊNDICE M – RELAÇÃO DE PRESSÃO DESLOCAMENTO



Considere que a pressão $p(x, t)$ provoca uma força na face esquerda

$$\Delta F_2 = -P(x, t)A.$$

Para a face direita também temos um fenômeno semelhante

$$\Delta F_1 = -P(x + \Delta x, t)A.$$

Verificando a força resultante sobre Δm para a esquerda, obtemos

$$\Delta F = \Delta F_1 + \Delta F_2 = [P(x, t) - P(x + \Delta x, t)]A = -\underbrace{A\Delta x}_{\Delta V} \cdot \left[\frac{P(x + \Delta x, t) - P(x, t)}{\underbrace{\Delta x}_{\approx \partial P / \partial x}} \right]$$

Como $\partial P / \partial x = \partial P / \partial x$ da equação (64),

$$\boxed{\Delta F = -\Delta V \frac{\partial P}{\partial x}(x, t)}$$

Sabendo que a aceleração no instante t do deslocamento do fluido é dada pela expressão $\partial^2 u / \partial t^2(x, t)$, da segunda lei de Newton, temos a equação do movimento

$$\Delta m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \rho_0 A \Delta x \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \Delta F = -A \Delta x \frac{\partial P}{\partial x}$$

APÊNDICE N – DEDUÇÃO DA VELOCIDADE DO SOM



Utilizando a equação do movimento dada pela equação (66), temos que

$$\rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = - \frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_0 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2},$$

onde a equação de onda satisfaz a condição

$$\boxed{\frac{1}{V^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} = 0} \quad (\text{N.2})$$

Logo, em comparação com essa relação, a velocidade de propagação é definida por

$$\boxed{V = \sqrt{(\partial P / \partial \rho)_0}}$$

Derivando em relação a x os membros da equação (N.2), vemos que

$$\frac{1}{V^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) = 0$$

Comparando com as equações (75) e (80) obtemos

$$\boxed{\frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \delta}{\partial x^2} = 0 = \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}}$$

A variação de densidade e pressão também atende a forma semelhante da equação de onda, isto é, propagam-se com velocidade do som.