

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA**

LUÍS ALEXANDRE RAUCH

**ELABORAÇÃO DE UM CONJUNTO DE MATERIAIS DE APOIO E APARATOS
EXPERIMENTAIS PARA O ESTUDO DE ONDAS MECÂNICAS POR MEIO DE
CORDAS**

**PONTA GROSSA
2016**

LUÍS ALEXANDRE RAUCH

ELABORAÇÃO DE UM CONJUNTO DE MATERIAIS DE APOIO E APARATOS
EXPERIMENTAIS PARA O ESTUDO DE ONDAS MECÂNICAS POR MEIO DE
CORDAS

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

Orientador: Prof. Dr. André Maurício Brinatti
Coorientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Pires

PONTA GROSSA
2016

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG

R241 Rauch, Luís Alexandre
Elaboração de um conjunto de materiais de apoio e aparatos experimentais para o estudo de ondas mecânicas por meio de cordas/ Luís Alexandre Rauch. Ponta Grossa, 2016.
305f.

Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física - Área de Concentração: Física), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. André Maurício Brinatti.

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Pires.

1.Sequência didática. 2.Experimentos demonstrativos. 3.Instrumentos musicais. I.Brinatti, André Maurício. II. Pires, Luiz Fernando. III. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Mestrado Profissional em Ensino de Física. IV. T.

CDD: 371.3

TERMO DE APROVAÇÃO

**ELABORAÇÃO DE UM CONJUNTO DE MATERIAIS DE APOIO E APARATOS
EXPERIMENTAIS PARA O ESTUDO DE ONDAS MECÂNICAS POR MEIO DE CORDAS**

MESTRANDO LUIS ALEXANDRE RAUCH

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ensino de Física no Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Estadual de Ponta Grossa, Polo 35 do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, pela seguinte banca examinadora:



Professor Dr. André Maurício Brinatti (orientador)
Departamento de Física – UEPG/PR



Professora Dra. Tramaia Jorge Cabral de Paulo
Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT)



Professor Dr. Silvio Luiz Rutz da Silva
Departamento de Física – UEPG/PR

Ponta Grossa, 23 de setembro de 2016

Dedico esta dissertação a minha amada esposa, Marlla, pelo companheirismo
e paciência.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. André Maurício Brinatti, meu orientador, pela sabedoria repassada, paciência nas correções dos trabalhos realizados, pelo incentivo nos momentos difíceis, além da amizade reforçada a cada dia.

Ao Prof. Dr. Luiz Fernando Pires, meu coorientador, pelo auxílio na elaboração dos textos de apoio.

A meus pais, pelo ensinamento de vida e incentivo aos estudos.

À CAPES pelo apoio financeiro por meio da bolsa concedida.

A meu irmão Carlos, pela disponibilidade para realização das impressões dos Textos de Apoio ao Educando, durante a aplicação do Produto em sala de aula.

A meus sobrinhos, Geraldo Baranoski Junior e André Rauch Baranoski pelo empréstimo do violão e violino para fotografias.

A Lilly Cristina Flores Schnepfer pelo empréstimo do violoncelo para fotografia.

Ao Colégio Getúlio Vargas, de Fernandes Pinheiro, pela autorização em fotografar o piano do Colégio.

À empresa New Sound, de Irati, pela doação dos Alto-falantes para confecção dos experimentos de corda e tubo de Kundt (para o pré-projeto).

A minha sogra, D. Beatriz pelo empréstimo da corda utilizada para confecção do Texto de Apoio ao Educando e aplicação em sala de aula, além da paciência e do apoio fornecido.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

RESUMO

No presente trabalho são apresentados o desenvolvimento do Produto – Nas cordas dos instrumentos musicais – e análise de sua aplicação. Em linhas gerais o Produto é um conjunto para o estudo de ondas mecânicas a partir de experimentos e instrumentos musicais, ambos confeccionados com materiais alternativos e de fácil acesso. Basicamente, o Produto é um material de apoio ao professor e contém: texto com abordagem dos conceitos físicos trabalhados em sala de aula; textos de apoio ao professor e textos de apoio aos educandos; planejamento de unidade e planos de aula; manuais de montagem dos aparatos e utilização destes em sala de aula. Nesta proposta foram planejadas 08 (oito) seções, distribuídas em 12 (doze) aulas, as quais buscam, a partir de uma sequência didática, abordar os conceitos básicos de ondulatória e efetuar a devida transposição dos conceitos em nível de ensino médio a fim de proporcionar avanços no processo de ensino-aprendizagem por parte dos educandos. Nesta elaboração, as atividades foram fundamentadas na teoria de aprendizagem de Ausubel. Por fim, da aplicação do Produto e posterior análise, constatou-se que a sequência de aulas realizadas possibilitou contemplar o estudo das ondas mecânicas por meio de cordas, sendo que as atividades dos instrumentos musicais e experimentos em sala de aula proporcionaram uma melhor interação dos educandos com os conteúdos trabalhados porque tais práticas instigaram os mesmos a perguntar e a observar em seu próprio contexto a física abordada. Assim, a aplicação do produto proporcionou, por meio de uma prática diferenciada, avanços no processo de ensino-aprendizagem de uma forma significativa.

Palavras-chave: Sequência didática, Experimentos Demonstrativos, Instrumentos Musicais.

ABSTRACT

This study presents the development of the Product – In the strings of musical instruments – and analysis of its application. Basically, the Product is a set to study mechanical waves through experiments and the use of musical instruments, both created with alternative material which is easily available. The product aids the teacher and comprises: text with approach to the physical concepts worked in the classroom; texts supporting teacher's work and texts supporting students' work, unit plans and lesson plans; manuals guiding the apparatuses assembly and their use in the classroom. This proposal contains 08 (eight) sessions, distributed into 12 (twelve) lessons, which seek, from a teaching sequence, to approach wave basic concepts and develop those concepts at the high school level aiming at providing advances to the teaching-learning process regarding the students involved. In such elaboration, the activities were based on Ausubel's learning theorie. Finally, from the Product use and analysis, it was seen that the sequence of lessons given made it possible to enhance the study of mechanical waves through strings, and the activities with musical instruments and experiments developed in the classroom provided the students better interaction with the content worked, since these practices motivated them to inquire and observe in their own context the physics content being studied. Therefore, the product application, through a differentiated practice, resulted in advances to the learning-teaching process in a meaningful manner.

Keywords: Teaching sequence, demonstration experiments, musical instruments.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 –	O movimento de uma roda de bicicleta (a) e o movimento do ponteiro dos segundos de um relógio (b)..	24
Figura 3.2 –	A representação, de forma aproximada, de um pêndulo simples.	26
Figura 3.3 –	Diagrama do corpo livre.	26
Figura 3.4 –	Superposição de duas imagens para observar o ângulo formado entre o ponto de equilíbrio e o seu deslocamento.	27
Figura 3.5 –	Movimento do pêndulo sobre uma base fixa.	29
Figura 3.6 –	A representação do movimento do pêndulo oscilando sobre uma base móvel.	30
Figura 3.7 –	Cinco instantâneos do movimento do pêndulo.	31
Figura 3.8 –	Representação de duas oscilações provocadas por amplitudes diferentes.	33
Figura 3.9 –	A formação de um pulso em uma corda.	34
Figura 3.10 –	Demonstração do transporte de energia sem o transporte e matéria em uma corda.	35
Figura 3.11 –	Um pulso refletindo em uma corda com a extremidade fixa.	36
Figura 3.12 –	Um pulso refletindo em uma corda com a extremidade livre	37
Figura 3.13 –	A superposição de dois pulsos, com o pulso refletido invertido ao pulso incidente.	38
Figura 3.14 –	A superposição de dois pulsos, com o pulso refletido com mesma direção ao pulso incidente.	38
Figura 3.15 –	Uma corda sendo agitada repetidas vezes, produzindo um padrão ondulatório.	39
Figura 3.16 –	Os instantâneos do movimento de um ponto específico de uma onda onde é produzida uma onda.	40
Figura 3.17 –	A representação de um instantâneo de uma onda em uma corda e pontos importantes para definição de grandezas que a caracterizam.	41

Figura 3.18 –	Uma onda senoidal produzida na corda.	42
Figura 3.19 –	Um aparato experimental para o estudo de ondas estacionárias.	43
Figura 3.20 –	Um padrão de ondas estacionárias, apresentado se nó e ventres.	44
Figura 3.21 –	Um instantâneo de uma onda nos três primeiros harmônicos.	45
Figura 3.22 –	Pitágoras realizando seus estudos no monocórdio.	48
Figura 3.23 –	Um instantâneo das cordas de um violão ao serem dedilhadas.	51
Figura 3.24 –	Composição de uma frequência fundamental e dois harmônicos subsequentes.	51
Figura 3.25 –	Uma onda periódica produzida por um teclado musical a partir de uma série de Fourier.	52
Figura 3.26 –	O timbre, em (a), de um violino, em (b) de um piano e em (c) de um trompete. Todos tirados com o auxílio de um osciloscópio.	54
Figura 4.1 –	Dois monocórdios de Pitágoras	58
Figura 4.2 –	Dois violões de lata	59
Figura 4.3 –	Pêndulo, em (a) primeiro protótipo e em (b) teste.	60
Figura 4.4 –	Um pêndulo utilizado para a elaboração do Texto de Apoio ao Educando bem como aplicação em sala de aula.	61
Figura 4.5 –	Aparato do experimento da corda.	62
Figura 5.1 –	Educandos manuseando instrumentos musicais	69
Figura 5.2 –	Relógio e roda de bicicleta utilizados na Seção 2.	70
Figura 5.3 –	O experimento do pêndulo.	71
Figura 5.4 –	O movimento do pêndulo sobre uma base fixa.	72
Figura 5.5 –	O movimento de um pêndulo com a base móvel.	73
Figura 5.6 –	Eixo de coordenadas sobre a marcação do papel.	73
Figura 5.7 –	Observações da velocidade de um pulso em uma corda.	75

Figura 5.8 –	Aferição do comprimento e massa das cordas utilizadas na Seção 4	75
Figura 5.9 –	Apresentação dos cálculos da densidade linear e da velocidade de propagação de um pulso em uma corda.	76
Figura 5.10 –	Demonstração do transporte de energia sem o transporte de matéria.	76
Figura 5.11 –	Utilização de um simulador mostrando a reflexão e interferência entre dois pulsos.	77
Figura 5.12 –	Aplicação do experimento da corda em um momento da aula.	80
Figura 5.13 –	Educandos manuseando e investigando o experimento da corda, em (a) investigando o alto-falante e em (b) explorando a corda.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 –	Relação pitagórica entre comprimento de uma corda e a nota emitida.	49
Tabela 3.2 –	Relação natural entre comprimento de uma corda e a nota emitida.	50
Tabela 3.3 –	Comparação entre as relações de Pitágoras e Zarlino.	50
Tabela 4.1 –	Relação da frequência em diferentes cordas.	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 –	Posição do pêndulo em função do tempo	32
Quadro 4.1 –	Sequência das seções na aplicação do produto	56

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	UMA BREVE INCURSÃO AO ESTADO DA ARTE	16
2.1	O ENSINO DE ONDULATÓRIA NOS DOCUMENTOS OFICIAIS	16
2.2	ALGUNS APARATOS EXPERIMENTAIS E INSTRUMENTOS MUSICAIS PARA O ENSINO DE FÍSICA	17
2.3	APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA COMO MARCO REFERENCIAL TEÓRICO	19
2	ONDAS MECÂNICAS E INSTRUMENTOS MUSICAIS DE CORDAS	22
3.1	INSTRUMENTOS MUSICAIS DE CORDAS	22
3.2	MOVIMENTO PERIÓDICO	23
3.3	PÊNDULO SIMPLES	24
3.4	MOVIMENTO HARMÔNICO SIMPLES	28
3.5	PULSO	33
3.5.1	Velocidade de um pulso	34
3.5.2	Transporte de energia sem transporte de matéria	35
3.5.3	Reflexão de um pulso	35
3.5.4	Superposição entre dois pulsos	37
3.6	ONDAS	39
3.7	ONDAS ESTACIONÁRIAS	43
3.8	PITÁGORAS NA FORMAÇÃO DA ESCALA MUSICAL OCIDENTAL	48
3.8.1	A contribuição de Zarlino	49
3.9	COMPOSIÇÃO HARMÔNICA	50
3.10	TIMBRE	53
4	MATERIAIS E MÉTODOS	55
4.1	INVESTIGAÇÃO INICIAL E AULAS ELABORADAS	55
4.2	INSTRUMENTOS MUSICAIS E EXPERIMENTOS	57
4.2.1	Monocórdio de Pitágoras	57
4.2.2	Violão Rudimentar	58
4.2.3	Materiais diversos	60
4.2.4	Pêndulo Simples	60
4.2.5	Experimento da corda	61
4.3	FOTOS, VÍDEOS E MATERIAIS AUXILIARES NA APLICAÇÃO DAS AULAS	63
4.4	TEXTOS DE APOIO	65
4.5	APLICAÇÃO DAS AULAS	66
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	86
	REFERÊNCIAS	88
	ANEXO: Nas cordas dos instrumentos musicais	92

1 INTRODUÇÃO

Existe uma necessidade real para o ensino de Física em buscar o interesse do educando para um aprendizado significativo. Perante esta informação, LIMA (2011, p.19) salienta que a Física é vista pelos professores como sendo uma disciplina de difícil aplicação, o que se faz com que os educandos apresentem desinteresse e dificuldades de aprendizagem dos conteúdos.

Para contornar esta situação o professor deve procurar alternativas diferenciadas para o ensino. Alternativas estas que busquem elevar o interesse do educando em aprender, além de facilitar o processo de ensino-aprendizagem dos mesmos, fazendo com que sejam agentes do seu próprio aprendizado.

Um possível fator que demonstre a falta de interesse por parte do educando pode estar relacionado ao número reduzido de profissionais formados na área. Segundo o Ministério da Educação (MEC) (BRASIL, 2008) existe a falta de 56 mil professores para a disciplina de Física, tanto para o Ensino Fundamental quanto para o Ensino Médio. Esta realidade apontada pelo MEC faz com que as vagas em destaque estejam ocupadas por professores e/ou profissionais de outras áreas, como a Matemática e Engenharia, por exemplo. Tal fato ocasiona um déficit no ensino-aprendizagem, pois são professores e/ou profissionais que não tiveram a formação adequada para tal disciplina.

A desmotivação por parte dos educandos pode estar associada à grande quantidade de disciplinas nos currículos, aproximadamente 13 disciplinas por série. Segundo Machado (s/ano) apud Gomes (2013), este “[...] excesso de disciplinas e de componentes curriculares tornam o ensino médio penoso e desagradável. É um desmotivador importante para esses jovens”, o que contribui para a evasão escolar, ainda segundo o autor.

Além disso, existe uma grande dificuldade em cumprir a grade curricular esperada para o curso, devido à carga horária da disciplina de Física para os colégios públicos constituir-se em média de 80 horas/aula por ano, limitando assim novas práticas educativas.

Desta forma, preocupado com esses aspectos, e buscando criar alternativas diferenciadas que propiciem o aumento do interesse por parte dos educandos, o autor desta dissertação foi motivado a unir a sua grande experiência no ensino de música com a sua formação em Licenciatura em Física, visando um aprendizado significativo de ondas mecânicas a partir de experimentos, aliados com a utilização de instrumentos musicais confeccionados a partir de materiais alternativos e de fácil acesso.

Com base no exposto, o presente trabalho foi proposto com o intuito de responder à seguinte questão: O estudo de ondas mecânicas pode se tornar mais interessante quando as atividades em sala de aula têm como base a aprendizagem significativa, uso de demonstrações de experimentos e de inserção de alguns instrumentos musicais, ambos elaborados pelo professor com materiais alternativos em sala de aula?

Visando a aplicação do projeto de pesquisa, foi elaborado o Produto: Nas cordas dos instrumentos musicais (ANEXO) cuja aplicação se deu em uma escola do interior do município de Irati – PR, em uma turma de 2º ano do Ensino Médio. O referido Produto consiste de uma unidade didática contendo oito seções, distribuídas em doze aulas, material de apoio e aparatos experimentais, o qual está dividido na seguinte estrutura: planejamento (questionário investigativo, plano de unidade e planos de seções), conceitos físicos abordados em sala de aula, Textos de Apoio ao Professor, Textos de Apoio ao Educando, manuais de montagem dos instrumentos musicais e experimentos demonstrativos, além de vídeos, slides e simulações utilizadas em sala de aula.

Uma vez elaborado e aplicado o Produto e considerando que é necessária sua avaliação, este trabalho tem como

Objetivos Gerais:

- Elaborar material para experimentos demonstrativos, instrumentos musicais, ambos com materiais alternativos, e material de apoio ao professor para uma sequência de aulas segundo aprendizagem significativa;
- Contribuir com uma nova alternativa para o ensino de ondas mecânicas por meio de cordas.

Objetivos Específicos:

- Fornecer ao educando uma forma diferenciada de aprendizado, onde o mesmo seja agente do seu próprio conhecimento;
- Proporcionar ao educando um processo de ensino-aprendizagem diferenciado;
- Avaliar o grau de aprendizado do educando a partir de observações da evolução que este apresente durante o curso.

Desta forma, a presente dissertação traz apontamentos gerais, análise e considerações acerca da aplicação do Produto e está dividida em seis capítulos, neste introdutório de apresentação do trabalho e em mais cinco. No segundo Capítulo são realizadas algumas considerações acerca do estado da arte onde, além disso, busca-se explicar as particularidades presentes na teoria de aprendizagem de David Ausubel, o qual é essencial para o desenvolvimento, aplicabilidade e análise do trabalho. Para o terceiro Capítulo são apresentados alguns conceitos físicos relacionados às ondas mecânicas e aos instrumentos musicais, os quais foram utilizados no decorrer da atividade proposta, sendo eles: movimento periódico, movimento harmônico simples, ondas mecânicas, escala pitagórica, entre outros. No quarto Capítulo são apresentados procedimentos, testagens e adaptações a partir da literatura para a confecção e a elaboração dos materiais de apoio e aparatos experimentais até a sua concepção final. Há também a descrição geral do modo como foi aplicado o Produto para viabilizar a análise da aplicabilidade do mesmo. No quinto Capítulo são abordados os principais resultados em relação ao uso dos materiais de apoio, dos experimentos e da aplicação das aulas, ou seja, são destacados os resultados e apontamentos relevantes que permitiram verificar a efetividade do Produto. No sexto e último Capítulo, são apresentadas as considerações finais em relação ao uso do Produto em sala de aula e de trabalhos futuros.

Por fim, pelo fato desta dissertação trazer apontamentos gerais, análise e considerações acerca da aplicação do Produto, mencionado anteriormente, tanto parte desta introdução, a qual consiste na transcrição parcial do Capítulo 1, quanto outros trechos são transcrições de forma integral ou parcial do referido Produto.

2 UMA BREVE INCURSÃO AO ESTADO DA ARTE

O presente Capítulo tem por objetivo realizar, em primeiro momento, uma breve revisão da literatura, a qual consiste em elencar fontes, obras e referências pesquisadas e, em um segundo momento, destacar a teoria de Ausubel, com suas particularidades e essencial para o desenvolvimento e aplicação Produto.

2.1 O ENSINO DE ONDULATÓRIA NOS DOCUMENTOS OFICIAIS

A acústica e, portanto ondas mecânicas, é parte integrante do currículo de Física, como subdivisão da ondulatória, onde o tema está previsto nos documentos oficiais como item fundamental do currículo de Física. Desses, pode-se destacar os Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (BRASIL, 2002) que abordam o tema como parte do eixo estruturante som, imagem e informação. Nesse documento ressalta-se a necessidade de se “[...] compreender os atuais meios de comunicação e informação que têm em sua base a produção de imagens e sons, seus processos de captação, suas codificações e formas de registro e o restabelecimento de seus sinais nos aparelhos receptores.”. Para tal, é necessário que se aborde, segundo os Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (BRASIL, 2002), “[...] a natureza ondulatória comum à luz e ao som, reconhecendo suas características físicas, relacionando-as a fontes, ‘volume’, timbre ou escalas musicais, entre outros.”.

As Diretrizes Curriculares do Estado do Paraná (PARANÁ, 2008, p.97), apresentam o tema ondulatória como parte fundamental da natureza da luz e suas propriedades, sendo que “[...] o estudo da ondulatória deve se iniciar pelas ondas mecânicas, pois são mais ‘visíveis’ ou perceptíveis no cotidiano”.

O Caderno de Expectativas de Aprendizagem¹ (PARANÁ, 2012, p. 51), aborda a ondulatória no conteúdo estruturante Eletromagnetismo onde coloca-

¹ Elaborado pela Secretaria de Estado da Educação (SEED), por meio do Departamento de Educação Básica (DEB), no ano de 2011, o Caderno de Expectativas de Aprendizagem fornece subsídios para auxiliar o professor na qualidade do processo educativo e no desempenho do aluno, podendo ser utilizado como referencial, tanto para o planejamento das aulas, quanto para o acompanhamento do trabalho pedagógico.

se alguns objetivos referentes à natureza comum das ondas, como que o educando:

- 61. Compreenda a onda como uma perturbação no tempo e no espaço que transporta energia sem transporte de matéria.[...]
- 63. Compreenda e explore os fenômenos de refração, difração e interferência, dentre outros, demonstrando conhecer as características ondulatórias das grandezas físicas, como comprimento de onda, velocidade, período, frequência e amplitude, bem como suas unidades de medida.

Conforme mencionado anteriormente, os documentos oficiais em destaque fundamentam a real necessidade do ensino de ondas mecânicas para o Ensino Médio. Contudo, considerando as proposições preconizadas nos documentos citados e acrescentando a importância para o ensino de Física, busca-se alternativas para o ensino do tema, por exemplo, de forma que haja motivação para aprender e desenvolver o conhecimento por parte do educando.

2.2 ALGUNS APARATOS EXPERIMENTAIS E INSTRUMENTOS MUSICAIS PARA O ENSINO DE FÍSICA

Para a elaboração e desenvolvimento desse trabalho, foi realizada pesquisa na literatura a fim de identificar trabalhos realizados relacionados com o tema. Identificou-se trabalhos realizados sobre o ensino de ondulatória para o Ensino Médio que empregam experimentos além de outros que fizeram uso de instrumentos musicais feitos a partir de materiais alternativos e/ou de baixo custo. Porém, em todos os trabalhos observou-se enfoques diferentes ao apresentado neste trabalho.

Nos projetos de extensão de Ignácio et al. (2012) e o artigo de Mello (2007) são apresentados montagens de experimentos de corda a partir de duas formas diferentes, fixando-se um arame em forma de laço ao alto-falante com Durepoxi e colocando-se um lápis preso na vertical na base do cone do alto-falante, respectivamente.

O experimento do pêndulo pode ser observado no trabalho apresentado pelo grupo PETFísica (2012) e no livro de Hewitt (2002). Enquanto, Hewitt (2002) apresenta uma imagem de um aparato utilizado para o estudo do

movimento de um pêndulo sobre uma base fixa e uma rolante, o grupo PETFísica trata a montagem de um aparato do pêndulo com materiais de baixo custo.

Em relação aos materiais desenvolvidos referentes ao tema abordado, Costa; Krummenauer e Pasqualetto (2009) aplicaram um questionário prévio para investigar o conhecimento de música dos educandos e, posteriormente, os autores ensinaram alguns conceitos de ondas mecânicas com materiais como mola maluca e com vozes de cantores de um coral. No decorrer do processo foi solicitado que alguns educandos levassem instrumentos musicais e executassem determinadas notas musicais, seguidas de alguns conceitos e visualizações das notas em um programa de computador. Como atividade final, os educandos tiveram que produzir algum tipo de instrumento rústico e apresentar à turma.

No trabalho desenvolvido por Moura e Neto (2011), os autores propõem a montagens de instrumentos musicais, sendo um de sopro, um de cordas e um de percussão, bem como sugestões de utilização destes em sala de aula. Entre as sugestões têm-se: com o uso do violão pode ser trabalhada a percepção dos educandos sobre a relação entre o comprimento da corda e altura do som.

A dissertação realizada por Pereira (2013) traz um relato de experiência, onde o pesquisador produziu cinco aulas de acústica, levando em primeiro momento instrumentos musicais diversos para os educandos interagirem com os mesmos. Em seguida, foram abordados alguns conceitos e apresentado uma simulação computacional sobre interferência de onda usando o Physics Education Technology (PhET, 2015), da Universidade do Colorado. Uma vez abordada a parte teórica sobre as propriedades dos sons foi feita uma atividade com os educandos onde estes produziram instrumentos musicais diversos, feitos a partir de materiais de baixo custo. Para finalizar, houve a apresentação dos instrumentos por parte dos educandos e a análise harmônica dos mesmos a partir de um programa computacional.

Ribeiro Júnior e Crochik (2009) realizaram um projeto sobre o estudo da construção de escalas musicais e a construção de instrumentos pitagóricos e apresentaram uma proposta pedagógica para aplicação dos instrumentos em sala de aula. Em uma destas propostas, os autores sugerem a utilização dos

instrumentos construídos como complemento da pesquisa. O primeiro instrumento constituiu-se de um planetário, onde os educandos mudam o comprimento da corda, desenvolvendo a percepção musical dos mesmos em relação a sons mais agudos e mais graves e relacionando-os as frequências. Outra atividade proposta com o instrumento planetário consiste em deixá-lo com duas cordas, sendo uma com a metade do comprimento da outra, e verificar se os educandos entendem como sendo o mesmo som quando essas cordas são tocadas ao mesmo tempo. O segundo instrumento proposto é o de canos acoplados, podendo-se solicitar aos educandos para que juntem diversos canos e verifiquem que quanto maior o comprimento do cano mais grave fica o som.

Maeoca (2012), em sua dissertação, propôs a construção de um instrumento musical de sopro (flauta pan) e um de corda (violopão) com materiais alternativos, a fim de auxiliar os educandos na aprendizagem de conceitos físicos relacionados às ondas sonoras, em particular os conceitos de frequência e amplitude. A autora fez testes pilotos antes da aplicação em sala de aula a fim de analisar a viabilidade dos instrumentos e realizar possíveis mudanças.

2.3 APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA COMO MARCO REFERENCIAL TEÓRICO

A partir do exposto anteriormente, vislumbrou-se a possibilidade de alinhar e adequar uma proposta desta natureza com teorias de aprendizagem cognitivistas, em especial a Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel, onde suas particularidades são destacadas nesta Seção e que aparecem no decorrer do presente trabalho.

Na teoria de Ausubel a aprendizagem está focada no educando, partindo da premissa do que o mesmo já sabe, o professor tem como função identificar tal conhecimento e ensinar de acordo (MOREIRA, 1999). Nela, os conhecimentos prévios dos alunos devem ser valorizados, para que estes possam construir estruturas mentais que permitem descobrir e redescobrir outros conhecimentos. O que torna a aprendizagem prazerosa e eficaz (PELIZZARI, et. al., 2002).

Para Ausubel, para que ocorra a aprendizagem é imprescindível que o educando tenha uma pré-disposição para aprender, aliado ao conteúdo escolar a ser aprendido, o qual deve ser potencialmente significativo ao educando. Caso não ocorram estes dois momentos, o educando poderá apenas memorizar o conteúdo de maneira arbitrária e literal, nesse caso, a aprendizagem será mecânica (MOREIRA, 1999).

Além do material possuir significado, o mesmo deve estar linguisticamente de acordo com o aluno. Em um primeiro momento, se faz necessário conhecer a estrutura lógica da disciplina e, por sua vez, a estrutura psicológica do aluno na referida área de conhecimento (LAHERA; FORTEZA, 2006).

Contudo, ainda cabe ao professor diminuir a distância entre teoria e prática, levando o aluno a refletir a partir de sua realidade e seus anseios, ou seja, conduzir o aluno a imaginar-se como parte integrante do novo conhecimento, isto se faz necessário devido ao fato do educando frequentar a escola e ver o que aprende distante de sua realidade, considerado por este como pouco aproveitável perante suas necessidades cotidianas (PELIZZARI, et.al. 2002).

Para Ausubel, existem três tipos de aprendizagem significativa: a aprendizagem de representações, tipo mais básico, na qual o aprendiz relaciona os símbolos a seus significados, atribuindo significado ao símbolo; a aprendizagem de conceitos, ligada à representação de conceitos amplos (genéricos), os quais são classificados em categorias pelo aprendiz e o aprendiz torna-se capaz de fazer abstrações a partir de símbolos, ou seja, é capaz de representar o símbolo, deslocando-o do seu real significado, utilizando-o para outros fins; e a aprendizagem de proposições, a qual é relativa à aprendizagem dos significados das ideias a partir de proposições. (LAHERA; FORTEZA, 2006; BESSA, 2008).

Além dos tipos de aprendizagem significativa exposto anteriormente, Ausubel procurou classificá-las por força de atração organizativa, as quais podem ser de três formas diferentes: por subordinação, a qual ocorre quando a nova ideia ou informação tem relação com algo que se sabe previamente, ou seja, a nova informação torna-se significativa por meio de ancoragem com subsunçores; por superordenação, quando a nova ideia, ou seja, proposição ou

conceito, a ser aprendida é mais geral e inclusiva do que uma ideia ou um conjunto de ideias ou conceitos que se sabe previamente, há uma relação de superordenação entre a ideia a ser aprendida e as ideias mais específica; e de forma combinatória, que acontece quando a nova ideia, principalmente proposição, não apresenta relação de subordinação ou superordenação com ideias da estrutura cognitiva à qual ela se relacionou de forma não-arbitrária e lógica, ou seja, a nova proposição se relaciona de forma geral à estrutura cognitiva (CRUZ, s/d; BESSA, 2008).

Na teoria da aprendizagem significativa de Ausubel há dois processos que acontecem durante as aprendizagens significativas anteriormente citadas: o processo de diferenciação progressiva e o processo de reconciliação integrativa. No que se refere à diferenciação progressiva, esta diz respeito à modificação do conceito subsunçor presente na estrutura do educando quando uma nova ideia, conceito ou proposição, é aprendido por subordinação. Assim, a diferenciação progressiva é um processo que está relacionado à aprendizagem significativa subordinada. Por outro lado, a reconciliação integrativa acontece quando ideia, conceito ou proposição, a ser aprendida se dá por meio de superordenação ou mesmo por meio de combinação de ideia, proposição ou conceito, presente na estrutura cognitiva. A reconciliação integrativa é definida como um processo que reorganiza a estrutura cognitiva com base nas novas aprendizagens relacionadas umas com as outras, o que lhe atribui novos significados gerados a partir de sucessivos processos de assimilação, ou seja, a partir da alteração, reorganização ocorrida nos conhecimentos prévios com a introdução de um novo conceito (BESSA, 2008).

2 ONDAS MECÂNICAS E INSTRUMENTOS MUSICAIS DE CORDAS

O presente capítulo tem por objetivo apresentar os conceitos físicos relacionados às ondas mecânicas e aos instrumentos musicais de cordas os quais são abordados no Capítulo 3 do Produto.

3.1 INSTRUMENTOS MUSICAIS DE CORDAS

Ao manusear algum instrumento musical de corda tentando tocar algum som, é possível perceber que existe mais de uma maneira de se produzir som nele, ou seja, a produção do som pode ser feita puxando a corda para baixo e a soltando (dedilhando) como em um violão, ou atritar um arco às cordas de um violino e estas entrar em vibração, ou até mesmo percutindo a corda com um pedaço de madeira, por exemplo, como ocorre com o berimbau. Desta forma, os instrumentos de cordas são divididos em três categorias, de acordo com a forma com que o som é produzido, que podem ser: instrumentos de cordas friccionadas, instrumentos de cordas percutidas e instrumentos de cordas dedilhadas.

Os instrumentos de cordas friccionadas têm a produção do som realizada a partir do atrito entre a corda do instrumento e uma cerda, sendo esta, normalmente confeccionada com crina ou calda de cavalo. A família deste tipo de instrumento é constituída por quatro membros: violino, viola, violoncelo e contrabaixo, e a produção do som nestes instrumentos ocorre segundo um processo de “prende-desliza”. Ao passar o arco sobre a corda, ocorre o deslocamento da mesma por aproximadamente 1 mm onde a força restauradora aumenta até que a força de atrito é vencida e a corda liberada, em seguida, prende-se novamente em um ponto mais à frente, recomeçando o ciclo, o qual é repetido na frequência da nota tocada (DONOSO, et al. 2008).

De outra forma, os instrumentos de cordas percutidas se referem aos instrumentos cujo o som é produzido a partir da vibração das cordas após estas serem percutidas por baquetas ou martelos, onde o som se inicia bruscamente e, quando a corda não é abafada, tem longa duração. Geralmente, se utiliza o método da percussão em instrumentos que possuem uma corda para cada nota e não há a necessidade de se utilizar uma das mãos

para controlar o comprimento da corda, tendo, desta forma, as duas mãos livres para se controlar as baquetas ou o teclado. Além disso, a intensidade das notas é controlada pela força da batida (CAMPAGNOLI, 2014; GABRIEL, 2016).

O piano é o principal instrumento da categoria dos instrumentos de cordas percutidas, onde em sua forma moderna possui 88 teclas que controlam um sofisticado sistema de martelos para percutir as cordas de cada nota de maneira independente (GABRIEL, 2016).

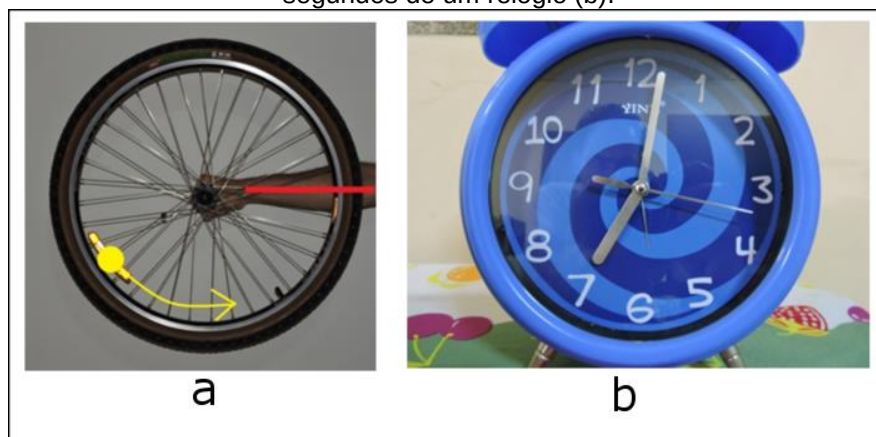
Por fim, os instrumentos de cordas dedilhadas produzem o som a partir da vibração das cordas após serem dedilhadas pelos dedos ou por palhetas. Para a produção do som nestes instrumentos, a corda é levemente deslocada de sua posição de repouso e depois solta, onde a mesma vibra livremente. Esta forma de execução faz com que o som se inicie bruscamente com um som forte, de curta duração, porém a corda mantém a vibração por um longo intervalo de tempo decaindo lentamente até o silêncio (CAMPAGNOLI, 2014; GABRIEL, 2016).

3.2 MOVIMENTO PERIÓDICO

A produção do som nos instrumentos musicais, seja de corda, sopro ou percussão, geralmente é feita a partir de repetições regulares de batidas, por exemplo, nas cordas do instrumento. Na Física, a repetição regular de um movimento ou batida denomina-se de movimento periódico, onde o intervalo de tempo entre as batidas é sempre o mesmo.

Esta repetição de movimentos é observada em várias situações do cotidiano como as que são apresentadas na Figura 3.1, ou seja, como o rodar dos pneus de uma bicicleta (Figura 3.1a) ao observar o ponto demarcado na roda passar por uma linha de referência como o braço da pessoa, por exemplo, ou até mesmo como os ponteiros de um relógio (Figura 3.1b) ao se observar os ponteiros dos segundos realizar uma volta completa a partir do número 12, por exemplo.

Figura 3.1 – O movimento de uma roda de bicicleta (a) e o movimento do ponteiro dos segundos de um relógio (b).



Fonte: O autor.

Do conceito de movimento periódico, é possível analisar duas propriedades físicas importantes: o período (T), que é o intervalo de tempo entre duas repetições simultâneas, medida em segundos, por exemplo: o período do ponteiro dos segundos de um relógio é $T = 60\text{s}$. A frequência (f), que é o número de vezes que esta repetição ocorre em um determinado intervalo de tempo. Por exemplo, uma roda de bicicleta que realiza 30 revoluções em um tempo de 10 s, possui uma frequência $f = 3\text{ s}^{-1}$.

A unidade de medida de frequência s^{-1} por ser muito utilizada é denominado de hertz, cujo símbolo é Hz, e foi assim designada em homenagem ao físico alemão Heinrich Hertz (1857-1898), um pioneiro nas investigações das ondas eletromagnéticas (YOUNG; FREEDMAN, 2003).

3.3 PÊNDULO SIMPLES

Galileu Galilei (1564 - 1642) físico, astrônomo, matemático e filósofo italiano sempre foi muito dedicado aos estudos sobre os movimentos dos corpos e segundo a história, em um desses estudos, estava observando as oscilações de um lustre da Catedral de Pisa quando teve a ideia de fazer medidas do tempo de oscilação. Porém, como ainda não existia o relógio, ele as fez comparando com os batimentos do seu pulso e verificou que mesmo quando as oscilações ficavam cada vez menores o tempo das oscilações permanecia sempre o mesmo. Ao repetir o experimento em sua casa, Galileu

verificou que o tempo das oscilações dependia apenas do comprimento do fio (CRUZ, et al., 2012).

Ao mecanismo onde se tem uma massa presa a um fio, como o lustre estudado por Galileu, ligeiramente deslocado de sua posição de equilíbrio e solto em seguida entrando em movimento oscilatório, denomina-se pêndulo. O modelo de pêndulo mais simples para efeitos de estudo é denominado pêndulo simples, composto por um sistema constituído de um corpo puntiforme com determinada massa e suspenso por um fio ideal, ou seja, inextensível e com massa desprezível, com determinado comprimento e que executa oscilações desenvolvendo pequenos deslocamentos, desprezando as possíveis resistências, como a do ar e atrito, e realiza um movimento periódico (ARNOLD, et al., 2011; TIPLER; MOSCA, 2009; HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

O aparato mostrado na Figura 3.2, utilizado no desenvolvimento desse trabalho, é a representação de um pêndulo. Ele é, constituído de um corpo de certa massa colocada para balançar na extremidade de um fio longo. A massa constitui-se de uma garrafa pet que possui um líquido colorido no seu interior e um pequeno orifício em sua tampa. O sistema apresentado pode ser considerado, de forma aproximada, como sendo a representação de um pêndulo simples, ou seja, um sistema constituído por um corpo puntiforme e suspenso por um fio inextensível e de massa desprezível (YOUNG; FREEDMAN, 2003).

Sabe-se que ao deslocar a massa do pêndulo em um pequeno ângulo θ a partir do ponto de equilíbrio, esta fica sujeita à força restauradora causada pela gravidade, que faz com que a massa quando solta, comece a balançar para lá e para cá, com um período T (TIPLER; MOSCA, 2009; YOUNG; FREEDMAN, 2003).

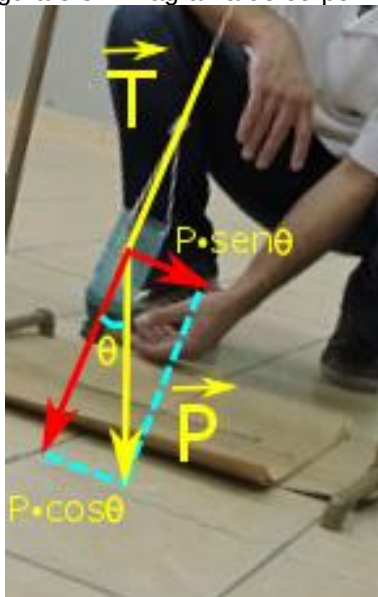
As forças que atuam sobre o pêndulo são o peso do corpo pendurado e a tensão sobre o fio. A Figura 3.3 representa diagrama do corpo livre, com sua respectiva decomposição. Vale ressaltar que o ângulo representado na Figura 3.3 foi ajustado de forma exagerada para melhor visualização das componentes das forças (TIPLER; MOSCA, 2009).

Figura 3.2 – A representação, de forma aproximada, de um pêndulo simples.



Fonte: O autor.

Figura 3.3 – Diagrama do corpo livre.



Fonte: O autor.

Como é possível observar na Figura 3.3, a componente da força peso dada por $(P \cdot \cos\theta)$ se anula com a força de tração do fio (T) ambas na mesma direção e sentidos opostos e tomadas em módulo, de forma que única componente que pode causar o movimento oscilatório é a força restauradora $(P \cdot \sin\theta)$ também tomada em módulo. Assim,

$$F = -P \cdot \sin\theta, \quad (3.1)$$

onde o sinal negativo da equação é relativo à ação de tentar manter o corpo em seu estado inicial de repouso, no centro da trajetória descrita pelo movimento, ou seja, devido a força restauradora, que não é proporcional ao ângulo θ , mas sim ao seno deste ângulo. Desta forma, o movimento do pêndulo não é um movimento harmônico simples. Porém, quando o ângulo θ é pequeno, o seno deste ângulo é aproximadamente igual ao ângulo, medidos em radianos (TIPLER; MOSCA, 2009; YOUNG; FREEDMAN, 2003).

A Figura 3.4 mostra duas imagens superpostas do aparato experimental utilizado em sala de aula, onde é possível observar o fio estendido em seu ponto de equilíbrio por meio da linha pontilhada e o mesmo fio fazendo um pequeno ângulo θ em relação ao ponto de equilíbrio. Ressaltando que o deslocamento y apresentado é justificado pelo fato do pêndulo estar oscilando sobre o eixo y e demarcado no papel logo abaixo do mesmo. O deslocamento y é a projeção do arco produzido pela oscilação do pêndulo, porém, como esta oscilação é pequena, pode-se dizer que o tamanho do arco é aproximadamente igual ao deslocamento y marcado no papel.

Figura 3.4 – Superposição de duas imagens para observar o ângulo formado entre o ponto de equilíbrio e o seu deslocamento.



Fonte: O autor.

Considerando a aproximação descrita anteriormente para o ângulo, ou seja ($\sin\theta \approx \theta$), a equação 3.1 pode ser reescrita como

$$F = -P \cdot \frac{y}{L} ,$$

e sabendo que $P = mg$, tem-se

$$F = -mg \cdot \frac{y}{L},$$

onde é possível observar que a força restauradora é proporcional à coordenada y , para pequenos deslocamentos e a constante da força é dada por $k = \frac{mg}{L}$.

A partir das equações da frequência angular ($\omega = \sqrt{k/m}$), frequência ($f = \omega/2\pi$) e período ($T = 2\pi/\omega$), é possível expressar o período de um pêndulo simples, válido para pequenos deslocamentos angulares, de acordo com a equação (3.2) (TIPLER; MOSCA, 2009; YOUNG; FREEDMAN, 2003), dada a seguir,

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad , \quad (3.2)$$

onde T é o período do movimento, L é o comprimento do pêndulo e g é a aceleração da gravidade.

3.4 MOVIMENTO HARMÔNICO SIMPLES

Movimento periódico, ou movimento harmônico é todo o movimento que se repete em intervalos iguais de tempo e, quando o deslocamento y de uma partícula em relação ao ponto de equilíbrio em função do tempo obedece à equação 3.3,

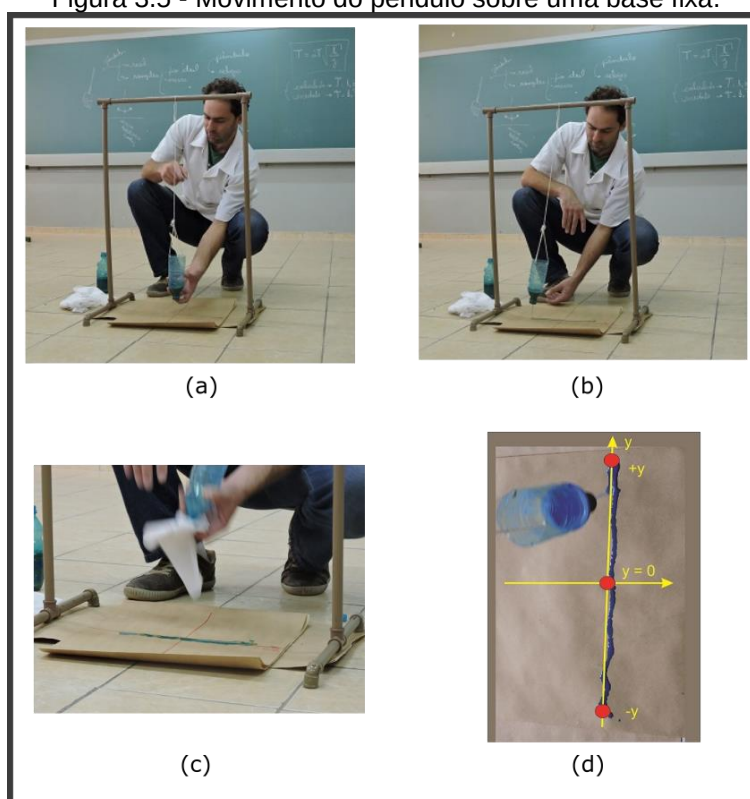
$$y(t) = y_m \cos(\omega t + \phi) \text{ (deslocamento)}, \quad (3.3)$$

este é denominado movimento harmônico simples (MHS), onde y_m , ω e ϕ são constantes (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

Pode-se considerar, por exemplo, o pêndulo apresentado na Figura 3.2, considerando as devidas aproximações, quando em movimento, representa MHS. Ao colocar o líquido colorido no interior da garrafa e fazer o pêndulo oscilar com um pequeno ângulo, abrindo o orifício da tampa da garrafa, o

líquido irá marcar o papel sob o pêndulo com o líquido, produzindo um segmento de linha reta, como mostrado no procedimento realizado na Figura 3.5, onde é possível observar em: (a) a colocação do líquido na garrafa pet; em (b), deslocamento da garrafa pet de um pequeno ângulo em relação ao ponto de equilíbrio e depois solta, ou seja, produção da oscilação, deixando o líquido demarcar o papel; em (c) apresenta o desenho demarcado pelo líquido após algumas oscilações; e em (d) é apresentado a demarcação no papel olhando de cima sob um sistema de eixos (xy).

Figura 3.5 - Movimento do pêndulo sobre uma base fixa.



Fonte: O autor.

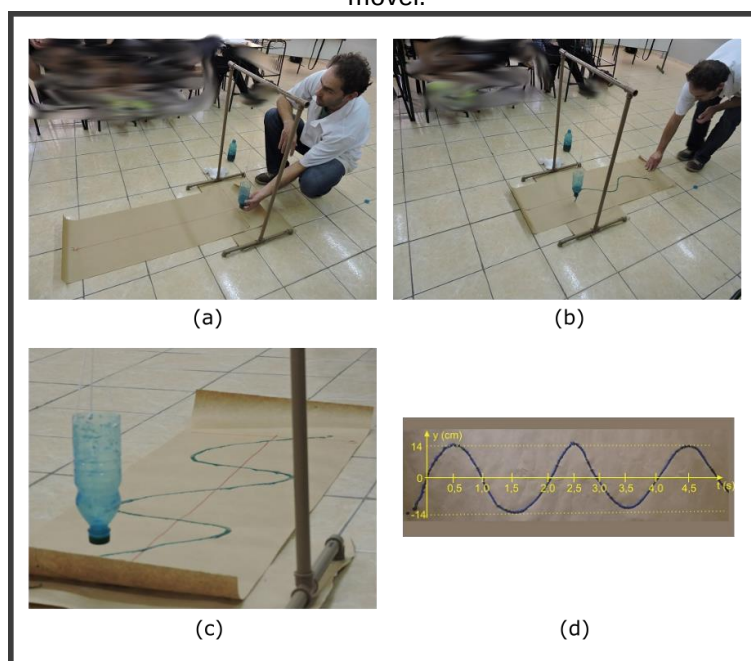
Observando a projeção do movimento do pêndulo sobre o papel produzida pelo líquido colorido, representado na Figura 3.5(d), é possível analisar a posição do pêndulo enquanto oscila em torno da origem do eixo y. Neste caso, têm-se três momentos distintos: o ponto ($y = 0$) refere-se ao instante em que o pêndulo está sobre o ponto de equilíbrio; o ponto ($+y$) representa o instante em que o pêndulo está com o seu deslocamento máximo para cima, a partir do seu ponto de equilíbrio, e o ponto ($-y$) representa o

instante em que o pêndulo está com seu deslocamento máximo para baixo a partir do seu ponto de equilíbrio (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

Ao deslocamento máximo do pêndulo para qualquer um dos sentidos de oscilação dá-se o nome de amplitude (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

Quando o papel sob o pêndulo é puxado com velocidade aproximadamente constante, como representado na Figura 3.6, é obtido um padrão ondulatório de forma senoidal, onde se tem: em (a) o preparo do experimento; em (b) produção da oscilação do pêndulo ao mesmo tempo em que o papel sob o pêndulo é deslocado com velocidade aproximadamente constante, deixando cair líquido colorido no mesmo; em (c) o resultado final do movimento do pêndulo, onde pode ser verificada a marcação no papel cujo formato é senoidal e em (d) é apresentado a demarcação no papel olhando de cima sob um sistema de eixos da posição em y em função do tempo.

Figura 3.6 - A representação do movimento do pêndulo oscilando sobre uma base móvel.

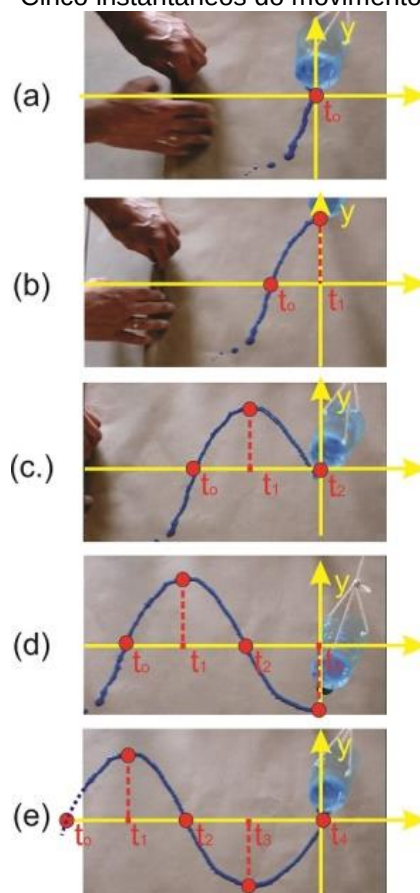


Fonte: O autor.

A Figura 3.7 representa o movimento do pêndulo em relação ao tempo, mantendo o referencial no ponto fixo na posição de equilíbrio do pêndulo, onde este fica parado e são tirados cinco instantâneos do movimento do mesmo. É possível observar que em 3.7(a) tem-se a representação do tempo inicial da observação (t_0), onde o elemento do pêndulo está com um deslocamento $y=0$.

No instantâneo 3.7(b), momento t_1 , o pêndulo se encontra em seu deslocamento extremo para cima (denominado pico). Em 3.7(c), momento t_2 , o pêndulo desce novamente para $y=0$. No quarto instantâneo 3.7(d), momento t_3 , o pêndulo está com seu deslocamento extremo para baixo (denominado vale) e no quinto instantâneo 3.7(e), momento t_4 , o pêndulo está novamente em $y=0$, completando o ciclo de oscilação e recomeçando o movimento (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

Figura 3.7 – Cinco instantâneos do movimento do pêndulo.



Fonte: O autor.

Ao analisar a Figura 3.6(d), da posição do pêndulo em y em função do tempo, é possível observar que a posição em y fornece a oscilação do pêndulo entre um valor máximo e um mínimo, o que pode facilmente ser observado comparando-se com as Figuras 3.5(d) e 3.7.

Buscando uma comparação da Figura 3.6(d) com a análise feita anteriormente referente à Figura 3.5(d), é possível analisar a partir do Quadro 3.1 a posição do pêndulo em função do tempo.

Quadro 3.1 – Posição do pêndulo em função do tempo.

instante	tempo (s)	deslocamento máximo em y (cm)
t_0	0	0
t_1	0,5	14
t_2	1,0	0
t_3	1,5	-14
t_4	2,0	0

Fonte: O autor.

Como o MHS é um movimento periódico, é possível atribuir a este tipo de movimento um período (T), o qual é definido como sendo o intervalo de tempo necessário para o pêndulo realizar uma oscilação completa (ou um ciclo). Desta forma, é possível perceber que o período do movimento na Figura 3.6(d) é de 2,0 s (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

Outro elemento importante que caracteriza o MHS é a sua frequência (f), onde indica o número de oscilações completas que o pêndulo realiza por segundo (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

Desta forma, ao escolher o número de oscilações completas e dividir pelo tempo que o pêndulo levou para realizá-las, é possível estimar a frequência descrita pelo seu movimento a partir da Figura 3.6(d), o qual é de:

$$f = \frac{2}{4} = \frac{1}{2}$$

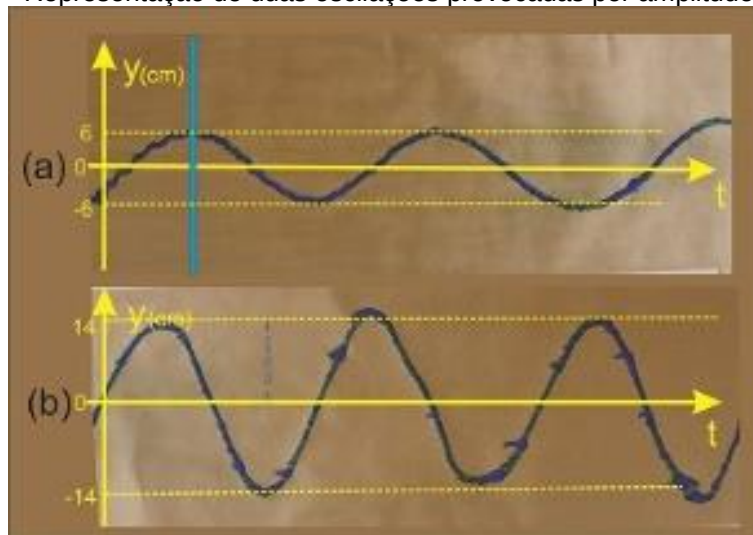
$$f = 0,5 \text{ Hz}$$

Como mencionado anteriormente, ao deslocamento máximo de oscilação do pêndulo em relação ao ponto de equilíbrio tem-se a amplitude do movimento e, ao analisar a Figura 3.6(d), tem-se que a amplitude de oscilação do pêndulo naquele movimento é de $A = 14 \text{ cm}$.

Quando o pêndulo é deslocado em ângulos diferentes a partir do seu eixo de equilíbrio, este possuirá amplitudes diferentes. A Figura 3.8 representa a realização do procedimento feito na Figura 3.6, mostrando a marcação feita

pelo líquido colorido no papel sob o pêndulo a partir de: em (a) um ângulo de deslocamento menor a partir do ponto de equilíbrio e em (b), um ângulo de deslocamento maior a partir do ponto de equilíbrio, portando com um MHS de amplitudes diferentes.

Figura 3.8 – Representação de duas oscilações provocadas por amplitudes diferentes.



Fonte: O autor.

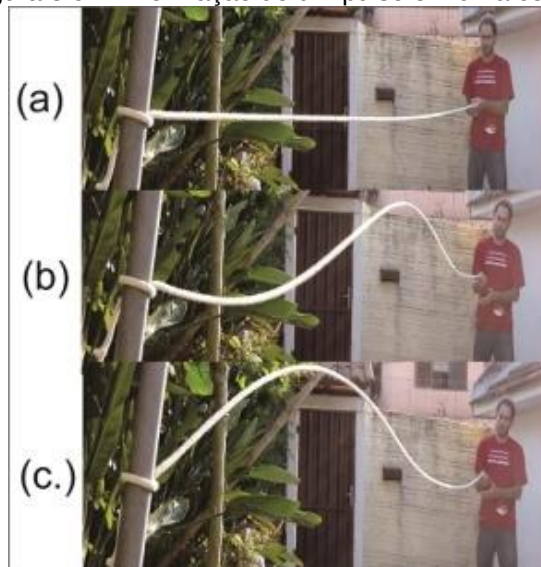
3.5 PULSO

Um pulso é uma distorção da forma de uma corda, por exemplo, o qual se propaga ao longo da corda com velocidade v (em módulo). O pulso realizado em uma corda esticada é a forma mais simples de ondas mecânicas, onde ao dar uma sacudida na extremidade da corda, um pulso se propaga através da sua extensão (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

A formação e propagação de um pulso se dá porque a corda está sob tensão, e ao puxar a extremidade da corda, esta transfere energia para sua parte vizinha. A parte vizinha, por sua vez, transfere energia para a próxima, e assim por diante. Enquanto isto ocorre, ao puxar a extremidade para baixo, as partes da corda que estão se deslocando para cima começam a ser forçadas a se mover para baixo. A Figura 3.9 apresenta a formação e transmissão de um pulso em uma corda tensionada, onde em 3.9(a) é mostrada a corda presa em uma das extremidades e tensionada em outra extremidade com determinada força F (em módulo); em 3.9(b), é dada uma sacudida na corda, tendo a

formação de um pulso e em 3.9(c), é mostrado o pulso se propagando pela extensão da corda (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

Figura 3.9 – A formação de um pulso em uma corda.



Fonte: O autor.

3.5.1 Velocidade de um pulso

A velocidade com a qual um pulso se propaga depende da força com a qual é puxada a corda (força de tração) e da densidade linear da corda. É possível calcular a velocidade da corda por meio da equação 3.4 (TIPLER; MOSCA, 2009).

$$v = \sqrt{\frac{\tau}{\mu}} \quad (3.4)$$

A tração da corda pode ser aferida a partir de um dinamômetro e a densidade linear da corda pode ser calculada por meio da equação 3.5,

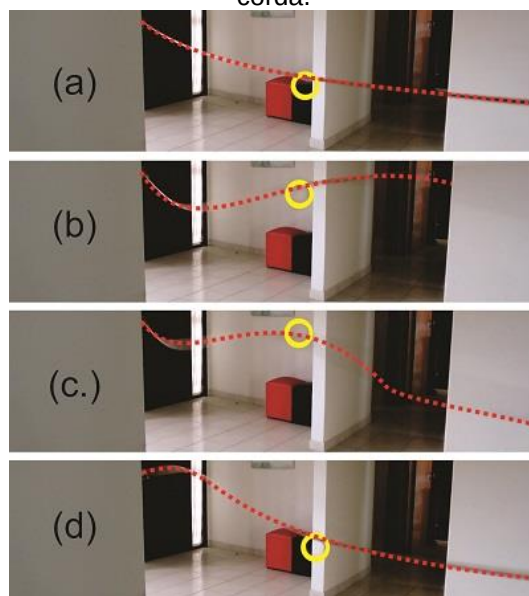
$$\mu = \frac{m}{l} \quad , \quad (3.5)$$

onde m é a massa da corda e l é o comprimento da corda.

3.5.2 Transporte de energia sem transporte de matéria

Ao aplicar um pulso em uma corda, este irá se propagar através dos pontos da mesma. Porém, se existir algo sobre a corda, ao passar o pulso, este não acompanhará o seu movimento. Isto é, ao pulso passar pelo objeto, este subirá e descenderá, acompanhando o ponto da corda logo abaixo dele, porém, após a passagem do pulso, o objeto permanecerá na mesma posição em que se encontrava antes da passagem do pulso. Ou seja, um pulso irá transportar energia através da corda, porém não irá transportar matéria. A Figura 3.10 representa uma situação onde uma argola está: em (a) em repouso sobre a corda, em (b) o pulso encontrando com a argola e esta iniciando a subida, em (c) a argola no ponto mais alto (pico) do pulso e em (d), logo após a passagem do pulso, a argola na posição igual à que se encontrava antes da passagem do pulso (YOUNG; FREEDMAN, 2003).

Figura 3.10 – Demonstração do transporte de energia sem o transporte e matéria em uma corda.



Fonte: O autor.

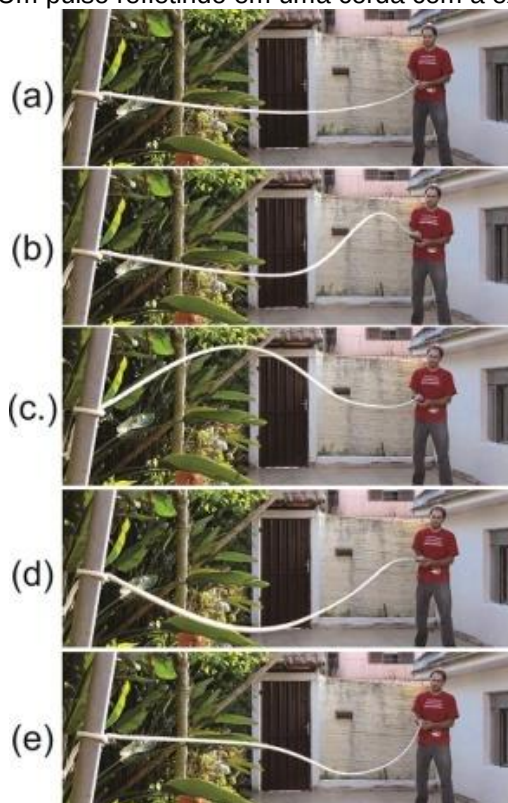
3.5.3 Reflexão de um pulso

Ao ser produzido um pulso em uma corda, este irá viajar pela corda até chegar à outra extremidade. Neste momento, ele irá sofrer reflexão e retornar no sentido contrário. A extremidade oposta da corda pode estar em duas

condições: fixa e imóvel em um anteparo, ou fixa em uma argola, e esta pode se mover livremente para cima ou para baixo.

Quando a extremidade é fixa no anteparo, ao pulso chegar na extremidade da corda, este irá exercer uma força para cima sobre o anteparo e, de acordo com a Terceira Lei de Newton, o anteparo irá exercer uma força oposta, de mesmo módulo sobre a corda. Esta força irá produzir um pulso que se propaga no sentido oposto ao pulso incidente. A Figura 3.11 apresenta em (a) uma corda esticada, fixa em sua extremidade, em (b) um pulso sendo produzido, em (c) o pulso chegando à extremidade da corda, em (d) o pulso sendo refletido e em (e) o pulso viajando pela corda na direção oposta à inicial e sentido contrário ao pulso incidente (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

Figura 3.11 – Um pulso refletindo em uma corda com a extremidade fixa.

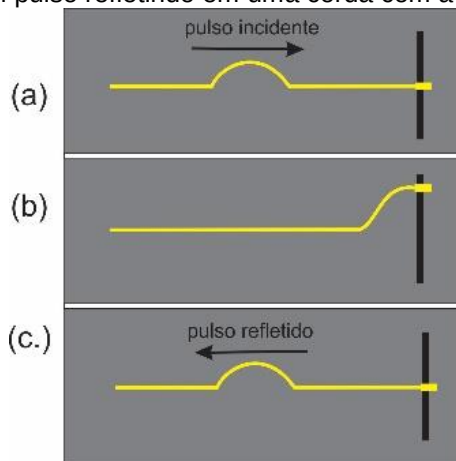


Fonte: O autor.

Quando a extremidade da corda está fixa em uma argola que possa deslizar livremente sobre uma barra, ao pulso chegar à extremidade da corda, a argola irá se deslocar para cima ao longo da barra, puxando e esticando a corda, produzindo um pulso refletido com mesmo sentido do pulso incidente. A Figura 3.12 representa um pulso em (a) incidindo em direção à extremidade de

uma corda presa a uma argola, em (b) a argola deslizando para cima na barra e em (c) o pulso refletido, viajando com mesmo sentido do pulso incidente.

Figura 3.12 – Um pulso refletindo em uma corda com a extremidade livre.



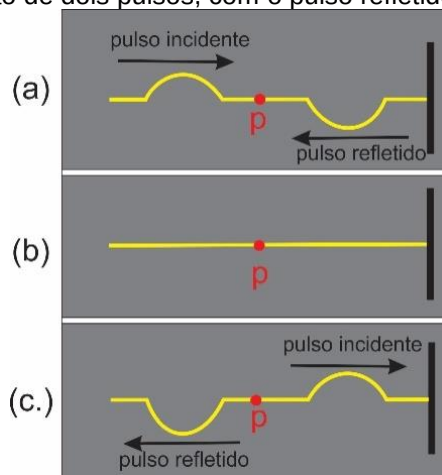
Fonte: O autor.

3.5.4 Superposição entre dois pulsos

Quando dois pulsos viajam em uma corda e em sentidos opostos, ao se encontrarem em um determinado ponto, de forma que ocupem a mesma região da corda, ocorre a superposição deles.

No caso de uma corda em que se tem a extremidade fixa, onde o pulso refletido retorna em direção oposta ao pulso incidente, ao se encontrarem em determinada região da corda, os pulsos se cancelam, ou seja, o deslocamento do ponto da corda em relação à posição de equilíbrio é zero. A Figura 3.13 apresenta em (a) dois pulsos, um incidente e outro refletido, em uma corda com a extremidade fixa, em (b) ocorre a superposição dos dois pulsos, resultando em deslocamento nulo do ponto P na corda e em (c), após a passagem do pulso por aquele ponto, os pulsos continuam a se deslocar pela corda normalmente (KELLER; GETTIS; SKOVE, 1999).

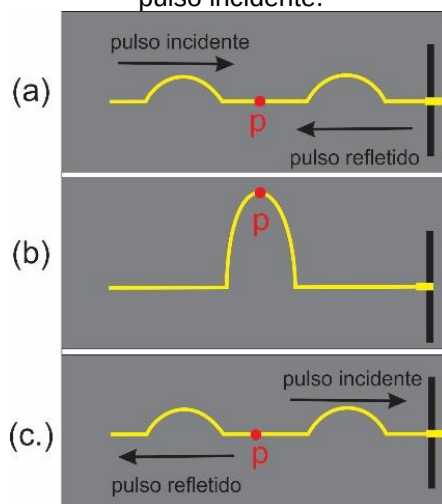
Figura 3.13 – A superposição de dois pulsos, com o pulso refletido invertido ao pulso incidente.



Fonte: O autor.

Quando os pulsos viajam em uma corda com a extremidade livre, o pulso refletido terá a mesma direção que o pulso incidente. Neste caso, os pulsos ao se encontrarem em determinada região da corda, o deslocamento máximo relativo à superposição dos pulsos é referente à soma dos deslocamentos máximos que cada pulso possui isoladamente. A Figura 3.14 apresenta em (a) dois pulsos, um incidente e outro refletido, em uma corda com a extremidade livre, (b) ocorre a superposição dos dois pulsos, resultando em deslocamento máximo no ponto P, relativo à soma dos deslocamentos de cada pulso e em (c), após a passagem do pulso por aquele ponto, os pulsos continuam a se deslocar pela corda normalmente (KELLER; GETTIS; SKOVE, 1999).

Figura 3.14 – A superposição de dois pulsos, com o pulso refletido com a mesma direção ao pulso incidente.



Fonte: O autor.

3.6 ONDAS

O estudo das ondas constitui um dos principais assuntos da Física. Sua compreensão se faz necessária para o entendimento de ondulatória, óptica física e eletromagnetismo. Uma onda é definida como sendo uma perturbação que se propaga no vácuo e em meios materiais, a qual pode ser classificada em ondas mecânicas, que são ondas que necessitam de um meio material para se locomover ou ondas eletromagnéticas, as quais não necessitam de um meio material para se locomover. Além disso, as ondas também são classificadas de acordo com a sua direção de propagação em relação à perturbação, as quais podem ser longitudinal, quando a direção de vibração é paralelo à direção de propagação da onda ou transversal, quando a direção de vibração é perpendicular à direção de propagação da onda (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

No presente trabalho será dado ênfase às ondas transversais, como a onda produzida na corda mostrada da Figura 3.15, que ao ser agitada para cima e para baixo, repetidas vezes, produz uma onda transversal.

Figura 3.15 – Uma corda sendo agitada repetidas vezes, produzindo um padrão ondulatório.

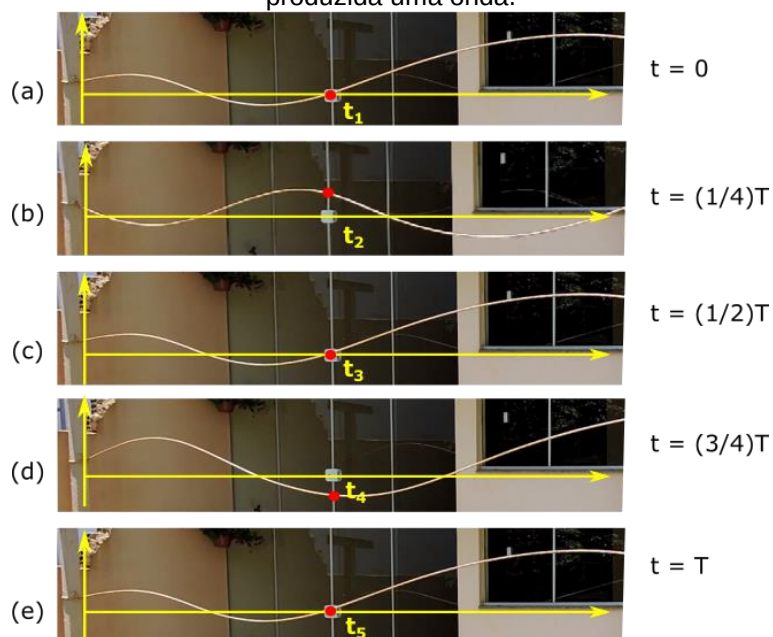


Fonte: O autor.

Ao se observar um ponto específico de uma corda que realiza um movimento oscilatório para cima e para baixo, é possível observar que este ponto realiza um Movimento Harmônico Simples, transversal à direção de propagação da onda, o que é possível ser observado na Figura 3.16, em que se tem uma onda transversal sendo formada em uma corda.

Ainda na Figura 3.16, foi colocado um sistema de coordenadas xy em que é possível observar um ponto demarcado na corda, em vermelho, realizando um movimento completo referente a uma oscilação (YOUNG; FREEDMAN, 2003).

Figura 3.16 – Os instantâneos do movimento de um ponto específico de uma onda onde é produzida uma onda.



Fonte: O autor.

A partir dos cinco instantâneos apresentados na Figura 3.16, observa-se que o ponto da corda demarcado com um círculo vermelho não se desloca no eixo x , mas sim na vertical, ou seja, somente apresenta mudança de posição em relação ao eixo y . Neste caso, é possível observar que: em (a) o ponto se encontra em $y = 0$, ou seja, neste instantâneo ele tem deslocamento zero em relação ao eixo y ; em (b) o ponto está na posição $y = +y_{\text{max}}$ para cima, ou seja, neste instantâneo ele tem deslocamento máximo para cima; em (c) o ponto se encontra em $y = 0$ novamente, ou seja, neste instantâneo ele tem deslocamento zero; em (d) o ponto está na posição $y = -y_{\text{max}}$ para baixo, ou seja, neste instantâneo ele tem deslocamento máximo para baixo; em (e) o ponto se encontra em $y = 0$ mais uma vez, ou seja, neste instantâneo ele tem deslocamento zero (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

Assim, depois de completar uma subida e uma descida, o ponto volta à posição inicial, isto é, ele oscila periodicamente em uma linha reta na direção vertical, paralela ao eixo y e em torno do ponto de equilíbrio. Caso semelhante ao observado em relação ao ponto vermelho na corda foi apresentado na Figura 3.5 (d), relativo ao movimento do pêndulo imprimindo uma linha reta sobre um papel parado.

Ainda em relação aos instantâneos do ponto em vermelho da corda, apresentados na Figura 3.16, ao se fazer uma comparação com a Figura 3.7,

supondo possível registrar o movimento do ponto da corda marcado em vermelho em função do tempo, esse registro seria uma curva de mesmo formato, ou seja, em ambos os casos tem-se curvas senoidais.

A Figura 3.17 apresenta o instantâneo de uma onda sendo produzida em uma corda, de modo que é possível definir algumas grandezas que caracterizam a onda através da corda.

Ao observar a Figura 3.17, têm-se três pontos demarcados: a , b e c . O ponto b , o qual tem o seu deslocamento máximo para cima a partir da sua posição de equilíbrio, é um ponto de máximo positivo, o qual é denominado de crista da onda. Por outro lado, os pontos a e c , que têm o seu deslocamento máximo para baixo a partir de sua posição de equilíbrio, são pontos de máximo negativo e são denominados de vales da onda.

Figura 3.17 – A representação de um instantâneo de uma onda em uma corda e pontos importantes para definição de grandezas que a caracterizam.



Fonte: O autor.

Ainda no que se refere à Figura 3.17, a distância entre o ponto de referência e uma crista de uma onda (ponto a), ou entre o ponto de referência e um vale (ponto b e c), é definida como amplitude da onda, representado pela letra A . (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

Por fim, a Figura 3.17 permite definir outra grandeza física: comprimento de onda, representado pela letra grega λ , que consiste na distância entre duas repetições (KELLER; GETTIS; SKOVE, 1999), por exemplo, dois vales, como representados pelos pontos a e c .

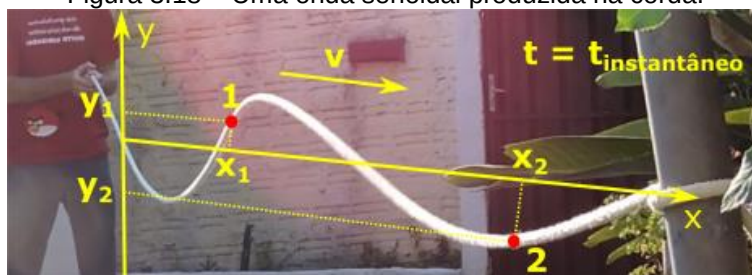
Ao se generalizar o movimento apresentado para o ponto em vermelho abordado para a Figura 3.16 para todos os pontos da corda a qualquer tempo é possível descrever a forma da onda se propagando em uma corda, a qual é dada pela função senoidal que está indicada na equação 3.6,

$$y(x,t) = y_m \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - ft \right), \quad (3.6)$$

em que $y(x,t)$ representa o deslocamento transversal de qualquer ponto da corda, em qualquer tempo; λ é o comprimento de onda; f é a frequência linear do movimento ondulatório, o qual é um MHS.

Ao imaginar uma onda senoidal percorrendo uma corda como a apresentada na Figura 3.18, a qual consiste em um instantâneo de uma onda produzida nesta corda, esta onda se propaga no sentido positivo do eixo x com velocidade v , assumindo em cada instante a forma semelhante como mostrada na referida figura.

Figura 3.18 – Uma onda senoidal produzida na corda.



Fonte: O autor.

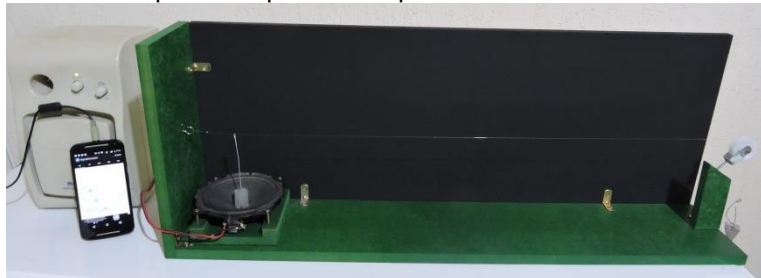
Se for escolhido um ponto da corda representado na Figura 3.18 e marcá-lo com um círculo em vermelho, em um determinado instante t , que no caso é o tempo em que foi tirada a foto (instantâneo), o deslocamento y do ponto marcado da corda situado na posição x é dado pela equação 3.6.

Assim, como a equação 3.6 está escrita em termos da posição x , ela pode ser usada para calcular os deslocamentos de todos os elementos da corda para qualquer tempo. Pode-se observar que o ponto da corda demarcado como x_2 , para o mesmo instantâneo, tem um $y = y_2$. Portanto, é possível dizer qual é a posição da onda em qualquer instante de tempo e como esta forma varia quando a onda se move ao longo da corda (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

3.7 ONDAS ESTACIONÁRIAS

Ao usar um aparato, como o mostrado na Figura 3.19, o qual é constituído por um gerador de frequência, acoplado a um alto falante que está preso por um arame até uma corda tensionada, e atribuir uma determinada frequência, a corda irá vibrar.

Figura 3.19 – Um aparato experimental para o estudo de ondas estacionárias.



Fonte: O autor.

A corda do aparato é presa em uma extremidade e tensionada por uma massa presa à outra extremidade. Como a corda está tocando uma roldana próximo à extremidade em que está posta a massa, esta se comporta como uma corda com as extremidades fixas, como visto na seção 3.5.

A vibração proporciona pulsos na corda com uma velocidade dada por

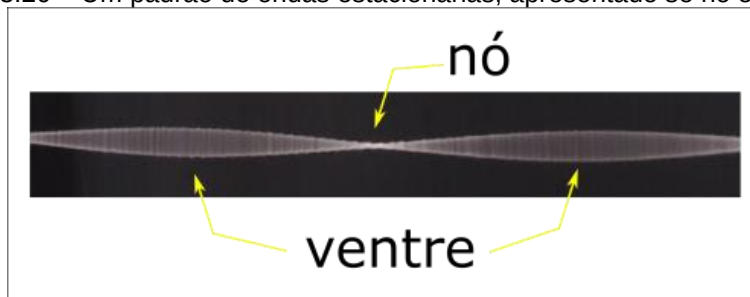
$$v = \sqrt{\frac{\tau}{\mu}} , \quad (3.7)$$

e ao chegar à outra extremidade, sofrem reflexão, retornando em direção à fonte de oscilação, refletindo novamente. Ou seja, o pulso que está confinado em duas extremidades fixas irá sofrer múltiplas reflexões nestas extremidades. Porém, quando o pulso que está retornando (pulso refletido), encontra outro pulso gerado pela fonte de oscilação (pulso incidente), eles irão sofrer interferência, de acordo com o princípio da superposição, visto na Seção 3.5 (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

Existem frequências específicas onde estas interferências geram um padrão de ondas, denominadas ondas estacionárias, também chamadas de modos de oscilação, onde os deslocamentos máximos sofridos pela corda são

denominados antinós ou ventres, em que se tem interferência construtiva entre os pulsos incidente e refletido, e nós, onde existe interferência destrutiva. A Figura 3.20 apresenta um padrão de ondas estacionárias, onde são apresentados os nós e ventres para aquela frequência específica gerada (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

Figura 3.20 – Um padrão de ondas estacionárias, apresentado se nó e ventres.

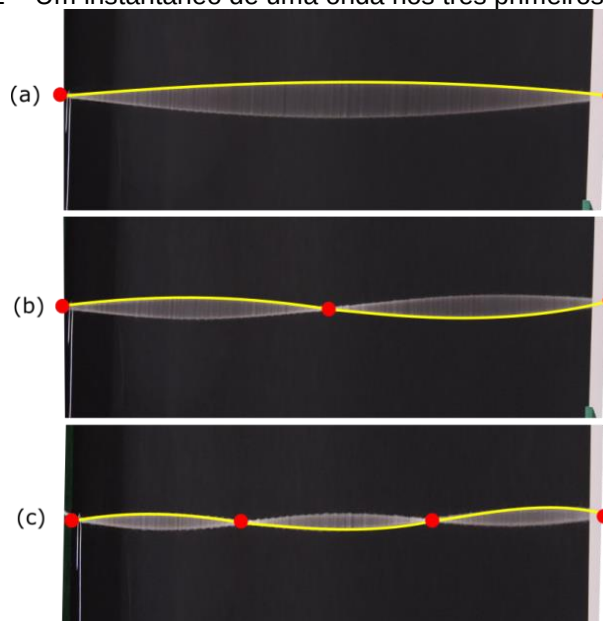


Fonte: O autor

À frequência responsável por um padrão de ondas estacionárias, como o apresentado na Figura 3.20 é denominada frequência de ressonância, e esta depende da densidade linear da corda, do seu comprimento e da tensão aplicada. A cada frequência de ressonância que produz ondas estacionárias dá-se o nome de modo de oscilação e à menor frequência de ressonância denomina-se frequência fundamental, representado por f_1 . A frequência fundamental produz o padrão mostrado na Figura 3.21(a), que é chamado de modo fundamental de vibração ou de primeiro harmônico. A Figura 3.21(b) representa a segunda menor frequência de ressonância. Este modo de oscilação tem o dobro da frequência fundamental, o qual é representado por f_2 , e também chamado de segundo harmônico. Em 3.21(c) tem-se a terceira menor frequência, a qual é três vezes maior que a frequência fundamental, representada por f_3 , e também chamado de terceiro harmônico. A mesma ideia pode ser estendida para o quarto, quinto harmônico, etc.. (YOUNG; FREEDMAN, 2003; HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

A todo o conjunto de frequências de ressonância de uma determinada corda, que produzem seus respectivos modos de oscilação, é denominado espectro de ressonância da corda (YOUNG; FREEDMAN, 2003).

Figura 3.21 – Um instantâneo de uma onda nos três primeiros harmônicos.



Fonte: O autor.

Ao analisar o segundo harmônico de uma onda estacionária, representada pela Figura 3.21 (b) é possível observar que este harmônico corresponde a um comprimento de onda inteiro específico.

Desta forma, lembrando que a corda do experimento tem comprimento fixo de valor L , o primeiro harmônico a corda de comprimento L contém apenas metade de um certo comprimento de onda específico, o que pode ser expresso como $(\lambda_1/2)$, representado pela linha em amarelo da Figura 3.21 (a).

Seguindo esta ideia, fazendo-se a mesma observação para os outros dois harmônicos representados na Figura 3.21, percebe-se que no segundo harmônico a corda de comprimento L contém duas metades de um certo comprimento de onda, o que pode ser expresso como $(2\lambda_2/2)$ e no terceiro harmônico a corda de comprimento L contém três metades de um certo comprimento de onda específico $(3\lambda_3/2)$.

Desta forma, para uma corda com comprimento L qualquer, uma onda estacionária somente poderá existir se satisfazer à equação 3.8 (YOUNG; FREEDMAN, 2003),

$$L = n \frac{\lambda_n}{2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) . \quad (3.8)$$

Para o experimento apresentado na Figura 3.19, existem ondas na corda que não possuem os comprimentos de ondas representados pela equação 3.8, portanto, tais ondas não podem formar ondas estacionárias com nós e ventres.

A equação 3.8 ilustra as ondas estacionárias formadas pelo experimento da Figura 3.19, onde a corda tem um comprimento L fixo e há a formação de ondas com certos comprimentos de onda específicos correspondentes aos $n = 1, 2$ e 3 , respectivamente, observadas na Figura 3.21 (YOUNG; FREEDMAN, 2003).

A velocidade de propagação da onda na corda, além da forma vista na equação 3.7, pode ser expressa em termos do comprimento de onda e respectiva frequência ($v = \lambda f$), onde o módulo da velocidade de propagação da onda na corda é fixa e constante. Isso pode ser admitido porque a densidade linear da corda não se modifica, ou seja, é a mesma corda, e também porque se escolhe uma tração fixa. Assim, pode-se reescrever a equação expressa como

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

Para uma série harmônica produzida em uma corda com uma velocidade de propagação fixa, como na Figura 3.21, em que se usou uma corda de densidade linear específica e uma tração devido à força peso foi possível observar vários modos de oscilação, estes correspondendo a uma série de valores possíveis de λ_n e uma série de respectivas frequências f_n , e que pode ser generalizado por

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) . \quad (3.9)$$

O comprimento de onda, λ_n , da equação 3.9 pode ser escrito a partir da equação 3.8 e, portanto, dado por

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) . \quad (3.10)$$

Considerando a equação 3.9, pode-se determinar a menor frequência, f_1 , $n = 1$ dada pela equação 3.11,

$$f_1 = \frac{v}{2L} , \quad (3.11)$$

e que corresponde ao maior comprimento de onda, $\lambda_1 = 2L$, este determinado pela equação 3.10.

O valor obtido a partir da equação 3.11 é denominado frequência fundamental, porque corresponde ao menor n admitido na equação 3.8, ou seja, L igual à metade do respectivo comprimento de onda, ou seja, λ_1 . As demais frequências das ondas estacionárias, então, podem ser expressas da forma mostrada nas equações 3.12 e 3.13:

$$f_2 = \frac{2v}{2L} = 2\left(\frac{v}{2L}\right); \quad n = 2 \quad (3.12)$$

$$f_3 = \frac{3v}{2L} = 3\left(\frac{v}{2L}\right); \quad n = 3 . \quad (3.13)$$

Assim, é possível verificar que os valores apresentados são múltiplos inteiros da frequência fundamental f_1 , tais como $2f_1$, $3f_1$, $4f_1$, ...

Generalizando as observações feitas anteriormente, chega-se à equação 3.14,

$$f_n = n \frac{v}{2L} \quad (n=1, 2, 3, \dots) , \quad (3.14)$$

ou simplesmente, à expressão da equação 3.15,

$$f_n = n f_1 \quad (n=1,2,3). \quad (3.15)$$

As frequências obtidas a partir das equações 3.14 e 3.15 são denominadas harmônicos, e a série que contém todos os valores de frequências para uma corda é chamada série harmônica (YOUNG; FREEDMAN, 2003; HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

3.8 PITÁGORAS NA FORMAÇÃO DA ESCALA MUSICAL OCIDENTAL

Segundo conta a lenda, ao passar em frente a uma oficina de um ferreiro, Pitágoras (580-497 a.C.) percebeu que as batidas de martelos de diferentes pesos produziam sons que eram agradáveis ao ouvido e se combinavam muito bem. Perante esta observação, o mesmo desenvolveu um aparelho denominado monocórdio, o qual consistia em uma corda musical esticada que produzia um determinado som. A Figura 3.22 mostra um momento de Pitágoras realizando seus estudos no monocórdio (SOARES, 2016)

Figura 3.22 – Pitágoras realizando seus estudos no monocórdio.



Fonte: HERRERO (2016).

Foi a partir dos seus estudos, com o uso do monocórdio, que Pitágoras chegou às 7 notas musicais conhecidas no ocidente (dó-ré-mi-fá-sol-lá-si-dó). Ele percebeu que quando dividia a corda do monocórdio em $\frac{2}{3}$ do seu tamanho original, ele obtinha um intervalo musical de quinta (exemplo: dó-sol). Ao dividir essa mesma corda em $\frac{3}{4}$ do tamanho original ele obtinha o intervalo musical de quarta (exemplo: dó-fá). E quando ele dividia a corda na metade do comprimento ele obtinha o intervalo de oitava (exemplo: dó¹-dó²). Para a obtenção das demais notas Pitágoras utilizou o ciclo das quintas, o qual consistia em encontrar as notas dó-ré-mi-fá-sol-lá-si-dó, através da superposição de quintas ascendentes. A utilização do ciclo das quintas proporciona a seguinte ordem das notas musicais: dó-sol-ré-lá-mi-si (RIBEIRO JÚNIOR; CROCHIK, 2009).

As relações entre as notas musicais e o comprimento da corda encontrada por Pitágoras estão descritas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Relação pitagórica entre comprimento de uma corda e a nota emitida.

Notas	Dó	Ré	Mi	Fá	Sol	Lá	Si	Dó
Comprimento da corda em relação à Dó	1	$\frac{8}{9}$	$\frac{64}{81}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{16}{27}$	$\frac{128}{243}$	$\frac{1}{2}$

Fonte: RIBEIRO JÚNIOR; CROCHIK (2009).

É importante destacar que a escala obtida por Pitágoras foi baseada nos comprimentos da corda. Porém, a associação da frequência a uma nota musical, a qual é utilizada nos dias de hoje para afinar um instrumento musical, foi introduzida por Galileu Galilei (1564-1642) (RIBEIRO JÚNIOR; CROCHIK, 2009).

3.8.1 A contribuição de Zarlino

Gioseffe Zarlino (1517-1590) foi um dos maiores teóricos musicais da época, e a escala proposta por este foi adaptada da escala original que Pitágoras desenvolveu, sistematizando a escala buscando os intervalos por meio da soma de médias harmônicas e aritméticas a partir de uma nota fundamental (PERES, 2016; RIBEIRO JÚNIOR; CROCHIK, 2009).

Enquanto Pitágoras gerava os intervalos a partir do ciclo das quintas, Zarlino obtinha intervalos dividindo-os, adicionando-os e subtraindo-os, mas nunca invertendo-os (SÓ MATEMÁTICA, 2016).

A média harmônica (H) de n números, na matemática, é dada como sendo o inverso da média aritmética do inverso dos números.

Seja um conjunto de números representados por $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$. A equação geral para a média harmônica é dada a partir de

$$H = \frac{n}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \frac{1}{x_3} + \dots + \frac{1}{x_n}} \quad . \quad (3.18)$$

Dessa forma, Zarlino sistematizou a escala através da soma de médias harmônicas e aritméticas a partir de uma nota fundamental. As relações entre os comprimentos de cordas a partir das proporções encontradas estão apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Relação natural entre comprimento de uma corda e a nota emitida.

Notas	Dó	Ré	Mi	Fá	Sol	Lá	Si	Dó
Comprimento da corda em relação à Dó	1	$\frac{8}{9}$	$\frac{4}{5}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{3}{5}$	$\frac{8}{15}$	$\frac{1}{2}$

Fonte: RIBEIRO JÚNIOR; CROCHIK (2009).

Ao comparar a Tabela 3.1 e 3.2, utilizando de uma corda de 1 m de comprimento entre os pontos da corda que estão apoiados no cavalete, é possível obter os valores apresentados na Tabela 3.3, onde estão representados os comprimentos das cordas em metros para determinada nota musical.

Tabela 3.3 - Comparação entre as relações de Pitágoras e Zarlino.

Nota	Pitágoras		Zarlino	
	relação	Comprimento (m)	relação	Comprimento (m)
Dó	1	1,000	1	1,000
Ré	8/9	0,889	8/9	0,889
Mi	64/81	0,790	4/5	0,800
Fá	3/4	0,750	3/4	0,750
Sol	2/3	0,667	2/3	0,667
Lá	16/27	0,593	3/5	0,600
Si	128/243	0,527	8/15	0,533
Dó	1/2	0,500	1/2	0,500

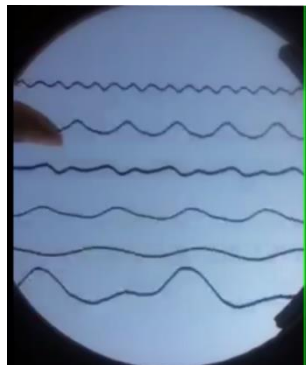
Fonte: O autor.

3.9 COMPOSIÇÃO HARMÔNICA

Ao se dedilhar a corda de um instrumento musical são produzidos pulsos na mesma. Como esta corda está confinada entre dois pontos, a onda irá sofrer inúmeras reflexões e múltiplas interferências, como abordado na Seção 3.7 deste Capítulo.

Ao se registrar um instantâneo das cordas de um violão vibrando, é possível identificar que as mesmas possuem um formato diferente da onda senoidal vista na Seção 3.6 do presente Capítulo. Este formato pode ser verificado na Figura 3.23, onde é possível observar ondas anarmônicas, produzida por um violão, as quais são periódicas, porém não senoidais (KELLER; GETTIS; SKOVE, 1999).

Figura 3.23 – Um instantâneo das cordas de um violão ao serem dedilhadas.



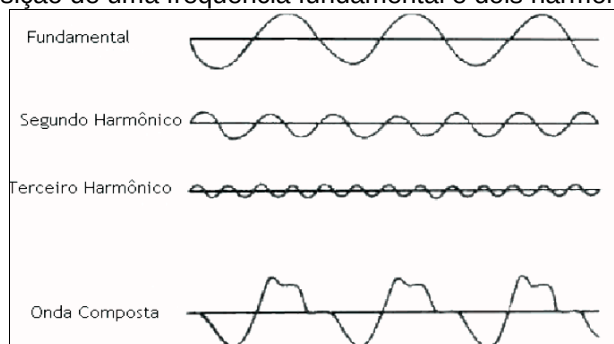
Fonte: PRADO (2016).

Sendo assim, é possível perceber que a função de onda dada para a corda deste instrumento é mais complexa a descrita pela equação 3.6.

Quando a corda de um instrumento vibra, sua vibração resultante é a combinação do harmônico fundamental juntamente com vários sobretons; desta forma, o movimento da corda será a superposição de vários modos normais (YOUNG; FREEDMAN, 2003).

Buscando ilustrar a colocação anterior, a Figura 3.24 ilustra a superposição de uma frequência fundamental e seus dois harmônicos subsequentes.

Figura 3.24 – Composição de uma frequência fundamental e dois harmônicos subsequentes.



Fonte: WUENSCHÉ (2005).

Jean Baptiste Joseph Fourier (1768 – 1830) demonstrou que a forma de uma onda periódica complexa pode ser descrita como a soma de ondas harmônicas representada pela equação 3.16 (KELLER; GETTIS; SKOVE, 1999),

$$y(t) = \sum_{n=1}^N A_n \sin(n\omega t + \phi_n) . \quad (3.16)$$

Assim como as ondas periódicas da Figura 3.23 podem ser analisadas em termos da equação 3.9 para serem encontrados os valores da frequência fundamental e seus harmônicos superiores, é possível também a formação de novas ondas periódicas de maneira eletrônica a partir de sintetizadores de som digitais, como um teclado musical, por exemplo. A Figura 3.25 representa a série de Fourier produzida por um teclado musical eletrônico ao tocar a nota Dó₃.

Figura 3.25 – Uma onda periódica produzida por um teclado musical a partir de uma série de Fourier.



Fonte: O autor.

Contudo, a composição harmônica de uma corda também depende da forma com que esta foi inicialmente perturbada, isto é, se a corda for tocada próximo à abertura da caixa de ressonância, a corda terá uma determinada composição harmônica. Porém, se a corda for tocada próximo à outra extremidade, por exemplo, a sua composição harmônica terá um formato diferente (YOUNG; FREEDMAN, 2003).

3.10 TIMBRE

Timbre é uma característica do som que permite que dois instrumentos diferentes que tocam a mesma nota musical sejam identificados.

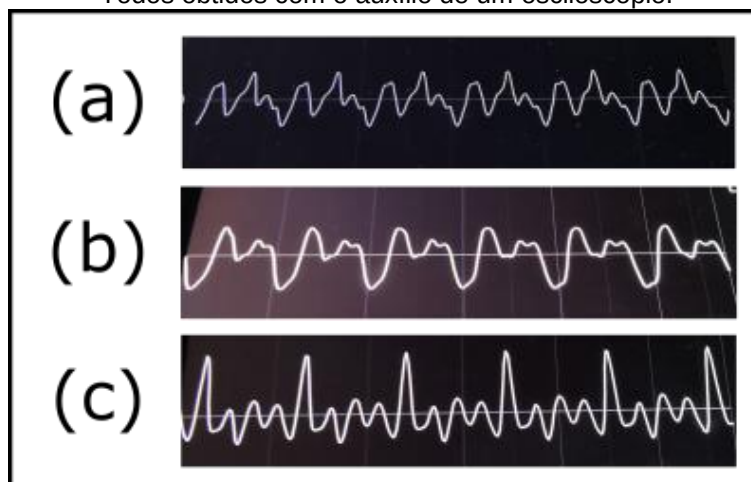
Ao tocar a nota $Dó_3$ (dó central do piano), esta produz a frequência fundamental de 262 Hz acompanhada de seus segundo, terceiro, quarto harmônicos entre outros. O número de harmônicos, e o volume de som de cada um destes, determinam o timbre do som associado ao instrumento, neste caso, o piano (HEWITT, 2002).

É possível transpor a ideia apresentada para o piano também para os demais instrumentos, onde a nota musical tocada por este, além de vibrar com a frequência fundamental da nota, esta acompanha uma série de harmônicos derivados desta.

Além disso, quando dois instrumentos diferentes, por exemplo, um trompete e um saxofone, tocam a mesma nota musical, estes produzem a mesma frequência, porém seus harmônicos possuem intensidades diferentes. Desta forma, o quarto harmônico de determinada nota musical pode ser forte em um instrumento e fraco (ou até mesmo ausente) em outro instrumento, e este é o motivo do som da nota musical percebido por um instrumento soar diferentemente da mesma nota musical tocada por outro instrumento musical (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

É possível observar a forma do timbre da nota musical tocada em um instrumento musical por meio de um osciloscópio. A Figura 3.26 apresenta o timbre em (a) de um violino, em (b) de um piano e em (c) de um trompete, todos tocando a nota $Dó_3$.

Figura 3.26 – O timbre, em (a), de um violino, em (b) de um piano e em (c) de um trompete. Todos obtidos com o auxílio de um osciloscópio.



Fonte: O autor.

Vale ressaltar que as Figuras 3.25 e 3.26 foram produzidas a partir de um teclado musical, que produz um som sintetizado, de maneira aproximada, a forma de onda produzida por um instrumento musical real. As imagens foram realizadas a partir da captação do som produzido pelo teclado com o uso de osciloscópio, o qual é um aplicativo de celular.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente Capítulo tem por finalidade descrever de maneira geral os principais procedimentos, testagens e adaptações para a confecção e a elaboração dos materiais de apoio e aparatos experimentais até a sua concepção final. Há também a descrição geral de como foi a aplicação do Produto.

A versão final do Produto que foi utilizada na aplicação das aulas é constituída de uma unidade didática contendo oito seções, distribuídas em doze aulas, material de apoio e aparatos experimentais. O Produto é composto de acordo com a seguinte estrutura: planejamento (questionário investigativo, plano de unidade e planos de seções), conceitos físicos abordados em sala de aula, Textos de Apoio ao Professor, Textos de Apoio ao Educando, manuais de montagem dos instrumentos musicais e experimentos demonstrativos, além de vídeos, slides e simulações.

4.1 INVESTIGAÇÃO INICIAL E AULAS ELABORADAS

Em um primeiro momento foi realizada uma investigação inicial com os educandos com a aplicação de um questionário contendo questões para conhecer a realidade e anseios dos mesmos a respeito do conteúdo a ser abordado durante a aplicação do Produto e que encontra-se disponível no Capítulo 2 do mesmo.

Com a análise dos dados obtidos por meio do questionário foi delineada a sequência das aulas, bem como os materiais a serem utilizados. Neste caso, os educandos, em sua grande maioria, demonstraram interesse pelo estudo do violão, o que foi fundamental para definir o estudo das ondas mecânicas com ênfase em ondulatória em cordas.

Foram planejadas 08 (oito) seções, distribuídas em 12 (doze) aulas, as quais buscam a partir de uma sequência de estudos, formar os conceitos básicos de ondulatória para a formação das notas musicais nos instrumentos de cordas.

O Quadro 4.1 apresenta, em linhas gerais, a sequência em que as seções foram aplicadas, bem como o número de aulas necessárias para cada

Seção. Além disso, o mesmo apresenta o material que se utilizou em cada Seção e os exercícios propostos no final de cada Texto de Apoio ao Educando.

Quadro 4.1 – Sequência das seções na aplicação do Produto.

Seção	Título	Número de aulas	Assunto	Material utilizado	Exercício proposto
01	“Com a corda toda!”	01	Interação dos educandos com instrumentos musicais de corda	Monocórdio de Pitágoras e violão rudimentar	Complete as lacunas
02	“Com que frequência?”	01	Conceitos de movimento periódico, período e frequência.	Relógio analógico, roda de bicicleta e baqueta de instrumento de percussão	No meio do texto completar lacunas e cálculos simples e como atividade final caça palavras
03	“Um balançar legal!”	02	Movimento Harmônico Simples	Pêndulo simples	No meio do texto completar as lacunas e cálculos simples e como atividade final “ligue os conceitos com sua denominação”
04	“Um pulso...”	02	Definição de pulso, velocidade, reflexão e superposição de pulsos.	Cordas de massas diferentes	No meio do texto completar as lacunas e cálculos simples e como atividade final “complete as frases”
05	“Com a onda toda!”	01	Definição de onda, análise de uma onda, equação da onda.	Cordas e simuladores computacionais	Palavras cruzadas
06	“Uma onda parada?”	03	Ondas estacionárias.	Experimento da corda	Cálculos em tabelas e completar os conceitos
07	“Voltando ao início...”	01	Apresentação da escala de Pitágoras, composição harmônica e timbre; retomada dos educandos com os instrumentos de cordas com análise do ponto de vista físico da sua produção de som.	Monocórdio de Pitágoras e violão rudimentar.	Palavras cruzadas
08	“Um final para um novo começo!”	01	Avaliação final compreendendo os conceitos abordados.		Interpretação de texto, cálculos, questões objetivas e descritivas.

Fonte: O autor.

4.2 INSTRUMENTOS MUSICAIS E EXPERIMENTOS

Os materiais que foram utilizados para a aplicação das aulas foram produzidos a partir de vasta pesquisa, onde se utilizou de ideias adaptadas a partir de aparatos semelhantes contidos na literatura, bem como páginas e vídeos da internet além de livros de graduação.

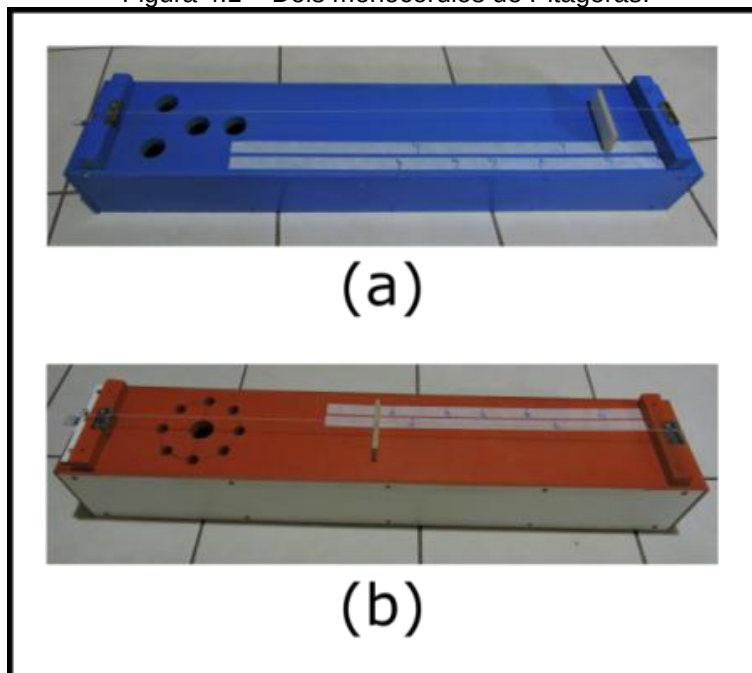
Destaca-se que para os instrumentos musicais bem como os experimentos citados no presente Capítulo foram realizados testes de verificação durante a sua elaboração e, por isso, são apresentados também comentários, resultados e revisão do material para melhoramento do mesmo antes de sua versão final e de ser utilizado na aplicação das aulas.

4.2.1 Monocórdio de Pitágoras

O monocórdio de Pitágoras foi produzido tendo como base o trabalho Ribeiro Júnior e Crochik (2009). Procurando facilitar sua aplicabilidade foi elaborada, em primeiro momento, uma caixa de ressonância cujo tamanho original para a corda seria de 100 cm. O comprimento inicialmente proposto justifica-se pelo fato de facilitar a divisão da corda para obtenção da escala musical. Depois de realizada a montagem do monocórdio, pôde-se perceber que tal aparato não seria viável, pois após várias pesquisas em lojas de vendas de instrumentos musicais, o não se encontrou a corda de violão com o comprimento necessário. Desta forma, o comprimento da caixa de ressonância foi reduzido de forma que a distância entre os cavaletes apresentasse 75 cm.

A Figura 4.1 apresenta os dois monocórdios confeccionados e utilizados nas aulas. Esta figura também serviu de ilustração na confecção do Texto de Apoio ao Educando constante do Produto.

Figura 4.1 – Dois monocórdios de Pitágoras.



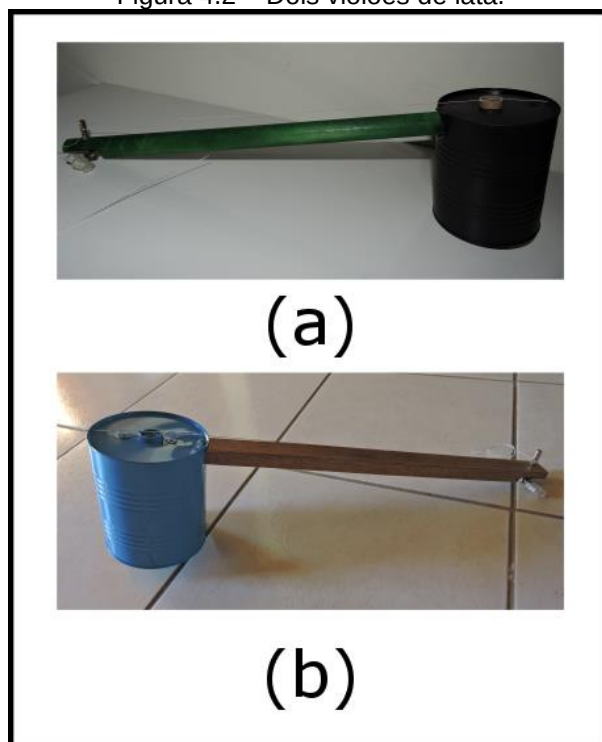
Fonte: O autor.

Vale destacar que foram confeccionados 2 (dois) monocórdios com duas cordas de violão diferentes, uma nº.3 e outra nº. 5. A montagem nestes parâmetros visa trabalhar diferentes cordas com o mesmo tamanho, a fim de analisar a frequência produzida a partir de diferentes densidades.

4.2.2 Violão Rudimentar

O violão rudimentar foi produzido a partir de adaptações dos trabalhos propostos por Moura e Neto (2011) e Vasconcelos (2014). A Figura 4.2 apresenta os dois violões construídos e utilizados nas aulas. Essa figura também foi usada como ilustração na confecção do Texto de Apoio ao Educando constante do Produto.

Figura 4.2 – Dois violões de lata.



Fonte: O autor.

Em sua primeira montagem e aplicação foi seguindo a indicação dos materiais propostos por Vasconcelos (2014). Porém, a partir de observações, sentiu-se a necessidade de realizar algumas adaptações no aparato, como a mudança do seu braço, o qual em sua versão original era constituído por um cabo redondo de vassoura, uma vez que foi observado durante sua aplicação uma dificuldade em se obter um som harmonioso. Tal problema foi contornado substituindo o cabo de vassoura por um cabo retangular, uma vez que com uma base reta para apoiar a corda obteve-se melhor qualidade no som.

Outro detalhe verificado na versão original do violão consistia em este possuir um som metálico e estridente, onde a partir de várias observações verificou-se que tal som era proveniente da vibração da argola de PVC que tinha a função de afastar a corda da base da lata, sendo o problema contornado para a versão final fixando a argola à lata. Foram construídos dois violões rudimentares um contendo cordas de violão nº 3 e outra de nº 5, escolha presente também no monocórdio de Pitágoras citado anteriormente.

4.2.3 Materiais diversos

Para a abordagem dos conceitos físicos como Movimento Periódico, Período e Frequência foram utilizados os seguintes aparatos: uma roda de bicicleta, um relógio analógico e um par de baquetas de bateria, além do uso de cordas de diferentes densidades lineares, para o estudo das propriedades dos pulsos e das ondas.

4.2.4 Pêndulo Simples

A confecção do pêndulo teve como base o trabalho apresentado por PETFísica (2012) e também da obra de Hewitt (2002) sendo que foram realizadas algumas modificações e adequações.

O experimento do pêndulo foi idealizado em primeiro momento empregando-se canos de PVC, inclusive substituindo a corda do pêndulo por um cano de PVC. A Figura 4.3 apresenta em (a) o primeiro protótipo do aparato e (b) teste inicial sendo realizado.

Figura 4.3 – Pêndulo, em (a) primeiro protótipo e em (b) teste.



Fonte: O autor.

A partir dos resultados dos testes, concluiu-se que seria inviável a sua utilização, pois havia muito atrito entre o cano da haste superior e o suporte do cano central. Tal problema foi contornado com a troca do cano central por um fio de barbante, o que proporcionou melhores resultados.

A Figura 4.4 apresenta o aparato experimental para o pêndulo confeccionado e utilizado nas aulas. O pêndulo é constituído de uma garrafa pet contendo líquido colorido em seu interior como massa, suportado por um pedaço de barbante preso à estrutura de PVC. Na parte inferior do aparato é colocada uma tira de papel kraft para marcação das oscilações do pêndulo.

Figura 4.4 – Pêndulo utilizado para a elaboração do Texto de Apoio ao Educando bem como aplicação em sala de aula.



Fonte: O autor.

4.2.5 Experimento da corda

Para a produção do experimento da corda foram realizadas adaptações de artigos científicos, tais como o projeto de extensão de Ignácio et al. (2012) e o artigo de Mello (2007). As principais modificações realizadas para a confecção foram a substituição de um alto-falante de caixa de som de computador contendo um lápis preso em seu cone central por um alto-falante automotivo, onde foi retirado o cone central do alto-falante e colado um arame, com a outra extremidade presa à corda. Outra mudança foi a utilização de um software de computador para gerar as frequências, associado a um amplificador o qual foi trocado por uma caixa subwoofer de computador como amplificador e um aplicativo de celular como gerador de frequência.

O aparato produzido consiste em uma corda esticada, tensionada por determinada massa previamente conhecida, onde um alto-falante produz uma frequência que faz com que a corda oscile e gere um padrão de ondas estacionárias.

Para sua construção, foram utilizadas madeiras de MDF 15 mm para o seu corpo, bem como para o suporte para fixação do alto-falante e da roldana.

A fixação da corda no aparato foi realizada com a utilização de um gancho aberto pequeno.

O alto-falante utilizado para a construção do aparato foi obtido a partir da doação de uma empresa de som automotivo e as massas utilizadas para tencionar a corda foram adquiridas em uma empresa de venda de materiais de pesca, as quais consistem em chumbadas do tipo “pirâmide comum”.

A Figura 4.5 apresenta o aparato para o experimento da corda construído e utilizado nas aulas.

Figura 4.5 – Aparato do experimento da corda.



Fonte: O autor.

Após a finalização da construção do experimento da corda, realizou-se diversos testes com diferentes fios, tais como fios de tricô, barbante e fios de nylon com o intuito de definir que material produziria uma melhor “visualização” das ondas estacionárias.

Após a realização dos testes, verificou-se que para a aplicação do experimento em sala de aula os fios de nylon proporcionaram uma melhor visualização das ondas estacionárias, sendo destes, escolhidos os fios 0,45 mm e 0,60 mm.

Os fios de crochê azul e rosa, apesar de proporcionar uma melhor visualização em contraste com o fundo preto do aparato, foram desconsiderados devido à produção das ondas estacionárias não estarem com boa visualização. Os testes realizados com os vários fios estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Relação da frequência em diferentes cordas.

fio	m (g)	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3 (Hz)	f4(Hz)	f5 (Hz)
crochê azul	20	21,5	43	64,5	86	107,5
	40	29	58	90	119	149,5
	60	37	74	111	---	---
crochê rosa	20	40	82	122	162	---
	40	56	112	168	---	---
	60	68	135,5	202,5	---	---
nylon 0.20	20	49	98	147	---	---
	60	78	159	---	---	---
nylon 0.45	20	26	54	79	103	---
	60	42	84	127	169	---
nylon 0.60	20	17	33,5	51,2	67	84
	40	23	46	70	94	117
	60	28	56,5	83	111	138,5
	80	32	65	96	128	159
	100	36	72	108	143	179

Fonte: O autor.

4.3 FOTOS, VÍDEOS E MATERIAIS AUXILIARES NA APLICAÇÃO DAS AULAS

Para a confecção das imagens apresentadas no Capítulo 3 do Produto: Conceitos Físicos, este transcrito integralmente nesta dissertação, Capítulo 3, e Textos de Apoio, Capítulo 4 do Produto, utilizou-se em grande parte do próprio acervo pessoal de fotografias de um dos autores do Produto, como as imagens do relógio e do ciclista, ambas mostradas no texto da Seção 2.

Para as fotografias presentes na Seção 1, como o violão, violino e violoncelo foram realizados empréstimos dos instrumentos para a produção das fotografias. A fotografia do piano, também presente na Seção 1, é pertencente à escola e foi realizada no período em que um dos autores do produto aplicava aulas na mesma. Vale ressaltar que para a utilização das fotografias foram solicitadas as devidas permissões para a sua realização e

utilização, e merecidamente tendo seus agradecimentos feitos no final da Seção 1.

Devido à indisponibilidade de acesso a alguns instrumentos, recorreu-se a fotografias retiradas a partir de sites da internet, como a harpa e o berimbau, ambos instrumentos contidos no texto de apoio da Seção 1. Ressaltando que para a utilização das fotografias foram tomados os devidos cuidados para que estas fossem “livre para compartilhar e usar”, no que se referem aos direitos autorais, e sendo devidamente referenciadas no texto.

Algumas das imagens apresentadas em Conceitos Físicos e Textos de Apoio ao Educando foram feitas a partir das filmagens dos experimentos que seriam utilizados em sala. Após a filmagem foram selecionados os quadros que continham o efeito ou conceito físico relevante, que após identificados foram editados com o software livre de desenho vetorial INKSCAPE (2016). As Figuras 1 a 5, todas presentes no Texto de Apoio ao Educando da Seção 4 são exemplos de imagens retiradas a partir da edição de vídeos.

Devido à dificuldade ou à impossibilidade de reprodução, algumas das figuras foram feitas a partir de software livre de desenho vetorial para elucidar alguns fenômenos físicos. São os casos das Figuras 6, 7 e 8, todas presentes no Texto de Apoio da Seção 4.

Algumas das filmagens realizadas para a produção de Conceitos Físicos e Texto de Apoio ao Educando foram editadas em software livre e reutilizadas em sala de aula para realçar alguma explicação, como é o caso, por exemplo, da filmagem da onda produzida na Figura 2 do Texto de Apoio da Seção 5.

Houve outro momento em que se utilizou de simulador educacional para explicação de fenômenos. Fato este ocorrido durante a aplicação da aula referente à Seção 4, onde foi apresentado o simulador de pulsos, em que foi demonstrado um pulso refletido com a extremidade fixa, um pulso refletido com a extremidade livre, bem como a interferência entre dois pulsos, tanto construtiva quanto destrutiva.

Para cada Seção foi elaborada uma apresentação de slides contendo pontos principais de cada Texto de Apoio, com o objetivo de dar suporte à explicação de pontos e conceitos importantes pertinentes à aula.

4.4 TEXTOS DE APOIO

Para cada Seção foram confeccionados Textos de Apoio ao Educando, os quais apresentam os assuntos trabalhados durante as aulas de forma detalhada, proporcionando ao educando a oportunidade de retomar o assunto trabalhado durante a aula e sanar possíveis dúvidas. No final de cada texto de apoio são propostos exercícios diferentes com o objetivo de auxiliar na compreensão do conteúdo.

Para a elaboração dos Textos de Apoio ao Educando foi realizada a transposição didática de artigos científicos, sites da internet e livros de graduação citados anteriormente na fundamentação teórica no Capítulo 3 desta dissertação, sendo este a transcrição integral de Conceitos Físicos do Produto, onde os conceitos envolvidos nas aulas foram reescritos em nível de educandos do ensino médio.

Como apresentado no Quadro 4.1 do presente Capítulo, o assunto abordado em relação à Seção 1 é a introdução aos instrumentos musicais de cordas. Para a Seção 2, há ênfase em conceitos de Movimento Periódico, Período e Frequência. Na Seção 3 trabalha-se Pêndulo Simples e Movimento Harmônico Simples. Durante a Seção 4, enfatiza-se o pulso em uma corda. Para complementar o conceito de pulso, na Seção 5 aborda-se ondas mecânicas transversais. Na Seção 6 estuda-se ondas estacionárias. Evidencia-se, na Seção 7, a formação da escala de Pitágoras, bem como conceitos de Composição Harmônica e Timbre. Como encerramento, na Seção 8, buscou-se rever os conceitos abordados nas seções anteriormente citadas pela avaliação quantitativa.

Destaca-se que o tema abordado em cada Texto de Apoio ao Educando foi elaborado a partir do planejamento da unidade e dos planos de aula para cada Seção. Além disso, para cada Texto de Apoio ao Educando foi organizado um Texto de Apoio ao Professor que contém o mesmo conteúdo, porém com as respostas das atividades.

4.5 APLICAÇÃO DAS AULAS

Como mencionado anteriormente foram planejadas 08 (oito) seções, distribuídas em 12 (doze) aulas, conforme apresentado no Quadro 4.1. Cada Seção contemplada nas aulas está relacionada a um assunto específico, buscando apreciar a construção dos conceitos físicos para explicar as ondas mecânicas em cordas.

A Seção 1 consiste em fornecer quatro instrumentos musicais de cordas, diferentes entre si, para que os educandos investiguem a produção do som nestes. Em seguida, é entregue o Texto de Apoio ao Educando referente à Seção 1, onde é realizada a leitura e como atividade os educandos completam lacunas existentes no decorrer deste.

Para a Seção 2 são investigados aparatos e ações como a roda de uma bicicleta girando com uma pequena velocidade, o ponteiro de um relógio analógico e uma baqueta de caixa de bateria utilizada para produzir batidas sobre uma mesa. Em seguida, são abordados os conceitos físicos relativos ao que foi observado, como Movimento Periódico, Período e Frequência. Ao final da aula é entregue o Texto de Apoio ao Educando referente à Seção 2 para a realização da atividade de um caça palavras.

A Seção 3 é composta por duas aulas. A primeira aula tem por finalidade a aplicação do experimento do pêndulo, o qual consiste em dois momentos: a base sob o pêndulo é fixa e a base sob o pêndulo é móvel. Após a realização de tal experimento são estudados os conceitos físicos presentes no aparato. O segundo momento da aula referente à Seção 3 propõe a leitura do Texto de Apoio por parte do educando onde o mesmo deve realizar a atividade ligando os conceitos descritos às suas definições.

Na Seção 4, também composta por duas aulas, consiste no estudo do pulso em uma corda, e suas características físicas. Na primeira aula desta Seção é aplicado o experimento do pulso em duas cordas diferentes, onde são abordados conceitos como densidade linear, tensão e velocidade, além da interferência entre dois pulsos. Na segunda aula referente à Seção 4 realiza-se leitura do Texto de Apoio ao Educando juntamente com o educando e solicita-se a realização da atividade de completar conceitos abordados na aula nas lacunas presentes nas frases.

Na Seção 5 são estudados os conceitos de ondas em uma corda e suas propriedades. Após o desempenho da proposta é fornecido o Texto de Apoio ao Educando referente à Seção 5 para leitura e resolução do exercício.

Em seguida, tem-se a Seção 6, cujo objetivo é o estudo de ondas estacionárias. Esta é dividida em três aulas, sendo a primeira destinada à manipulação e investigação do experimento de corda por parte dos educandos, a segunda aula abrange os conceitos físicos presentes na experimentação, bem como deduções de equações, e a terceira aula a leitura do Texto de Apoio ao Educando com a efetivação dos exercícios.

Como encerramento, no que se refere à formulação dos conceitos físicos relacionados aos instrumentos de cordas, a Seção 7 visa à construção da escala musical ocidental, desenvolvida por Pitágoras ao estudar a relação do som com o comprimento e a tensão de uma corda e adaptada por Zarlino. Além disso, são abordados os conceitos de Timbre e composição harmônica. Esta Seção é finalizada com a realização de um caça palavras como atividade avaliativa.

A fim de contemplar o estudo das ondas mecânicas, a Seção 8 traz dois textos, ambos relacionados a instrumentos musicais de cordas, além de oito questões, divididas entre questões de múltipla escolha, de cálculos e questões descritivas.

Vale ressaltar que muitas das ações da aplicação previstas no Produto são comentadas em conjunto aos principais apontamentos de análise da aplicabilidade do mesmo, no Capítulo a seguir, para a maior compreensão da análise apresentada.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente Capítulo tem por finalidade apresentar os principais resultados e apontamentos mais relevantes durante a aplicação do Produto em sala de aula e que permitiram verificar a viabilidade de seu uso. As análises qualitativas estão presentes no decorrer do mesmo permitindo assim observar avanços no processo ensino-aprendizagem, as dificuldades dos educandos e do proponente da proposta como professor da turma, os principais apontamentos levantados pelos educandos, as principais observações feitas pelo proponente, além da inserção de imagens ao corpo do trabalho a fim de deixar claro o momento de contato dos educandos com o tipo de aula proposto.

O Produto foi aplicado em aulas do ensino médio, em uma turma do segundo ano de um colégio de educação do campo, localizado em um distrito a 16 km do Núcleo Regional de Educação de Irati-PR, onde o Ensino Médio funciona no período noturno contou com a participação de 24 (vinte e quatro) educandos e que todos receberam os 8 (oito) Textos de Apoio ao Educando, estes mencionados anteriormente e que estão presentes no Capítulo 4 do Produto.

Vale salientar novamente que foi realizada inicialmente uma investigação por meio de um questionário prévio a fim de conhecer a realidades e anseios dos educandos, com este material foi possível delinear a sequência das aulas e os materiais a serem utilizados. Neste caso, os educandos, em sua grande maioria, demonstraram interesse pelo estudo do violão, o que foi fundamental para definir o estudo das ondas mecânicas com ênfase em ondulatória em cordas.

A aplicação iniciou-se com a Seção 1, a qual objetivou o primeiro contato e investigação dos educandos com os instrumentos de cordas (dois monocórdios de Pitágoras e dois violões rudimentares, além de um violino).

A turma foi organizada em cinco equipes, disponibilizando um instrumento para cada uma delas. Solicitou-se que cada integrante da equipe manipulasse o instrumento a fim de produzir som e observassem as diferenças entre eles, discutindo com os colegas os pontos relevantes. Cada equipe teve aproximadamente 5 (cinco) minutos para manipular cada instrumento.

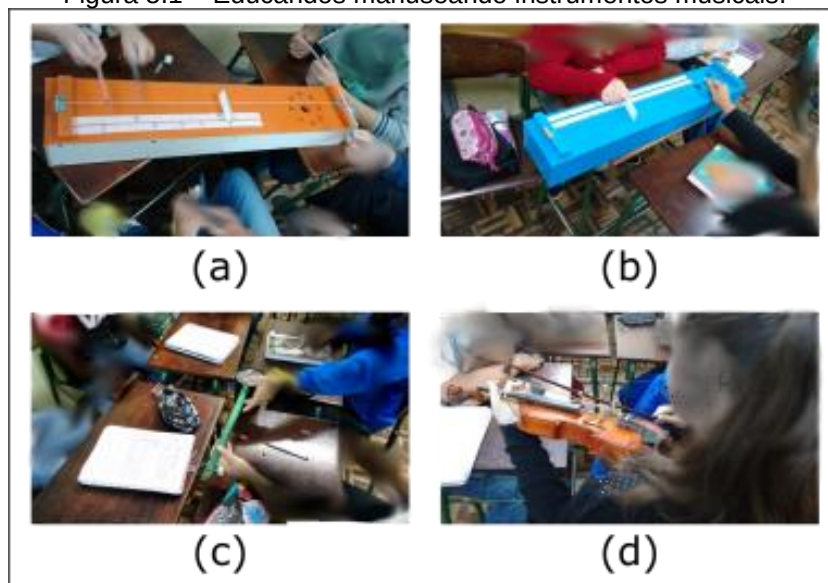
Após a investigação, os educandos receberam o texto de apoio da referida Seção, onde foi solicitado que os mesmos realizassem sua leitura e consequentemente desenvolvessem a atividade proposta, Quadro 4. 1.

Na aula introdutória os educandos demonstraram grande interesse ao receber os instrumentos musicais, os quais foram averiguados de várias formas diferentes. Porém, alguns problemas foram levantados durante a aplicação da aula, como o som dos mesmos estava muito fraco quando manuseados, ou seja, de difícil percepção. Uma das prováveis causas para tal observação pode ser atribuída ao excesso de barulho na sala.

Outro fator observado se refere à aplicação da aula, pois se percebeu grande dificuldade em vencer o conteúdo previsto no plano de aula, devido ao pouco tempo para trabalhar a investigação dos instrumentos juntamente com o Texto de Apoio ao Educando.

A Figura 5.1 apresenta momentos da investigação inicial realizada pelos educandos, onde eles manuseavam os instrumentos tirando som nos mesmos de formas variadas: em (a) e (b) manipulando os monocórdios, em (b) explorando o violão e em (c) manuseando o violino.

Figura 5.1 – Educandos manuseando instrumentos musicais.



Fonte: O autor.

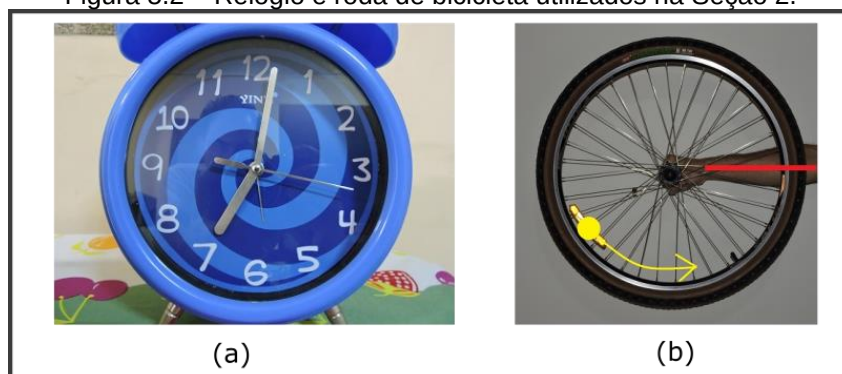
No que se diz respeito à atividade proposta no Texto de Apoio ao Educando referente à Seção 1, percebeu-se que 87,5% dos educandos realizaram a atividade com louvor, 4,16% deixaram de preencher um campo,

4,16% deixaram de preencher nove campos e não preencheram de forma correta um campo e 4,16% deixaram apenas um campo sem preencher e não preencheu de forma correta um campo.

Na aula referente à Seção 2 foram trabalhados conceitos de Movimento Periódico, Período e Frequência. A aula iniciou com a investigação de aparelhos simples, como as batidas regulares de uma baqueta em uma mesa, uma roda de bicicleta contendo uma marca em seu pneu girando e até mesmo da observação do ponteiro dos segundos de um relógio, após estas demonstrações os educandos foram questionados a levantar os pontos em comum entre os movimentos. Ao final da aula o Texto de Apoio ao Educando foi fornecido e solicitado à realização da atividade presente na Seção, Quadro 4.1. Assim, com estas ações, pode-se inferir que houve de forma parcial, a promoção de negociação de significados entre os educandos e a possível ocorrência do processo de reconciliação integrativa em alguns deles.

A Figura 5.2 mostra em (a) o relógio e em (b) a roda da bicicleta, ambos utilizados para a explicação. Vale ressaltar que estas figuras foram produzidas previamente para o Produto constando nos Capítulos: Conceitos Físicos e Textos de Apoios.

Figura 5.2 – Relógio e roda de bicicleta utilizados na Seção 2.



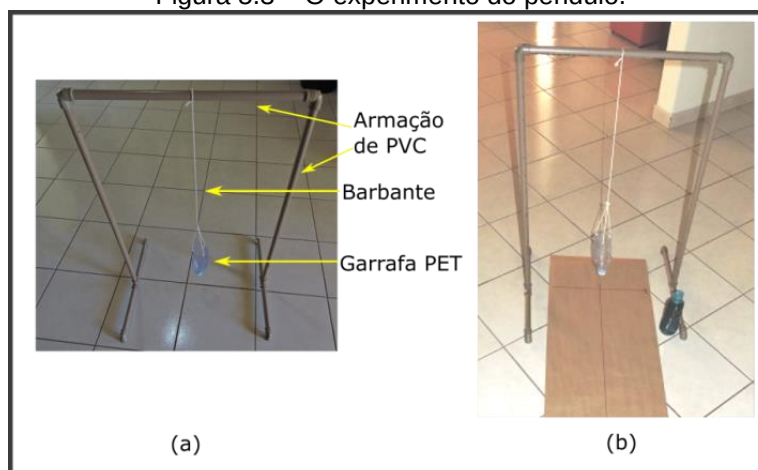
Fonte: O autor.

Destaca-se que, nesta Seção, houve participações expressivas por parte dos educandos, onde à medida que a aula se desenvolvia e estes eram questionados, os mesmos forneciam as respostas, bem como realizavam as medidas e efetuavam os cálculos quando solicitado. De certa forma, observou-se a motivação e a exposição de possíveis subsunçores de alguns educandos. Em relação aos exercícios propostos, Quadro 4.1, durante esta Seção, notou-

se que 42% preencheram de forma correta todos os campos, 47,6% destes deixaram algum campo em branco e 9,5% não fizeram corretamente o preenchimento dos campos. Em relação ao caça palavras, 81% dos educandos obtiveram 100% de acertos, enquanto 19% não preencheram uma das palavras, obtendo acerto de 92%.

Na aula referente à Seção 3, foi trabalhado um experimento demonstrativo, o qual consiste em um pêndulo. O aparato pode ser visualizado na Figura 5.3, onde em (a) são representadas as partes do pêndulo e em (b) é mostrado o aparato completo com o papel em sua base e o líquido colorido em um recipiente.

Figura 5.3 – O experimento do pêndulo.



Fonte: O autor.

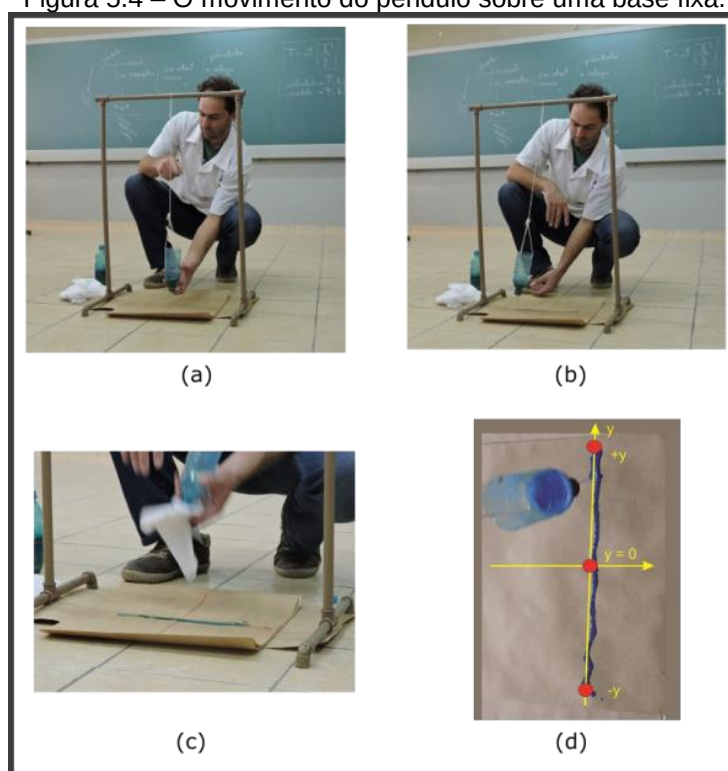
A atividade foi realizada dispondo os educandos em círculo ao redor do aparato, em seguida, fez-se o pêndulo oscilar com um pequeno deslocamento do seu ponto de equilíbrio, deixando que o líquido colorido demarcasse o caminho percorrido pelo movimento do pêndulo sobre um papel onde foi colocado previamente neste um eixo de coordenadas (xy) como referência. Neste primeiro momento, o papel permanecia parado (base fixa). A presente atividade ao ser desenvolvida foi um possível exercício de diferenciação progressiva para alguns educandos. A Figura 5.4 mostra a aplicação em sala de aula onde em (a) coloca-se o líquido no seu interior; em (b), desloca-se um pequeno ângulo em relação ao ponto de equilíbrio e o solta, deixando o líquido demarcar o papel; em (c) apresenta-se o desenho demarcado pelo líquido e em (d), este produzido em um momento anterior à aula, foi colocado um sistema

de eixos em computador para a confecção do Produto constando nos Capítulos: Conceitos Físicos e Textos de Apoios.

A partir do desenho formado pelo caminho do líquido foi possível trabalhar a amplitude de oscilação do pêndulo.

Após o primeiro momento, fez-se novamente o experimento, porém, o papel sob o pêndulo, onde o mesmo possuía previamente um eixo (xt) desenhado, foi puxado com uma velocidade constante, enquanto o líquido caía sobre este.

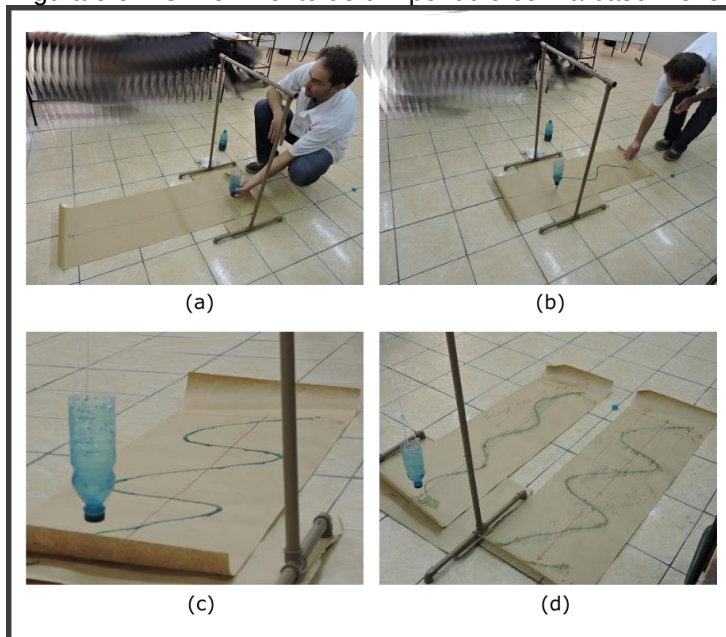
Figura 5.4 – O movimento do pêndulo sobre uma base fixa.



Fonte: O autor.

A Figura 5.5 mostra em (a) o preparo do experimento; em (b) o pêndulo deslocado em um determinado ângulo em relação ao ponto de equilíbrio e quando solto e o papel sendo puxado sobre o pêndulo com velocidade constante; em (c) é mostrado o resultado final do movimento do pêndulo e em (d) representa a replicação do experimento em um novo papel onde foi abordado a amplitude do movimento.

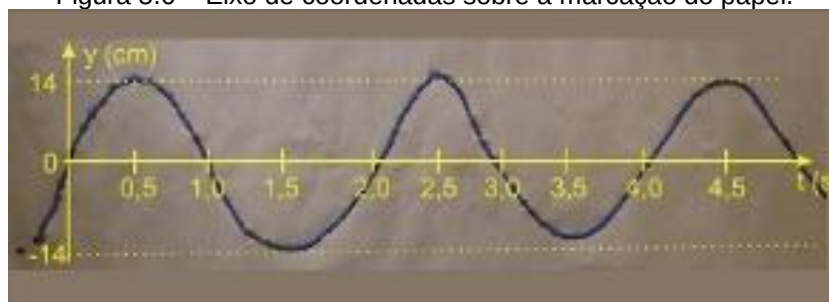
Figura 5.5 – O movimento de um pêndulo com a base móvel.



Fonte: O autor.

Depois da marcação do líquido, trabalhou-se os conceitos previamente estudados, como período de oscilação, amplitude e cálculo de velocidade em que o papel foi puxado. Este momento possivelmente promoveu o processo de renegociação de significados. A Figura 5.6 representa o eixo de coordenadas ($x(t)$) similar ao eixo que havia sido pré-desenhado, demonstrando como ficara a situação real feita na aula. Vale ressaltar que a Figura 5.6 representa o movimento pendular relativo a um experimento feito previamente, colocou-se, com o auxílio de um programa de computador, o eixo de coordenadas ($x(t)$), contendo valores aproximados do movimento do pêndulo para a confecção do Produto constando nos Capítulos: Conceitos Físicos e Textos de Apoios.

Figura 5.6 – Eixo de coordenadas sobre a marcação do papel.



Fonte: O autor.

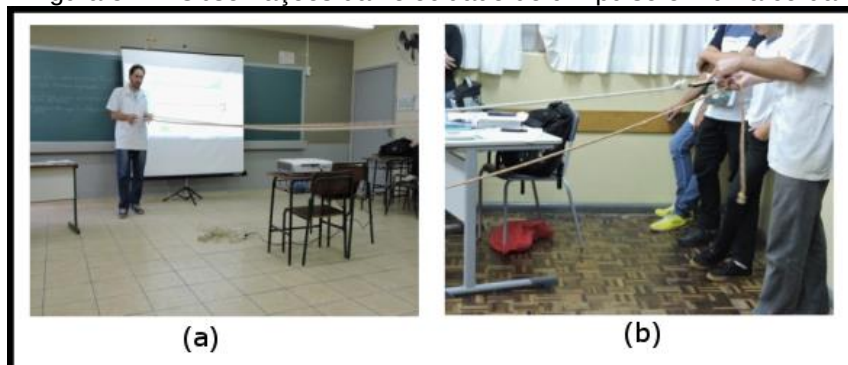
Do mesmo modo que a aula da Seção 2, ao final da aula da Seção 3 foi fornecido o Texto de Apoio ao Educando para que os mesmos lessem e retirassem possíveis dúvidas que surgiram durante a aplicação da aula. Ao final do texto deveriam realizar a atividade proposta, Quadro 4.1. Tal procedimento foi em uma tentativa de desenrolar o processo de reconciliação integrativa em alguns dos educandos,

Perante a Seção 3, destaca-se o surgimento de dúvidas além do esperado, um dos alunos questionou como calcular o valor da amplitude do pêndulo e outro como fazer um movimento circular com o pêndulo, ao invés de plano. A partir de tais questionamentos, há indicação de aprendizagem significativa, uma vez que se percebeu haver certo interesse por parte dos educandos sobre a aula. Vale ressaltar que todas as dúvidas que surgiram durante a aplicação da aula foram sanadas, com demonstrações, cálculos e exemplos práticos. Estas atividades desenvolvidas possivelmente promoveram o processo de diferenciação progressiva em alguns educandos. Em relação à análise das respostas da atividade proposta, os campos a serem preenchidos no decorrer do texto, 95% dos educandos preencheram de forma correta, enquanto que 5% destes deixou um campo sem preenchimento, obtendo acerto de 80%. No que se diz respeito à atividade final, o qual consistia em ligar os conceitos às suas definições, 90,4% dos educandos obtiveram acerto total, 4,7% deixaram de preencher alguns conceitos e 4,7% ligaram de forma equivocada três conceitos. Essa atividade desenvolvida promoveu possivelmente a reconciliação integrativa em alguns educandos.

As Seções 4 e 5 contaram com a utilização de duas cordas diferentes, onde foi trabalhado o conceito de pulso e suas propriedades, Seção 4, e ondas Seção 5.

A Seção 4 iniciou-se com a realização de pulsos nas duas cordas, buscando manter a mesma tensão em ambas, solicitando que os educandos observassem o que ocorria em termos da velocidade em cada corda. A figura 5.7 apresenta em: (a) a aplicação de pulsos em duas cordas com densidades lineares diferentes e (b), a medida da tensão na corda.

Figura 5.7 – Observações da velocidade de um pulso em uma corda.



Fonte: O autor.

Após realizada a investigação inicial, foi explanado sobre a dependência da velocidade de um pulso com a densidade linear da corda e a tensão aplicada na mesma. Realizada a explicação, foram aferidas as massas e o comprimento de ambas as cordas, onde os educandos puderam calcular a densidade linear de cada corda. A Figura 5.8 apresenta o momento em que foram feitas as aferições da massa e do comprimento das cordas.

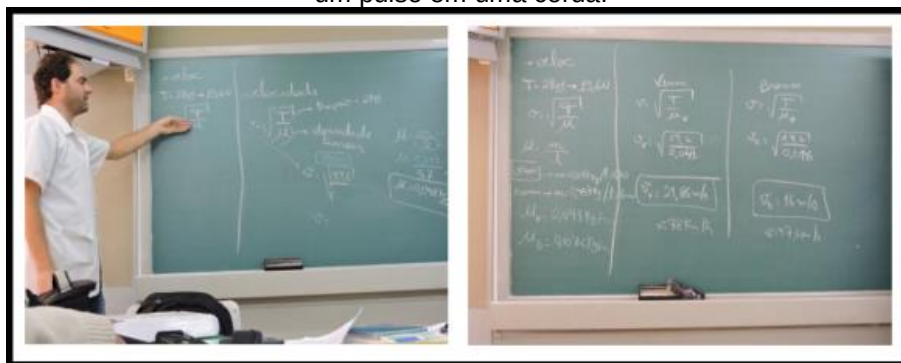
Figura 5.8 – Aferição do comprimento e massa das cordas utilizadas na Seção 4.



Fonte: O autor.

Feitas as aferições, as medidas foram escritas na lousa e os educandos foram orientados quanto à realização dos cálculos da densidade linear e da velocidade de propagação do pulso em uma corda. A Figura 5.9 apresenta os cálculos realizados da densidade linear, bem como da velocidade de propagação de um pulso na corda.

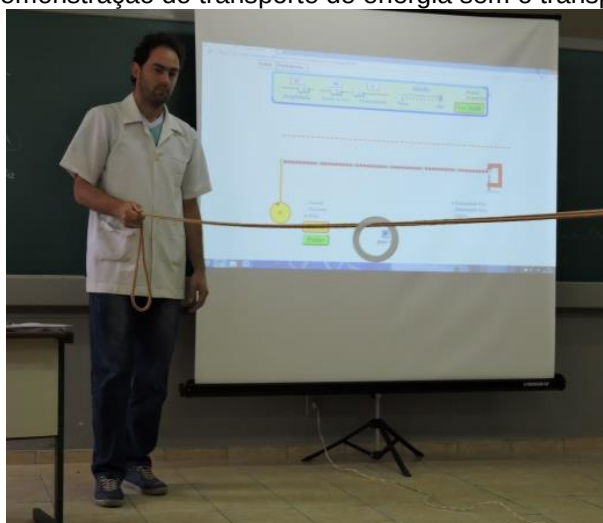
Figura 5.9 – Apresentação dos cálculos da densidade linear e da velocidade de propagação de um pulso em uma corda.



Fonte: O autor.

Além da velocidade de propagação, também foi trabalhado em sala de aula o conceito do transporte de energia sem o transporte de matéria, a partir da introdução de uma argola de plástico na corda, onde foi demonstrado que um pulso ao passar por um ponto material, este não o desloca do seu ponto inicial após a passagem do pulso. A Figura 5.10 apresenta o momento inicial para exemplificação do conceito mencionado anteriormente.

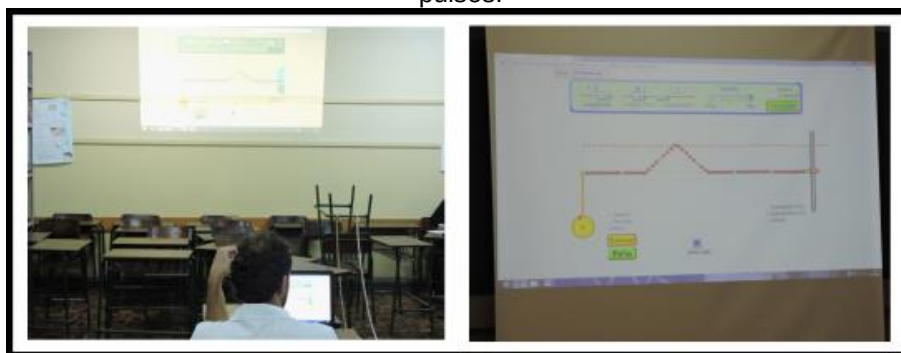
Figura 5.10 – Demonstração do transporte de energia sem o transporte de matéria.



Fonte: O autor.

Devido à dificuldade de realização da demonstração, o professor apresentou no final da Seção a simulação “onda em corda” (PhET, 2015), onde foram trabalhados os conceitos de reflexão de um pulso com a extremidade livre, confrontando com a reflexão observada com a corda com extremidade fixa. Ainda com o simulador foi apresentada a interferência entre dois pulsos. A Figura 5.11 apresenta os momentos da aplicação da aula utilizando o simulador.

Figura 5.11 – Utilização de um simulador mostrando a reflexão e interferência entre dois pulsos.



Fonte: O autor.

Como finalização, foi entregue o Texto de Apoio ao Educando referente à Seção, onde foi solicitado a sua leitura bem como a realização da atividade proposta, Quadro 4.1.

Para a aula referente à Seção 4, onde foram trabalhadas as propriedades de um pulso, os educandos participaram ativamente da aula, pois auxiliaram a amarrar a corda aos pés da carteira, bem como apoiar a carteira durante a aplicação do pulso, para que esta não se movesse. Além disso, houve grande interesse em observar cada passo realizado, como aferir a massa e medir a tensão das cordas. Foram também feitos questionamentos relevantes pelos educandos, como no momento em que estava sendo abordado o conceito de transporte de energia onde um educando levantou a questão do surfista no mar, uma vez que a onda leva a prancha junto.

Como atividade final proposta nesta Seção, o educando foi convidado a procurar no texto as palavras e/ou conceitos que completassem as lacunas presentes nas frases. Ao realizar a análise do mesmo, verificou-se que 83,3% dos educandos obtiveram êxito, respondendo corretamente todos os campos,

12,5% deixaram uma lacuna sem preenchimento e 4,16% realizaram a atividade preenchendo quatro dos oito campos presentes na atividade.

A Seção 5 iniciou com um vídeo produzido pelo professor mostrando uma corda sendo agitada (de cima para baixo) formando ondulações. A partir deste momento, foi fornecido o Texto de Apoio aos Educandos e realizada a sua leitura concomitantemente com as explicações dos conceitos físicos presentes no texto.

Nesta proposta de trabalho, os educandos questionaram alguns pontos, tais como: “Por que o nome de vale para o ponto de mínima amplitude de uma onda?”, momento que derivou uma alusão à disciplina de Geografia, em que a palavra se refere aos locais onde representa o ponto mais baixo de um terreno, cercado por montanhas.

Como atividade final, Quadro 4.1, da Seção 5 foi solicitado que os educandos, com base no Texto de Apoio da referida Seção, completassem as lacunas das frases e colocassem as palavras das lacunas nos referidos campos das palavras cruzadas logo em seguida. Ao realizar a análise dos dados obtidos na resolução desta atividade, notou-se que 66,7% dos educandos preencheram com louvor todos os campos, 12,5% deixaram um campo sem preencher, 12,5% preencheram de forma equivocada um campo, 4,16% preencheram de forma equivocada dois campos e deixaram um campo em branco e 4,16% dos educandos não realizaram a atividade proposta no texto de apoio.

A Seção 6 foi dividida em três aulas, em que na primeira teve início com um resumo de todas as aulas realizadas, os educandos foram instigados a relembrar os assuntos abordados nas aulas anteriores. À medida que os mesmos iam relatando os temas, o professor anotava em tópicos no quadro. Ao terminar a retrospectiva, o professor mostrou a evolução dos conceitos abordados em todas as Seções. Da forma que foi realizada e pelas observações da turma, este procedimento possivelmente resultou em um processo de reconciliação integrativa em alguns educandos.

Em seguida, foi realizada uma breve explicação sobre o aparato do experimento da corda, mostrando que havia um alto-falante acoplado a uma corda tensionada, e que em uma de suas extremidades havia uma determinada massa.

Com o auxílio de um gerador de frequência, foi aplicada no alto-falante uma determinada frequência (abaixo da frequência fundamental para aquele momento), e foi explicado aos educandos o conceito da frequência emitida pelo alto-falante, solicitando que estes tocassem no alto falante para sentir sua vibração.

Após este momento foi colocada uma segunda frequência (pouco acima da frequência fundamental), e solicitou novamente que os educandos tocassem o alto-falante.

Realizado o procedimento, o professor então, com o auxílio do gerador de frequência, aplicou a frequência referente ao primeiro harmônico naquelas condições: massa e fio, onde o alto-falante produziu na corda o padrão da onda estacionária. Neste momento, percebeu-se grande alvoroço por parte dos educandos, onde demonstraram espanto e curiosidade ao observar o formato que a corda produzia.

A partir deste momento, foi realizada a explicação de onda estacionária, mostrando que para determinadas frequências específicas uma corda vibrando forma um padrão como o ali apresentado.

Além do exposto, foi demonstrado também as frequências referentes ao segundo e terceiro harmônicos naquelas condições: massa e fio, e apresentadas as propriedades da onda estacionária. A Figura 5.12 apresenta um momento onde é colocada uma frequência referente ao segundo harmônico durante o momento da aula.

Realizadas as explicações iniciais sobre o funcionamento do aparato, foi aberto um momento para que os educandos pudessem investigar e manipular o aparato experimental.

Esta Seção também permitiu o aparecimento de perguntas interessantes, de forma geral, tais como: E se colocar uma corda mais grossa?, ou E se puxar com mais força a corda?, Por que antes não mexia aqui e agora mexe?. Tais questionamentos servem de evidências para uma possível Aprendizagem Significativa. A Figura 5.13 apresenta momentos onde os educandos manuseavam o aparato e realizavam suas investigações.

Figura 5.12 – Aplicação do experimento da corda em um momento da aula.



Fonte: O autor.

Figura 5.13 – Educandos manuseando e investigando o experimento da corda, em (a) investigando o alto-falante e em (b) explorando a corda.



Fonte: O autor.

Na segunda aula referente à Seção 6, depois das investigações realizadas pelos educandos, procedeu-se com a aplicação dos conceitos físicos envolvidos na produção das ondas estacionárias, realizando as deduções da equação para se calcular o valor da frequência fundamental e seus harmônicos.

Em primeiro momento, foi deduzida a equação para definir a frequência fundamental para o fio de 0,45 mm e massa de 20 g. Os educandos calcularam o valor de 20,8 Hz, porém ao colocar esta frequência no gerador de frequências não se formou a onda estacionária, como esperado. A partir de

tentativa e erro, foi observado que a onda aparecera em 25 Hz. O mesmo fato ocorreu ao aumentar a massa para 60 g, onde a partir dos cálculos realizados pelos educandos esperava-se a onda fundamental para a frequência de 36,8 Hz, porém a mesma produziu com a frequência de 40 Hz. Apesar da diferença observada para os cálculos, para ambas massas, ao colocar o dobro da frequência aferida para a fundamental, estas proporcionaram o segundo harmônico na corda.

Ao serem questionados, os educandos chegaram à conclusão respondendo que existe uma margem de erro e, assim foi explicado que todos os experimentos realizados na Física dependem de vários fatores externos, como material, o próprio experimento, que não é ideal (uma vez que, no caso do experimento da corda, o arame que faz vibrar a corda diminui o tamanho da mesma) entre outros.

Outros pontos levantados durante a Seção 6 referem-se à dificuldade dos educandos em perceber as relações entre as equações deduzidas no quadro. Além disso, houve um questionamento sobre o Texto de Apoio ao Educando trazer em seu cabeçalho a expressão: versão preliminar, e se iriam receber a nova versão. Foi comentado que a nova versão seria igual à que eles tinham recebido, porém com pequenas correções, não havendo a necessidade. No entanto, tendo a possibilidade, ao término das revisões, de ser fornecida a versão final para quem tiver o interesse.

Na última aula referente à Seção 6 os educandos receberam o Texto de Apoio. O professor realizou a sua leitura juntamente com os mesmos, realçando os principais passos do experimento e elucidando possíveis dúvidas. No final do texto os educandos se depararam com duas tabelas, onde a partir de alguns dados iniciais precisaram calcular a velocidade de propagação do pulso nos fios do experimento, bem como calcular as frequências correspondentes ao padrão de ondas estacionários para os fios.

Com os resultados nas tabelas, os educandos puderam ao final da Seção confrontar o que ocorria em relação à frequência quando eram trocados os fios (densidades lineares diferentes), bem como quando eram aplicadas tensões diferentes nos fios.

Foi possível observar durante a aplicação das três aulas da Seção 6 uma grande participação por parte dos educandos.

Da atividade presente no Texto de Apoio ao Educando, Quadro 4.1, referente à Seção 6, notou-se que 58,3% dos educandos tiveram acertos totais dos exercícios, 33,3% obtiveram alguns erros durante a resolução, 4,16% realizou apenas a metade da atividade e 4,16% não realizou a atividade proposta.

Na Seção 7, trabalhou-se os conceitos diretamente relacionados aos instrumentos musicais, onde foi apresentada a construção da escala pitagórica, bem como conceitos de timbre e composição harmônica. Após este primeiro momento, a turma foi organizada em 4 (quatro) equipes e foi fornecido dois monocórdios e dois violões rudimentares. Foi solicitado que os educandos manipulassem novamente os instrumentos observando os conceitos físicos estudados até então, e realizassem a troca entre as equipes, manuseando todos os instrumentos levados, este momento em particular debateu-se as ocorrências, as observações e as indagações, espaço que proporcionou ao professor a realização da avaliação qualitativa sobre a aplicação do Produto, inferindo um processo de recursividade e de negociação de significados com momentos para a ocorrência de diferenciação progressiva e reconciliação integrativa em alguns educandos.

Para finalizar esta Seção foi solicitada a execução de um caça palavras, Quadro 4.1, presente ao final do Texto de Apoio ao Educando. Em relação a este exercício 54,2% dos educandos responderam corretamente todos os campos, 4,16% preencheu de forma equivocada um dos campos, 25% esqueceram de preencher alguns campos e 16,7% dos educandos não realizaram a atividade proposta.

Por fim, na Seção 8 foi realizada a avaliação quantitativa, Quadro 4.1, a qual foi composta por 8 questões, sendo destas, 4 questões eram objetivas, 2 questões necessitavam de cálculo para sua resolução e 2 questões eram descritivas.

Como início da Seção, foram apresentados dois textos, sendo o primeiro texto, um fragmento de um texto contido em um livro de graduação, que tratava das cordas dos instrumentos musicais e apresentava a técnica utilizada nos pianos para se obter notas mais graves partir da variação da densidade linear da mesma, sem precisar mudar o comprimento do mesmo. O segundo texto tratava de um texto fictício, elaborado por um dos autores do Produto, onde se

trabalhava a construção de um instrumento musical inovador, onde o mesmo possui um mecanismo que mantém a tensão na corda sempre igual garantindo, por sua vez, uma afinação constante. Os textos seriam utilizados para responder às questões 3, 4, 6 e 7 da avaliação.

Na questão 1, ao perguntar sobre o que ocorreria com a velocidade de propagação de uma onda ao se aumentar o comprimento de uma corda, 11,5% responderam de forma correta a questão, dizendo que a velocidade não modifica, enquanto 80,7% dos educandos disseram que a velocidade diminui e 7,7%, que a velocidade aumenta.

Para a questão 2, quando questionados sobre o que ocorreria com a velocidade de propagação de uma onda ao se trocar uma determinada corda por uma outra corda, de mesmo material que a primeira, porém com densidade linear maior, 84,6% responderam corretamente à questão, dizendo que a velocidade diminui, enquanto 15,3% disseram que a velocidade aumenta.

A questão 3, referente ao primeiro texto abordado, os educandos precisaram responder à seguinte questão: Ao ler o texto, quando o autor descreve “aumentar a altura”, ele se refere:. E como resultado, 19,2% dos educandos responderam de forma correta, dizendo que o autor se referia a aumentar a frequência da onda, enquanto que 76,9% dos educandos responderam que seria para aumentar a amplitude da onda e 3,8% dos educandos respondeu que seria para aumentar o comprimento de onda da corda.

Para a questão 4, também do primeiro texto, foi questionado qual a intenção é de se realizar um procedimento de enrolar uma corda com um fio. Referente a isto, 19,2% dos educandos responderam corretamente à questão, dizendo que seria para aumentar a densidade linear da corda; 65,3% dos educandos relataram que seria para diminuir a densidade linear da corda e 15,3% dos educandos disseram que não se alteraria nada ao se fazer tal procedimento.

Na questão 5 os educandos se depararam com uma questão descritiva, onde estes precisariam lançar mão dos conceitos abordados nas aulas anteriores, bem como suas observações e investigações realizadas nos monocórdios e nos violões, para fazer um breve relato sobre os conceitos físicos envolvidos nos instrumentos de cordas ao tocá-los. Como resultados,

26,9% dos educandos fizeram um bom relato, porém com poucos conceitos físicos; 3,8% dos educandos não apresentaram relato, colocando apenas alguns conceitos físicos; 23% dos educandos realizaram relato superficial, porém sem explicar os conceitos físicos envolvidos; 3,8% dos educandos realizaram a cópia de conceitos físicos através da explicação feita pelo professor e 42,2% dos educandos não responderam de forma coerente à questão.

A questão 6, referente ao segundo texto abordado, os educandos foram desafiados a realizar alguns cálculos para poder calcular a tensão da corda para que mantenha a frequência fundamental da corda. A partir disso, observou-se que 11,5% dos educandos conseguiram fazer a resolução da questão de forma correta; 11,5% resolveram a questão de forma parcial e 76,9% dos educandos não conseguiram resolver a questão.

Como questão 7, utilizando-se dos conceitos estudados na Seção anterior, os educandos precisaram calcular a posição em que se deveria colocar um traste (comprimento da corda) no instrumento do segundo texto para que este obtivesse determinada nota. Em relação a isto, 19,2% dos educandos conseguiram resolver a questão corretamente; 73% dos educandos não conseguiram resolver a questão, 3,8% apresentou o resultado final corretamente, porém não apresentou os cálculos e 3,8% dos educandos não responderam de forma coerente à questão.

Por fim, a questão 8 consistiu em uma questão descritiva e aberta, onde os educandos foram convidados a fazer um breve relato sobre a sua apreciação pelo método utilizado nas aulas, bem como fazer um breve relato sobre o assunto abordado, tentando relacionar o funcionamento do monocórdio ou do violão com os conceitos físicos. Em relação aos resultados obtidos, 3,8% dos educandos não responderam a esta questão, 15,4% responderam que gostaram e que preferem aulas deste tipo, porém apresentaram dificuldade em compreender alguns conceitos do conteúdo trabalhado, 61,5% dos educandos relataram que gostaram das aulas, porém apresentaram de maneira vaga a relação da Física com os instrumentos musicais, sem abordar os conceitos físicos sendo de forma geral a resposta que gostaram e viram relação com a física e 19,3% dos educandos gostaram e tentaram relatar alguns apontamentos no que se refere ao funcionamento do violão e do monocórdio

com a Física, levantando alguns conceitos como densidade, velocidade, propagação e frequência.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Diante do exposto no Capítulo 5, desta dissertação, é possível notar que na avaliação referente à Seção 8, que os educandos não conseguiram obter o êxito esperado. Porém, ao analisar os resultados de cada exercício proposto ao longo das sete Seções anteriores é possível verificar que em sua grande maioria, os educandos responderam com êxito todas as atividades propostas.

Esta observação pode ser justificada pelo fato dos educandos não estarem habituados a resolver os tipos de questões propostas, as quais possuem a necessidade de interpretação do texto para as suas resoluções.

No que se refere à realização e aplicação do Produto constatou-se que com a sequência de aulas realizadas é possível contemplar o estudo das ondas mecânicas, além disso, verificou-se que os trabalhos com instrumentos musicais e experimentos em sala de aula propiciaram uma melhor interação dos educandos com os conteúdos trabalhados porque instigou os mesmos a realizarem perguntas voltadas para as observações do seu dia a dia.

Assim, observou-se uma pré-disposição em aprender por parte do educando e uma diminuição da distância entre teoria e prática, a qual o leva a refletir a partir de sua realidade e a se imaginar como parte integrante do novo conhecimento adquirido.

Em relação ao ensino, verifica-se que por meio da metodologia aplicada, há relevância em procurar, quando possível, a negociação de significados, permanente busca em considerar os conhecimentos prévios e os possíveis subsunçores de cada educando, usar processos de recursividade, e promover os processos de diferenciação progressiva e reconciliação integrativa. Paralelamente, do ponto de vista da aprendizagem, ao observar as ações coletivas e individuais dos educandos, pode-se inferir que houve momentos de ocorrência do processo de diferenciação progressiva e do processo de reconciliação integrativa em alguns educandos.

Avanços também foram verificados no que se refere à confecção dos Textos de Apoio ao Professor e aos experimentos elaborados, pois admitem possíveis reproduções por parte de outros profissionais, bem como os Textos de Apoio ao Educando que permitem a realização de novas leituras e revisões futuras por parte dos educandos.

Por fim, destaca-se que a proposta inicial é vista com bons olhos, uma vez que proporcionou por meio de uma prática diferenciada avanços no processo de ensino-aprendizagem porque os educandos em contato com materiais alternativos demonstraram maior interesse e participação. Assim, espera-se que o conteúdo desta pesquisa sirva como material de apoio total ou parcial para outros pesquisadores, permitindo um ensino de Física diferenciado e conseqüentemente promovendo aos educandos uma aprendizagem significativa e prazerosa.

Como proposta para uma nova aplicação sugere-se em trabalhar durante o processo com os educandos interpretação de textos, permitindo assim um trabalho interdisciplinar. Para isto, torna-se necessário um desmembramento das Seções abordadas em maior número de aulas.

REFERÊNCIAS

ARNOLD, F. J. et al. Estudo do amortecimento do pêndulo simples: uma proposta para aplicação em laboratório de ensino. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 4. 2011. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/334311.pdf>>. Acesso em 01 jul. 2016.

BECKER, F. O que é construtivismo. **Revista de educação AEC**, Brasília, v. 21, n. 83, p. 7-15, 1992. Disponível em: <http://maratavarepsictics.pbworks.com/w/file/fetch/74464829/oqueue_construtivismo.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2016.

BESSA, V. da H. Teorias de aprendizagem. Curitiba: IESDE Brasil S.S., 2008. 204p.

BIANCHINI, L. G. B. et al. Desenvolvimento e Aprendizagem. In: Instituto de Estudos Avançados e Pós Graduação (Org.). **Curso de Pós-graduação lato sensu – Neuropedagogia**. UNIVALE, 2013. Cap. 5. 137-172.

BRASIL, MEC. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. **Parâmetros Curriculares Nacionais - Ensino Médio**: orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais. Brasília, 2002. 144p. Disponível em <portal.mec.gov.br/seb/arquivo/pdf/cienciasnatureza.pdf>. Acesso em: 01 out. 2014.

_____. **Falta de professores preocupa especialistas**. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/busca-geral/222-noticias/537011943/9885-sp-604135961>>. Acesso em: 13 abr. 2015.

CAMPAGNOLI, D. **Instrumentos de corda**. Disponível em: <<http://violinando.com/instrumentos-de-cordas/>>. Acesso em: 08 out. 2015.

CAVICCHIA, D. C. **O desenvolvimento da criança nos primeiros anos de vida**. UNESP, São Paulo. Disponível em: <<http://www.acervodigital.unesp.br/bitstream/123456789/224/1/01d11t01.pdf>>. Acesso em 01 jul. 2016.

COSTA, S. S. C. da, KRUMMENAUER, W. L., PASQUALETTO, T. I. O uso de instrumentos musicais como ferramenta motivadora para o ensino de acústica no ensino médio. **A Física na Escola**. V. 10, n. 2, P.22-24, 2009. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol10/Num2/a07.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2015.

CRUZ, A. R. L. da, et al. **Pêndulo Simples**. 2012. 20f. Relatório de laboratório (Laboratório de Física) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/RobertoLeao/relatrio-pndulo-simples-turma-t5>>. Acesso em 23 abr. 2016.

CRUZ, C. C. **A teoria cognitivista de Ausubel**. Disponível em: <http://www.robertexto.com/archivo3/a_teorias_ausubel.htm>. Acesso em: 02 Nov. 2016.

DONOSO, J. P. et al. A acústica do violino. **CiêNCia Hoje**, v. 45, n. 267, 2010. Disponível em: <<http://www.escolamobile.com.br/emedio/e-sapiens/fisica/arquivos/artigos/a-acustica-do-violino.pdf>>. Acesso em: 29 mai. 2016.

GABRIEL, A. **Instrumentos que utilizam cordas**. Disponível em: <<http://theguitar10.blogspot.com.br/2011/03/historia-o-primeiro-instrumento-de.html>>. Acesso em: 25 jun. 2016.

GOMES, P. **Currículo do ensino médio é grande demais**. Disponível em: <<http://porvir.org/porpensar/curriculo-ensino-medio-e-grande-demaais/20130807>>. Acesso em: 13 abr. 2015.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos da Física**. v. 2, 8. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

HERRERO, Raul. Pitágoras en el momento del triunfo del cristianismo. Disponível em: <<http://raulherrero.blogia.com/2006/071801-pitagoras-en-el-momento-del-triunfo-del-cristianismo.php>>. Acesso em: 28 mai. 2016.

HEWITT, P. G. **Física Conceitual**. 9. ed. São Paulo: Bookman, 2002.

IGNACIO, B. S. F. et al. **Cordas Vibrantes**. Universidade do Estado de São Paulo. Sorocaba, 2012. Disponível em: <http://www.sorocaba.unesp.br/Home/Extensao/Engenhocas/Carculetas_Atomicas_-_Roteiro_Final.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2014.

INKSCAPE. **Draw Freely**. Disponível em <<https://inkscape.org>>. Acesso em 26 mai. 2016.

KELLER, F.J.; GETTIS W. E.; SKOVE, M. J. **Física, Volume 2**. São Paulo: Pearson, 1999.

LAHERA, J.; FORTEZA, A. **Ciências físicas no ensino fundamental e médio: modelos e exemplos**. Porto Alegre: Artmed, 2006.

LIMA, F. D. A. **As disciplinas de física na concepção dos alunos do ensino médio na rede pública de fortaleza/CE**. 2011, 36f. Monografia (Graduação em Física) – Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2011. Disponível em: <http://www.uece.br/fisica/index.php/arquivos/doc_download/113-as-disciplinas-de-fisica-na-concepcao-dos-alunos-do-ensino-medio-na-rede-publica-de-fortalezace>. Acesso em 15 abr. 2015.

MAEOCA, G. da S. **Construção de instrumentos musicais artesanais por aluno, para auxiliar na aprendizagem de conceitos físicos relacionados as ondas sonoras**. 2012, 127f. Dissertação (Programa de Pós-graduação em

Ensino de Ciências) Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Disponível em: <http://www.ppec.ufms.br/Dissertacoes/Dissertacao_Glaucia_Maeoca.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2015.

MELLO, G. I. de. Produzindo ondas transversais em cordas de nylon. **A Física na Escola**, V. 8, n. 2, 2007. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol8/Num2/v08n02a08.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2015.

MOREIRA, M. A. **Teorias de Aprendizagem**. São Paulo: EPU, 1999.

MORENO, A. C. **Só 2% dos professores participam de treino prático na carreira, diz estudo**. Disponível em <<http://g1.globo.com/educacao/noticia/2014/07/falta-incentivo-para-formacao-continuada-de-professores-diz-estudo.html>>. Acesso em: 13 abr. 2015.

MOURA, D. de A.; NETO, P. B. O ensino de acústica no Ensino Médio por meio de instrumentos musicais de baixo custo. **A Física na Escola**, V. 12, n. 1, 2011. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol12/Num1/acustica.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2015.

PARANÁ. Secretaria de Estado da Educação. **Diretrizes Curriculares da Educação Básica: Física**. Curitiba: SEED-PR, 2008. Disponível em: <www.educadores.diaadia.pr.gov.br/arquivos/file/diretrizes/dce_fis.pdf>. Acesso em: 22 Set. 2014.

_____. Secretaria de Estado da Educação. **Caderno de expectativas de aprendizagem**. (Departamento de Educação Básica). Curitiba: SEED-PR, 2012. Disponível em: <www.educadores.diaadia.pr.gov.br/arquivos/file/diretrizes/caderno_expectativas.pdf>. Acesso em: 21 set. 2014.

PELIZZARI, A. et al. Teoria da aprendizagem significativa segundo Ausubel. **Revista PEC**, v. 2, n. 1, p. 37-42, 2002. Disponível em: <<http://portaldoprofessor.mec.gov.br/storage/materiais/0000012381.pdf>>. Acesso em 21 mar. 2016.

PEREIRA, R. M. **Abordagem ativa da música no Ensino Médio com a confecção de artefatos musicais pelos alunos**. 2013, 87f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Exatas) - Universidade de São Carlos São Carlos, 2013. Disponível em: <http://www.btdtd.ufscar.br/htdocs/tedeSimplificado/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=6572>. Acesso em: 10 abr. 2015.

PERES, L. S. **Matemática e Música: em busca da harmonia**. Disponível em: <<http://www.contrabaixobr.com/t17527-musica-e-matematica-a-relacao-harmoniosa-entre-sons-e-numeros>>. Acesso em 18 jun. 2016.

PETFísica Uem. **Oficina de experimentos PET**: Pendulo de Areia. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=1y5hZAQw0OI>>. Acesso em 22 mai. 2016.

PhET - Simulações Interativas Em Ciências E Matemática. **Onda em corda**. Disponível em: <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/wave-on-a-string>. Acesso em: 13 jun. 2015.

PRADO, D. **¡Como se ven las cuerdas dentro de la guitarra!...¡Increíble!**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=xYcSy146LAM>>. Acesso em: 10 out. 2015.

RAUCH, L. A.; BRINATTI, A. M.; PIRES, L. F. **Nas cordas dos instrumentos musicais**. Ponta Grossa: UEPG, 2016. Não publicado.

RIBEIRO JÚNIOR, I. S.; CROCHIK, L. . A Construção de Escalas Musicais e Instrumentos Musicais de Baixo Custo Como Recurso Didático Para o Ensino de Física Ondulatória. In: Simpósio Nacional de Ensino de Física, 2009, Vitoria. **Anais do XVIII SNEF**, 2009. Disponível em: <http://www.ciencia.iao.usp.br/dados/snef/_aconstrucaodeescalasmusi.trabalho.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2015.

SOARES, L. C. **O monocórdio de Pitágoras**. Disponível em: <<http://www.ghc.usp.br/server/Sites-HF/Lucas-Soares/Home.html>>. Acesso em: 21 mar. 2015.

SÓ MATEMÁTICA. **Mundo Matemático**. Disponível em: <<http://www.somatematica.com.br/mundo/musica6.php>>. **Acesso em 18 jun. 2016**.

TIPLER, P. A; MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros**. V.1, 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

VASCONCELOS, J. **Como fazer uma viola de lata**. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=Ubb3D1YkM_w>. Acesso em 06 nov. 2015.

WUENSCHÉ, C. A. **A física da música**. Disponível em: <http://www.cea.inpe.br/~alex/FisicadaMusica/fisica_da_musica.pdf>, 2005. Acesso em 04 Dez. 2015.

YOUNG, D. H.; FREEDMAN R. A. **Física II**. 10. ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2003.

ANEXO

Nas cordas dos instrumentos musicais

MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

UEPG
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA

SBF
SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

Nas cordas dos instrumentos musicais

Luís Alexandre Rauch

André Maurício Brinatti

Luiz Fernando Pires

2016

APRESENTAÇÃO

O presente conjunto de materiais de apoio e aparatos experimentais denominado **Nas cordas dos instrumentos musicais**¹ foi idealizado tendo por objetivo facilitar a aplicação de aulas para o estudo de ondas mecânicas em cordas, utilizando instrumentos musicais e experimentos demonstrativos, ambos confeccionados com materiais alternativos e de fácil acesso, e materiais de apoio, buscando uma aprendizagem significativa do educando.

O material aqui apresentado contempla uma unidade didática contendo oito seções, distribuídas em doze aulas, material de apoio e aparatos experimentais, o qual está dividido na seguinte estrutura: planejamento (questionário investigativo, plano de unidade e planos de seções), conceitos físicos abordados em sala de aula, Textos de Apoio ao Professor, Textos de Apoio ao Educando, manuais de montagem dos instrumentos musicais e experimentos demonstrativos, além de vídeos, slides e simulações utilizadas em sala de aula.

Vale destacar que cada item contemplado neste Produto é único e independente em sua aplicabilidade, podendo ser trabalhado de forma em separado por parte do professor, caso este deseje utilizar apenas como forma de complementação do seu conteúdo previsto.

Os autores.

¹ Material desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física – Mestrado Profissional, da Universidade Estadual de Ponta Grossa, Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física – MNPEF, da Sociedade Brasileira de Física – SBF, como polo 35.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO.....	98
2 – PLANEJAMENTO.....	100
Questionário investigativo para aplicação do projeto de Mestrado ..	101
Plano de Unidade e Planos de Seção.....	104
Plano de Unidade – Nas cordas dos instrumentos musicais.....	106
Plano de Seção 1 – “Com a corda toda!”.....	111
Slides referentes à Seção 1 – “Com a corda toda!”.....	116
Plano de Seção 2 – “Com que frequência?”.....	119
Slides referentes à Seção2 – “Com que frequência?”.....	124
Plano de Seção 3 – “Um balançar legal!”.....	126
Slides referentes à Seção 3 – “Um balançar legal!”.....	132
Plano de Seção 4 – “Um pulso...”.....	135
Slides referentes à Seção 4 – “Um pulso...”.....	143
Plano de Seção 5 – “Com a onda toda!”.....	146
Slides referentes à Seção 5 – “Com a onda toda!”.....	149
Plano de Seção 6 – “Uma onda parada?”.....	151
Slides referentes à Seção 6 – “Uma onda parada?”.....	159
Plano de Seção 7 – “Voltando ao início...”.....	162
Slides referentes à Seção 7 – “Voltando ao início...”.....	167
Plano de Seção 8 – “Um final para o novo começo!”.....	170
3 – ONDAS MECÂNICAS E INSTRUMENTOS	
MUSICAIS DE CORDAS.....	172
3.1 Instrumentos musicais de cordas.....	173
3.2 Movimento Periódico.....	174
3.3 Pêndulo Simples.....	175
3.4 Movimento Harmônico Simples.....	179
3.5 Pulso.....	184
3.5.1 Velocidade de um pulso.....	185
3.5.2 Transporte de energia sem transporte de matéria.....	186
3.5.3 Reflexão de um pulso.....	187

3.5.4 Superposição entre dois pulsos.....	188
3.6 Ondas.....	190
3.7 Ondas Estacionárias.....	194
3.8 Pitágoras na formação da escala musical ocidental.....	199
3.8.1 A contribuição de Zarlino.....	200
3.9 Composição Harmônica.....	202
3.10 Timbre.....	204
4 – TEXTOS DE APOIO.....	206
TEXTOS DE APOIO AO PROFESSOR.....	207
Capa – Texto de Apoio ao Professor.....	208
Apresentação – Texto de Apoio ao Professor	209
Seção 1 – “Com a corda toda!” (Professor).....	210
Seção 2 – “Com que frequência?” (Professor).....	214
Seção 3 – “Um balançar legal!” (Professor).....	216
Seção 4 – “Um pulso...” (Professor).....	220
Seção 5 – “Com a onda toda!” (Professor).....	225
Seção 6 – “Uma onda parada?” (Professor).....	230
Seção 7 – “Voltando ao início...” (Professor).....	236
Seção 8 – “Um final para o novo começo!” (Professor).....	241
TEXTOS DE APOIO AO EDUCANDO.....	244
Capa– Texto de Apoio ao Educando.....	245
Apresentação – Texto de Apoio ao Educando	246
Seção 1 – “Com a corda toda!” (Educando).....	247
Seção 2 – “Com que frequência?” (Educando).....	251
Seção 3 – “Um balançar legal!” (Educando).....	253
Seção 4 – “Um pulso...” (Educando).....	257
Seção 5 – “Com a onda toda!” (Educando).....	262
Seção 6 – “Uma onda parada?” (Educando).....	267
Seção 7 – “Voltando ao início...” (Educando).....	273
Seção 8 – “Um final para o novo começo!” (Educando).....	278
5 – MANUAIS DE MONTAGEM.....	280
5.1 Monocórdio de Pitágoras.....	281

5.2 Violão de lata.....	286
5.3 Aparato para o experimento do pêndulo.....	290
5.4 Aparato para o experimento da corda.....	294
5.4.1 Procedimentos de montagem do experimento de corda	299
6 – VÍDEOS, SLIDES E SIMULAÇÕES.....	301
REFERÊNCIAS.....	303

1 – INTRODUÇÃO

Existe uma necessidade real para o ensino de Física em buscar o interesse do educando para um aprendizado significativo. Esta necessidade é reforçada quando analisamos os fatores que ocasionam o desinteresse ou a dificuldade no Ensino de Física.

A disciplina é vista pelos professores como sendo de difícil aplicação (Lima, 2011). O problema se torna maior quando se observa o número reduzido de profissionais formados na área (BRASIL, 2008), o que ocasiona prejuízos na qualidade do ensino. Além disso, no que se refere aos educandos Machado (s/ano) apud Gomes (2013) destaca que o excesso de disciplinas no ensino médio é árduo, acarretando a desmotivação e/ou evasão escolar.

Considerando também a realidade dos colégios públicos, e buscando criar alternativas diferenciadas que propiciem o aumento do interesse por parte dos educandos em aprender, foi idealizado o presente Produto, conforme descrito na Apresentação, para o estudo de ondas mecânicas em cordas.

A escolha do tema: ondas mecânicas é justificado porque está previsto nos documentos oficiais como item fundamental do currículo de Física. As Diretrizes Curriculares do Estado do Paraná (PARANÁ, 2008) destacam que o estudo da ondulatória deve ocorrer a partir das ondas mecânicas que, segundo o documento, são perceptíveis no cotidiano do educando. Os Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (BRASIL, 2002) abordam a necessidade de trabalhar a natureza ondulatória comum à luz e ao som, e reconhecer suas características físicas. O Caderno de Expectativas de Aprendizagem (PARANÁ, 2012), traz a ondulatória no conteúdo estruturante Eletromagnetismo, sendo ressaltada a importância da compreensão, por parte do educando, de vários aspectos, tais como onda como uma perturbação no tempo e no espaço, transporte de energia sem transporte de matéria; conhecimento das grandezas físicas: comprimento de onda, velocidade, período, frequência e amplitude e suas unidades de medida.

Ressalta-se que, para melhor compreensão, o presente Produto contém seis capítulos, este introdutório e mais cinco.

No segundo capítulo estão contemplados os planejamentos realizados para as aulas, como o questionário investigativo aplicado aos educandos e o plano de unidade e planos de seções.

Para o terceiro capítulo são apresentados os conceitos físicos relacionados às ondas mecânicas e aos instrumentos musicais, os quais foram utilizados no decorrer da atividade proposta. Entre os conceitos estão: movimento periódico, movimento harmônico simples, ondas mecânicas, escala pitagórica, entre outros.

No quarto capítulo são apresentados os Textos de Apoio ao Educando onde contém os conceitos físicos abordados na aplicação do produto e transcritos a partir de livros de graduação para uma linguagem de educando de Ensino Médio e também o Texto de Apoio ao Professor que são textos idênticos, porém com as soluções das atividades propostas.

No quinto capítulo são apresentados os manuais de montagem dos instrumentos musicais bem como os aparatos experimentais utilizados durante a aplicação do produto.

Enfim, no sexto e último capítulo apresenta-se a relação dos vídeos, simulação e slides utilizados durante a aplicação do produto.

2 –PLANEJAMENTO

O presente capítulo tem o objetivo de preparar inicialmente o professor para aplicação do conteúdo de ondas mecânicas em cordas na sala de aula. Nele está disponível o Questionário Investigativo, o qual proporciona ao professor a realização de uma investigação inicial com os educandos para conhecer a realidade e anseios dos mesmos, além disso, o referido capítulo apresenta o Plano de Unidade e os Planos de Seções, aqui referente às 08 (oito) Seções, que consistem na sistematização das atividades a serem desenvolvidas em sala de aula num determinado período de tempo visando atender a uma sequência didática.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
PRÓ REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA MESTRADO
NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA – PÓLO 35

PROFESSOR MESTRANDO: Luís Alexandre Rauch

PROFESSOR ORIENTADOR: Prof. Dr. André Maurício Brinatti

PROFESSOR COORIENTADOR: Prof. Dr. Luiz Fernando Pires

QUESTIONÁRIO INVESTIGATIVO PARA APLICAÇÃO DO PROJETO DE
MESTRADO

ELABORAÇÃO DE UM CONJUNTO DE MATERIAIS DE APOIO E APARATOS
EXPERIMENTAIS PARA O ESTUDO DE ONDAS MECÂNICAS POR MEIO DE
CORDAS

COLÉGIO _____

Nome: _____

GUPO PERFIL DO EDUCANDO

1 – Você costuma estudar em casa?

() Sim.

() Não.

2 – Seus pais participam da sua vida escolar, estão interessados com seus estudos e ajudam você nos trabalhos escolares?

() Sim.

() Não.

3 – Você faz trabalhos e tarefas escolares em casa quando o professor solicita?

() Sim.

() Não.

4 – Se a resposta anterior for sim, quando os professores pedem trabalho para fazer, ou pesquisar em casa, você procura fazer logo que eles pedem ou deixa para o último dia?

() Procuro fazer logo.

() Deixo para o último dia.

() Faço no dia de entregar o trabalho, na sala antes da aula.

() Faço no dia, copiando o trabalho feito por um colega.

() Não faço o trabalho.

5 – Você possui computador/notebook em casa ou tem acesso fácil à internet?

() Sim.

() Não.

6 – Você já fez aulas experimentais, de química, física ou biologia?

() Sim.

() Não.

7 – Quando os professores fazem aulas experimentais, você consegue entender melhor a matéria, ou associar com conhecimentos do seu dia a dia?

() Sim.

() Não.

() Nunca fiz aula experimental.

GRUPO MOTIVADOR

8 – Você gosta de música?

() Sim.

() Não.

9 – Você tem acesso à música em sua casa?

() Sim.

() Não.

10 – Você já foi a algum show musical?

() Sim.

() Não

Se sim qual(is)? _____

11 – Qual o estilo de música você mais gosta?

() Rock.

() Pop Brasileiro.

() Pop Internacional.

() Sertanejo.

() Música Raiz.

() Funk Nacional.

() Clássica.

() Gospel.

() Sou eclético (gosto de todos os tipos de música).

() Outro. Qual? _____

12 – Você já chegou a tocar ou simplesmente mexer em algum instrumento musical?

() Sim, eu já toquei ou mexi no/na _____.

() Não.

13 – Teria interesse em saber tocar algum instrumento?

() Sim, eu gostaria de tocar o/a _____.

() Não.

BLOCO QUALIFICADOR

14 – Quando você vê aqueles desenhos e figuras de música, como por exemplo, estes apresentados aqui



ou



you diz que são:

() Representação de notas musicais.

() Apenas desenhos.

() Não quer dizer nada.

() São apenas figuras.

15 – Você acredita que sabe definir o que significa uma nota musical?

() Sim.

() Não.

Se sim, diga: o que é uma nota musical? _____

16 – Quando alguém lhe fala: dó-ré-mi-fá-sol-lá-si-dó, nesta ordem, você diz que:

() São somente notas musicais.

() É uma escala musical.

() Não quer dizer nada.

Plano de Unidade e Planos de Seção

Para a aplicação do presente Produto foram planejadas 08 (oito) seções, distribuídas em 12 (doze) aulas. Cada seção contemplada nas aulas está relacionada a um assunto específico, buscando apreciar a construção dos conceitos físicos para explicar as ondas mecânicas em cordas.

A Seção 1 consiste em fornecer quatro instrumentos musicais de cordas, diferentes entre si, para que os educandos investiguem a produção do som nestes. Em seguida, é entregue o Texto de Apoio ao Educando referente à Seção 1, onde é realizada a leitura e como atividade os educandos completam lacunas existentes no decorrer deste.

Para a Seção 2 são investigados aparatos e ações como a roda de uma bicicleta girando com uma pequena velocidade, o ponteiro de um relógio analógico e uma baqueta de caixa de bateria utilizada para produzir batidas sobre uma mesa. Em seguida, são abordados os conceitos físicos relativos ao que foi observado, como Movimento Periódico, Período e Frequência. Ao final da aula é entregue o Texto de Apoio ao Educando referente à Seção 2 para a realização da atividade de um caça palavras.

A Seção 3 é composta por duas aulas. A primeira aula tem por finalidade a aplicação do experimento do pêndulo, o qual consiste em dois momentos: a base sob o pêndulo é fixa e a base sob o pêndulo é móvel. Após a realização de tal experimento são estudados os conceitos físicos presentes no aparato. O segundo momento da aula referente à Seção 3 propõe a leitura do Texto de Apoio por parte do educando onde o mesmo deve realizar a atividade ligando os conceitos descritos às suas definições.

Na Seção 4, também composta por duas aulas, consiste no estudo do pulso em uma corda, e suas características físicas. Na primeira aula desta Seção é aplicado o experimento do pulso em duas cordas diferentes, onde são abordados conceitos como densidade linear, tensão e velocidade, além da interferência entre dois pulsos. Na segunda aula referente à Seção 4 realiza-se leitura do Texto de Apoio ao Educando juntamente com o educando e solicita-se a realização da atividade de completar conceitos abordados na aula nas lacunas presentes nas frases.

Na Seção 5 são estudados os conceitos de ondas em uma corda e suas propriedades. Após o desempenho da proposta é fornecido o Texto de Apoio ao Educando referente à Seção 5 para leitura e resolução do exercício.

Em seguida, tem-se a Seção 6, cujo objetivo é o estudo de ondas estacionárias. Esta é dividida em três aulas, sendo a primeira destinada à manipulação e investigação do experimento de corda por parte dos educandos, a segunda aula abrange os conceitos físicos presentes na experimentação, bem como deduções de equações, e a terceira aula a leitura do Texto de Apoio ao Educando com a efetivação dos exercícios.

Como encerramento, no que se refere à formulação dos conceitos físicos relacionados aos instrumentos de cordas, a Seção 7 visa à construção da escala musical ocidental, desenvolvida por Pitágoras ao estudar a relação do som com o comprimento e a tensão de uma corda e adaptada por Zarlino. Além disso, são abordados os conceitos de Timbre e composição harmônica. Esta Seção é finalizada com a realização de um caça palavras como atividade avaliativa.

A fim de contemplar o estudo das ondas mecânicas, a Seção 8 traz dois textos, ambos relacionados a instrumentos musicais de cordas, além de oito questões, divididas entre questões de múltipla escolha, de cálculos e questões descritivas.

Perante a descrição anterior, será apresentado o Plano de Seção, referente à unidade didática elaborada para o estudo de ondas mecânicas em cordas e os Planos de Seção desenvolvidos, para aplicação do Produto.

PLANO DE UNIDADE
NAS CORDAS DOS INSTRUMENTOS MUSICAIS

1. IDENTIFICAÇÃO

1.1 CURSO: Ensino Médio

1.2 DISCIPLINA: Física

1.3 CARGA HORÁRIA: 12 horas-aula

1.4 PERÍODO: Noturno

1.5 SEMESTRE: 2º.

1.6 ANO LETIVO: 2015

1.7 PROFESSOR: Luís Alexandre Rauch

2. EMENTA

- a) Instrumentos musicais de corda;
- b) Movimento periódico, período e frequência;
- c) Pêndulo Simples e Movimento harmônico simples;
- d) Pulso e suas características;
- e) Ondas transversais em cordas;
- f) Ondas estacionárias;
- g) Escala de Pitágoras, Composição harmônica e Timbre.

3. OBJETIVO

Relacionar conceitos de ondas mecânicas às notas musicais produzidas por instrumentos de corda a partir da manipulação de instrumentos musicais de cordas confeccionados com materiais de fácil acesso aliados com a demonstração de experimentos em sala de aula.

4. CONTEÚDO PROGRAMÁTICO

- 1 – Interação dos educandos com instrumentos musicais de cordas;
- 2 – Introdução dos conceitos de movimento periódico, período e frequência a partir de demonstrações de materiais como relógio e roda de bicicleta;
- 3 e 4 – Aula com experimento demonstrativo: Pêndulo Simples;
- 5 e 6 – Aula com experimento demonstrativo: Pulso em uma corda;
- 7 – Ondas transversais em uma corda;
- 8, 9 e 10 – Aula com experimento demonstrativo: Experimento da corda – conceito de ondas estacionárias;
- 11 – Apresentação da criação da Escala de Pitágoras, introdução de conceitos de composição harmônica e timbre;
- 12 – Atividade Avaliativa: interpretação de texto e cálculos para determinação de velocidade de onda e comprimento de corda.

5. METODOLOGIA

Os temas de cada aula serão desenvolvidos a partir de uma problematização inicial simplesmente com questionamentos ou com uso de vídeos promovendo a participação ativa dos educandos.

Em seguida, o assunto será abordado a partir de experimentos demonstrativos, vídeos, simulações e instrumentos musicais de acordo com cada aula e os educandos serão instigados a desenvolver os conceitos físicos apresentados naquela situação.

O encerramento do assunto será feito com a retomada da problematização inicial, com a leitura do Texto de Apoio ao Educando e realização do exercício proposto no mesmo.

6. AVALIAÇÃO

AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE ENSINO-APRENDIZAGEM

A avaliação será realizada de forma continuada, com enfoque qualitativo do aprendizado do educando, por meio de observações em sala a respeito do interesse e participação do mesmo no processo de ensino-aprendizagem. Além disso, serão avaliadas as resoluções feitas pelo educando ao final de cada Texto de Apoio ao Educando fornecido a este de forma quantitativa.

INSTRUMENTOS

Como instrumentos de avaliação, serão realizados no decorrer das aulas:

- I – observações no decorrer das aulas de forma qualitativa;
- II – resolução de exercícios e atividades contidos no Texto de Apoio ao Educando de forma quantitativa;
- III – Avaliação escrita de forma quantitativa.

CRITÉRIOS

Como critérios de avaliação tem-se como base nos PCN+ - Ensino Médio, onde deve-se ter “Uma aula com diálogo, na qual os alunos fazem uso da palavra para manifestar suas ideias, pode ser fonte de informação para o professor conhecer como pensam seus alunos, podendo detectar suas dificuldades, problemas de aprendizagem e interesses.” (BRASIL, 2002, p. 110). Esta forma, além de ser um processo avaliativo torna a aula mais dinâmica, despertando o interesse do educando.

Contudo tem-se a necessidade das avaliações formais, “Apresentações escritas e orais feitas pelos alunos também podem dar pistas ao professor de conceitos malformados, possíveis lacunas, e servir como instrumento de replanejamento de ações.” (BRASIL, 2002, p.110)

7. BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA BÁSICA

CAMPAGNOLI, D.. **Instrumentos de corda**. Violinando.com – Tudo sobre Violino. 2014. Disponível em: <<http://violinando.com/instrumentos-de-cordas/>>. Acesso em: 08 Out. 2015.

FERNANDES, N.. **Como surgiram os instrumentos musicais**. 2010. Disponível em: <<http://www.dgabc.com.br/Noticia/101965/como-surgiram-os-instrumentos-musicais>>. Acesso em: 08 Out. 2015.

GRUPO VIRTOUS. **Frequência de uma onda**. Disponível em: http://www.sobiologia.com.br/conteudos/oitava_serie/Ondas2.php. Acesso em 29 Out. 2015.

GRUPO VIRTOUS – Tecnologia Educacional. **Reflexão de ondas**. Disponível em: <http://www.sofisica.com.br/conteudos/Ondulatoria/Ondas/reflexao.php>. Acesso em 20 Out. 2015.

HALLIDAY, D. RESNICK, R. WALKER, J.. **Fundamentos da Física**. Rio de Janeiro: LTC, 2009. v.2.

HERRERO, Raul. **Pitágoras em el momento del triunfo del cristianismo**. Disponível em: <<http://raulherrero.blogia.com/2006/071801-pitagoras-en-el-momento-del-triunfo-del-cristianismo.php>>. Acesso em: 28 mai. 2016.

HEWITT, P. G.. **Física Conceitual**. 9ªed. São Paulo: Bookman, 2002.

LOPES, Wilson. **Variação da aceleração da gravidade com a latitude e altitude**. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 25, n. 3: p. 561-568, dez. 2008. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/issue/view/1160>. Acesso em: 28 Nov. 2015.

MHS – **Movimento oscilatório e periódico**. Disponível em: <http://www.sofisica.com.br/conteudos/Ondulatoria/MHS/movpereosc.php>. Acesso em 12 Out. 2015.

MUSICAL MENDELSSOHN. **Instrumentos de Corda**. Disponível em: <<http://www.musicalmendelssohn.com/#!/cordas/c1bhy>>. Acesso em 04 Out. 2015.

Note the diferente timbres below. Disponível em: <http://www.simplifyingtheory.com/timbre/>. Acesso em: 26 Jun. 2016.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica vol. 2**. 4ª ed. Edgard Blucher, 2002.

PASCOAL, E. G.. **Instrumentos: origem e classificação**. Banda Musical da casa do povo de Vilarandelo. Disponível em: <<http://www.angelfire.com/musicals/bandadevilarandelo/instrumentos.htm>>. Acesso em 04 Out. 2015.

ORTEGA, G.. **A Harpa e seu mistério**. DEMAP – Adoração Irresistível. Disponível em: <<http://www.adoracaoirresistivel.com/2015/05/a-harpa-e-seu-misterio/>>. Acesso em 08 Out. 2015.

Pitágoras. Disponível em: <http://pensador.uol.com.br/autor/pitagoras/>. Acesso em: 25 dez. 2015.

RODRIGUES, A.. **A história dos instrumentos**. 2011. Disponível em: <<http://www.movimento.com/2011/09/a-historia-dos-instrumentos/>>. Acesso em: 04 Out. 2015.

SANTIAGO, E. **Berimbau**. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/musica/berimbau/>>. Acesso em: 12 Out. 2015.

SILVA, Junior. **O que é frequência elétrica?** Disponível em: <http://www.eletricante.com.br/2012/07/o-que-e-frequencia-eletrica.html>. Acesso em 21 Out. 2015.

WUENSCHÉ, C. A. **A física da música**. Disponível em: <http://www.cea.inpe.br/~alex/FisicadaMusica/fisica_da_musica.pdf>, 2005. Acesso em 04 Dez. 2015.

YOUNG, D. H.. FREEDMAN R. A. **Física II**. 10. ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2003.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

BRASIL/MEC. **Parâmetros Curriculares Nacionais: PCN+ Ensino Médio. Ciências da natureza, matemática e suas tecnologias**. Brasília: MEC/SENTEC, 2002.

INSTITUTO DE FÍSICA DA USP. **Tabela de densidades lineares de fios de nylon**. Disponível em: <http://portal.if.usp.br/labdid/pt-br/tabelas-e-constantes>. Acesso em: 28 Nov. 2015.

PLANO DE SEÇÃO 1: Com a corda toda!

IDENTIFICAÇÃO: Colégio_____

CURSO: Ensino Médio

DISCIPLINA: Física

PROFESSOR: Luís Alexandre Rauch

SÉRIE: 2º Ano

CARGA HORÁRIA: 50 minutos

UNIDADE DIDÁTICA: Nas cordas dos instrumentos musicais

TEMA: Ondas Mecânicas

ASSUNTO: Introdução ao estudo de Ondas Mecânicas

COMPETÊNCIAS E HABILIDADES

- Ler e interpretar textos de interesse científico e tecnológico;
- Expressar-se oralmente com correção e clareza usando a terminologia correta;
- Reconhecer o sentido histórico da ciência e da tecnologia, percebendo seu papel na vida humana em diferentes épocas e na capacidade humana de transformar o meio.
- Formular questões a partir de situações reais e compreender àquelas já enunciadas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Participar junto à equipe investigando os instrumentos oferecidos;
- Manipular os instrumentos musicais;
- Ouvir os diferentes sons produzidos pelos instrumentos;
- Estabelecer relações entre os sons produzidos por dois instrumentos musicais diferentes;
- Demonstrar interesse pelo material proposto pelo professor.

MOMENTOS DA AULA

1 – Introdução/Incentivação: (05minutos)

Como introdução à aula o professor apresenta o vídeo “Como se ven las cuerdas dentro de la guitarr” com o auxílio da TVPendrive ou data show, o qual contém uma gravação feita por meio de um celular Iphone mostrando a formação das ondas nas cordas quando tocadas.

Em seguida, é feita a pergunta: “Por que ocorrem aqueles formatos na corda do violão apresentados no vídeo?”.

Prováveis respostas esperadas:

- Acho que depende da corda do violão;
- Porque as cordas do violão são muito esticadas;

Neste momento o professor solicita que os educandos se organizem em 4 equipes.

Enquanto ocorre a organização da sala, o professor comente que cada equipe receberá um instrumento musical (um violão rústico ou um monocórdio) e orienta quanto ao seu manuseio, solicitando que procurem perceber as diferenças e semelhanças entre os sons, bem como os tipos de sons que se consegue produzir com cada instrumento apresentado.

2 – Desenvolvimento: (35 minutos)

O professor apresentados dois monocórdios e os dois violões para a turma inteira e solicita que os educandos deem alguma característica que podem observar

Possíveis respostas esperadas:

- Todos eles possuem cordas;
- O monocórdio e o violão possuem tamanhos diferentes;
- Os furos das tampas dos monocórdios são diferentes.

Em seguida, o professor faz uma breve explicação sobre cada instrumento como complementação e também realiza possíveis correções.

É comentado que será fornecido um instrumento para cada equipe, orientando que cada uma terá 3 (três) minutos para manusear o instrumento,

solicitando que todos os membros da equipe o manipule, investigando a sua construção e tentando tirar som no mesmo, da forma que preferir.

Fornece-se um instrumento para cada equipe, e a cada e (três) minutos, solicita-se então que troquem o instrumento com outra equipe.

Após todos os educandos terem tido contato com todos os instrumentos, é fornecido as pastas contendo o primeiro texto (seção 01) para os educandos, orientando quanto à responsabilidade do cuidado das mesmas e do compromisso de levar as pastas em todas as aulas.

É realizada a leitura do texto junto aos educandos. Com o auxílio do Datashow, são apresentados slides referentes à apresentação “Seção 1 – Com a corda toda!”, o qual contém pontos principais contidos no texto e apresenta fotos de alguns detalhes dos instrumentos. Este processo se dá de forma dinâmica e, concomitantemente às intervenções feitas pelo professor, são permitidos comentários, observações e experiências dos alunos com alguns dos instrumentos apresentados promovendo o enriquecimento da aula. Sendo que são esperados comentários, observações e experiências tais como:

- Professor, eu já toquei cavaquinho, que é igual um violão mais curto, e o som dele é mais “fino”;
- Professor, eu já fui assistir uma orquestra tocar, e lá tem um monte de violinos que tocam junto;
- Professor, um canhoto consegue tocar um violão normalmente?

E também são sanadas possíveis dúvidas que surgirem e no decorrer do preenchendo das lacunas presentes no texto. Este procedimento final do desenvolvimento ocorre simultaneamente ao momento de síntese integradora e processo de avaliação.

3 – Síntese Integradora: (10 minutos)

Se dá durante o processo de leitura do texto, apresentação de slides com fotos de alguns detalhes dos instrumentos e preenchimento das lacunas presentes no texto. Assim sendo em conjunto com o procedimento final do desenvolvimento, de forma dinâmica como citado no próprio desenvolvimento, uma vez que são permitidos comentários, dúvidas, observações e experiências

dos alunos com alguns dos instrumentos apresentados promovendo o enriquecimento da aula.

Antes do fechamento, é apresentado o último slide da apresentação “Seção 1 – Com a corda toda!” contendo a ordem das palavras a serem preenchidas nas lacunas, onde os educandos fazem sua conferência.

AVALIAÇÃO

Feita de uma forma qualitativa, a partir de observações feitas no decorrer da aula com base no interesse, na participação e na interação dos educandos com os instrumentos musicais.

Poderá ser realizada de forma quantitativa, analisando o preenchimento das lacunas após o final do desenvolvimento.

RECURSOS FÍSICOS:

Para a aula são utilizados:

- Datashow ou TV Pendrive;
- Apresentação “Seção 1 – Com a corda toda!”, disponível no material do professor e reproduzido nas observações deste plano;
- Instrumentos musicais (2 violões rudimentares com encordoamentos diferentes e 2 monocórdios de Pitágoras com encordoamentos diferentes);
- Pasta contendo apresentação e texto de apoio ao educando referente à Seção 1;
- Vídeo “Como se ven las cuerdas dentro de la guitarra”, disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=xYcSy146LAM>>.

BIBLIOGRAFIA:

FERNANDES, N.. **Como surgiram os instrumentos musicais**. 2010. Disponível em: <<http://www.dgabc.com.br/Noticia/101965/como-surgiram-os-instrumentos-musicais>>. Acesso em: 08 Out. 2015.

PASCOAL , E. G.. **Instrumentos: origem e classificação**. Banda Musical da casa do povo de Vilarandelo. Disponível em:

<<http://www.angelfire.com/musicals/bandadevilarandelo/instrumentos.htm>>. Acesso em 04 Out. 2015.

ORTEGA, G.. **A Harpa e seu mistério**. DEMAP – Adoração Irresistível. Disponível em: <<http://www.adoracaoirresistivel.com/2015/05/a-harpa-e-seu-misterio/>>. Acesso em 08 Out. 2015.

CAMPAGNOLI, D.. **Instrumentos de corda**. Violinando.com – Tudo sobre Violino. 2014. Disponível em: <<http://violinando.com/instrumentos-de-cordas/>>. Acesso em: 08 Out. 2015.

MUSICAL MENDELSSOHN. **Instrumentos de Corda**. Disponível em: <<http://www.musicalmendelssohn.com/#!/cordas/c1bhy>>. Acesso em 04 Out. 2015.

RODRIGUES, A.. **A história dos instrumentos**. 2011. Disponível em: <<http://www.movimento.com/2011/09/a-historia-dos-instrumentos/>>. Acesso em: 04 Out. 2015.

SANTIAGO. E.. **Berimbau**. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/musica/berimbau/>>. Acesso em: 12 Out. 2015.

OBSERVAÇÕES:

- Como pré-requisito, o educando deverá conhecer a utilização de cronômetro e calculadora.
- Para a aplicação da aula, caso o professor não possua conhecimento prévio sobre instrumentos musicais, sugere-se a leitura dos trabalhos apresentados na bibliografia.
- Se houver a possibilidade de serem levados outros instrumentos de cordas além dos citados, como um violino, poderão ser formadas mais equipes e a aula ficará mais produtiva.
- Na impossibilidade de utilização do datashow em sala de aula por motivos diversos, o professor pode apresentar o vídeo proposto na introdução, bem como a apresentação “Seção 1 – Com a corda toda!” junto à TV Pendrive.

Slides referentes à Seção 1 – “Com a corda toda!”

MESTRADO NACIONAL PROFSSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA – POLO 35 - UEPG

Luís Alexandre Rauch*, Luís Fernando Pires*, André Mauricio Brinati†
*Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física / Universidade Estadual de Ponta Grossa/ UEPG, PR, Brasil.
† Departamento de Física/ Universidade Estadual de Ponta Grossa/ UEPG, PR, Brasil

Colégio _____

Com a corda toda!

Prof. Luís Alexandre Rauch

Instrumentos Musicais

- Os instrumentos musicais fazem parte do ser humano desde o seu surgimento na Terra.
- Dentre os tipos de instrumentos musicais, destacam-se os **Instrumentos de corda**
 - Tamanhos e espessuras diferentes



Monocórdio
Fonte: O autor



Violão de lata
Fonte: O autor

- Classificação dos instrumentos de cordas:
 - De acordo como são tocados.
 - Instrumentos de cordas **friccionadas**
 - Instrumentos de cordas **dedilhadas**
 - Instrumentos de cordas **percutidas**

Instrumentos de cordas friccionadas

- O som é emitido através de cordas postas em vibração, pelo atrito entre as cordas e um arco
- Violino



Fonte: O autor

- Violoncelo



Fonte: O autor

- Composto por quase 70 peças diferentes

- Interior
 - cadeira ou barra harmônica



Foto: http://en.sergentjakob.kalther.com/html/images/galerien/thumbs/800x600/_46294104.jpg

- Alma



Foto: <http://img.dail.com.br/2015/03/09/Alma-Para-Violino-2015030915-40-28.jpg>

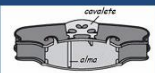


Foto: <http://musicartgarnua.blogspot.com.br/2013/02/ribeirade-dio-violino.html>

Instrumentos de cordas percutidas

O som é produzido a partir da vibração das cordas após serem percutidas.



Piano
Fonte: O autor.



berimbau
Fonte: <http://www.geledes.org.br/plano-de-aula-artes-literaria-e-processos-de-identidade-etnica-o-atal-do-afo-brasileiro/>

Piano

- O som é produzido por peças feitas de madeira e cobertas com feltro macio, denominado martelo;
- O martelo é acionado por um teclado, onde toca na corda esticada.
- As cordas vibram e produzem o som



Fonte: O autor.



Martelo
Fonte: O autor.

Berimbau

- É um instrumento de percussão, porém, é tocado através de uma corda.



Fonte: <http://www.geledes.org.br/plano-de-aula-artes-literaria-e-processos-de-identidade-etnica-o-atal-do-afo-brasileiro/>

- Comum em rodas de capoeira, mas também está presente em outros contextos, como as celebrações de candomblé-de-caboclo.

- Composto por uma cabaça, um arco chamado biriba, envergado por um cabo de arame, o qual é percutido por uma baqueta.
- o instrumentista segura uma pedra chamada de dobrão que é levado de encontro ao arame, causando variação nos tons emitidos pelo arco



cabaça
Fonte: <http://www.museu.mg.gov.br/2012/01/berimbau-brasileiro-cabaça.html>



caxixi



baqueta
Fonte: <https://ru21.mn.bing.net/ru21-mn-bing-net/5c4894270287e1529612f0b8p1-15.1>



dobrão

Fonte: <https://ru21.mn.bing.net/ru21-mn-bing-net/5c4894270287e1529612f0b8p1-15.1>

Ordem das palavras das lacunas

- | | |
|----------------|--------------|
| • Instrumentos | • Dedilhadas |
| • Cordas | • Vibração |
| • Tamanhos | • Percutidas |
| • Espessuras | • Madeira |
| • Violão | • Teclado |
| • Monocórdio | • Esticadas |
| • Friccionadas | • Vibram |
| • Atrito | • Percussão |
| • Ressonância | • Arame |
| • Grave | • Baqueta |
| • Comprimento | • Variação |

FIM

PLANO DE SEÇÃO 2: Com que frequência?

IDENTIFICAÇÃO: Colégio _____

CURSO: Ensino Médio

DISCIPLINA: Física

PROFESSOR: Luís Alexandre Rauch

SÉRIE: 2º Ano

CARGA HORÁRIA: 50 minutos

UNIDADE DIDÁTICA: Nas cordas dos instrumentos musicais

TEMA: Ondas Mecânicas

ASSUNTO: Movimento periódico, período e frequência.

COMPETÊNCIAS E HABILIDADES

- Utilizar instrumentos de medição e de cálculo;
- Ler e interpretar textos de interesse científico e tecnológico;
- Interpretar e criticar resultados a partir de experimentos e demonstrações.
- Fazer uso dos conhecimentos da Física para explicar o mundo natural e planejar, executar e avaliar intervenções práticas.

OBJETIVOS

- Realizar medições de tempo e números de rotações;
- Relacionar período com frequência;
- Calcular o período e a frequência de um movimento.

MOMENTOS DA AULA

1 – Introdução/Incentivação: (10 minutos)

Solicitando que os educandos prestem atenção nos movimentos produzidos pelo professor, este com o auxílio de um pedaço de madeira provoca batidas repetidas e regulares na mesa. Logo em seguida, com uma roda de bicicleta contendo um marca no pneu (ou no aro), faz esta girar com uma determinada velocidade (pequena, de preferência), solicitando aos

educandos que observem a marca passando por um determinado local (a caixa do apagador, por exemplo), e por fim, apresenta um relógio para a turma e solicita que as equipes observem o movimento dos ponteiros dos segundos.

Feita a apresentação o professor apresenta, com o auxílio do multimídia ou da TV Pendrive, o segundo slide da apresentação “Seção 2 – Com que frequência?” e solicita para que os educandos tentem achar uma relação entre o que foi mostrado. O professor anota no quadro as possíveis respostas, as quais podem ser:

- O tempo entre os movimentos são iguais;
- Não há relação nenhuma;
- Dá a ideia de movimento.

2 – Desenvolvimento: (35 minutos)

À medida que a explicação dos conceitos vão sendo fornecidos, o professor apresenta a sequência dos slides contidos na apresentação “Seção 2 – Com que frequência?”.

Depois de anotadas as possíveis respostas no quadro, o professor explica o conceito de movimento periódico a partir dos materiais apresentados na introdução da aula, mostrando que:

- As batidas realizadas na mesa foram feitas sempre com o mesmo intervalo de tempo;
- A marca na roda da bicicleta passou pelo local demarcado pelo professor no mesmo intervalo de tempo;

Ou seja, ambos os movimentos (da mão ao bater e da marca na roda ao girar) se repetiam de forma regular.

Em seguida, com o auxílio do relógio, o professor explica aos educandos o movimento dos ponteiros do relógio, demonstrando que os mesmos demoram certo tempo para dar uma volta completa, e que este tempo é chamado na Física de período. A partir disso, o professor gira a roda da bicicleta contendo a marca no pneu (ou aro) com uma pequena velocidade e solicita que os educandos percebam que a marca demora certo tempo para dar uma volta completa e que este tempo é também denominado período.

A partir do exposto anteriormente, é mostrado aos educandos o relógio e solicita que estes observem o período do ponteiro dos segundos e anotem em seu caderno.

Com a roda novamente, aumenta-se a sua rotação e faz com que os educandos percebam que esta realiza várias voltas em um determinado intervalo de tempo, e que esta relação do número de voltas pelo intervalo de tempo é denominada frequência.

Solicita-se que os educandos que possuam cronômetro em seu celular o utilizem e quem não tem, o professor fornece um cronômetro. Em seguida são orientados que a roda estará girando. Estes acionam o cronômetro e começam a realizar a contagem do número de rotações que desejar. Assim que terminarem a contagem, pausem o cronômetro.

Os educandos são orientados a anotar o número de voltas contadas e o tempo medido no cronômetro no seu caderno.

Realiza-se a explicação da unidade de medida de frequência – hertz (1/s), mostrando que a unidade de medida do número de vezes que algo se repete é adimensional, ou seja, não possui unidade e medida, sendo por isso representado pelo número 1.

É fornecido o texto de apoio aos educandos e solicitado que estes o leiam em silêncio, completando as lacunas pertinentes com os valores que estes anotaram no rascunho e também, caso seja necessário, que perguntem sobre as possíveis dúvidas que ocorrerem no decorrer do texto.

Após lido o texto os educandos realizam individualmente o exercício proposto no final do texto.

3 – Síntese Integradora (05 minutos)

Ao final da aula o professor solicita que os educandos entreguem a folha 2 (colocando o nome na mesma) que será corrigida e entregue na aula seguinte para arquivamento.

AVALIAÇÃO

Feita de uma forma qualitativa, a partir de observações no decorrer da aula com base no interesse, na participação e na interação dos educandos. E de forma quantitativa, analisando o a resolução do caça palavras após o final do desenvolvimento.

RECURSOS FÍSICOS:

Para a aula são utilizados:

- Quadro negro;
- Giz;
- datashow ou TV Pendrive;
- Apresentação “Seção 2 – Com que frequência?”, disponível no material do professor e reproduzido nas observações deste plano;
- baqueta de bateria;
- Relógio;
- Roda de bicicleta contendo uma marca no pneu;
- Cronômetros;
- Calculadora;
- Texto de apoio ao educando – Seção 2.

BIBLIOGRAFIA:

MHS – Movimento oscilatório e periódico. Disponível em: <http://www.sofisica.com.br/conteudos/Ondulatoria/MHS/movpereosc.php>. Acesso em 12 Out. 2015.

HALLIDAY, D. RESNICK, R. WALKER, J.. **Fundamentos da Física**. Rio de Janeiro: LTC, 2009. v.2.

YOUNG, D. H.. FREEDMAN R. A.. **Física II**. 10. ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2003.

SILVA, Junior. **O que é frequência elétrica?** Disponível em: <http://www.eletricante.com.br/2012/07/o-que-e-frequencia-eletrica.html>. Acesso em 21 Out. 2015.

GRUPO VIRTOUS. **Frequência de uma onda**. Disponível em: http://www.sobiologia.com.br/conteudos/oitava_serie/Ondas2.php. Acesso em 29 Out. 2015.

OBSERVAÇÕES:

- Se o professor desejar, poderá levar materiais alternativos para enriquecer a explicação, como um objeto preso à extremidade de um barbante (pêndulo);
- Na impossibilidade de conseguir uma baqueta de bateria, a mesma pode ser trocada por um pedaço de madeira (pedaço de cabo de vassoura, por exemplo);
- Na impossibilidade de utilização do datashow em sala de aula por motivos diversos, o professor pode realizar a apresentação “Seção 2 – Com que frequência?” junto à TV Pendrive.

Slides referentes à Seção 2 – “Com que frequência?”

Seção 02



Fonte: O autor.

Com que Frequência?

Qual a relação???




Fonte: O autor.



Fonte: O autor.

Fonte: <https://img4.mmm.bing.net/t?u=408D-Michal98arqac8lccuaj3dc8uq68f7j00&pid=15.1>

Movimento periódico

- Quando um determinado movimento se repete em intervalos de tempos iguais, como a roda de uma bicicleta passando por um ponto de referência, denomina-se movimento periódico
- 1 volta completa - ciclo



Fonte: O autor.

Período

- Tempo necessário para o ponteiro do relógio dar uma volta completa em torno de um ponto de referência.

O período do ponteiro dos segundos do relógio é de

$T = \underline{\hspace{1cm}} \text{ s}$

Período

- Tempo necessário para o ponteiro do relógio dar uma volta completa em torno de um ponto de referência.

O período do ponteiro dos segundos do relógio é de

$T = \underline{60} \text{ s}$

Frequência

- É o número de ciclos completos que um ponto realiza em determinado intervalo de tempo
- Número de voltas: $\underline{\hspace{1cm}}$
- Tempo medido: $\underline{\hspace{1cm}} \text{ s}$

$$f = \frac{\text{número de voltas}}{\text{intervalo de tempo}}$$

Sistema Internacional de unidades

$$f = \frac{1}{s} = \text{hertz (Hz)}$$

Ex.: Ao se colocar uma frequência de 440Hz (nota lá) em um gerador de frequências, o alto-falante vibra 440 vezes por segundo.

M	E	R	N	L	O	D	S	E	G	U	N	D	O	E	R	G	H	M	R
O	D	M	F	N	T	I	R	E	Q	U	E	N	C	I	A	S	A	G	D
V	I	F	B	N	T	I	Y	U	E	V	M	J	F	S	D	I	N	P	D
M	D	O	T	G	K	J	S	S	R	E	J	D	A	O	E	R	B	K	
E	G	E	Q	E	A	C	A	O	U	A	N	D	A	P	G	P	R	A	U
N	V	A	G	A	M	O	M	W	M	Q	Y	E	Y	L	M	I	I	J	N
T	U	P	F	T	E	P	E	T	E	T	R	C	L	E	H	Y	O	K	I
O	I	M	C	H	A	Y	O	Y	R	A	S	M	I	D	G	T	D	M	D
A	L	T	O	C	E	L	K	I	O	Y	H	E	R	T	Z	H	I	T	A
D	K	G	M	V	G	E	T	N	D	O	K	D	T	M	Ä	O	C	B	D
E	O	E	P	D	P	Ö	F	M	E	H	D	I	R	H	M	S	O	L	E
A	O	R	L	E	A	M	R	E	C	J	M	T	D	E	B	D	M	D	
S	D	S	E	G	F	R	I	D	I	N	C	O	N	S	T	A	N	T	E
F	H	S	T	I	O	F	Q	S	C	R	T	W	E	Ä	L	U	W	I	T
F	G	W	A	S	I	D	S	F	L	Y	E	I	F	M	P	Q	C	D	E
R	Y	T	O	F	R	E	G	T	O	O	T	W	D	X	E	R	E	T	M
I	T	K	L	A	S	W	H	F	S	E	O	R	F	G	R	E	W	O	P
I	G	U	A	I	S	P	O	I	K	L	F	R	E	D	U	E	Y	F	O
A	S	R	E	R	D	L	E	P	E	R	I	O	D	O	R	E	J	K	M

M	E	R	N	L	O	D	S	E	G	U	N	D	O	E	R	G	H	M	R
O	S	O	F	A	S	C	D	S	F	A	P	M	L	B	S	D	E	J	K
V	D	M	F	R	E	Q	U	E	N	C	I	A	S	A	G	D	Y	T	R
I	F	B	N	T	I	Y	U	E	V	M	J	F	S	D	I	N	P	D	U
M	D	O	T	G	K	J	S	S	R	E	J	D	A	O	E	R	B	K	
E	G	E	Q	E	A	C	A	O	U	A	N	D	A	P	G	P	R	A	U
N	V	A	G	A	M	O	M	W	M	Q	Y	E	Y	L	M	I	I	J	N
T	U	P	F	T	E	P	E	T	E	T	R	C	L	E	H	Y	O	K	I
O	I	M	C	H	A	Y	O	Y	R	A	S	M	I	D	G	T	D	M	D
A	L	T	O	C	E	L	K	I	O	Y	H	E	R	T	Z	H	I	T	A
D	K	G	M	V	G	E	T	N	D	O	K	D	T	M	Ä	O	C	B	D
E	O	E	P	D	P	Ö	F	M	E	H	D	I	R	H	M	S	O	L	E
A	O	R	L	E	A	M	R	E	C	J	M	T	D	E	B	D	M	D	
S	D	S	E	G	F	R	I	D	I	N	C	O	N	S	T	A	N	T	E
F	H	S	T	I	O	F	Q	S	C	R	T	W	E	Ä	L	U	W	I	T
F	G	W	A	S	I	D	S	F	L	Y	E	I	F	M	P	Q	C	D	E
R	Y	T	O	F	R	E	G	T	O	O	T	W	D	X	E	R	E	T	M
I	T	K	L	A	S	W	H	F	S	E	O	R	F	G	R	E	W	O	P
I	G	U	A	I	S	P	O	I	K	L	F	R	E	D	U	E	Y	F	O
A	S	R	E	R	D	L	E	P	E	R	I	O	D	O	R	E	J	K	M

FIM

PLANO DE SEÇÃO 3: Um balançar legal!

IDENTIFICAÇÃO: Colégio _____

CURSO: Ensino Médio

DISCIPLINA: Física

PROFESSOR: Luís Alexandre Rauch

SÉRIE: 2º Ano

CARGA HORÁRIA: 100 minutos

UNIDADE DIDÁTICA: Nas cordas dos instrumentos musicais

TEMA: Ondas Mecânicas

ASSUNTO: Movimento Harmônico Simples

COMPETÊNCIAS E HABILIDADES

- Ler e interpretar textos de interesse científico e tecnológico;
- Utilizar instrumentos de medição e de cálculo;
- Interpretar e criticar resultados a partir de experimentos e demonstrações.
- Fazer uso dos conhecimentos da Física para explicar o mundo natural e planejar, executar e avaliar intervenções práticas.

OBJETIVOS

- Explicar o conceito de Movimento Harmônico Simples;
- Verificar informações básicas como período, frequência e amplitude de uma onda senoidal;

MOMENTOS DA AULA

A seção foi dividida em duas aulas, onde estão contidos os momentos relativos a cada uma das aulas.

AULA 1

1 – Introdução/Motivação: (15 minutos)

Como introdução o professor organiza o experimento do pêndulo no meio da sala, dispondo os educandos organizados nas laterais. O professor faz uma ligeira explanação sobre o que é um pêndulo e procede com os seguintes passos:

- Coloca o papel pequeno com marcação do eixo XY sob o pêndulo e faz com que este realize duas ou três oscilações para que o líquido marque uma reta no papel – **nesta etapa mantém-se a base fixa**, em seguida, solicita que os educandos observem o formato da marcação do papel;
- Repete o experimento, agora com o papel de comprimento maior, contendo a marcação do eixo de coordenadas YT; ao soltar o pêndulo, com uma amplitude maior, puxa o papel com **velocidade constante**, onde o líquido marca o papel no formato de uma linha curva.

Após a realização dos experimentos, faz a seguinte pergunta aos educandos: Quais as diferenças observadas?

Sendo que são esperados comentários, observações e experiências tais como:

- Em um papel tem uma linha reta e no outro tem uma linha curva;
- Em um o papel se moveu e no outro não.

2 – Desenvolvimento: (25 minutos)

Mantendo-se ainda a organização da sala, com o papel contendo a marcação reta, o professor explica o movimento do pêndulo sobre o eixo y, onde este sai de uma extremidade (amplitude máxima para cima), passa pela origem (ponto de equilíbrio), chega à outra extremidade (amplitude máxima para baixo), passa pela origem novamente (ponto de equilíbrio) e retorna ao ponto de partida (amplitude máxima), contemplando um ciclo, e que este ciclo se repete várias vezes, onde se dá, com as devidas aproximações, pois se trata de um aparato onde a massa não é constante e que há perdas por atrito, por exemplo, o conceito de Movimento Harmônico Simples.

Comenta que o movimento realizado pelo pêndulo sempre se repete, faz um paralelo com o movimento periódico estudado na aula da seção 2, e também que o intervalo de tempo entre duas oscilações completas, em pequeno ângulo, com as devidas aproximações, é sempre o mesmo.

O professor então mostra aos educandos o papel contendo a marcação feita quando a base é puxada com velocidade constante, onde explica o desenho formado – posição do pêndulo no decorrer do tempo e que aquele desenho corresponde ao desenho de uma senóide.

O professor retoma ao conceito de período, fazendo uma marcação de tempo hipotética no papel (próximo do real e devidamente determinado antes da aula com amplitudes pré-estabelecidas), mostrar que é possível medir o período observando o tempo que o pêndulo levou para fazer uma oscilação completa. Então solicita aos educandos que anotem o valor do período demonstrado na folha de papel.

Comenta com os educandos que é possível calcular a velocidade com que foi puxado o papel a partir da distância da marca e do tempo anotado no papel.

Em um novo papel com os eixos YT demarcados, o professor faz novamente procedimento similar ao anterior, onde desloca o pêndulo com um ângulo menor em relação ao ponto de equilíbrio, proporcionando uma amplitude menor do pêndulo.

Mostra então os papéis com as duas marcações (o com maior e menor oscilação), e solicita que os educandos comentem da diferença entre eles, onde é apresentado o conceito de amplitude, mostrando a distância da reta central ao pico máximo e mínimo, e que a amplitude está relacionada com a energia do movimento (quanto maior a amplitude, maior será a energia);

Como encerramento da atividade experimental, o professor comenta que é possível chegar ao conceito de frequência no movimento oscilatório, a partir da marcação de tempo hipotética (aproximada da real) no papel e solicita que os educandos forneçam ideias de como calcular a frequência.

3 – Síntese Integradora (10 minutos)

Como finalização da aula, o professor faz um breve resumo do que foi realizado na aula e sana possíveis dúvidas e curiosidades que surgirem.

AVALIAÇÃO

Feita de uma forma qualitativa, a partir de observações feitas no decorrer da aula com base no interesse, na participação e na interação dos educandos.

RECURSOS FÍSICOS:

Para a aula serão utilizados:

- Quadro negro;
- Giz;
- Experimento do pêndulo com líquido colorido;
- Tiras de papel kraft 40 cm de largura com marcações de eixos xy e yt ;
- Régua;

BIBLIOGRAFIA:

HEWITT, P. G.. **Física Conceitual**. 9ªed. São Paulo: Bookman, 2002.

HALLIDAY, D. RESNICK, R. WALKER, J.. **Fundamentos da Física**. Rio de Janeiro: LTC, 2009. v.2

OBSERVAÇÕES:

- É interessante levar junto ao experimento papel absorvente para retirar o líquido em excesso ao final do processo.
- O papel deverá ser puxado com velocidade aproximadamente constante e de forma lenta, de modo que se obtenha um padrão de desenho melhor.

AULA 2

1 – Introdução/Motivação: (05 minutos)

O professor inicia a aula tecendo comentários da aula anterior, relembrando os passos dados e as medições realizadas.

2 – Desenvolvimento: (35 minutos)

É fornecido o texto de apoio aos educandos. Com o auxílio do datashow, o professor realiza a leitura do texto de apoio juntamente com os educandos e apresenta os slides apontando os pontos principais contidos nos textos, onde realiza as explicações pertinentes. Ao terminar a leitura do texto, o professor solicita que os educandos realizem a atividade proposta no final do texto.

3 – Síntese Integradora (10 minutos)

Como encerramento, o professor apresenta o slide no datashow referente à resolução do exercício e estimula os educandos a tirar possíveis dúvidas e curiosidades.

AVALIAÇÃO

Feita de uma forma qualitativa, a partir de observações no decorrer da aula com base no interesse, na participação e na interação dos educandos. E de forma quantitativa, ao efetuar a correção do liga pontos depois da aula arquivados na pasta.

RECURSOS FÍSICOS:

Para a aula serão necessários:

- Quadro negro;
- Giz;
- Datashow ou TV Pendrive;
- Apresentação “Seção 3 – Um balanço legal!”, disponível no material do professor e reproduzido nas observações deste plano;
- Texto de apoio ao educando – Seção 3.

BIBLIOGRAFIA:

HEWITT, P. G.. **Física Conceitual**. 9ªed. São Paulo: Bookman, 2002.

HALLIDAY, D. RESNICK. R. WALKER, J.. **Fundamentos da Física**. Rio de Janeiro: LTC, 2009. v.2

OBSERVAÇÕES:

- Na impossibilidade de utilização do datashow em sala de aula por motivos diversos, o professor pode apresentar o vídeo proposto na introdução, bem como a apresentação “Seção 3 – Um balançar legal!” junto à TV Pendrive.
- Se houver a possibilidade, durante a aplicação do experimento pode-se variar o comprimento da corda, mostrando os diferentes períodos de oscilação do pêndulo.

Slides referentes à Seção 3: Um balançar legal!

Seção 03
Um balançar legal!

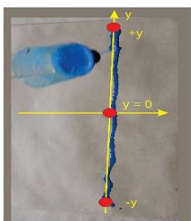


Fonte: O autor.

Pêndulo Simples

Sistema constituído de um corpo puntiforme com determinada massa e suspenso por um fio ideal, ou seja, inextensível e com massa desprezível, com determinado comprimento e que executa oscilações desenvolvendo pequenos deslocamentos.

Pêndulo oscilando sobre um ponto de equilíbrio

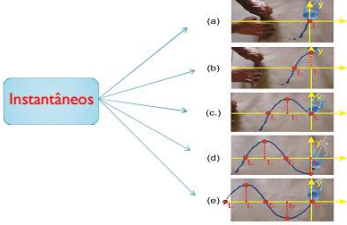


Fonte: O autor.

Movimento Harmônico Simples (MHS)

Movimento oscilatório de um pêndulo balançando através de um pequeno arco em torno de um ponto central.

Ao puxar o papel que está sob a base do pêndulo com velocidade constante, este fará uma marcação no papel.



Fonte: O autor.

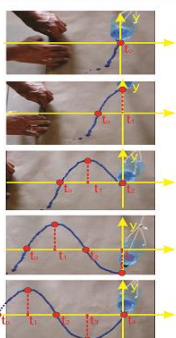
(a), tempo inicial da observação, representado por t_0 , este elemento está com um deslocamento $y=0$.

(b), momento t_1 , pode-se perceber que o ponto se encontra em seu deslocamento extremo para cima (denominado pico).

(c), momento t_2 , desce novamente para $y=0$.

(d), momento t_3 , está com seu deslocamento extremo para baixo (denominado vale).

(e), momento t_4 , está novamente em $y=0$, completando o ciclo de oscilação e reconhecendo o movimento.



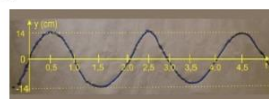
Fonte: O autor.

No final deste movimento, observa-se uma marcação da tinta no papel, representando o movimento do pêndulo em função do tempo.



Fonte: O autor.

Colocando-se um eixo de coordenadas na figura:



Fonte: O autor.

instante	tempo (s)	deslocamento máximo em y (cm)
t_0	0	0
t_1	0,5	14
t_2	1,0	0
t_3	1,5	-14
t_4	2,0	0

Fonte: O autor.

Propriedades do MHS

- **Período do movimento de um pêndulo:** é o intervalo de tempo necessário para o pêndulo realizar uma oscilação completa (ou um ciclo).

$$T = \text{---} s$$

- **Frequência:** número de oscilações completas do pêndulo por segundo.

$$f = \text{---} \text{Hz}$$

- **Amplitude de oscilação:** é o deslocamento máximo de oscilação do pêndulo em relação ao ponto de equilíbrio, ponto central, em um dos sentidos.

$$A = \text{---} \text{cm}$$

Propriedades do MHS

- **Período do movimento de um pêndulo:** é o intervalo de tempo necessário para o pêndulo realizar uma oscilação completa (ou um ciclo).

$$T = 2s$$

- **Frequência:** número de oscilações completas do pêndulo por segundo.

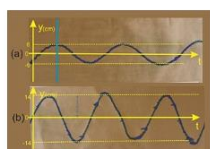
$$f = \frac{2}{4} = \frac{1}{2}$$

$$f = 0,5 \text{ Hz}$$

- **Amplitude de oscilação:** é o deslocamento máximo de oscilação do pêndulo em relação ao ponto de equilíbrio, ponto central, em um dos sentidos.

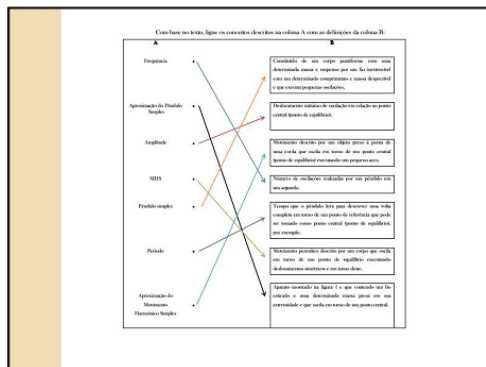
$$A = 14 \text{ cm}$$

Marcação do movimento do pêndulo em função do tempo descrevendo amplitudes diferentes:



Fonte: O autor.

Resposta:	+	Exatidão de um corpo medido com uma dimensão real e expressa por sua localização entre os dois pontos comparados e a massa deslocada e que possui propriedades físicas.
Apresentação gráfica:	+	Exatidão de um corpo medido com uma dimensão real e expressa por sua localização entre os dois pontos comparados e a massa deslocada e que possui propriedades físicas.
Amplitude:	+	Exatidão de um corpo medido com uma dimensão real e expressa por sua localização entre os dois pontos comparados e a massa deslocada e que possui propriedades físicas.
MHS:	+	Exatidão de um corpo medido com uma dimensão real e expressa por sua localização entre os dois pontos comparados e a massa deslocada e que possui propriedades físicas.
Exatidão gráfica:	+	Exatidão de um corpo medido com uma dimensão real e expressa por sua localização entre os dois pontos comparados e a massa deslocada e que possui propriedades físicas.
Período:	+	Exatidão de um corpo medido com uma dimensão real e expressa por sua localização entre os dois pontos comparados e a massa deslocada e que possui propriedades físicas.
Apresentação de:	+	Exatidão de um corpo medido com uma dimensão real e expressa por sua localização entre os dois pontos comparados e a massa deslocada e que possui propriedades físicas.
Exatidão gráfica:	+	Exatidão de um corpo medido com uma dimensão real e expressa por sua localização entre os dois pontos comparados e a massa deslocada e que possui propriedades físicas.



PLANO DE SEÇÃO 4: Um pulso...

IDENTIFICAÇÃO: Colégio _____

CURSO: Ensino Médio

DISCIPLINA: Física

PROFESSOR: Luís Alexandre Rauch

SÉRIE: 2º Ano

CARGA HORÁRIA: 100 minutos

UNIDADE DIDÁTICA: Nas cordas dos instrumentos musicais

TEMA: Ondas Mecânicas

ASSUNTO: Pulso em uma corda

COMPETÊNCIAS E HABILIDADES

- Ler e interpretar textos de interesse científico e tecnológico;
- Expressar-se oralmente com correção e clareza, usando a terminologia correta;
- Usar instrumentos de medição e de cálculo;
- Formular hipóteses e prever resultados;
- Procurar e sistematizar informações relevantes para a compreensão da situação-problema.
- Fazer uso dos conhecimentos da Física para explicar o mundo natural e planejar, executar e avaliar intervenções práticas.

OBJETIVOS

- Calcular densidade linear,
- Perceber que um pulso transporta energia e não matéria;
- Associar que diferentes cordas possuem velocidades de pulsos diferentes;
- Explicar a interferência construtiva e destrutiva entre dois pulsos.

MOMENTOS DA AULA

AULA 1

1 – Introdução/Motivação: (15 minutos)

Como introdução o professor estica uma corda e provoca um pulso, solicitando que os educandos observem e digam como é o seu comportamento. Sendo que são esperados comentários, observações e experiências tais como:

- O pulso vai e vem;
- Parece uma onda;

Faz o mesmo procedimento para uma segunda corda, com uma densidade linear diferente da primeira, buscando fazer um movimento similar e questiona novamente o que observam. Sendo que são esperados comentários, observações e experiências tais como:

- Uma vai mais rápido que a outra;
- Uma parece mais alta que outra.

3 – Desenvolvimento: (30 minutos)

O professor começa com a explicação do conceito de pulso, comentando a perturbação sofrida pela corda ao balançar a mão para cima e para baixo, mostra que um ponto qualquer da corda perturba o seu ponto vizinho, e que este perturba o seguinte e assim por diante, e que esta perturbação caminha de ponto a ponto da corda, até chegar à outra extremidade.

E então comenta com os educandos que quando existe uma perturbação no espaço (neste caso, na corda), esta transporta energia sem o transporte da matéria. O professor então com o auxílio de uma argola de plástico inserida no meio da corda, faz um pulso na mesma e solicita que os educando observem o que ocorre (a argola permanece no mesmo lugar).

Em seguida são amarradas e estica duas cordas de diferentes densidades lineares, uma ao lado a outra. Toma cuidado para que as tensões nas duas cordas fiquem aproximadamente iguais, o professor faz um pulso em

ambas as cordas ao mesmo tempo, e pergunta para os educandos o que conseguem observar a respeito da velocidade dos pulsos na corda.

Sendo que são esperados comentários, observações e experiências tais como:

- A corda mais grossa vai mais devagar que a mais fina;

Após ouvir as conclusões dos educandos, explica-se que a força com que a corda é puxada é denominada tração, e que cada corda tem uma propriedade denominada densidade linear, a qual depende da massa e do comprimento da corda, e comenta-se que a velocidade depende da tração da corda, e da sua densidade linear.

O professor estica a corda com o auxílio de um dinamômetro e então solicitada que os educandos observem no dinamômetro o valor demarcado. Em seguida o professor anota os valores no quadro.

Em seguida o professor solicita que os educandos utilizem a balança para aferir a massa das cordas, e de uma régua para medir seus comprimentos. Os valores são anotados pelo professor no quadro.

Após as observações e medições e explicado aos educandos que a velocidade de um pulso na corda tem relação com a tração da corda e com a sua densidade linear, onde escreve no quadro a equação que calcula a velocidade de um pulso. Explica então que a tração foi aferida diretamente no dinamômetro, porém não tem o valor da densidade linear. É explicado então que a densidade linear pode ser calculada a partir da equação:

$$\mu = \frac{m}{l}$$

É solicitado que os educandos realizem o cálculo da densidade linear das duas cordas, tomando os devidos cuidados com as unidades de medida.

Com os valores da densidade linear em mãos, solicita que os educandos realizem o cálculo da velocidade em cada corda, apontando a relação entre a densidade linear e a velocidade do pulso na corda.

- **Reflexão de um pulso**

Após a atividade da velocidade na corda, o professor estica novamente uma das cordas amarradas em uma das extremidades e solicita que os educandos observem o que ocorre com um pulso ao chegar na outra extremidade. É perguntado então: o que ocorreu? Possíveis respostas esperadas pelos educandos:

- O pulso chega no final e retorna;
- O pulso volta por baixo.

É fornecido então o conceito de reflexão de um pulso, explicando que esta pode ocorrer com a extremidade oposta da corda fixa ou livre, porém, na aula será apresentada a reflexão com extremidade fixa, pois com a extremidade móvel é de difícil execução.

Ao realizar novamente um pulso, o professor demonstra que quando a extremidade é fixa, o pulso retorna invertido ao pulso incidente, comentando que quando a extremidade é móvel, este retorna na mesma direção do incidente.

Com o auxílio do datashow o professor apresenta então aos educandos a simulação “onda em corda”, do Phet®, primeiramente com a opção de extremidade fixa, onde seleciona a opção pulso, deixando em uma amplitude de 1,0 cm, amortecimento baixo e tensão média e pressiona o botão verde, onde é dado um pulso. Neste momento o professor mostra que a reflexão do pulso realizado no simulador é similar ao pulso apresentado pela corda na sala de aula.

O professor mostra as possibilidades que o simulador fornece, variando a tensão da corda e o amortecimento da mesma.

Após realizada a análise, o professor seleciona a opção “extremidade solta” e repete os passos feitos anteriormente para a corda com extremidade fixa, onde mostra a reflexão do pulso que retorna na mesma direção do pulso incidente.

Ainda com o simulador é explicado e apresentado a superposição de dois pulsos: um incidente e um refletido, tanto para uma corda com a extremidade fixa, quanto para uma corda com a extremidade livre, onde o

professor, mantendo as configurações que fez inicialmente para analisar a reflexão do pulso, realiza primeiramente um pulso, e logo em seguida aplica outro pulso, e demonstra que ao pulso que está retornando (pulso refletido) encontra o pulso incidente, estes se anulam naquele local, porém, depois deste momento, os pulsos viajam no seu caminho original.

O professor realiza o mesmo procedimento para a opção “extremidade solta”.

4 – Síntese Integradora (10 minutos)

Como finalização da aula, o professor faz um breve resumo do que foi realizado na aula e sana possíveis dúvidas e curiosidades que surgirem.

AValiação

Feita de uma forma qualitativa, a partir de observações feitas no decorrer da aula com base no interesse, na participação e na interação dos educandos.

RECURSOS FÍSICOS:

Para a aula serão utilizados:

- Quadro negro;
- Giz;
- Datashow ou TV Pendrive;
- cordas com espessuras diferentes;
- argola de plástico recortada da tampa de lata de achocolatado em pó;
- dinamômetro;
- balança de precisão.
- Simulador Onda em corda, disponível em http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/wave-on-a-string.

BIBLIOGRAFIA:

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica vol. 2.** 4ª ed. Edgard Blucher, 2002.

GRUPO VIRTOUS – Tecnologia Educacional. **Reflexão de ondas.** Disponível em: <http://www.sofisica.com.br/conteudos/Ondulatoria/Ondas/reflexao.php>. Acesso em 20 Out. 2015.

YOUNG, D. Hugh. FREEDMAN Roger A.. **Física II.** 10ª ed. São Paulo: Ed. Pearson Addison Wesley, 2003.

HALLIDAY, Resnick. WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física.** Volume 2. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

OBSERVAÇÕES:

- Como pré-requisito, o educando deverá saber fazer medidas com balança e régua.
- Para evitar qualquer inconveniente devido à impossibilidade de utilização do datashow em sala de aula por motivos diversos, é interessante que o professor realize gravações das simulações sugeridas previamente e apresente para os educandos em forma de vídeo através da TV Pendrive.

Aula 2**1 – Introdução/Motivação: (10 minutos)**

Como introdução à aula o professor faz uma breve explanação sobre os aspectos observados na aula anterior e retira possíveis dúvidas que surgirem. Em seguida o professor distribui os textos de apoio aos educandos.

5 – Desenvolvimento: (35 minutos)

Com o auxílio do datashow, o professor apresenta os slides referentes à apresentação “Seção 4 – Um pulso...” contendo pontos mais importantes do texto e imagens, explica-os de forma mais detalhada à medida que é realizada a leitura do texto juntamente com o educando.

À medida que na leitura do texto vão surgindo lacunas, o professor solicita que as preencha, utilizando os valores colhidos na aula anterior.

Ao término da leitura é solicitado que os educandos realizem a atividade proposta no final do texto.

6 – Síntese Integradora (5 minutos)

Ao final da aula o professor solicita que os educandos entreguem as folhas da seção 4 (colocando o nome nas mesmas), onde os exercícios serão corrigidos e então as folhas serão entregues na aula seguinte para arquivamento.

AVALIAÇÃO

Feita de uma forma qualitativa, a partir de observações no decorrer da aula com base no interesse, na participação e na interação dos educandos. E de forma quantitativa, ao efetuar a correção das lacunas preenchidas no texto e do “Pesquise no texto, completando as lacunas nas frases abaixo”.

RECURSOS FÍSICOS:

Para a aula serão utilizados:

- Quadro negro;
- Giz;
- Projetor multimídia;
- Texto de apoio ao educando – Seção 4.
- Apresentação “Seção 4 – Um pulso...”, disponível no material do professor e reproduzido nas observações deste plano;

BIBLIOGRAFIA:

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica vol. 2.** 4ª ed. Edgard Blucher, 2002.

GRUPO VIRTOUS – Tecnologia Educacional. **Reflexão de ondas.** Disponível em: <http://www.sofisica.com.br/conteudos/Ondulatoria/Ondas/reflexao.php>. Acesso em 20 Out. 2015.

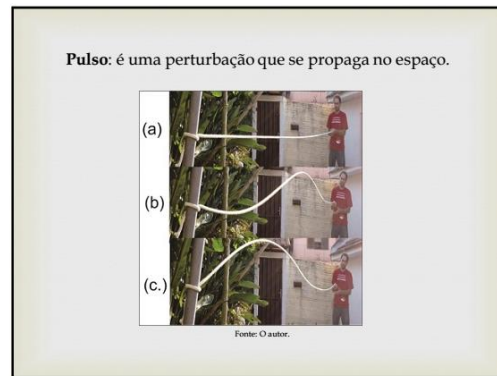
YOUNG, D. Hugh. FREEDMAN Roger A.. **Física II.** 10ª ed. São Paulo: Ed. Pearson Addison Wesley, 2003.

HALLIDAY, Resnick. WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física.** Volume 2. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

OBSERVAÇÕES:

- Na impossibilidade de utilização do datashow em sala de aula por motivos diversos, o professor pode realizar a apresentação “Seção 4 – Um pulso...” junto à TV Pendrive.

Slides referentes à Seção 4: Um pulso...



Velocidade de um pulso

A velocidade do pulso depende:

a) **tração** – força com a qual é puxada a corda

Exemplo: **$T = 2\text{N}$**

b) **densidade linear** – quantidade de matéria por unidade de comprimento.

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Densidade linear

$$\mu = \frac{m}{l}$$

Corda 01:

$m = \underline{\hspace{2cm}} \text{ kg}$

$l = \underline{\hspace{2cm}} \text{ m}$

Desta forma:

$$\mu = \frac{\underline{\hspace{2cm}}}{\underline{\hspace{2cm}}}$$

$\mu = \underline{\hspace{2cm}} \text{ kg/m}$

Logo:

Corda 01:

$T = \underline{\hspace{2cm}} \text{ N}$

$\mu = \underline{\hspace{2cm}} \text{ kg/m}$

Onde:

$$v = \sqrt{\frac{\underline{\hspace{2cm}}}{\underline{\hspace{2cm}}}}$$

$v = \underline{\hspace{2cm}} \text{ m/s}$

Propagação do pulso em um ponto específico da corda

(a) o ponto se encontra em sua posição de equilíbrio sobre o eixo da corda;

(b) o pulso encontra o ponto da corda, onde este se move para cima;

(c) ponto alcança sua máxima amplitude;

(d) o ponto inicia retorno à posição original.

Fonte: O autor.

Também é possível verificar que à medida que o pulso se propaga para a esquerda na corda, sua parte da frente está se movendo para cima, enquanto a parte posterior, na direita, está se movendo para baixo.

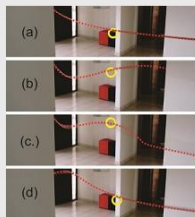
Um pulso transporta energia, porém, não transporta matéria:

(a) É colocada uma argola em uma corda esticada.

(b) Um pulso é aplicado.

(c) Quando o pulso alcança a argola, a mesma faz um movimento de subida e descida.

(d) Após a passagem do pulso ela permanece no mesmo lugar.



Fonte: O autor.

Reflexão de um Pulso



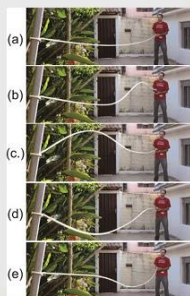
☞ Quando o pulso de onda incide sobre um obstáculo e retorna ao meio de propagação, mantendo as características da onda incidente.

☞ A reflexão pode ocorrer com a extremidade da corda **fixa** ou **móvel**.

Extremidade fixa

Ao pulso atingir uma extremidade fixa, a força aplicada nela, pelo princípio da ação e reação, reage sobre a corda, causando um movimento.

Esse movimento é na direção da aplicação do pulso, e o sentido da propagação e da velocidade são contrários ao sentido inicial e com o pulso invertido, sendo esse o pulso refletido.



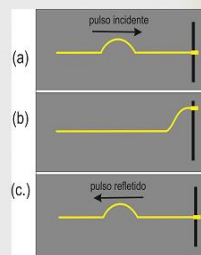
Fonte: O autor.

Extremidade livre

Supondo que um pulso atinja uma extremidade de uma corda que contém um anel preso a uma haste vertical - o anel pode movimentar-se livremente para cima e para baixo.

Um pulso incidente desloca a extremidade da corda para cima, e ao refletir, o anel retorna à sua posição original.

O pulso refletido não se inverte, retorna na mesma direção de propagação e no sentido contrário ao sentido do pulso incidente.



Fonte: O autor.

Superposição de dois pulsos

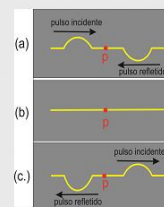
Quando dois pulsos estão se movendo em direção oposta, seja em uma corda com extremidade fixa ou móvel, ao se encontrar em um determinado ponto, ocorre a superposição.

Extremidade fixa

(a) Situação antes da superposição dos dois pulsos.

(b) tem-se a situação em que os pulsos se encontram no ponto p, o deslocamento para cima do pulso incidente soma-se com o deslocamento para baixo do pulso refletido, se anulando naquele ponto.

(c). ilustra-se a situação após os pulsos passarem pelo ponto p; ambos se deslocam e continuam seus movimentos independentes.



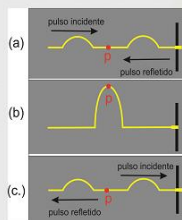
Fonte: O autor.

Extremidade livre

(a) tem-se a situação antes da superposição dos dois pulsos.

(b) ao se encontrarem no ponto p, os pulsos somam-se, formando um pulso com amplitude igual à soma dos dois pulsos individuais.

(c) Situação após a passagem dos pulsos pelo ponto p, na qual ambos se deslocam de forma independente e igual ao da situação inicial mostrada em (a).



Fonte: O autor.

Pesquise no texto, completando as lacunas nas frases abaixo:

- 1) Quando dois pulsos estão em sentidos contrários e na mesma direção em uma corda de extremidade fixa, ao se encontrar em um ponto, eles se _____.
- 2) Um pulso em uma corda com extremidade _____, ao se refletir, retorna invertido em relação ao pulso incidente.
- 3) Quando dois pulsos estão em sentidos contrários e na mesma direção, ao se encontrar ocorre a _____ deles.
- 4) _____: é uma perturbação que se propaga ao longo de uma corda.
- 5) Tração na corda é a _____ com a qual a corda é esticada (puxada).
- 6) Quando dois pulsos estão em sentidos contrários e na mesma direção em uma corda de extremidade _____, ao se encontrar em um ponto, eles se _____.
- 7) A velocidade de propagação de um pulso em uma corda depende da tração e da _____ da corda.
- 8) Um pulso é uma perturbação no meio, que no caso é a corda, que transporta _____, porém não transporta _____.

Pesquise no texto, completando as lacunas nas frases abaixo:

- 1) Quando dois pulsos estão em sentidos contrários e na mesma direção em uma corda de extremidade fixa, ao se encontrar em um ponto, eles se ANULAM.
- 2) Um pulso em uma corda com extremidade FIXA, ao se refletir, retorna invertido em relação ao pulso incidente.
- 3) Quando dois pulsos estão em sentidos contrários e na mesma direção, ao se encontrar ocorre a SUPERPOSIÇÃO deles.
- 4) PULSO: é uma perturbação que se propaga ao longo de uma corda.
- 5) Tração na corda é a FORÇA com a qual a corda é esticada (puxada).
- 6) Quando dois pulsos estão em sentidos contrários e na mesma direção em uma corda de extremidade LIVRE, ao se encontrar em um ponto, eles se SOMAM.
- 7) A velocidade de propagação de um pulso em uma corda depende da tração e da DENSIDADE LINEAR da corda.
- 8) Um pulso é uma perturbação no meio, que no caso é a corda, que transporta ENERGIA, porém não transporta MATÉRIA.

PLANO DE SEÇÃO 5: Com a onda toda!

IDENTIFICAÇÃO: Colégio _____

CURSO: Ensino Médio

DISCIPLINA: Física

PROFESSOR: Luís Alexandre Rauch

SÉRIE: 2º Ano

CARGA HORÁRIA: 50 minutos

UNIDADE DIDÁTICA: Nas cordas dos instrumentos musicais

TEMA: Ondas Mecânicas

ASSUNTO: Ondas em uma corda

COMPETÊNCIAS E HABILIDADES

- Ler e interpretar textos de interesse científico e tecnológico;
- Fazer uso dos conhecimentos da Física para explicar o mundo natural e planejar, executar e avaliar intervenções práticas.

OBJETIVOS

- Associar um ponto de onda em uma corda com o movimento de um pêndulo simples.
- Visualizar e medir as grandezas físicas a partir de um instantâneo de uma onda.

MOMENTOS DA AULA

1 – Introdução/Motivação: (5 minutos)

Com o auxílio do datashow o professor apresenta aos educandos o vídeo “onda em uma corda”, onde tece um breve comentário sobre o conceito de onda e os ramos da Física que estuda as ondas: ondulatória, óptica física e eletromagnetismo.

7 – Desenvolvimento: (40 minutos)

O professor entrega aos educandos o texto de apoio referente à seção 5, onde com o auxílio do datashow, realiza a leitura do texto, apresentando os slides referentes à apresentação “Seção 5 – Com a onda toda!”, onde apresenta as diferenças entre ondas mecânicas e eletromagnéticas, bem como a direção de propagação das ondas, entre longitudinal e transversal.

É comentado com os educandos que neste momento será dado ênfase ao estudo das ondas transversais, como a onda produzida na corda apresentada no vídeo.

Prosseguindo com o texto, juntamente com os slides, o professor faz explicações do estudo de um ponto da corda em momentos diferentes e específicos e também o movimento deste ao longo de um intervalo de tempo, comparando o movimento deste ponto com o movimento realizado pelo pêndulo, estudado na seção 3.

Terminado os comentários acerca do estudo do ponto da corda, o professor apresenta o slide contendo um instantâneo de uma onda, onde define as grandezas físicas: crista, vale, amplitude e comprimento de onda.

Em seguida o professor fornece aos educandos a equação que permite encontrar a posição de qualquer ponto da corda em qualquer instante de tempo, comentando cada uma de suas partes.

Após a leitura do texto, o professor solicita que os educandos realizem a atividade proposta no final do texto de apoio.

3 – Síntese Integradora (5 minutos)

Ao final da aula o professor solicita que os educandos entreguem a última página (colocando o nome na mesma), a qual será corrigida e entregue na aula seguinte para arquivamento.

AVALIAÇÃO

Feita de uma forma qualitativa, a partir de observações no decorrer da aula com base no interesse, na participação e na interação dos educandos. E de forma quantitativa, ao efetuar a correção das palavras cruzadas depois da aula arquivados na pasta.

RECURSOS FÍSICOS:

Para a aula serão utilizados:

- Quadro negro;
- Giz;
- Projetor multimídia;
- Vídeo: “Onda em uma corda”, disponível no conteúdo digital do Material de apoio ao Professor reproduzido nas observações deste plano;
- Texto de apoio ao educando – Seção 5;
- Apresentação “Seção 5 – Com a onda toda!”, disponível no material do professor e reproduzido nas observações deste plano.

REFERÊNCIAS:

HALLIDAY, Resnick. WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física**. Volume 2. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

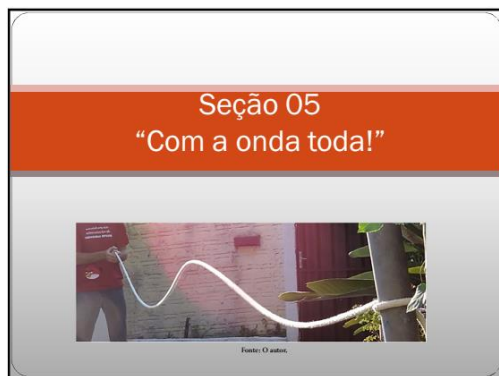
HEWITT, Paul G. **Física Conceitual**. 9ªed. São Paulo: Bookman, 2002.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica**. Volume 2. 4ª ed. Edgard Blucher, 2002.

OBSERVAÇÕES:

- Na impossibilidade de utilização do datashow em sala de aula por motivos diversos, o professor pode realizar a apresentação do vídeo “Onda em uma corda”, bem como os slides da “Seção 5 – Com a onda toda!” junto à TV Pendrive.

Slides referentes à Seção 5: Com a onda toda!



Ondas

Constituem um dos principais assuntos da Física.

Sua compreensão se faz necessário para o entendimento de:

- Ondulatória;
- Óptica física;
- Eletromagnetismo.

Classificação

1. De acordo com a necessidade de um meio de propagação ou não:

- **Ondas mecânicas** – necessitam de um meio material para se propagar;
Exemplo: ondas em uma corda
- **Ondas eletromagnéticas** – não necessita de um meio.
Exemplo: a luz do Sol

2. De acordo com a direção de propagação da perturbação

- **Onda transversal** – quando a perturbação é transversal à direção de propagação.
Exemplo: ondas em uma corda
- **Onda longitudinal** – quando a perturbação é na mesma direção da propagação.
Exemplo: mola comprimida

Posição de um ponto da corda em momentos diferentes e específicos

Analisa-se o movimento oscilatório para cima e para baixo de um ponto específico da corda. Para isso, admite-se um sistema de coordenadas xy.

Comparação

Foto: O autor.

(a) o ponto se encontra em $y = 0$ e x fixo, ou seja, neste instante ele tem deslocamento zero.

(b) o ponto está na posição $y = +y_{\text{max}}$ para cima e x fixo, ou seja, neste instante ele tem deslocamento máximo para cima.

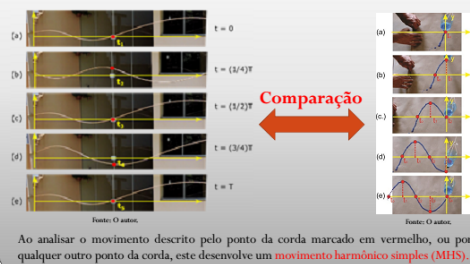
(c) O ponto se encontra em $y = 0$ novamente e x fixo, ou seja, neste instante ele tem deslocamento zero.

(d) o ponto está na posição $y = -y_{\text{max}}$ para baixo e x fixo, ou seja, neste instante ele tem deslocamento máximo para baixo.

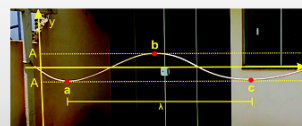
(e) o ponto se encontra em $y = 0$ mais uma vez e x fixo, ou seja, neste instante ele tem deslocamento zero.

Foto: O autor.

Movimento do ponto ao longo de um intervalo de tempo



O instantâneo apresentado na figura mostra a forma assumida pela corda, quando a onda passa pela mesma, de modo que é possível definir algumas grandezas que caracterizam a onda através da corda.



- **b** é um ponto de máximo positivo - **crista da onda**.
- **a** e **c** são pontos de máximo negativo, - **vales da onda**.
- **Amplitude** é a distância do ponto: a, b ou c à linha de referência que foi adotada como o eixo x.
- **Comprimento de onda**, representado pela letra grega λ - distância entre duas cristas ou dois vales da onda.

Movimento de qualquer ponto da corda em qualquer tempo

Pode-se generalizar o movimento de um ponto na corda para todos os pontos da corda a qualquer tempo e descrever a forma da onda se propagando em uma corda.

$$y(x, t) = y_m \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - ft \right)$$

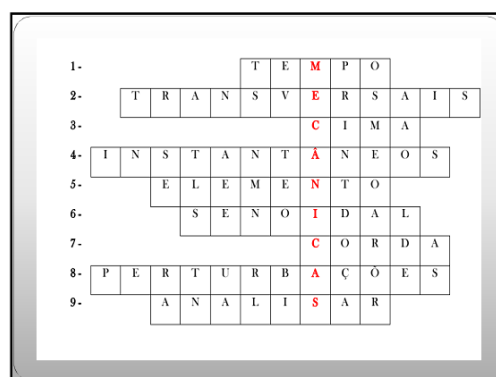
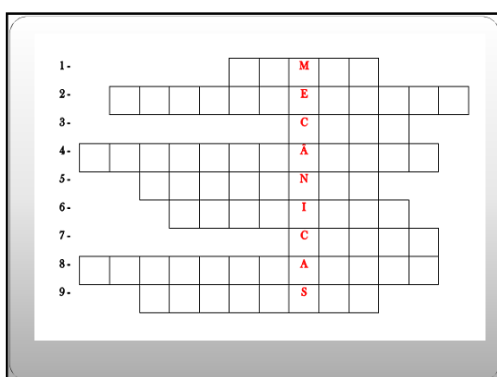
y - deslocamento transversal de qualquer ponto da corda
 λ - comprimento de onda
 f - frequência linear do movimento oscilatório

A figura apresenta um instantâneo de uma onda senoidal percorrendo uma corda, onde apresenta e representa qualquer ponto da corda, se propagando no sentido positivo do eixo x com velocidade v.



O ponto da corda demarcado como x_1 tem $y = y_1$.
 O ponto da corda demarcado como x_2 tem $y = y_2$.

É possível dizer qual é a posição da onda em qualquer instante de tempo e como esta forma varia quando a onda se move ao longo da corda.



PLANO DE SEÇÃO 6: Uma onda parada?

IDENTIFICAÇÃO: Colégio _____

CURSO: Ensino Médio

DISCIPLINA: Física

PROFESSOR: Luís Alexandre Rauch

SÉRIE: 2º Ano

CARGA HORÁRIA: 150 minutos

UNIDADE DIDÁTICA: Nas cordas dos instrumentos musicais

TEMA: Ondas Mecânicas

ASSUNTO: Ondas estacionárias

COMPETÊNCIAS E HABILIDADES

- Ler e interpretar textos de interesse científico e tecnológico;
- Utilizar instrumentos de medição e de cálculo;
- Interpretar e criticar resultados a partir de experimentos e demonstrações;
- Fazer uso dos conhecimentos da Física para explicar o mundo natural e planejar, executar e avaliar intervenções práticas;
- Expressar-se oralmente com correção e clareza, usando a terminologia correta;
- Identificar variáveis relevantes e selecionar os procedimentos necessários para a produção, análise e interpretação de resultados de processos e experimentos científicos e tecnológicos.

OBJETIVOS

- Explicar o conceito de ondas estacionárias;
- Associar a frequência criada pelo gerador de áudio e transposta para o alto-falante à frequência de uma nota musical;
- Calcular a frequência fundamental de uma corda e seus harmônicos.

MOMENTOS DA AULA**AULA 01****1 – Introdução/Motivação: (10 minutos)**

Como introdução da aula o professor realiza um resumo das aulas anteriores, fazendo no quadro uma linha temporal mostrando a evolução dos conceitos apresentados nas aulas anteriores, mostrando que na primeira aula apresentada os educandos manusearam instrumentos musicais de cordas, na segunda e terceira aulas foram trabalhados conceitos de Movimento Periódico e MHS, e nas aulas 4 e 5 foram trabalhados as propriedades do pulso e ondas.

8 – Desenvolvimento: (30 minutos)

Após realizada a revisão, com a massa de 60g e a corda de nylon 0.60, no experimento de corda, a partir do gerador de frequências, o professor coloca uma frequência de 20 Hz e explica o significado (o alto-falante vibra 20 vezes por segundo) e pergunta o que está acontecendo com a corda. Possíveis respostas esperadas pelos educandos:

- A corda está vibrando;
- Não estou vendo acontecer nada na corda.

Então é solicitado que os educandos toquem com o dedo levemente no alto-falante e sintam a vibração no mesmo.

Após os educandos tocarem o alto-falante, o professor coloca uma frequência de 40Hz e repete o procedimento.

Depois dos educandos tocarem no alto-falante com as duas frequências e verificar que a corda vibra aleatoriamente, coloca-se a frequência relativa ao 1º harmônico ($f = 28\text{Hz}$), onde solicita-se que os educandos observem. Em seguida, faz a pergunta: Por que isto ocorre?

- Isto é mágica, professor.
- Que coisa, não tem lógica isso, professor.

Após ouvir as possíveis respostas, o professor relembra sobre a reflexão de um pulso, visto na seção 4, e comenta que o alto-falante ao vibrar provoca

pulsos repetidos nas cordas, os quais estão constantemente sendo refletidos nas extremidades, e ocorrem então as interferências entre os pulsos incidentes e refletidos.

Então comenta que existem frequências específicas onde ocorre um padrão de interferência onde a corda parece estar “parada”, explicando que aquele “desenho” formado é denominado **1º. Harmônico**, e a frequência que o gera é chamada **frequência fundamental**.

O professor coloca então a frequência referente aos 2º. harmônico ($f = 56,5\text{Hz}$) e mostra o desenho formado, apresenta os conceitos de **nó** e **ventre**. Faz o mesmo procedimento para o 3º. Harmônico ($f = 83\text{Hz}$).

3 – Síntese Integradora (10 minutos)

O professor realiza a troca da corda por cordas de densidades diferentes, bem como varia a massa para que os educandos observem o que ocorre, incentivando os mesmos a investigar o experimento, manipulando-o (pegando na corda, variando a tensão na corda para produzir outros harmônicos)

AVALIAÇÃO

Realizada de uma forma qualitativa, a partir de observações feitas no decorrer da aula com base no interesse, na participação e na interação dos educandos.

RECURSOS FÍSICOS:

Para a aula serão utilizados:

- Quadro negro;
- Giz;
- Experimento da corda;
- Massas de 20g e 60g
- Fios de nylon 0.20, 0.45 e 0.60; fios de tricô (pré-testados pelo professor).

REFERÊNCIAS:

YOUNG, D. Hugh. FREEDMAN Roger A.. **Física II**. 10ª ed. São Paulo: Ed. Pearson Addison Wesley, 2003.

HALLIDAY, Resnick. WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física**. Volume 2. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

LOPES, Wilson. **Variação da aceleração da gravidade com a latitude e altitude**. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 25, n. 3: p. 561-568, dez. 2008. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/issue/view/1160>. Acesso em: 28 Nov. 2015.

INSTITUTO DE FÍSICA DA USP. **Tabela de densidades lineares de fios de nylon**. Disponível em: <http://portal.if.usp.br/labdid/pt-br/tabelas-e-constantas>. Acesso em: 28 Nov. 2015.

OBSERVAÇÕES:

- Na falta de amplificador, o professor pode utilizar as caixas de som da escola, que possuam entrada de áudio para conectar os fios;
- Tome cuidado com a tensão da rede do Colégio para não ter perigo de danificar o equipamento. É interessante acompanhar um transformador bivolt junto ao kit do experimento da corda, visto que algumas escolas possuem tensão 127 V e outras 227 V.

AULA 02

1 – Introdução/Motivação: (10 minutos)

O professor realiza a montagem do experimento da corda e refaz o experimento com as cordas de nylon 0,45 e 0,60 para massas de 20 g e 60 g, onde sana possíveis dúvidas sobre o funcionamento do experimento.

9 – Desenvolvimento: (30 minutos)

Com o experimento da corda contendo o fio de nylon 0,60, e massa 60 g, o professor coloca a frequência relativa ao 2º. harmônico ($f = 56,5\text{Hz}$) e mostra com o auxílio de um desenho no quadro negro, que o formato da corda refere-se a um comprimento de onda completo, mostrando a relação:

$$L = \lambda$$

Em seguida é colocada a frequência relativa ao 1º. harmônico, onde é mostrado que este se refere à metade de um comprimento de onda, mostrando a relação:

$$L = \lambda/2$$

E então repete o procedimento para o 3º. harmônico ($f = 83\text{Hz}$), chegando à relação:

$$L = 3\lambda/2$$

O professor mostra no quadro que é possível fazer a relação:

$$1^\circ. \text{ Harmônico} - L = 1\lambda/2$$

$$2^\circ. \text{ Harmônico} - L = 2\lambda/2$$

$$3^\circ. \text{ Harmônico} - L = 3\lambda/2$$

Assim, generaliza as observação na equação:

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

A partir desta generalização o professor realiza a dedução no quadro negro da equação para encontrar o valor da frequência fundamental e seus harmônicos para uma corda.

3 – Síntese Integradora (10 minutos)

Como encerramento da aula, o professor propõe que os educandos realizem o calcula para encontrar a frequência fundamental de um fio de nylon 0,45 cuja massa que o tensiona é de 80g. Após eles fornecerem o resultado o professor comprova com o experimento da corda

O professor entrega o texto de apoio aos educandos e recomenda que estes realizem a leitura prévia para a próxima aula.

AVALIAÇÃO

Feita de uma forma qualitativa, a partir de observações feitas no decorrer da aula com base no interesse, na participação e na interação dos educandos.

RECURSOS FÍSICOS:

Para a aula serão utilizados:

- Quadro negro;
- Giz;
- Experimento da corda;
- Massas de 20g e 60g
- Fios de nylon 0.45 e 0.60.
- Texto de apoio ao educando – Seção 6

REFERÊNCIAS:

YOUNG, D. Hugh. FREEDMAN Roger A.. **Física II**. 10ª ed. São Paulo: Ed. Pearson Addison Wesley, 2003.

HALLIDAY, Resnick. WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física**. Volume 2. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

LOPES, Wilson. **Variação da aceleração da gravidade com a latitude e altitude**. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 25, n. 3: p. 561-568, dez. 2008. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/issue/view/1160>. Acesso em: 28 Nov. 2015.

INSTITUTO DE FÍSICA DA USP. **Tabela de densidades lineares de fios de nylon**. Disponível em: <http://portal.if.usp.br/labdid/pt-br/tabelas-e-constantes>. Acesso em: 28 Nov. 2015.

OBSERVAÇÕES:

- Na falta de amplificador, o professor pode utilizar as caixas de som da escola, que possuam entrada de áudio para conectar os fios;
- Tome cuidado com a tensão da rede do Colégio para não ter perigo de danificar o equipamento. É interessante acompanhar um transformador bivolt junto ao kit do experimento da corda, visto que algumas escolas possuem tensão 127 V e outras 227 V.

AULA 03

1 – Introdução/Motivação: (05 minutos)

Com o auxílio do quadro negro, o professor realiza um breve relato do que foi apresentado nas duas primeiras aulas do experimento da corda, anotando em forma de itens os pontos principais das investigações realizadas pelos educandos.

2 – Desenvolvimento: (35 minutos)

Com o auxílio do datashow, o professor projeta a apresentação “seção 6 – Uma onda parada?”, onde, juntamente com a leitura do texto, apresenta slides contendo os pontos principais do texto.

Após realizada a leitura do texto, o professor comenta acerca do primeiro exercício proposto, solicita que os educandos realizem o cálculo da velocidade do pulso em cada corda, completando os espaços da tabela. Em seguida, é então solicita que sejam analisados os resultados e completem as lacunas nas frases logo abaixo.

Repete o mesmo procedimento para a tabela das frequências.

3 – Síntese Integradora (10 minutos)

Como finalização da aula, o professor faz um breve resumo do que foi realizado na aula e sana possíveis dúvidas e curiosidades que surgirem. É solicitado então que os educandos entreguem as páginas 5 e 6 (colocando o nome nas mesmas), as quais serão realizadas as correções e entregue na aula seguinte para arquivamento.

AValiação

Realizada de uma forma qualitativa, a partir de observações no decorrer da aula com base no interesse, na participação e na interação dos educandos. E de forma quantitativa, ao efetuar a correção da atividade: Uma situação real, depois da aula arquivados na pasta.

RECURSOS FÍSICOS:

Para a aula serão utilizados:

- Quadro negro;
- Giz;
- Datashow ou TV Pendrive;
- Apresentação “Seção 6 – Uma onda parada?”, disponível no material do professor e reproduzido nas observações deste plano.
- Calculadora.

REFERÊNCIAS:

YOUNG, D. Hugh. FREEDMAN Roger A.. **Física II**. 10ª ed. São Paulo: Ed. Pearson Addison Wesley, 2003.

HALLIDAY, Resnick. WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física**. Volume 2. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

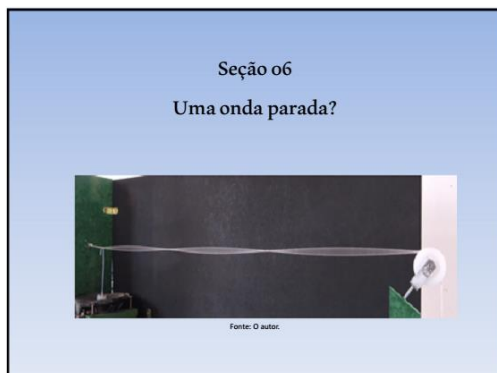
LOPES, Wilson. **Variação da aceleração da gravidade com a latitude e altitude**. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 25, n. 3: p. 561-568, dez. 2008. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/issue/view/1160>. Acesso em: 28 Nov. 2015.

INSTITUTO DE FÍSICA DA USP. **Tabela de densidades lineares de fios de nylon**. Disponível em: <http://portal.if.usp.br/labdid/pt-br/tabelas-e-constantes>. Acesso em: 28 Nov. 2015.

OBSERVAÇÕES:

- Na impossibilidade de utilização do datashow em sala de aula por motivos diversos, o professor pode apresentar o vídeo proposto na introdução, bem como a apresentação “Seção 6 – Uma onda parada?” junto à TV Pendrive.

Slides referentes à Seção 6: Uma onda parada?



- Uma corda presa nas duas extremidades, como as cordas de um violão,
- Ou quando uma das extremidades está presa, mas a outra tensionada por uma determinada massa

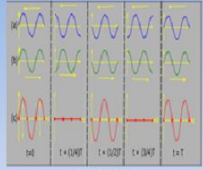
Em ambos os casos, ao vibrar a corda haverá ondas atravessando a mesma. Estas sofrerão reflexões nas duas extremidades, fazendo com que viagem nos dois sentidos da corda.

Estas ondas superpostas sofrem interferência.

(a) Cinco instantâneos de uma onda se propagando para a esquerda.

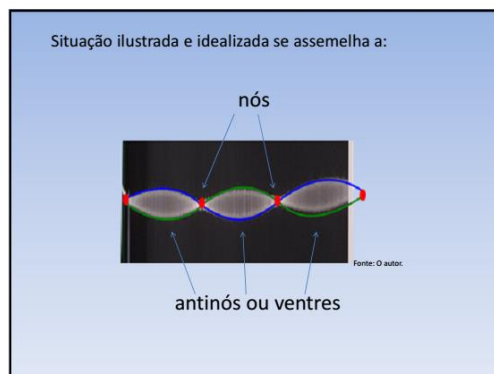
(b) Os cinco instantâneos respectivos de outra onda se propagando para a direita;

(c) Representa-se os cinco instantâneos respectivos do movimento desta ondas para cada ponto da corda, ou seja, a superposição das duas ondas.



Fonte: O autor.

- Os **pontos imóveis** na corda são denominados **nós**.
- As regiões entre dois nós vizinhos onde existem pontos onde as resultantes da superposição das ondas possuem **amplitude máxima positiva** ou **amplitude máxima negativa**, são denominados **antinós** ou **ventres**.



Ao se manter uma corda esticada e colocá-la para oscilar em MHS de pequena amplitude tem-se: duas ondas que se propagam pela corda com frequência e direção iguais e sentidos contrários gerando um **padrão de onda estacionária**.

Estes padrões têm **número de nós e ventres diferentes** porque são produzidos com certas frequências denominadas frequências de ressonância da corda. A **cada frequência de ressonância** que produz ondas estacionárias dá-se o nome de **modo de oscilação**:

- À menor frequência de ressonância – **frequência fundamental** – representado por f_1 – primeiro harmônico.
- A segunda menor frequência de ressonância – dobro da frequência fundamental - representada por f_2 – **segundo harmônico**.
- A terceira menor frequência – três vezes maior que a frequência fundamental - representada por f_3 – **terceiro harmônico**.

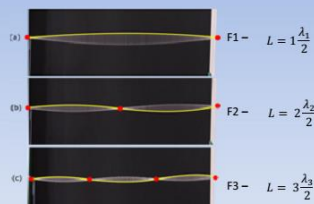
Espectro de ressonância

É todo o conjunto de frequências de ressonância de uma determinada corda, que produzem seus respectivos modos de oscilação.



Fonte: O autor.

A corda do experimento tem comprimento fixo de valor L , observando os comprimentos e onda λ , é fácil perceber que:



Fonte: O autor.

Onde: $L = n \frac{\lambda_n}{2}$

A velocidade de um pulso pode ser expressa em função do comprimento de onda como:

$$v = \lambda f \Rightarrow f = \frac{v}{\lambda} \Rightarrow f_n = \frac{v}{\lambda_n} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

Logo:

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}$$

$$\left. \begin{array}{l} f_1 = \frac{v}{2L} \quad n = 1 \\ f_2 = \frac{2v}{2L} = 2 \left(\frac{v}{2L} \right); \quad n = 2 \\ f_3 = \frac{3v}{2L} = 3 \left(\frac{v}{2L} \right); \quad n = 3 \end{array} \right\} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} f_n = \frac{v}{2L} \\ f_n = n f_1 \end{array} \right\}$$

- Fio 1 - nylon 0.45 - $\mu = 2,003 \times 10^{-4} \text{ Kg/m}$
- Fio 2 - nylon 0.60 - $\mu = 3,235 \times 10^{-4} \text{ Kg/m}$
- 1 massa de 20g - $T = 0,1956 \text{ N}$
- 1 massa de 60g - $T = 0,5868 \text{ N}$

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Ex:

$$v = \sqrt{\frac{0,1956}{2,003 \cdot 10^{-4}}} = 31,24 \text{ m/s}$$

	$\mu \text{ (kg/m)}$	$T \text{ (N)}$	$v \text{ (m/s)}$
fio 1	$2,003 \cdot 10^{-4}$	0,1956	31,24
fio 1	$2,003 \cdot 10^{-4}$	0,5868	
fio 2	$3,235 \cdot 10^{-4}$	0,1956	
fio 2	$3,235 \cdot 10^{-4}$	0,5868	

Fonte: O autor.

- Fio 1 - nylon 0.45 - $\mu = 2,003 \times 10^{-4} \text{ Kg/m}$
- Fio 2 - nylon 0.60 - $\mu = 3,235 \times 10^{-4} \text{ Kg/m}$
- 1 massa de 20g - $T = 0,1956 \text{ N}$
- 1 massa de 60g - $T = 0,5868 \text{ N}$

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Ex:

$$v = \sqrt{\frac{0,1956}{2,003 \cdot 10^{-4}}} = 31,24 \text{ m/s}$$

	$\mu \text{ (kg/m)}$	$T \text{ (N)}$	$v \text{ (m/s)}$
fio 1	$2,003 \cdot 10^{-4}$	0,1956	31,24
fio 1	$2,003 \cdot 10^{-4}$	0,5868	54,13
fio 2	$3,235 \cdot 10^{-4}$	0,1956	24,58
fio 2	$3,235 \cdot 10^{-4}$	0,5868	42,59

Fonte: O autor.

- Quando o fio 1 está esticado com maior intensidade, isto é, coloca-se um corpo de massa maior, a tensão na corda _____ (aumenta/diminui), em consequência a velocidade de propagação de uma onda será _____ (maior/menor) neste fio;
- Da mesma forma, ao considerar os dois fios diferentes, fio 1 e fio 2, mas mantendo-se a mesma tensão no fio, isto é, o corpo utilizado em ambos os fios é o mesmo, pode-se afirmar que o fio _____ (1/2), cuja densidade linear é maior que a do fio _____ (1/2) tem velocidade de propagação de onda _____ (menor/menor) do que o fio _____ (1/2).

Assim, é possível concluir a partir das observações feitas na tabela 1, que quanto _____ (maior/menor) a densidade do fio, _____ (maior/menor) será a velocidade de propagação de um pulso ou de uma onda neste fio. E quanto _____ (maior/menor) a tensão aplicada no fio, _____ (maior/menor) será a velocidade de propagação de um pulso ou de uma onda.

- Quando o fio 1 está esticado com maior intensidade, isto é, coloca-se um corpo de massa maior, a tensão na corda **AUMENTA** (aumenta/diminui), em consequência a velocidade de propagação de uma onda será **MAIOR** (maior/menor) neste fio;
- Da mesma forma, ao considerar os dois fios diferentes, fio 1 e fio 2, mas mantendo-se a mesma tensão no fio, isto é, o corpo utilizado em ambos os fios é o mesmo, pode-se afirmar que o fio **2** (1/2), cuja densidade linear é maior que a do fio **1** (1/2) tem velocidade de propagação de onda **MENOR** (menor/menor) do que o fio **1** (1/2).

Assim, é possível concluir a partir das observações feitas na tabela 1, que quanto **MAIOR** (maior/menor) a **densidade** do fio, **MENOR** (maior/menor) será a velocidade de propagação de um pulso ou de uma onda neste fio. E quanto **MAIOR** (maior/menor) a **tensão** aplicada no fio, **MAIOR** (maior/menor) será a velocidade de propagação de um pulso ou de uma onda.

fio 1	fio 1	fio 2	fio 2
$\mu = 2,003 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}$	$\mu = 2,003 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}$	$\mu = 3,233 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}$	$\mu = 3,233 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}$
$T = 0,1936 \text{ N}$	$T = 0,3868 \text{ N}$	$T = 0,1936 \text{ N}$	$T = 0,3868 \text{ N}$
f_1	20,8 Hz	36,08 Hz	16,38 Hz
f_2	41,6 Hz	32,76 Hz	28,40 Hz
f_3	62,4 Hz	49,12 Hz	
f_4	83,2 Hz	65,52 Hz	
f_5	104 Hz	81,9 Hz	142 Hz

$$L = 0,75 \text{ m}$$

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}$$

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n}$$

$$f_n = n f_1$$

fio 1	fio 1	fio 2	fio 2
$\mu = 2,003 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}$	$\mu = 2,003 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}$	$\mu = 3,233 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}$	$\mu = 3,233 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}$
$T = 0,1936 \text{ N}$	$T = 0,3868 \text{ N}$	$T = 0,1936 \text{ N}$	$T = 0,3868 \text{ N}$
f_1	20,8 Hz	36,08 Hz	28,40 Hz
f_2	41,6 Hz	72,16 Hz	56,8 Hz
f_3	62,4 Hz	108,24 Hz	85,2 Hz
f_4	83,2 Hz	144,32 Hz	113,6 Hz
f_5	104 Hz	180,4 Hz	142 Hz

Fonte: O autor.

$$L = 0,75 \text{ m}$$

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}$$

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n}$$

$$f_n = n f_1$$

- Ao se utilizar um mesmo fio, quanto maior a tensão aplicada no fio, isto é, ao se utilizar um corpo de massa maior para puxar o fio, **MAIOR** (maior/menor) será a frequência fundamental para este fio.
- Ao se utilizar dois fios de densidades lineares diferentes, ao se aplicar a mesma tensão em cada um dos fios, isto é o mesmo corpo para puxar o fio, quanto maior a densidade linear do fio, **MENOR** (maior/menor) será a frequência fundamental para esta tensão.

- Ao se utilizar um mesmo fio, quanto maior a tensão aplicada no fio, isto é, ao se utilizar um corpo de massa maior para puxar o fio, **MAIOR** (maior/menor) será a frequência fundamental para este fio.
- Ao se utilizar dois fios de densidades lineares diferentes, ao se aplicar a mesma tensão em cada um dos fios, isto é o mesmo corpo para puxar o fio, quanto maior a densidade linear do fio, **MENOR** (maior/menor) será a frequência fundamental para esta tensão.

PLANO DE SEÇÃO 7: Voltando ao início...

IDENTIFICAÇÃO: Colégio _____

CURSO: Ensino Médio

DISCIPLINA: Física

PROFESSOR: Luís Alexandre Rauch

SÉRIE: 2º Ano

CARGA HORÁRIA: 50 minutos

UNIDADE DIDÁTICA: Nas cordas dos instrumentos musicais

TEMA: Ondas Mecânicas

ASSUNTO: Escala Pitagórica e Timbre

COMPETÊNCIAS E HABILIDADES

- Ler e interpretar textos de interesse científico e tecnológico;
- Interpretar e criticar resultados a partir de experimentos e demonstrações;
- Fazer uso dos conhecimentos da Física para explicar o mundo natural e planejar, executar e avaliar intervenções práticas;
- Expressar-se oralmente com correção e clareza, usando a terminologia correta;

OBJETIVOS

- Associar uma nota musical produzida por um instrumento de corda com a dependência com a densidade linear, o material e comprimento da corda;
- Explicar como Pitágoras procedeu para construir a escala musical ocidental (escala Pitagórica);
- Descrever o conceito de timbre de um instrumento musical, bem como da voz humana.

MOMENTOS DA AULA

1 – Introdução/Motivação: (5 minutos)

Com o auxílio do datashow, o professor apresenta o vídeo “Pitágoras e a Música - Donald no País da Matemática”.

.

10 – Desenvolvimento: (40 minutos)

Após a apresentação do vídeo, com o auxílio dos slides referentes à apresentação da Seção 7 – Voltando ao início..., são apresentados os pontos principais contidos no texto, onde é explicado como Pitágoras realizou seus estudos e chegou às notas musicais a partir da variação do comprimento da corda do seu monocórdio, e como Zarlino aperfeiçoou a divisão realizada por Pitágoras.

É trabalhado com os educandos também os conceitos de composição harmônica e timbre.

Após as explicações, o professor fornece os textos de apoio aos educandos, onde estes realizam a leitura do mesmo, porém, ainda sem resolver o exercício proposto.

O professor solicita que a turma se organize em 4 (quatro) equipes, distribui um instrumento para cada equipe, solicita que tentem observar os princípios físicos estudados durante a unidade, bem como variem o comprimento da corda do monocórdio sobre as marcações feitas na tampa para ouvir as notas musicais a partir da divisão da corda como Pitágoras fez e Zarlino aperfeiçoou.

Depois de um tempo, o professor solicita que as equipes que estão com os monocórdios permutem os monocórdios entre si, faz o mesmo procedimento com as equipes que possuem os violões rudimentares.

Realizadas as análises com dois instrumentos que possuem mesmo comprimento, porém cordas diferentes (dois monocórdios ou dois violões), o professor solicita então que façam novamente a permuta entre os instrumentos, porém, desta vez, a equipe que estava com o monocórdio com a corda nº. 3, pegue o violão com a corda nº. 3, e vice-versa. O mesmo procedimento com a

equipe que estava com o monocórdio de corda nº. 5, que pegue o violão contendo a corda nº. 5 e vice-versa.

Após as equipes analisarem os instrumentos, o professor pergunta para a turma: O que conseguiram observar quando manusearam o mesmo instrumento (violão ou monocórdio), ou seja, os instrumentos que possuem mesmo comprimento? Possíveis respostas fornecidas pelos educandos:

- O instrumento que tem corda mais grossa tem o som mais grave;
- O instrumento que tem corda mais fina tem som mais agudo.

É perguntado novamente aos educandos: E quando foram manuseados os instrumentos com tamanhos diferentes (um violão e um monocórdio), porém, ambos com a mesma corda? Possíveis respostas fornecidas pelos educandos:

- O instrumento que tem corda maior possui som mais grave;
- O instrumento que tem corda menos possui som mais agudo.

O professor solicita então que os educandos realizem a atividade final proposta no texto de apoio.

3 – Síntese Integradora (5 minutos)

Ao final da aula o professor solicita que os educandos entreguem a folha 5 (colocando o nome na mesma) que será corrigida e entregue na aula seguinte para arquivamento.

AVALIAÇÃO

Feita de uma forma qualitativa, a partir de observações no decorrer da aula com base no interesse, na participação e na interação dos educandos. E de forma quantitativa, ao efetuar a correção da atividade: palavras cruzadas depois da aula arquivados na pasta.

RECURSOS FÍSICOS:

Para a aula serão utilizados:

- Quadro negro;
- Giz;

- Datashow ou TV Pendrive;
- Apresentação “Seção 7 – Voltando ao início...”, disponível no material do professor e reproduzido nas observações deste plano;
- Monocórdios de Pitágoras com cordas nº 3 e 5;
- Violão Rudimentar com cordas nº 3 e 5;
- Texto de apoio ao educando – Seção 7;
- Vídeo “Pitágoras e a Música - Donald no País da Matemática”, disponível no conteúdo digital do Material de Apoio ao Professor ou para acesso em: <https://www.youtube.com/watch?v=66l6MBQgcRg>.

REFERÊNCIAS:

CROCHIK, L.; RIBEIRO JÚNIOR, I. S. **A construção de escalas musicais e instrumentos musicais de baixo custo como recurso didático para o ensino de física ondulatória**. Simpósio Nacional de Ensino de Física, 2009. Disponível em: http://www.cienciamao.usp.br/dados/snef/_aconstrucaodeescalasmusi.trabalho.pdf. Acesso em: 10 Abr. 2015.

DAVE, P. **Como se vem las cuerdas dentro de la guitarra**. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=xYcSy146LAM>. Acesso em: 10 Out. 2015.

HERRERO, Raul. **Pitágoras en el momento del triunfo del cristianismo**. Disponível em: <http://raulherrero.blogia.com/2006/071801-pitagoras-en-el-momento-del-triunfo-del-cristianismo.php>. Acesso em: 28 mai. 2016.

Note the diferente timbres below. Disponível em: <http://www.simplifyingtheory.com/timbre/>. Acesso em: 26 Jun. 2016.
Wuensche, C. A. **A física da música**. Disponível em: http://www.cea.inpe.br/~alex/FisicadaMusica/fisica_da_musica.pdf, 2005. Acesso em 04 Dez. 2015.

O Monocórdio de Pitágoras . <http://www.ghtc.usp.br/server/Sites-HF/Lucas-Soares/monocordio%20de%20pitagoras.html>

Pitágoras. Disponível em: <http://pensador.uol.com.br/autor/pitagoras/>. Acesso em: 25 dez. 2015.

YOUNG, D. Hugh. FREEDMAN Roger A.. **Física II**. 10ª ed. São Paulo: Ed. Pearson Addison Wesley, 2003.

OBSERVAÇÕES:

- Na impossibilidade de utilização do datashow em sala de aula por motivos diversos, o professor pode apresentar o vídeo proposto na introdução, bem como a apresentação “Seção 7 – Voltando ao início...” junto à TV Pendrive.
- Se houver a possibilidade de serem levados outros instrumentos de cordas além dos citados, como um violino, poderão ser formadas mais equipes e a aula ficará mais produtiva.

Slides referentes à Seção 7: Voltando ao início...

**SEÇÃO 07
VOLTANDO AO INÍCIO...**



Fonte: O autor.

É possível perceber relações dos conceitos apresentados nas seções anteriores com instrumento de cordas como:

Piano



Fonte: O autor.

Monocórdio



Fonte: O autor.

violão



Fonte: O autor.

Monocórdio

É instrumento confeccionado basicamente por uma corda. Pode ser, por exemplo:

- ✦ de aço;
- ✦ de Nylon.

A corda é presa em uma das extremidades e tensionada na outra extremidade.

Sistema onde uma corda é presa em uma das extremidades e tensionada em outra por uma determinada massa - seção 6 - experimento da corda onde estudou-se a formação de ondas estacionárias em uma corda presa nas extremidades, sendo que em uma das extremidades estava fixa e a outra extremidade possuindo uma determinada massa, a qual era variável e proporcionava tensão à corda.



Fonte: O autor.

O Monocórdio foi inventado por Pitágoras (580-497 a.C.)

Ao passar em frente a uma oficina de um ferreiro, Pitágoras percebeu que as batidas de martelos de diferentes pesos produziam sons que eram agradáveis ao ouvido e se combinavam muito bem.

Pitágoras utilizou o monocórdio para estudar a relação dos comprimentos das cordas com o som produzido por estas, tentando encontrar as relações onde os sons eram mais agradáveis aos ouvidos.

O monocórdio consistia basicamente de uma corda, cujas extremidades eram tensionadas por objetos de determinada massa, apoiada sobre dois cavaletes em uma mesa. Esta mesa também possuía um terceiro cavalete móvel, cuja função era dividir a corda em frações perfeitas do comprimento original.



Fonte: <http://raulherreno.blogia.com/2006/071801-pitagoras-en-el-momento-del-nacimiento-del-cristianismo.php>

Foi a partir dos seus estudos com o uso do monocórdio que Pitágoras chegou às 7 notas musicais conhecidas no ocidente, que são as notas **dó-ré-mi-fá-sol-lá-si-dó**.

- ✖ Ao dividir a corda do monocórdio em 2/3 do seu tamanho original - intervalo musical de quinta (exemplo: dó-sol).
- ✖ Ao dividir essa mesma corda em 3/4 do tamanho original ele obtinha o intervalo musical de quarta (exemplo: dó-fá).
- ✖ Quando ele dividia a corda na metade do comprimento ele obtinha o intervalo de oitava (exemplo: dó1 - dó2).

Para a obtenção das demais notas Pitágoras utilizou o ciclo das quintas, o qual consistia em encontrar as notas **dó-ré-mi-fá-sol-lá-si-dó**, através da superposição de quintas ascendentes.

- ✖ A utilização do ciclo das quintas nos proporciona a seguinte ordem das notas musicais:

dó-sol-ré-lá-mi-si

Notas	Dó	Ré	Mi	Fá	Sol	Lá	Si	Dó
Comprimento da corda em relação à Dó	1	$\frac{8}{9}$	$\frac{64}{81}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{16}{27}$	$\frac{128}{243}$	$\frac{1}{2}$

Fonte: http://www.cienciamao.usp.br/dados/inef/_construcao_escalasmusical.trabalho.pdf

Importante

A escala obtida por Pitágoras foi baseada em função **dos comprimentos** das cordas.

Porém, a **associação da frequência** a uma nota musical, a qual é utilizada nos dias de hoje para afinar um instrumento musical, foi introduzida por **Galileu Galilei** (1564-1642)

Após Pitágoras, houve muitas outras tentativas de construção de escalas musicais, as quais possuíam sonoridades agradáveis aos ouvidos.

- ✖ **Giuseffo Zarlino** (1517-1590), teórico musical italiano, sistematizou a escala de Pitágoras buscando os intervalos através da soma de médias harmônicas e aritméticas a partir de uma nota fundamental. Ou seja, Zarlino se utilizou de passos matemáticos para chegar à escala musical.

Ao pegar 2 números: X e Y

- ✖ Média aritmética:

$$M = \frac{x + y}{2}$$

- ✖ Média harmônica

$$M = \frac{n}{\frac{1}{x} + \frac{1}{y}}$$

Relação de Zarlino

Notas	Dó	Ré	Mi	Fá	Sol	Lá	Si	Dó
Comprimento da corda em relação à Dó	1	$\frac{8}{9}$	$\frac{4}{5}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{3}{5}$	$\frac{8}{15}$	$\frac{1}{2}$

Fonte: http://www.cienciamao.usp.br/dados/inef/_construcao_escalasmusical.trabalho.pdf

Relação entre as escalas:

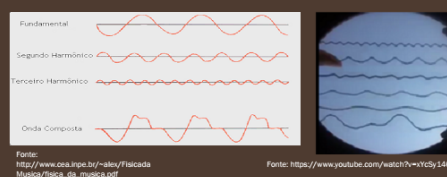
Considerando uma corda de comprimento $L = 1\text{m}$

Nota	Pitágoras		Zarlino	
	relação	comprimento (m)	relação	comprimento (m)
Dó	1	1,000	1	1,000
Ré	8/9	0,889	8/9	0,889
Mi	64/81	0,790	4/5	0,800
Fá	3/4	0,750	3/4	0,750
Sol	2/3	0,667	2/3	0,667
Lá	16/27	0,593	3/5	0,600
Si	128/243	0,527	8/15	0,533
Dó	1/2	0,500	1/2	0,500

Fonte: O autor.

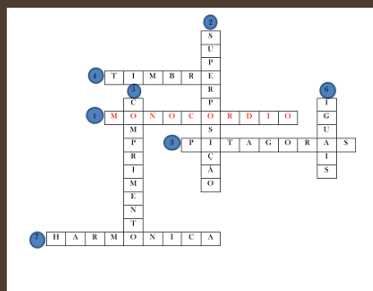
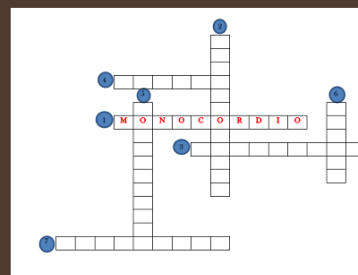
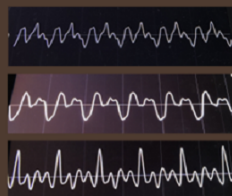
COMPOSIÇÃO HARMÔNICA

Quando a corda de um instrumento vibra, sua vibração resultante é a combinação do harmônico fundamental juntamente com vários sobretons; desta forma, o movimento da corda será a superposição de vários modos normais. A esta superposição denomina-se composição harmônica.



TIMBRE

A diferença do som produzido pelos instrumentos musicais ao tocarem uma nota musical cuja frequência é a mesma dá-se o nome de timbre do instrumento.



PLANO DE SEÇÃO 8: Um final para um novo começo!

IDENTIFICAÇÃO: Colégio _____

CURSO: Ensino Médio

DISCIPLINA: Física

PROFESSOR: Luís Alexandre Rauch

SÉRIE: 2º Ano

CARGA HORÁRIA: 50 minutos

UNIDADE DIDÁTICA: Nas cordas dos instrumentos musicais

TEMA: Ondas Mecânicas

ASSUNTO: Avaliação da aprendizagem.

COMPETÊNCIAS E HABILIDADES

- Ler e interpretar textos de interesse científico e tecnológico;
- Expressar-se oralmente com correção e clareza, usando a terminologia correta;
- Fazer uso dos conhecimentos da Física para explicar o mundo natural e planejar, executar e avaliar intervenções práticas;

OBJETIVOS

- Interpretar e retirar informações de textos científicos;
- Calcular a tensão aplicada em uma corda a partir dos dados de frequência, densidade linear e comprimento da corda;
- Saber calcular o comprimento que uma corda deve ter para determinada nota musical a partir da relação de Zarlino adaptada da escala de Pitágoras;
- Estabelecer relações entre conceitos abordados nas seções 1 a 7 com as notas musicais produzidas por um instrumento musical de cordas.

MOMENTOS DA AULA

1 – Introdução/Motivação: (5 minutos)

Caso a turma esteja organizada de forma diferente, o professor solicita então sua organização com as carteiras enfileiradas.

Em seguida é fornecida a avaliação aos educandos.

2 – Desenvolvimento: (40 minutos)

O professor realiza a leitura das questões da avaliação juntamente com os educandos, explicando os principais pontos que os mesmos deverão tomar a devida atenção para responder.

3 – Síntese Integradora (5 minutos)

O professor recolhe a avaliação, onde será realizada a correção e devolvida aos educandos na aula seguinte para arquivamento.

AVALIAÇÃO

Feita de uma forma qualitativa, a partir de observações no decorrer da aula com base no esforço do educando na resolução da avaliação. E de forma quantitativa, analisando a resolução das questões presentes na avaliação.

RECURSOS FÍSICOS:

- Quadro negro;
- Giz;
- Texto da avaliação – Seção 8.

REFERÊNCIAS:

YOUNG, D. H.. FREEDMAN R. A.. **Física II**. 10. ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2003.

OBSERVAÇÕES:

- Caso julgue necessário, o professor poderá permitir com que os educandos realizem a consulta dos Textos de Apoio e 1 a 7 para retirar possíveis dúvidas que surgirem durante a resolução;
- A partir da observação do desempenho da turma durante o processo de realização da avaliação o professor deverá passar dicas para a resolução de determinada questão que julgue necessário.

3 - ONDAS MECÂNICAS E INSTRUMENTOS MUSICAIS DE CORDAS

O presente capítulo tem por objetivo apresentar os conceitos físicos relacionados às ondas mecânicas e aos instrumentos musicais de cordas que foram abordados no decorrer do Produto, e dele foram elaborados os Textos de Apoio ao Educando e Textos de Apoio ao Professor.

Os conceitos de movimento periódico, movimento harmônico simples, ondas mecânicas, escala pitagórica, entre outros serão melhor aprofundados para subsidiar o professor durante aplicação em sala de aula.

3. ONDAS MECÂNICAS E INSTRUMENTOS MUSICAIS DE CORDAS

3.1 Instrumentos musicais de cordas

Ao manusear algum instrumento musical de corda tentando tocar algum som, é possível perceber que existe mais de uma maneira de se produzir som nele, ou seja, a produção do som pode ser feita puxando a corda para baixo e a soltando (dedilhando) como em um violão, ou atritar um arco às cordas de um violino e estas entrar em vibração, ou até mesmo percutindo a corda com um pedaço de madeira, por exemplo, como ocorre com o berimbau. Desta forma, os instrumentos de cordas são divididos em três categorias, de acordo com a forma com que o som é produzido, que podem ser: instrumentos de cordas friccionadas, instrumentos de cordas percutidas e instrumentos de cordas dedilhadas.

Os instrumentos de cordas friccionadas têm a produção do som realizada a partir do atrito entre a corda do instrumento e uma cerda, sendo esta, normalmente confeccionada com crina ou calda de cavalo. A família deste tipo de instrumento é constituída por quatro membros: violino, viola, violoncelo e contrabaixo, e a produção do som nestes instrumentos ocorre segundo um processo de “prende-desliza”. Ao passar o arco sobre a corda, ocorre o deslocamento da mesma por aproximadamente 1 mm onde a força restauradora aumenta até que a força de atrito é vencida e a corda liberada, em seguida, prende-se novamente em um ponto mais à frente, recomeçando o ciclo, o qual é repetido na frequência da nota tocada (DONOSO, et al. 2008).

De outra forma, os instrumentos de cordas percutidas se referem aos instrumentos cujo o som é produzido a partir da vibração das cordas após estas serem percutidas por baquetas ou martelos, onde o som se inicia bruscamente e, quando a corda não é abafada, tem longa duração. Geralmente, se utiliza o método da percussão em instrumentos que possuem uma corda para cada nota e não há a necessidade de se utilizar uma das mãos para controlar o comprimento da corda, tendo, desta forma, as duas mãos livres para se controlar as baquetas ou o teclado. Além disso, a intensidade

das notas é controlada pela força da batida (CAMPAGNOLI, 2014; GABRIEL, 2016).

O piano é o principal instrumento da categoria dos instrumentos de cordas percutidas, onde em sua forma moderna possui 88 teclas que controlam um sofisticado sistema de martelos para percutir as cordas de cada nota de maneira independente (GABRIEL, 2016).

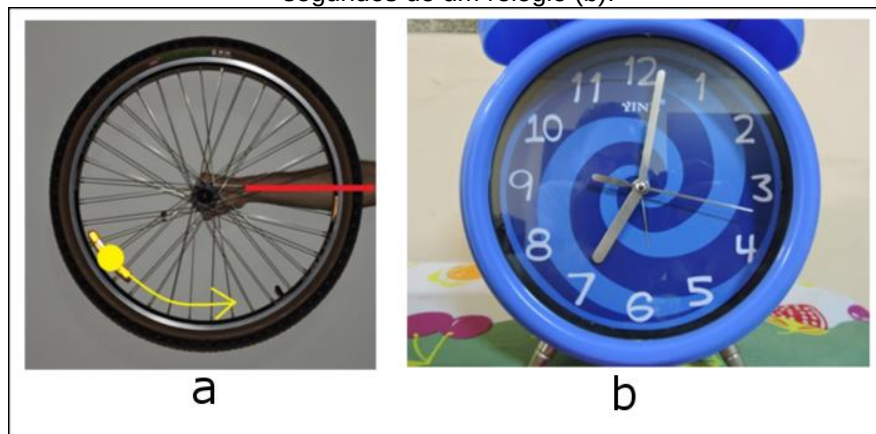
Por fim, os instrumentos de cordas dedilhadas produzem o som a partir da vibração das cordas após serem dedilhadas pelos dedos ou por palhetas. Para a produção do som nestes instrumentos, a corda é levemente deslocada de sua posição de repouso e depois solta, onde a mesma vibra livremente. Esta forma de execução faz com que o som se inicie bruscamente com um som forte, de curta duração, porém a corda mantém a vibração por um longo intervalo de tempo decaindo lentamente até o silêncio (CAMPAGNOLI, 2014; GABRIEL, 2016).

3.2 Movimento periódico

A produção do som nos instrumentos musicais, seja de corda, sopro ou percussão, geralmente é feita a partir de repetições regulares de batidas, por exemplo, nas cordas do instrumento. Na Física, a repetição regular de um movimento ou batida denomina-se de movimento periódico, onde o intervalo de tempo entre as batidas é sempre o mesmo.

Esta repetição de movimentos é observada em várias situações do cotidiano como as que são apresentadas na Figura 3.1, ou seja, como o rodar dos pneus de uma bicicleta (Figura 3.1a) ao observar o ponto demarcado na roda passar por uma linha de referência como o braço da pessoa, por exemplo, ou até mesmo como os ponteiros de um relógio (Figura 3.1b) ao se observar os ponteiros dos segundos realizar uma volta completa a partir do número 12, por exemplo.

Figura 3.1 – O movimento de uma roda de bicicleta (a) e o movimento do ponteiro dos segundos de um relógio (b).



Fonte: O autor.

Do conceito de movimento periódico, é possível analisar duas propriedades físicas importantes: o período (T), que é o intervalo de tempo entre duas repetições simultâneas, medida em segundos, por exemplo: o período do ponteiro dos segundos de um relógio é $T = 60\text{s}$. A frequência (f), que é o número de vezes que esta repetição ocorre em um determinado intervalo de tempo. Por exemplo, uma roda de bicicleta que realiza 30 revoluções em um tempo de 10 s, possui uma frequência $f = 3\text{ s}^{-1}$.

A unidade de medida de frequência s^{-1} por ser muito utilizada é denominado de hertz, cujo símbolo é Hz, e foi assim designada em homenagem ao físico alemão Heinrich Hertz (1857-1898), um pioneiro nas investigações das ondas eletromagnéticas (YOUNG; FREEDMAN, 2003).

3.3 Pêndulo simples

Galileu Galilei (1564 - 1642) físico, astrônomo, matemático e filósofo italiano sempre foi muito dedicado aos estudos sobre os movimentos dos corpos e segundo a história, em um desses estudos, estava observando as oscilações de um lustre da Catedral de Pisa quando teve a ideia de fazer medidas do tempo de oscilação. Porém, como ainda não existia o relógio, ele as fez comparando com os batimentos do seu pulso e verificou que mesmo quando as oscilações ficavam cada vez menores o tempo das oscilações permanecia sempre o mesmo. Ao repetir o experimento em sua casa, Galileu

verificou que o tempo das oscilações dependia apenas do comprimento do fio (CRUZ, et al., 2012).

Ao mecanismo onde se tem uma massa presa a um fio, como o lustre estudado por Galileu, ligeiramente deslocado de sua posição de equilíbrio e solto em seguida entrando em movimento oscilatório, denomina-se pêndulo. O modelo de pêndulo mais simples para efeitos de estudo é denominado pêndulo simples, composto por um sistema constituído de um corpo puntiforme com determinada massa e suspenso por um fio ideal, ou seja, inextensível e com massa desprezível, com determinado comprimento e que executa oscilações desenvolvendo pequenos deslocamentos, desprezando as possíveis resistências, como a do ar e atrito, e realiza um movimento periódico (ARNOLD, et al., 2011; TIPLER; MOSCA, 2009; HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

O aparato mostrado na Figura 3.2, utilizado no desenvolvimento desse trabalho, é a representação de um pêndulo. Ele é, constituído de um corpo de certa massa colocada para balançar na extremidade de um fio longo. A massa constitui-se de uma garrafa pet que possui um líquido colorido no seu interior e um pequeno orifício em sua tampa. O sistema apresentado pode ser considerado, de forma aproximada, como sendo a representação de um pêndulo simples, ou seja, um sistema constituído por um corpo puntiforme e suspenso por um fio inextensível e de massa desprezível (YOUNG; FREEDMAN, 2003).

Sabe-se que ao deslocar a massa do pêndulo em um pequeno ângulo θ a partir do ponto de equilíbrio, esta fica sujeita à força restauradora causada pela gravidade, que faz com que a massa quando solta, comece a balançar para lá e para cá, com um período T (TIPLER; MOSCA, 2009; YOUNG; FREEDMAN, 2003).

As forças que atuam sobre o pêndulo são o peso do corpo pendurado e a tensão sobre o fio. A Figura 3.3 representa diagrama do corpo livre, com sua respectiva decomposição. Vale ressaltar que o ângulo representado na Figura 3.3 foi ajustado de forma exagerada para melhor visualização das componentes das forças (TIPLER; MOSCA, 2009).

Figura 3.2 – A representação, de forma aproximada, de um pêndulo simples.



Fonte: O autor.

Figura 3.3 – Diagrama do corpo livre.



Fonte: O autor.

Como é possível observar na Figura 3.3, a componente da força peso dada por $(P \cdot \cos\theta)$ se anula com a força de tração do fio (T) ambas na mesma direção e sentidos opostos e tomadas em módulo, de forma que única componente que pode causar o movimento oscilatório é a força restauradora $(P \cdot \sin\theta)$ também tomada em módulo. Assim,

$$F = -P \cdot \sin\theta, \quad (3.1)$$

onde o sinal negativo da equação é relativo à ação de tentar manter o corpo em seu estado inicial de repouso, no centro da trajetória descrita pelo movimento, ou seja, devido a força restauradora, que não é proporcional ao ângulo θ , mas sim ao seno deste ângulo. Desta forma, o movimento do pêndulo não é um movimento harmônico simples. Porém, quando o ângulo θ é pequeno, o seno deste ângulo é aproximadamente igual ao ângulo, medidos em radianos (TIPLER; MOSCA, 2009; YOUNG; FREEDMAN, 2003).

A Figura 3.4 mostra duas imagens superpostas do aparato experimental utilizado em sala de aula, onde é possível observar o fio estendido em seu ponto de equilíbrio por meio da linha pontilhada e o mesmo fio fazendo um pequeno ângulo θ em relação ao ponto de equilíbrio. Ressaltando que o deslocamento y apresentado é justificado pelo fato do pêndulo estar oscilando sobre o eixo y e demarcado no papel logo abaixo do mesmo. O deslocamento y é a projeção do arco produzido pela oscilação do pêndulo, porém, como esta oscilação é pequena, pode-se dizer que o tamanho do arco é aproximadamente igual ao deslocamento y marcado no papel.

Figura 3.4 – Superposição de duas imagens para observar o ângulo formado entre o ponto de equilíbrio e o seu deslocamento.



Fonte: O autor.

Considerando a aproximação descrita anteriormente para o ângulo, ou seja ($\sin\theta \approx \theta$), a equação 3.1 pode ser reescrita como

$$F = -P \cdot \frac{y}{L},$$

e sabendo que $P = mg$, tem-se

$$F = -mg \cdot \frac{y}{L},$$

onde é possível observar que a força restauradora é proporcional à coordenada y , para pequenos deslocamentos e a constante da força é dada por $k = \frac{mg}{L}$.

A partir das equações da frequência angular ($\omega = \sqrt{k/m}$), frequência ($f = \omega/2\pi$) e período ($T = 2\pi/\omega$), é possível expressar o período de um pêndulo simples, válido para pequenos deslocamentos angulares, de acordo com a equação (3.2) (TIPLER; MOSCA, 2009; YOUNG; FREEDMAN, 2003), dada a seguir,

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}, \quad (3.2)$$

onde T é o período do movimento, L é o comprimento do pêndulo e g é a aceleração da gravidade.

3.4 Movimento harmônico simples

Movimento periódico, ou movimento harmônico é todo o movimento que se repete em intervalos iguais de tempo e, quando o deslocamento y de uma partícula em relação ao ponto de equilíbrio em função do tempo obedece à equação 3.3,

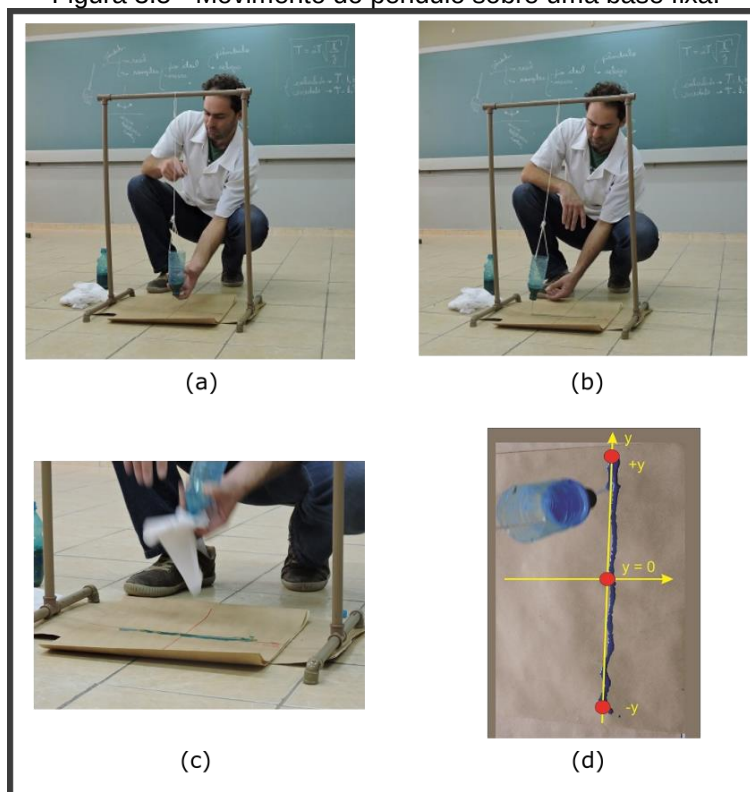
$$y(t) = y_m \cos(\omega t + \phi) \text{ (deslocamento)}, \quad (3.3)$$

este é denominado movimento harmônico simples (MHS), onde y_m , ω e ϕ são constantes (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

Pode-se considerar, por exemplo, o pêndulo apresentado na Figura 3.2, considerando as devidas aproximações, quando em movimento, representa MHS. Ao colocar o líquido colorido no interior da garrafa e fazer o pêndulo oscilar com um pequeno ângulo, abrindo o orifício da tampa da garrafa, o líquido irá marcar o papel sob o pêndulo com o líquido, produzindo um

segmento de linha reta, como mostrado no procedimento realizado na Figura 3.5, onde é possível observar em: (a) a colocação do líquido na garrafa pet; em (b), deslocamento da garrafa pet de um pequeno ângulo em relação ao ponto de equilíbrio e depois solta, ou seja, produção da oscilação, deixando o líquido demarcar o papel; em (c) apresenta o desenho demarcado pelo líquido após algumas oscilações; e em (d) é apresentado a demarcação no papel olhando de cima sob um sistema de eixos (xy).

Figura 3.5 - Movimento do pêndulo sobre uma base fixa.



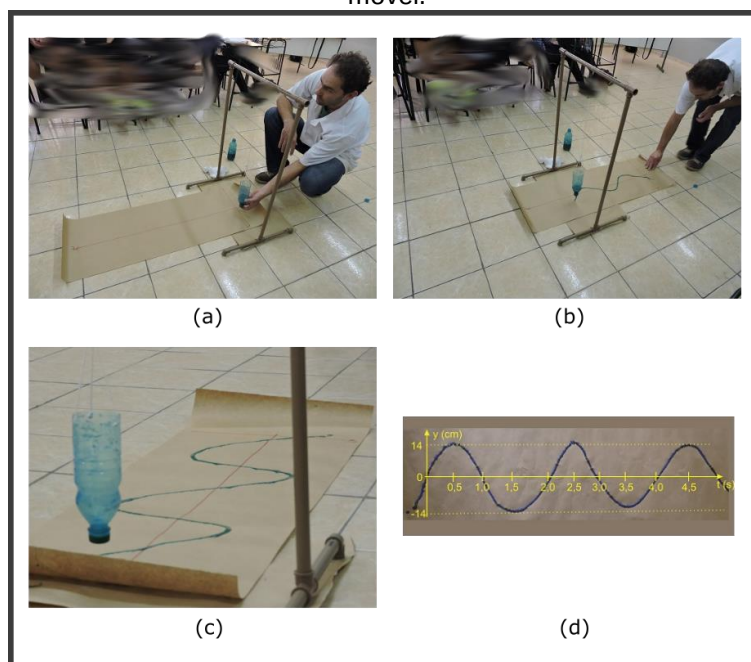
Fonte: O autor.

Observando a projeção do movimento do pêndulo sobre o papel produzida pelo líquido colorido, representado na Figura 3.5(d), é possível analisar a posição do pêndulo enquanto oscila em torno da origem do eixo y. Neste caso, têm-se três momentos distintos: o ponto ($y = 0$) refere-se ao instante em que o pêndulo está sobre o ponto de equilíbrio; o ponto ($+y$) representa o instante em que o pêndulo está com o seu deslocamento máximo para cima, a partir do seu ponto de equilíbrio, e o ponto ($-y$) representa o instante em que o pêndulo está com seu deslocamento máximo para baixo a partir do seu ponto de equilíbrio (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

Ao deslocamento máximo do pêndulo para qualquer um dos sentidos de oscilação dá-se o nome de amplitude (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

Quando o papel sob o pêndulo é puxado com velocidade aproximadamente constante, como representado na Figura 3.6, é obtido um padrão ondulatório de forma senoidal, onde se tem: em (a) o preparo do experimento; em (b) produção da oscilação do pêndulo ao mesmo tempo em que o papel sob o pêndulo é deslocado com velocidade aproximadamente constante, deixando cair líquido colorido no mesmo; em (c) o resultado final do movimento do pêndulo, onde pode ser verificada a marcação no papel cujo formato é senoidal e em (d) é apresentado a demarcação no papel olhando de cima sob um sistema de eixos da posição em y em função do tempo.

Figura 3.6 - A representação do movimento do pêndulo oscilando sobre uma base móvel.



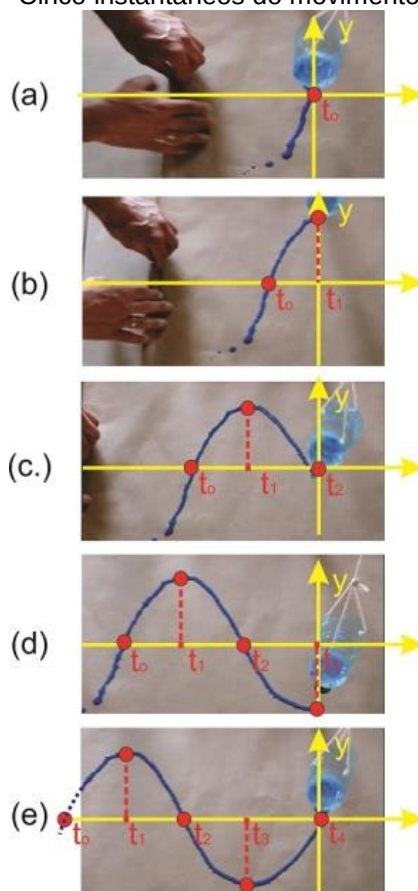
Fonte: O autor.

A Figura 3.7 representa o movimento do pêndulo em relação ao tempo, mantendo o referencial no ponto fixo na posição de equilíbrio do pêndulo, onde este fica parado e são tirados cinco instantâneos do movimento do mesmo. É possível observar que em 3.7(a) tem-se a representação do tempo inicial da observação (t_0), onde o elemento do pêndulo está com um deslocamento $y=0$.

No instantâneo 3.7(b), momento t_1 , o pêndulo se encontra em seu deslocamento extremo para cima (denominado pico). Em 3.7(c), momento t_2 , o

pêndulo desce novamente para $y=0$. No quarto instantâneo 3.7(d), momento t_3 , o pêndulo está com seu deslocamento extremo para baixo (denominado vale) e no quinto instantâneo 3.7(e), momento t_4 , o pêndulo está novamente em $y=0$, completando o ciclo de oscilação e recomeçando o movimento (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

Figura 3.7 – Cinco instantâneos do movimento do pêndulo.



Fonte: O autor.

Ao analisar a Figura 3.6(d), da posição do pêndulo em y em função do tempo, é possível observar que a posição em y fornece a oscilação do pêndulo entre um valor máximo e um mínimo, o que pode facilmente ser observado comparando-se com as Figuras 3.5(d) e 3.7.

Buscando uma comparação da Figura 3.6(d) com a análise feita anteriormente referente à Figura 3.5(d), é possível analisar a partir do Quadro 3.1 a posição do pêndulo em função do tempo.

Quadro 3.1 – Posição do pêndulo em função do tempo.

instante	tempo (s)	deslocamento máximo em y (cm)
t_0	0	0
t_1	0,5	14
t_2	1,0	0
t_3	1,5	-14
t_4	2,0	0

Fonte: O autor.

Como o MHS é um movimento periódico, é possível atribuir a este tipo de movimento um período (T), o qual é definido como sendo o intervalo de tempo necessário para o pêndulo realizar uma oscilação completa (ou um ciclo). Desta forma, é possível perceber que o período do movimento na Figura 3.6(d) é de 2,0 s (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

Outro elemento importante que caracteriza o MHS é a sua frequência (f), onde indica o número de oscilações completas que o pêndulo realiza por segundo (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

Desta forma, ao escolher o número de oscilações completas e dividir pelo tempo que o pêndulo levou para realizá-las, é possível estimar a frequência descrita pelo seu movimento a partir da Figura 3.6(d), o qual é de:

$$f = \frac{2}{4} = \frac{1}{2}$$

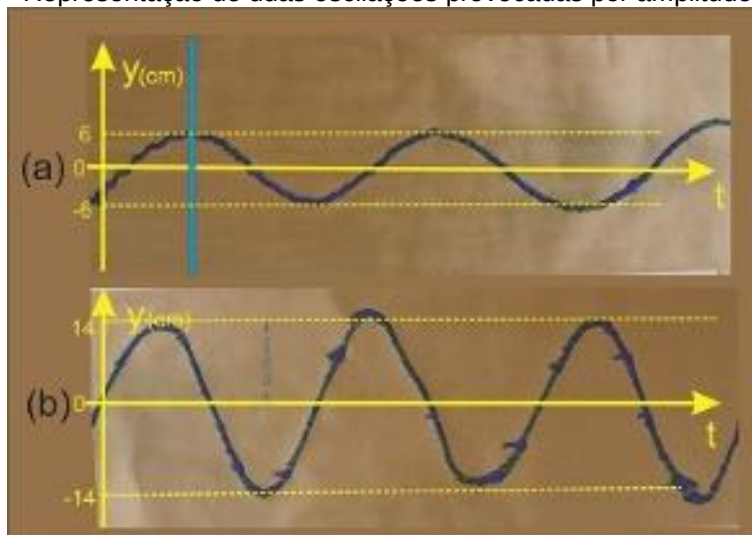
$$f = 0,5 \text{ Hz}$$

Como mencionado anteriormente, ao deslocamento máximo de oscilação do pêndulo em relação ao ponto de equilíbrio tem-se a amplitude do movimento e, ao analisar a Figura 3.6(d), tem-se que a amplitude de oscilação do pêndulo naquele movimento é de $A = 14 \text{ cm}$.

Quando o pêndulo é deslocado em ângulos diferentes a partir do seu eixo de equilíbrio, este possuirá amplitudes diferentes. A Figura 3.8 representa

a realização do procedimento feito na Figura 3.6, mostrando a marcação feita pelo líquido colorido no papel sob o pêndulo a partir de: em (a) um ângulo de deslocamento menor a partir do ponto de equilíbrio e em (b), um ângulo de deslocamento maior a partir do ponto de equilíbrio, portando com um MHS de amplitudes diferentes.

Figura 3.8 – Representação de duas oscilações provocadas por amplitudes diferentes.



Fonte: O autor.

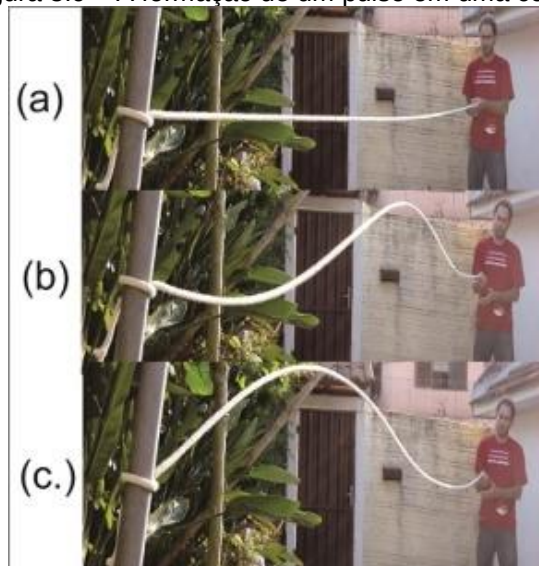
3.5 Pulso

Um pulso é uma distorção da forma de uma corda, por exemplo, o qual se propaga ao longo da corda com velocidade v (em módulo). O pulso realizado em uma corda esticada é a forma mais simples de ondas mecânicas, onde ao dar uma sacudida na extremidade da corda, um pulso se propaga através da sua extensão (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

A formação e propagação de um pulso se dá porque a corda está sob tensão, e ao puxar a extremidade da corda, esta transfere energia para sua parte vizinha. A parte vizinha, por sua vez, transfere energia para a próxima, e assim por diante. Enquanto isto ocorre, ao puxar a extremidade para baixo, as partes da corda que estão se deslocando para cima começam a ser forçadas a se mover para baixo. A Figura 3.9 apresenta a formação e transmissão de um pulso em uma corda tensionada, onde em 3.9(a) é mostrada a corda presa em uma das extremidades e tensionada em outra extremidade com determinada

força F (em módulo); em 3.9(b), é dada uma sacudida na corda, tendo a formação de um pulso e em 3.9(c), é mostrado o pulso se propagando pela extensão da corda (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

Figura 3.9 – A formação de um pulso em uma corda.



Fonte: O autor.

3.5.1 Velocidade de um pulso

A velocidade com a qual um pulso se propaga depende da força com a qual é puxada a corda (força de tração) e da densidade linear da corda. É possível calcular a velocidade da corda por meio da equação 3.4 (TIPLER; MOSCA, 2009).

$$v = \sqrt{\frac{\tau}{\mu}} \quad (3.4)$$

A tração da corda pode ser aferida a partir de um dinamômetro e a densidade linear da corda pode ser calculada por meio da equação 3.5,

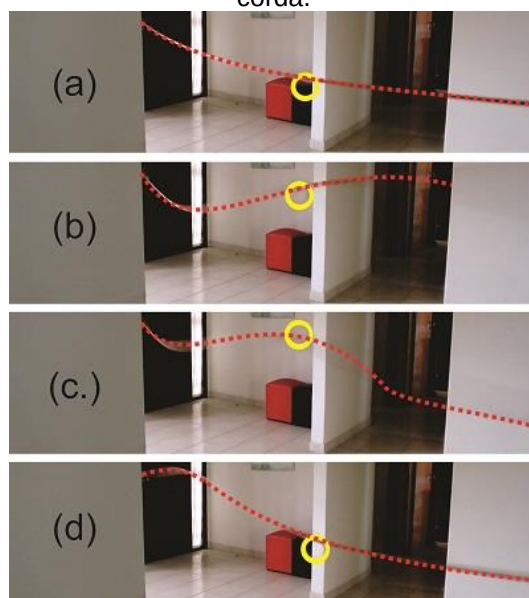
$$\mu = \frac{m}{l} \quad , \quad (3.5)$$

onde m é a massa da corda e l é o comprimento da corda.

3.5.2 Transporte de energia sem transporte de matéria

Ao aplicar um pulso em uma corda, este irá se propagar através dos pontos da mesma. Porém, se existir algo sobre a corda, ao passar o pulso, este não acompanhará o seu movimento. Isto é, ao pulso passar pelo objeto, este subirá e descenderá, acompanhando o ponto da corda logo abaixo dele, porém, após a passagem do pulso, o objeto permanecerá na mesma posição em que se encontrava antes da passagem do pulso. Ou seja, um pulso irá transportar energia através da corda, porém não irá transportar matéria. A Figura 3.10 representa uma situação onde uma argola está: em (a) em repouso sobre a corda, em (b) o pulso encontrando com a argola e esta iniciando a subida, em (c) a argola no ponto mais alto (pico) do pulso e em (d), logo após a passagem do pulso, a argola na posição igual à que se encontrava antes da passagem do pulso (YOUNG; FREEDMAN, 2003).

Figura 3.10 – Demonstração do transporte de energia sem o transporte e matéria em uma corda.



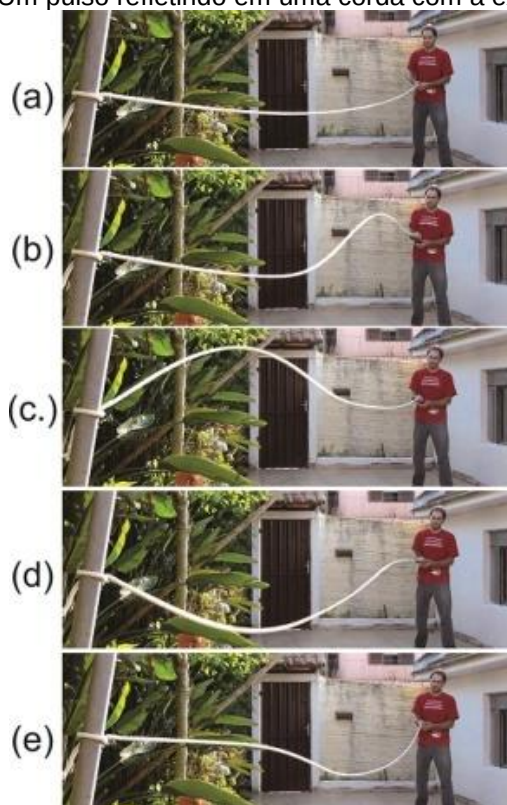
Fonte: O autor.

3.5.3 Reflexão de um pulso

Ao ser produzido um pulso em uma corda, este irá viajar pela corda até chegar à outra extremidade. Neste momento, ele irá sofrer reflexão e retornar no sentido contrário. A extremidade oposta da corda pode estar em duas condições: fixa e imóvel em um anteparo, ou fixa em uma argola, e esta pode se mover livremente para cima ou para baixo.

Quando a extremidade é fixa no anteparo, ao pulso chegar na extremidade da corda, este irá exercer uma força para cima sobre o anteparo e, de acordo com a Terceira Lei de Newton, o anteparo irá exercer uma força oposta, de mesmo módulo sobre a corda. Esta força irá produzir um pulso que se propaga no sentido oposto ao pulso incidente. A Figura 3.11 apresenta em (a) uma corda esticada, fixa em sua extremidade, em (b) um pulso sendo produzido, em (c) o pulso chegando à extremidade da corda, em (d) o pulso sendo refletido e em (e) o pulso viajando pela corda na direção oposta à inicial e sentido contrário ao pulso incidente (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

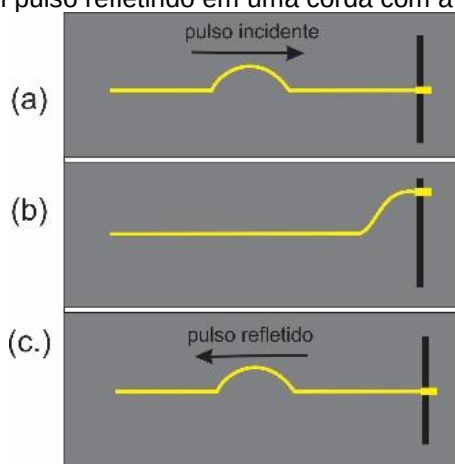
Figura 3.11 – Um pulso refletindo em uma corda com a extremidade fixa.



Fonte: O autor.

Quando a extremidade da corda está fixa em uma argola que possa deslizar livremente sobre uma barra, ao pulso chegar à extremidade da corda, a argola irá se deslocar para cima ao longo da barra, puxando e esticando a corda, produzindo um pulso refletido com mesmo sentido do pulso incidente. A Figura 3.12 representa um pulso em (a) incidindo em direção à extremidade de uma corda presa a uma argola, em (b) a argola deslizando para cima na barra e em (c) o pulso refletido, viajando com mesmo sentido do pulso incidente.

Figura 3.12 – Um pulso refletindo em uma corda com a extremidade livre.



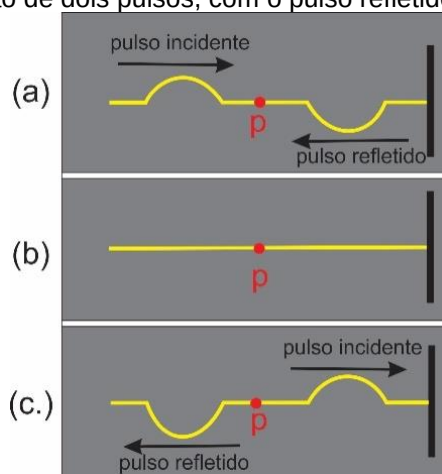
Fonte: O autor.

3.5.4 Superposição entre dois pulsos

Quando dois pulsos viajam em uma corda e em sentidos opostos, ao se encontrarem em um determinado ponto, de forma que ocupem a mesma região da corda, ocorre a superposição deles.

No caso de uma corda em que se tem a extremidade fixa, onde o pulso refletido retorna em direção oposta ao pulso incidente, ao se encontrarem em determinada região da corda, os pulsos se cancelam, ou seja, o deslocamento do ponto da corda em relação à posição de equilíbrio é zero. A Figura 3.13 apresenta em (a) dois pulsos, um incidente e outro refletido, em uma corda com a extremidade fixa, em (b) ocorre a superposição dos dois pulsos, resultando em deslocamento nulo do ponto P na corda e em (c), após a passagem do pulso por aquele ponto, os pulsos continuam a se deslocar pela corda normalmente (KELLER; GETTIS; SKOVE, 1999).

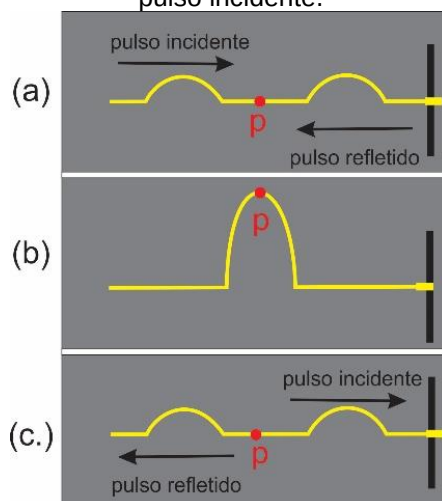
Figura 3.13 – A superposição de dois pulsos, com o pulso refletido invertido ao pulso incidente.



Fonte: O autor.

Quando os pulsos viajam em uma corda com a extremidade livre, o pulso refletido terá a mesma direção que o pulso incidente. Neste caso, os pulsos ao se encontrarem em determinada região da corda, o deslocamento máximo relativo à superposição dos pulsos é referente à soma dos deslocamentos máximos que cada pulso possui isoladamente. A Figura 3.14 apresenta em (a) dois pulsos, um incidente e outro refletido, em uma corda com a extremidade livre, (b) ocorre a superposição dos dois pulsos, resultando em deslocamento máximo no ponto P, relativo à soma dos deslocamentos de cada pulso e em (c), após a passagem do pulso por aquele ponto, os pulsos continuam a se deslocar pela corda normalmente (KELLER; GETTIS; SKOVE, 1999).

Figura 3.14 – A superposição de dois pulsos, com o pulso refletido com a mesma direção ao pulso incidente.



Fonte: O autor.

3.6 Ondas

O estudo das ondas constitui um dos principais assuntos da Física. Sua compreensão se faz necessária para o entendimento de ondulatória, óptica física e eletromagnetismo. Uma onda é definida como sendo uma perturbação que se propaga no vácuo e em meios materiais, a qual pode ser classificada em ondas mecânicas, que são ondas que necessitam de um meio material para se locomover ou ondas eletromagnéticas, as quais não necessitam de um meio material para se locomover. Além disso, as ondas também são classificadas de acordo com a sua direção de propagação em relação à perturbação, as quais podem ser longitudinal, quando a direção de vibração é paralelo à direção de propagação da onda ou transversal, quando a direção de vibração é perpendicular à direção de propagação da onda (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

No presente trabalho será dado ênfase às ondas transversais, como a onda produzida na corda mostrada da Figura 3.15, que ao ser agitada para cima e para baixo, repetidas vezes, produz uma onda transversal.

Figura 3.15 – Uma corda sendo agitada repetidas vezes, produzindo um padrão ondulatório.

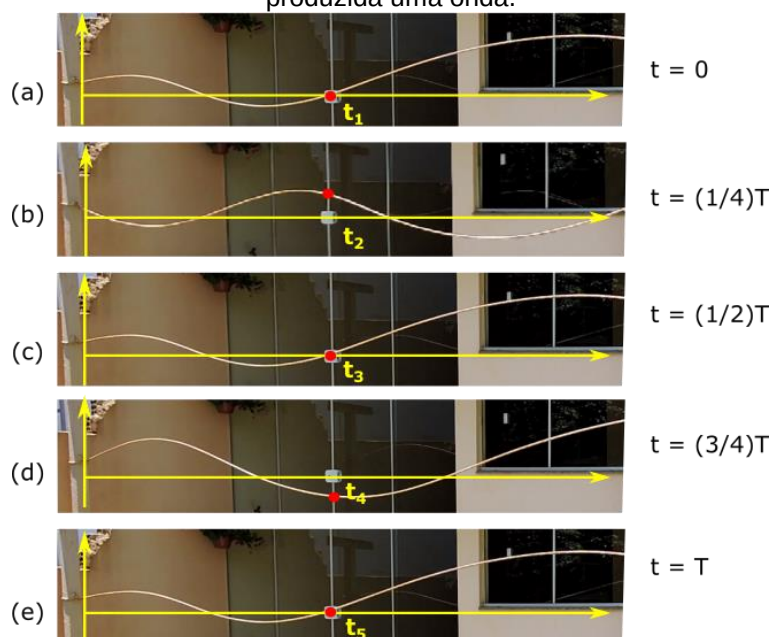


Fonte: O autor.

Ao se observar um ponto específico de uma corda que realiza um movimento oscilatório para cima e para baixo, é possível observar que este ponto realiza um Movimento Harmônico Simples, transversal à direção de propagação da onda, o que é possível ser observado na Figura 3.16, em que se tem uma onda transversal sendo formada em uma corda.

Ainda na Figura 3.16, foi colocado um sistema de coordenadas xy em que é possível observar um ponto demarcado na corda, em vermelho, realizando um movimento completo referente a uma oscilação (YOUNG; FREEDMAN, 2003).

Figura 3.16 – Os instantâneos do movimento de um ponto específico de uma onda onde é produzida uma onda.



Fonte: O autor.

A partir dos cinco instantâneos apresentados na Figura 3.16, observa-se que o ponto da corda demarcado com um círculo vermelho não se desloca no eixo x , mas sim na vertical, ou seja, somente apresenta mudança de posição em relação ao eixo y . Neste caso, é possível observar que: em (a) o ponto se encontra em $y = 0$, ou seja, neste instantâneo ele tem deslocamento zero em relação ao eixo y ; em (b) o ponto está na posição $y = +y_{\max}$ para cima, ou seja, neste instantâneo ele tem deslocamento máximo para cima; em (c) o ponto se encontra em $y = 0$ novamente, ou seja, neste instantâneo ele tem deslocamento zero; em (d) o ponto está na posição $y = -y_{\max}$ para baixo, ou seja, neste instantâneo ele tem deslocamento máximo para baixo; em (e) o ponto se encontra em $y = 0$ mais uma vez, ou seja, neste instantâneo ele tem deslocamento zero (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

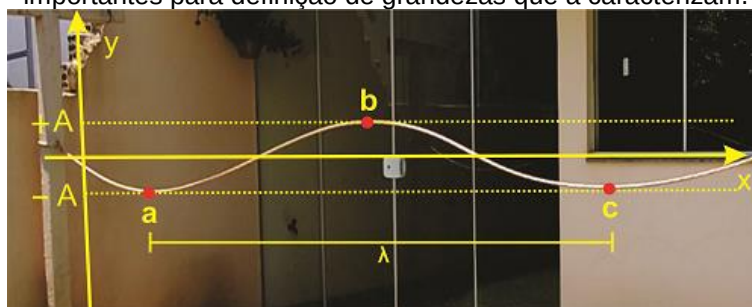
Assim, depois de completar uma subida e uma descida, o ponto volta à posição inicial, isto é, ele oscila periodicamente em uma linha reta na direção vertical, paralela ao eixo y e em torno do ponto de equilíbrio. Caso semelhante ao observado em relação ao ponto vermelho na corda foi apresentado na Figura 3.5 (d), relativo ao movimento do pêndulo imprimindo uma linha reta sobre um papel parado.

Ainda em relação aos instantâneos do ponto em vermelho da corda, apresentados na Figura 3.16, ao se fazer uma comparação com a Figura 3.7, supondo possível registrar o movimento do ponto da corda marcado em vermelho em função do tempo, esse registro seria uma curva de mesmo formato, ou seja, em ambos os casos tem-se curvas senoidais.

A Figura 3.17 apresenta o instantâneo de uma onda sendo produzida em uma corda, de modo que é possível definir algumas grandezas que caracterizam a onda através da corda.

Ao observar a Figura 3.17, têm-se três pontos demarcados: a , b e c . O ponto b , o qual tem o seu deslocamento máximo para cima a partir da sua posição de equilíbrio, é um ponto de máximo positivo, o qual é denominado de crista da onda. Por outro lado, os pontos a e c , que têm o seu deslocamento máximo para baixo a partir de sua posição de equilíbrio, são pontos de máximo negativo e são denominados de vales da onda.

Figura 3.17 – A representação de um instantâneo de uma onda em uma corda e pontos importantes para definição de grandezas que a caracterizam.



Fonte: O autor.

Ainda no que se refere à Figura 3.17, a distância entre o ponto de referência e uma crista de uma onda (ponto a), ou entre o ponto de referência e um vale (ponto b e c), é definida como amplitude da onda, representado pela letra A . (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

Por fim, a Figura 3.17 permite definir outra grandeza física: comprimento de onda, representado pela letra grega λ , que consiste na distância entre duas repetições (KELLER; GETTIS; SKOVE, 1999), por exemplo, dois vales, como representados pelos pontos a e c .

Ao se generalizar o movimento apresentado para o ponto em vermelho abordado para a Figura 3.16 para todos os pontos da corda a qualquer tempo é

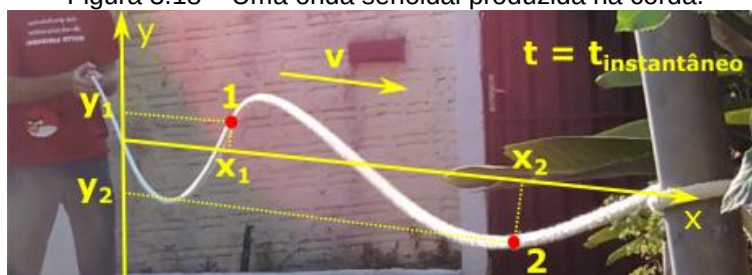
possível descrever a forma da onda se propagando em uma corda, a qual é dada pela função senoidal que está indicada na equação 3.6,

$$y(x, t) = y_m \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - ft \right), \quad (3.6)$$

em que $y(x, t)$ representa o deslocamento transversal de qualquer ponto da corda, em qualquer tempo; λ é o comprimento de onda; f é a frequência linear do movimento ondulatório, o qual é um MHS.

Ao imaginar uma onda senoidal percorrendo uma corda como a apresentada na Figura 3.18, a qual consiste em um instantâneo de uma onda produzida nesta corda, esta onda se propaga no sentido positivo do eixo x com velocidade v , assumindo em cada instante a forma semelhante como mostrada na referida figura.

Figura 3.18 – Uma onda senoidal produzida na corda.



Fonte: O autor.

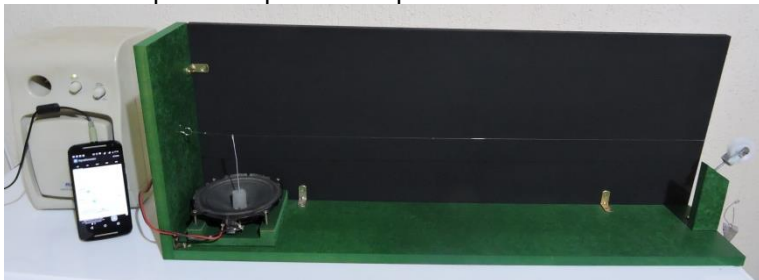
Se for escolhido um ponto da corda representado na Figura 3.18 e marcá-lo com um círculo em vermelho, em um determinado instante t , que no caso é o tempo em que foi tirada a foto (instantâneo), o deslocamento y do ponto marcado da corda situado na posição x é dado pela equação 3.6.

Assim, como a equação 3.6 está escrita em termos da posição x , ela pode ser usada para calcular os deslocamentos de todos os elementos da corda para qualquer tempo. Pode-se observar que o ponto da corda demarcado como x_2 , para o mesmo instantâneo, tem um $y = y_2$. Portanto, é possível dizer qual é a posição da onda em qualquer instante de tempo e como esta forma varia quando a onda se move ao longo da corda (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

3.7 Ondas estacionárias

Ao usar um aparato, como o mostrado na Figura 3.19, o qual é constituído por um gerador de frequência, acoplado a um alto falante que está preso por um arame até uma corda tensionada, e atribuir uma determinada frequência, a corda irá vibrar.

Figura 3.19 – Um aparato experimental para o estudo de ondas estacionárias.



Fonte: O autor.

A corda do aparato é presa em uma extremidade e tensionada por uma massa presa à outra extremidade. Como a corda está tocando uma roldana próximo à extremidade em que está posta a massa, esta se comporta como uma corda com as extremidades fixas, como visto na seção 3.5.

A vibração proporciona pulsos na corda com uma velocidade dada por

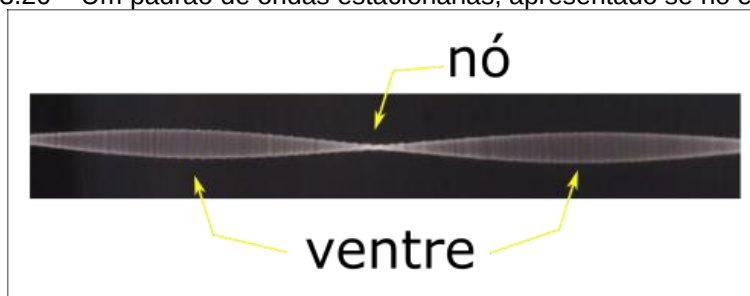
$$v = \sqrt{\frac{\tau}{\mu}} , \quad (3.7)$$

e ao chegar à outra extremidade, sofrem reflexão, retornando em direção à fonte de oscilação, refletindo novamente. Ou seja, o pulso que está confinado em duas extremidades fixas irá sofrer múltiplas reflexões nestas extremidades. Porém, quando o pulso que está retornando (pulso refletido), encontra outro pulso gerado pela fonte de oscilação (pulso incidente), eles irão sofrer interferência, de acordo com o princípio da superposição, visto na Seção 3.5 (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

Existem frequências específicas onde estas interferências geram um padrão de ondas, denominadas ondas estacionárias, também chamadas de

modos de oscilação, onde os deslocamentos máximos sofridos pela corda são denominados antinós ou ventres, em que se tem interferência construtiva entre os pulsos incidente e refletido, e nós, onde existe interferência destrutiva. A Figura 3.20 apresenta um padrão de ondas estacionárias, onde são apresentados os nós e ventres para aquela frequência específica gerada (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

Figura 3.20 – Um padrão de ondas estacionárias, apresentado se nó e ventres.

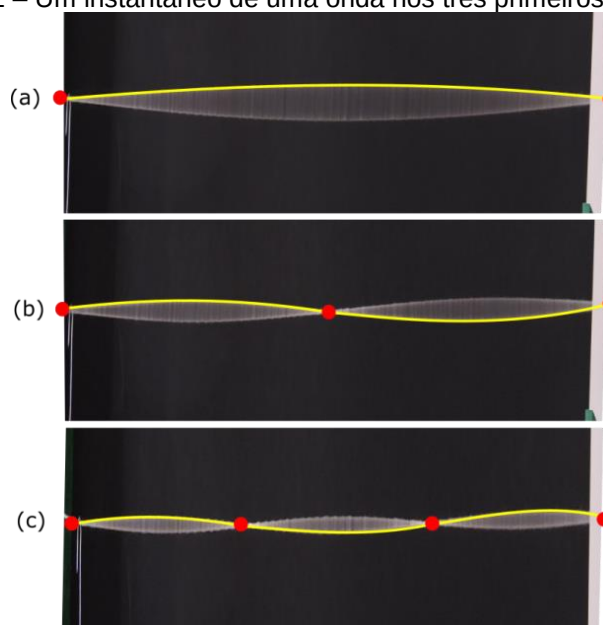


Fonte: O autor.

À frequência responsável por um padrão de ondas estacionárias, como o apresentado na Figura 3.20 é denominada frequência de ressonância, e esta depende da densidade linear da corda, do seu comprimento e da tensão aplicada. A cada frequência de ressonância que produz ondas estacionárias dá-se o nome de modo de oscilação e à menor frequência de ressonância denomina-se frequência fundamental, representado por f_1 . A frequência fundamental produz o padrão mostrado na Figura 3.21(a), que é chamado de modo fundamental de vibração ou de primeiro harmônico. A Figura 3.21(b) representa a segunda menor frequência de ressonância. Este modo de oscilação tem o dobro da frequência fundamental, o qual é representado por f_2 , e também chamado de segundo harmônico. Em 3.21(c) tem-se a terceira menor frequência, a qual é três vezes maior que a frequência fundamental, representada por f_3 , e também chamado de terceiro harmônico. A mesma ideia pode ser estendida para o quarto, quinto harmônico, etc.. (YOUNG; FREEDMAN, 2003; HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

A todo o conjunto de frequências de ressonância de uma determinada corda, que produzem seus respectivos modos de oscilação, é denominado espectro de ressonância da corda (YOUNG; FREEDMAN, 2003).

Figura 3.21 – Um instantâneo de uma onda nos três primeiros harmônicos.



Fonte: O autor.

Ao analisar o segundo harmônico de uma onda estacionária, representada pela Figura 3.21 (b) é possível observar que este harmônico corresponde a um comprimento de onda inteiro específico.

Desta forma, lembrando que a corda do experimento tem comprimento fixo de valor L , o primeiro harmônico a corda de comprimento L contém apenas metade de um certo comprimento de onda específico, o que pode ser expresso como $(\lambda_1/2)$, representado pela linha em amarelo da Figura 3.21 (a).

Seguindo esta ideia, fazendo-se a mesma observação para os outros dois harmônicos representados na Figura 3.21, percebe-se que no segundo harmônico a corda de comprimento L contém duas metades de um certo comprimento de onda, o que pode ser expresso como $(2\lambda_2/2)$ e no terceiro harmônico a corda de comprimento L contém três metades de um certo comprimento de onda específico $(3\lambda_3/2)$.

Desta forma, para uma corda com comprimento L qualquer, uma onda estacionária somente poderá existir se satisfazer à equação 3.8 (YOUNG; FREEDMAN, 2003),

$$L = n \frac{\lambda_n}{2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) . \quad (3.8)$$

Para o experimento apresentado na Figura 3.19, existem ondas na corda que não possuem os comprimentos de ondas representados pela equação 3.8, portanto, tais ondas não podem formar ondas estacionárias com nós e ventres.

A equação 3.8 ilustra as ondas estacionárias formadas pelo experimento da Figura 3.19, onde a corda tem um comprimento L fixo e há a formação de ondas com certos comprimentos de onda específicos correspondentes aos $n = 1, 2$ e 3 , respectivamente, observadas na Figura 3.21 (YOUNG; FREEDMAN, 2003).

A velocidade de propagação da onda na corda, além da forma vista na equação 3.7, pode ser expressa em termos do comprimento de onda e respectiva frequência ($v = \lambda f$), onde o módulo da velocidade de propagação da onda na corda é fixa e constante. Isso pode ser admitido porque a densidade linear da corda não se modifica, ou seja, é a mesma corda, e também porque se escolhe uma tração fixa. Assim, pode-se reescrever a equação expressa como

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

Para uma série harmônica produzida em uma corda com uma velocidade de propagação fixa, como na Figura 3.21, em que se usou uma corda de densidade linear específica e uma tração devido à força peso foi possível observar vários modos de oscilação, estes correspondendo a uma série de valores possíveis de λ_n e uma série de respectivas frequências f_n , e que pode ser generalizado por

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (3.9)$$

O comprimento de onda, λ_n , da equação 3.9 pode ser escrito a partir da equação 3.8 e, portanto, dado por

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (3.10)$$

Considerando a equação 3.9, pode-se determinar a menor frequência, f_1 , $n = 1$ dada pela equação 3.11,

$$f_1 = \frac{v}{2L}, \quad (3.11)$$

e que corresponde ao maior comprimento de onda, $\lambda_1 = 2L$, este determinado pela equação 3.10.

O valor obtido a partir da equação 3.11 é denominado frequência fundamental, porque corresponde ao menor n admitido na equação 3.8, ou seja, L igual à metade do respectivo comprimento de onda, ou seja, λ_1 . As demais frequências das ondas estacionárias, então, podem ser expressas da forma mostrada nas equações 3.12 e 3.13:

$$f_2 = \frac{2v}{2L} = 2\left(\frac{v}{2L}\right); \quad n = 2 \quad (3.12)$$

$$f_3 = \frac{3v}{2L} = 3\left(\frac{v}{2L}\right); \quad n = 3. \quad (3.13)$$

Assim, é possível verificar que os valores apresentados são múltiplos inteiros da frequência fundamental f_1 , tais como $2f_1$, $3f_1$, $4f_1$, ...

Generalizando as observações feitas anteriormente, chega-se à equação demonstrada em 3.14,

$$f_n = n \frac{v}{2L} \quad (n=1, 2, 3, \dots), \quad (3.14)$$

ou simplesmente, à expressão da equação 3.15,

$$f_n = nf_1 \quad (n=1,2,3). \quad (3.15)$$

As frequências obtidas a partir das equações 3.14 e 3.15 são denominadas harmônicos, e a série que contém todos os valores de frequências para uma corda é chamada série harmônica (YOUNG; FREEDMAN, 2003; HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

3.8 Pitágoras na formação da escala musical ocidental

Segundo conta a lenda, ao passar em frente a uma oficina de um ferreiro, Pitágoras (580-497 a.C.) percebeu que as batidas de martelos de diferentes pesos produziam sons que eram agradáveis ao ouvido e se combinavam muito bem. Perante esta observação, o mesmo desenvolveu um aparelho denominado monocórdio, o qual consistia em uma corda musical esticada que produzia um determinado som. A Figura 3.22 mostra um momento de Pitágoras realizando seus estudos no monocórdio (SOARES, 2016)

Figura 3.22 – Pitágoras realizando seus estudos no monocórdio.



Fonte: HERRERO (2016).

Foi a partir dos seus estudos, com o uso do monocórdio, que Pitágoras chegou às 7 notas musicais conhecidas no ocidente (dó-ré-mi-fá-sol-lá-si-dó). Ele percebeu que quando dividia a corda do monocórdio em $\frac{2}{3}$ do seu tamanho original, ele obtinha um intervalo musical de quinta (exemplo: dó-sol). Ao dividir essa mesma corda em $\frac{3}{4}$ do tamanho original ele obtinha o intervalo musical de quarta (exemplo: dó-fá). E quando ele dividia a corda na metade do comprimento ele obtinha o intervalo de oitava (exemplo: dó¹-dó²). Para a obtenção das demais notas Pitágoras utilizou o ciclo das quintas, o qual consistia em encontrar as notas dó-ré-mi-fá-sol-lá-si-dó, através da superposição de quintas ascendentes. A utilização do ciclo das quintas

proporciona a seguinte ordem das notas musicais: dó-sol-ré-lá-mi-si (RIBEIRO JÚNIOR; CROCHIK, 2009).

As relações entre as notas musicais e o comprimento da corda encontrada por Pitágoras estão descritas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Relação pitagórica entre comprimento de uma corda e a nota emitida.

Notas	Dó	Ré	Mi	Fá	Sol	Lá	Si	Dó
Comprimento da corda em relação à Dó	1	$\frac{8}{9}$	$\frac{64}{81}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{16}{27}$	$\frac{128}{243}$	$\frac{1}{2}$

Fonte: RIBEIRO JÚNIOR; CROCHIK (2009).

É importante destacar que a escala obtida por Pitágoras foi baseada nos comprimentos da corda. Porém, a associação da frequência a uma nota musical, a qual é utilizada nos dias de hoje para afinar um instrumento musical, foi introduzida por Galileu Galilei (1564-1642) (RIBEIRO JÚNIOR; CROCHIK, 2009).

3.8.1 A contribuição de Zarlino

Gioseffe Zarlino (1517-1590) foi um dos maiores teóricos musicais da época, e a escala proposta por este foi adaptada da escala original que Pitágoras desenvolveu, sistematizando a escala buscando os intervalos por meio da soma de médias harmônicas e aritméticas a partir de uma nota fundamental (PERES, 2016; RIBEIRO JÚNIOR; CROCHIK, 2009).

Enquanto Pitágoras gerava os intervalos a partir do ciclo das quintas, Zarlino obtinha intervalos dividindo-os, adicionando-os e subtraindo-os, mas nunca invertendo-os (SÓ MATEMÁTICA, 2016).

A média harmônica (H) de n números, na matemática, é dada como sendo o inverso da média aritmética do inverso dos números.

Seja um conjunto de números representados por $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$. A equação geral para a média harmônica é dada a partir de

$$H = \frac{n}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \frac{1}{x_3} + \dots + \frac{1}{x_n}} \quad (3.18)$$

Dessa forma, Zarlino sistematizou a escala através da soma de médias harmônicas e aritméticas a partir de uma nota fundamental. As relações entre os comprimentos de cordas a partir das proporções encontradas estão apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Relação natural entre comprimento de uma corda e a nota emitida.

Notas	Dó	Ré	Mi	Fá	Sol	Lá	Si	Dó
Comprimento da corda em relação à Dó	1	$\frac{8}{9}$	$\frac{4}{5}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{3}{5}$	$\frac{8}{15}$	$\frac{1}{2}$

Fonte: RIBEIRO JÚNIOR; CROCHIK (2009).

Ao comparar a Tabela 3.1 e 3.2, utilizando de uma corda de 1 m de comprimento entre os pontos da corda que estão apoiados no cavalete, é possível obter os valores apresentados na Tabela 3.3, onde estão representados os comprimentos das cordas em metros para determinada nota musical.

Tabela 3.3 - Comparação entre as relações de Pitágoras e Zarlino.

Nota	Pitágoras		Zarlino	
	relação	Comprimento (m)	relação	Comprimento (m)
Dó	1	1,000	1	1,000
Ré	8/9	0,889	8/9	0,889
Mi	64/81	0,790	4/5	0,800
Fá	3/4	0,750	3/4	0,750
Sol	2/3	0,667	2/3	0,667
Lá	16/27	0,593	3/5	0,600
Si	128/243	0,527	8/15	0,533
Dó	1/2	0,500	1/2	0,500

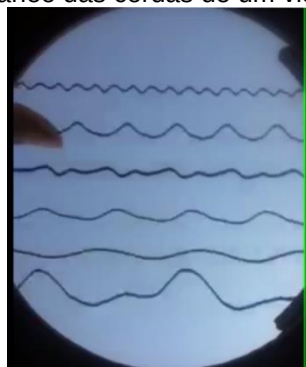
Fonte: O autor.

3.9 Composição harmônica

Ao se dedilhar a corda de um instrumento musical são produzidos pulsos na mesma. Como esta corda está confinada entre dois pontos, a onda irá sofrer inúmeras reflexões e múltiplas interferências, como abordado na Seção 3.7 deste Capítulo.

Ao se registrar um instantâneo das cordas de um violão vibrando, é possível identificar que as mesmas possuem um formato diferente da onda senoidal vista na Seção 3.6 do presente Capítulo. Este formato pode ser verificado na Figura 3.23, onde é possível observar ondas anarmônicas, produzida por um violão, as quais são periódicas, porém não senoidais (KELLER; GETTIS; SKOVE, 1999).

Figura 3.23 – Um instantâneo das cordas de um violão ao serem dedilhadas.



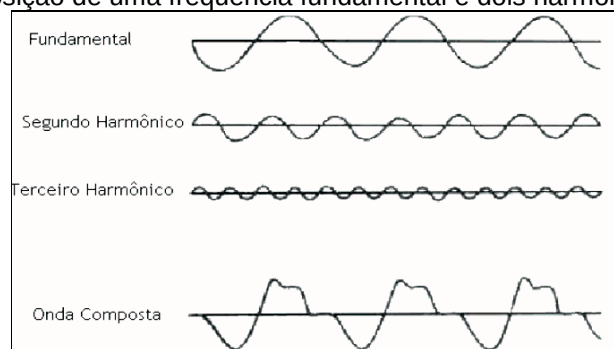
Fonte: PRADO (2016).

Sendo assim, é possível perceber que a função de onda dada para a corda deste instrumento é mais complexa a descrita pela equação 3.6.

Quando a corda de um instrumento vibra, sua vibração resultante é a combinação do harmônico fundamental juntamente com vários sobretons; desta forma, o movimento da corda será a superposição de vários modos normais (YOUNG; FREEDMAN, 2003).

Buscando ilustrar a colocação anterior, a Figura 3.24 ilustra a superposição de uma frequência fundamental e seus dois harmônicos subsequentes.

Figura 3.24 – Composição de uma frequência fundamental e dois harmônicos subsequentes.



Fonte: WUENSCHÉ (2005).

Jean Baptiste Joseph Fourier (1768 – 1830) demonstrou que a forma de uma onda periódica complexa pode ser descrita como a soma de ondas harmônicas representada pela equação 3.16 (KELLER; GETTIS; SKOVE, 1999),

$$y(t) = \sum_{n=1}^N A_n \sin(n\omega t + \phi_n). \quad (3.16)$$

Assim como as ondas periódicas da Figura 3.23 podem ser analisadas em termos da equação 3.9 para serem encontrados os valores da frequência fundamental e seus harmônicos superiores, é possível também a formação de novas ondas periódicas de maneira eletrônica a partir de sintetizadores de som digitais, como um teclado musical, por exemplo. A Figura 3.25 representa a série de Fourier produzida por um teclado musical eletrônico ao tocar a nota Dó₃.

Figura 3.25 – Uma onda periódica produzida por um teclado musical a partir de uma série de Fourier.



Fonte: O autor.

Contudo, a composição harmônica de uma corda também depende da forma com que esta foi inicialmente perturbada, isto é, se a corda for tocada

próximo à abertura da caixa de ressonância, a corda terá uma determinada composição harmônica. Porém, se a corda for tocada próximo à outra extremidade, por exemplo, a sua composição harmônica terá um formato diferente (YOUNG; FREEDMAN, 2003).

3.10 Timbre

Timbre é uma característica do som que permite que dois instrumentos diferentes que tocam a mesma nota musical sejam identificados.

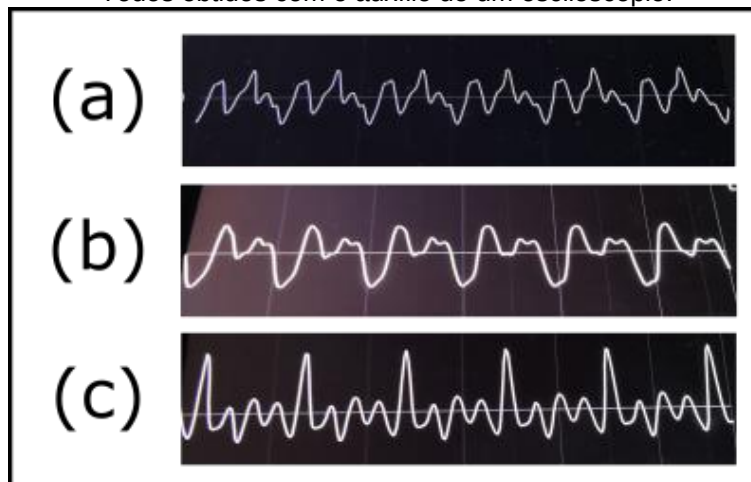
Ao tocar a nota $Dó_3$ (dó central do piano), esta produz a frequência fundamental de 262 Hz acompanhada de seus segundo, terceiro, quarto harmônicos entre outros. O número de harmônicos, e o volume de som de cada um destes, determinam o timbre do som associado ao instrumento, neste caso, o piano (HEWITT, 2002).

É possível transpor a ideia apresentada para o piano também para os demais instrumentos, onde a nota musical tocada por este, além de vibrar com a frequência fundamental da nota, esta acompanha uma série de harmônicos derivados desta.

Além disso, quando dois instrumentos diferentes, por exemplo, um trompete e um saxofone, tocam a mesma nota musical, estes produzem a mesma frequência, porém seus harmônicos possuem intensidades diferentes. Desta forma, o quarto harmônico de determinada nota musical pode ser forte em um instrumento e fraco (ou até mesmo ausente) em outro instrumento, e este é o motivo do som da nota musical percebido por um instrumento soar diferentemente da mesma nota musical tocada por outro instrumento musical (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

É possível observar a forma do timbre da nota musical tocada em um instrumento musical por meio de um osciloscópio. A Figura 3.26 apresenta o timbre em (a) de um violino, em (b) de um piano e em (c) de um trompete, todos tocando a nota $Dó_3$.

Figura 3.26 – O timbre, em (a), de um violino, em (b) de um piano e em (c) de um trompete. Todos obtidos com o auxílio de um osciloscópio.



Fonte: O autor.

Vale ressaltar que as Figuras 3.25 e 3.26 foram produzidas a partir de um teclado musical, que produz um som sintetizado, de maneira aproximada, a forma de onda produzida por um instrumento musical real. As imagens foram realizadas a partir da captação do som produzido pelo teclado com o uso de osciloscópio, o qual é um aplicativo de celular.

4 – TEXTOS DE APOIO

Neste capítulo disponibilizam-se o Texto de Apoio ao Educando e o Texto de Apoio ao Professor que foram elaborados. Eles apresentam assuntos trabalhados durante as aulas de forma detalhada. Observa-se que para cada Texto de Apoio ao Educando, foi organizado um Texto de Apoio ao Professor, onde este apresenta o mesmo conteúdo, porém com as resoluções dos exercícios de fixação.

Para a elaboração dos textos de apoio foi realizada a transposição didática de artigos científicos, sites da internet e livros de graduação citados anteriormente na fundamentação teórica no Capítulo 3, onde os conceitos envolvidos nas aulas foram reescritos em nível do ensino médio.

Ressalta-se que o tema abordado em cada Texto de Apoio ao Educando foi elaborado a partir dos planos de aula para cada seção e apresentado no Capítulo 2 deste Produto. Além disso, destaca-se que ao final de cada Texto de Apoio são propostas atividades, diferentes para cada texto, com o objetivo de auxiliar na compreensão do conteúdo.

TEXTOS DE APOIO AO PROFESSOR

MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA - POLO 35 - UEPG

Luís Alexandre Rauch¹, Luiz Fernando Pires², André Maurício Brinatti²

¹ Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física / Universidade Estadual de Ponta Grossa/ UEPG, PR, Brasil

² Departamento de Física/ Universidade Estadual de Ponta Grossa/ UEPG, PR, Brasil

Colégio _____

Nome: TEXTO DE APOIO
(VERSÃO DO PROFESSOR)

Nas cordas dos instrumentos musicais

2016



APRESENTAÇÃO

O presente conjunto de textos é parte do Produto elaborado pelo mestrando Luís Alexandre Rauch, sob orientação do Prof. Dr. André Maurício Brinatti e coorientação do Prof. Dr. Luiz Fernando Pires, no Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física – Mestrado Profissional, da Universidade Estadual de Ponta Grossa, vinculado ao Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física – MNPEF, da Sociedade Brasileira de Física – SBF, como polo 35, sendo referente a uma sequência de aulas como unidade didática, a qual contempla o estudo das ondas mecânicas em cordas.

Este conjunto de textos consiste em oferecer apoio ao educando, permitindo a sua utilização como forma de revisão e contam com exercícios diferenciados, tendo por objetivo auxiliar na assimilação dos conteúdos estudados, possibilitando avanços no processo de ensino-aprendizagem a partir do mesmo sobre o tema. Além disso, os textos são também utilizados juntamente com materiais didáticos constante no Produto que são apresentados em cada seção. À medida que se avança nas seções, novos conhecimentos serão agregados.

Por fim, o referido trabalho consiste em uma versão final, a qual foi reformulada após sua primeira aplicação, sendo providenciadas as devidas correções.

Os autores

Seção 1

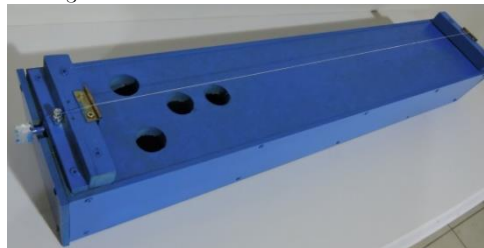
“Com a corda toda!”

Figura 1 - Um violão rudimentar.



Fonte: O autor.

Figura 2 - Um monocórdio rudimentar.



Fonte: O autor.

Os **INSTRUMENTOS** musicais estão associados ao ser humano desde o seu surgimento na Terra. Na Idade da Pedra Lascada (quando o homem produzia objetos com pedra e madeira), surgiram os primeiros chocalhos e apitos, feitos com materiais retirados da natureza. Ossos, por exemplo, serviam como flautas e apitos. O homem começou a construí-los para imitar os sons da natureza, como o vento e o trovão, o canto dos pássaros e até o rugido das feras [1].

As culturas primitivas atribuíam a criação dos instrumentos aos deuses, pois acreditavam que a música tinha origem divina [2].

Dentre os tipos de instrumentos musicais destaca-se uma classe em especial, os instrumentos de **CORDAS** os quais consistem em cordas de **TAMANHOS** e **ESPESSURAS** diferentes com diversos tipos de tensão, que quando combinadas formam os sons. Dois exemplos destes instrumentos são apresentados nas Figuras 1 e 2 iniciais desta seção, à esquerda (Figura 1), tem-se um **VIOLÃO** rudimentar e à direita (Figura 2) um **MONOCÓRDIO**.

A história dos instrumentos de cordas também é muito antiga. Há registros de 3.000 a.C com relatos de instrumentos parecidos às harpas na Mesopotâmia [3].

Os instrumentos de corda são classificados de acordo como são tocados, podendo ser:

Instrumentos de cordas **FRICCIONADAS**.

São os instrumentos cujo som é emitido através de cordas postas em vibração por meio de um arco, através do **ATRITO** entre as cordas e um arco, o qual é normalmente confeccionado com crina de cavalo [4]

Figura 3 - Um violino.



Fonte: O autor.

Dentre os instrumentos desta modalidade podemos citar o violino, ilustrado na figura 3. Esse instrumento foi desenvolvido no século XVI pelos italianos Andrea Amati, de Cremona, e Gasparo da Salò, de Brescia, a partir do aperfeiçoamento do primitivo instrumento de 3 cordas. De aparência simples, é um instrumento de extraordinária complexidade, composto de quase 70 peças diferentes. Constitui-se basicamente de quatro cordas, afinadas em quintas (mi⁴, lá³, ré³ e

sol2), uma caixa de **RESSONÂNCIA** em forma de oito e um braço preso à caixa por um cepo. No interior da caixa, há uma prancheta chamada “cadeira” e um pequeno cilindro vertical denominado “alma”. Ambos têm por finalidade melhorar a sonoridade, além de dar mais solidez à parte superior da caixa de ressonância, o “tampo harmônico”, em cuja parte central encontra-se o “cavelete”, por onde passam as cordas. O violino, o mais agudo e versátil instrumento de cordas, é indispensável na orquestra sinfônica e no quarteto de câmara [5].

Figura 4 – Um violoncelo.



Fonte: O autor.

O violoncelo, ilustrado na figura 4, foi construído no século XVI, à maneira do violino e para ser tocado como a viola da gamba, pelos mestres italianos Andres Amati, Gasparo da Salò, Maggini e outros. Esse instrumento de timbre **GRAVE** e aveludado tem como principal função a de reforçar os baixos da orquestra. Em seus primórdios, exercia papel secundário, sendo utilizado ora como baixo contínuo, juntamente com o cravo, ora como simples pedal da orquestra. Somente a partir do final do século XVII é que se firmou como instrumento solista, substituindo a “viola da gamba”. De estrutura semelhante à do violino e

à da viola, diferencia-se destes pelo **COMPRIMENTO** (1,19m), como também pela caixa de ressonância, proporcionalmente mais funda. Possui 4 cordas afinadas uma oitava abaixo das cordas da viola, também em quintas (dó1, sol1, ré2 e lá2), e seu registro médio é de 3 oitavas e meia [6].

Instrumentos de cordas DEDILHADAS. O som é produzido a partir da **VIBRAÇÃO** das cordas após serem dedilhadas pelos dedos ou por palhetas [4].

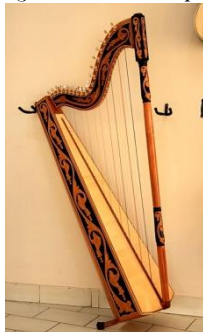
Figura 5 – Um violão.



Fonte: O autor.

A figura 5 representa o mais popular dos instrumentos de corda dedilhada, o violão, também chamada “guitarra espanhola”. Trata-se de um instrumento de cordas dedilhadas, sobre cuja origem não acordam os pesquisadores, embora sua presença e difusão na Espanha tenha a ver com a invasão dos árabes na Península Ibérica. Ele consta de uma caixa de ressonância, de um braço com 19 trastes, que termina numa cravelha. Tem seis cordas, tocadas com a ponta dos dedos ou arranhadas com as unhas [6].

Figura 6 - Uma harpa.



Fonte: [8]

Talvez o mais antigo dos instrumentos musicais de corda, cujos exemplares foram encontrados em um túmulo da rainha dos sumérios, Schub-ad, na Mesopotâmia, que viveu 3000 a.C., seja a harpa, ilustrada na figura 6, tem construção sempre triangular, lembrando um arco de caça [3]. A harpa utilizada nas orquestras sinfônicas atuais contém cerca de 46 cordas presas a uma armação triangular. Seu registro abrange seis oitavas e meia (dó bemol1 a sol bemol6). Usada como instrumento solista por alguns compositores, é amplamente empregada na orquestra sinfônica por uma gama interessante de compositores [6].

Instrumentos de cordas PERCUTIDAS. O som é produzido a partir da vibração das cordas após estas serem percutidas.

Figura 7 - Um piano.



Fonte: O autor.

A figura 7 ilustra o piano, cujo som é produzido por peças feitas em MADEIRA e

cobertas por um material macio (geralmente feltro) designadas martelos. Os martelos são ativados através de um TECLADO e tocam nas cordas ESTICADAS e presas numa estrutura rígida de madeira ou metal. As cordas VIBRAM e produzem o som.

Figura 8 - Um berimbau.



Fonte: [9]

O berimbau, ilustrado na figura 8, é um instrumento de PERCUSSÃO, porém, é tocado através de uma corda. É um instrumento característico do Brasil, figura indispensável em todas as rodas de capoeira, apesar de estar presente em outros contextos, como por exemplo, as celebrações do candomblé-de-caboclo. Nos tempos de escravidão, os africanos utilizavam-se do berimbau para comunicar-se de modo sigiloso. Apesar de uma ou outra discordância, o instrumento é considerado de origem africana, tendo como construtores os povos Bantus. O instrumento é composto de uma cabaça, um arco geralmente feito da madeira chamada biriba, a qual é envergada por um cabo de ARAME, uma BAQUETA com a qual se percuti o arame; ao mesmo tempo em que a mão da baqueta percuti o arame, a mesma segura o caxixi, um pequeno cesto contendo pequenas sementes ou algo similar dentro, que ajuda no som percussivo; com a outra mão, o instrumentista segura uma pedra ou um pedaço de metal

(popularmente chamado de dobrão) que é levado de encontro ao arame, causando **VARIAÇÃO** nos tons emitidos pelo arco. Ele produz, basicamente, três texturas de sons, que são a solta (sem a pedra, com o instrumento longe do corpo), presa (com a pedra friccionando o arame, com a baqueta atuando acima da pedra, com o instrumento longe do corpo) e chiado (com a pedra tocando o arame de modo solto, livre, com a baqueta atuando

acima da pedra, com o instrumento preso ao corpo). [7]

Palavras utilizadas:

monocórdio, espessuras, vibram, dedilhadas, variação, instrumentos, ressonância, madeira, arame, teclado, tamanhos, esticadas, comprimento, violão, baqueta, percutidas, atrito, percussão, friccionadas, grave, vibração, cordas.

Agradecimentos

- Colégio Getúlio Vargas - Fernandes Pinheiro, pela autorização em fotografar o piano do Colégio;
- Geraldo Baranoski Junior - pelo empréstimo do violão para fotografar;
- André Rauch Baranoski - pelo empréstimo para fotografar e utilização do violino;
- Lilly Cristina Flores Schnepfer - pelo empréstimo do violoncelo para fotografar.

Referências

- [1] - FERNANDES, N. **Como surgiram os instrumentos musicais**. 2010. Disponível em: <http://www.dgabc.com.br/Noticia/101965/como-surgiram-os-instrumentos-musicais>. Acesso em: 08 Out. 2015.
- [2] - PASCOAL, E. G. **INSTRUMENTOS : ORIGEM E CLASSIFICAÇÃO**. Banda Musical da casa do povo de Vilarandelo. Disponível em: <http://www.angelfire.com/musicals/bandadevilarandelo/instrumentos.htm>. Acesso em: 04 Out. 2015.
- [3] - ORTEGA, G. **A Harpa e seu mistério**. DEMAP - Adoração Irresistível. Disponível em: <http://www.adoracaoirresistivel.com/2015/05/a-harpa-e-seu-misterio/>. Acesso em: 08 Out. 2015.
- [4] - CAMPAGNOLI, D. **Instrumentos de corda**. Violinando.com - Tudo sobre Violino. 2014. Disponível em: <http://violinando.com/instrumentos-de-cordas/>. Acesso em: 08 Out. 2015.
- [5] - MUSICAL MENDELSSOHN. **Instrumentos de Corda**. Disponível em: <http://www.musicalmendelssohn.com/#!cordas/c1bhj>. Acesso em: 04 Out. 2015.
- [6] - RODRIGUES, A. **A história dos instrumentos**. 2011. Disponível em: <http://www.movimento.com/2011/09/a-historia-dos-instrumentos/>. Acesso em: 04 Out. 2015.
- [7] - SANTIAGO, E. **Berimbau**. Disponível em: <http://www.infoescola.com/musica/berimbau/>. Acesso em: 12 Out. 2015.
- [8] - Paraguayan Harp. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Paraguayan_harp.jpg. Acesso em: 18 Out. 2015.
- [9] - Berimbau. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Berimbau_1.jpg. Acesso em: 18 Out. 2015.

Seção 2

“Com que frequência?”

Figura 1 - Um relógio trabalhando.



Fonte: O autor.

Figura 2 - Uma bicicleta em movimento.



Fonte: O autor.

Quando se observa o **movimento** dos ponteiros dos relógios, como ilustrado na Figura 1, de um ponto qualquer demarcado em um aro de uma bicicleta que anda com velocidade **constante**, como ilustrado na Figura 2, ou até mesmo o movimento realizado pelos planetas em torno do Sol, a posição, velocidade e aceleração do corpo móvel se **repetem** em intervalos de tempos **iguais**. Ao movimento que exibe este tipo de regularidade dá-se o nome de movimento **periódico** [1].

Imagine uma roda, na qual existe um ponto marcado próximo ao pneu e ao aro, que gira livremente em torno do seu eixo.

Figura 3 - Uma roda girando.



Fonte: O autor.

Quando ela está girando, como ilustrado na figura 3, o ponto gasta um certo intervalo de **tempo** para percorrer uma volta **completa** em torno de um ponto de referência (o braço, por exemplo). Em Física, este

intervalo de tempo é definido como **Período** [2] sendo, em geral, representado pela letra T. No Sistema Internacional de Unidades (S.I.), a unidade de medida de período é o **segundo** (s).

Para exemplificar: observe o ponteiro dos segundos do relógio da sua sala de aula, o período do ponteiro dos segundos é de 60s, ou $T = 60s$.

Suponha que você esteja na situação em que se observa um determinado ponto da roda e com o uso do cronômetro conta o número de voltas completas que este ponto realiza em determinado intervalo de tempo. Ao medir um tempo de 17 s, você contou 45 voltas completas. Ao dividir o número de voltas completas pelo tempo que foi medido, tem-se uma grandeza denominada **frequência**, a qual é representada na Física muitas vezes com a letra **f**. Assim, pode-se definir frequência como o número de ciclos que um movimento se repete na unidade de tempo [3], sendo que no caso da roda, é o número de voltas que o ponto da roda completa no intervalo de tempo.

Assim, é possível calcular frequência a partir da seguinte equação:

$$f = \frac{\text{número de ciclos}}{\text{unidade de tempo}}$$

A unidade de medida de frequência é $\frac{1}{s}$, denominado de **hertz**, cujo símbolo é Hz [3]. O número 1 no numerador indica que o número de ciclos não possui unidade de medida.

A unidade hertz foi assim designada em homenagem ao físico alemão Heinrich Hertz (1857-1898), um pioneiro nas investigações das ondas eletromagnéticas [3].

Assim, quando se diz, por exemplo, que uma determinada estação de rádio possui frequência de 99,7 megahertz, isto quer dizer que a onda de rádio emitida por essa estação possui 99,7 milhões de oscilações por segundo [5] (tal conceito será mais bem explorado na seção 5).

Voltando ao problema da roda, a frequência do seu movimento será de:

$$f = \frac{45 \text{ voltas}}{17 \text{ segundos}} = 2,65 \text{ Hz}$$

Obs.: os valores aqui utilizados foram aferidos em sala de aula juntamente com os educandos, logo, se utilizar uma nova corda deverão ser realizadas novas medidas.

Referências

[1] MHS - Movimento oscilatório e periódico. Disponível em:

<http://www.sofisica.com.br/conteudos/Ondulatoria/MHS/movpereosc.php>. Acesso em 12 Out. 2015.

[2] HALLIDAY, D. RESNICK, R. WALKER, J.. Fundamentos da Física. Rio de Janeiro: LTC, 2009. v.2

[3] YOUNG, D. H.. FREEDMAN R. A.. **Física II**. 10. ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2003.

[4] SILVA, Junior. **O que é frequência elétrica?** Disponível em: <http://www.eletricante.com.br/2012/07/o-que-e-frequencia-eletrica.html>. Acesso em 21 Out. 2015.

[5] GRUPO VIRTOUS. **Frequência de uma onda**. Disponível em:

http://www.sobiologia.com.br/conteudos/oitava_serie/Ondas2.php. Acesso em 29 Out. 2015.

Atividade:

Procure no quadro abaixo as palavras que estão destacadas no texto:

M	E	R	N	L	O	D	S	E	G	U	N	D	O	E	R	G	H	M	B
O	S	Ó	F	Ã	S	Ç	D	S	F	A	P	M	L	B	S	D	E	J	K
V	D	M	F	R	E	Q	U	Ê	N	C	I	A	S	A	G	D	Y	T	R
I	F	B	N	T	I	Y	U	E	V	M	J	F	S	D	I	X	P	D	U
M	D	O	T	G	G	K	J	S	N	S	R	E	J	D	A	Ô	E	B	K
E	G	E	Q	E	A	Ç	Ã	O	Ú	A	X	D	A	F	G	P	R	A	U
N	Y	A	G	A	M	O	M	W	M	Q	Y	E	Y	L	M	Í	I	J	N
T	U	P	F	T	É	P	E	T	E	T	R	Ç	L	E	H	Y	O	K	I
O	I	M	C	H	A	Y	O	Y	R	A	S	M	I	D	G	T	D	M	D
A	L	T	O	Ç	Ú	L	R	I	O	Y	H	E	R	T	Z	H	I	T	A
D	K	G	M	V	G	E	T	N	D	O	K	D	T	M	Ã	O	C	B	D
E	O	E	P	D	P	Ô	F	M	E	H	D	I	R	H	M	S	O	L	E
A	O	R	L	E	A	M	R	E	C	J	M	T	D	E	E	B	D	M	D
S	D	S	E	G	F	R	I	D	I	N	C	O	N	S	T	A	N	T	E
F	H	S	T	I	Ó	F	Q	S	C	R	T	W	E	Ã	E	U	W	I	T
F	G	W	A	S	Í	D	S	F	L	Y	E	Í	F	M	P	Q	C	D	E
R	Y	T	O	F	R	E	G	T	O	O	T	W	D	X	E	R	E	T	M
I	T	K	L	A	S	W	H	F	S	E	Ó	R	F	G	R	E	W	O	P
I	G	U	A	I	S	P	O	I	K	L	F	R	E	D	U	I	Y	F	O
A	S	R	E	R	D	L	E	P	E	R	Í	O	D	O	R	E	J	K	M

Seção 3

“Um balançar legal!”

Figura 1 - O movimento de um pêndulo.



Fonte: O autor.

A foto da figura 1 consiste em um corpo de certa massa variável colocado para balançar na extremidade de um fio longo [2]. Neste caso, a massa é composta por uma garrafa pet que possui um líquido colorido no seu interior e um pequeno orifício em sua tampa. Esta é a representação de um pêndulo. O mesmo sistema pode ser observado em várias situações em nosso dia a dia, como o movimento de um relógio de pêndulos ou no balançar de uma criança em um balanço infantil, e ambos exemplificam o caso de um pêndulo.

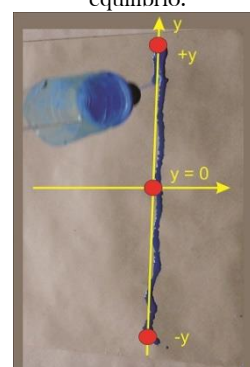
Porém, pode-se considerar a situação da figura 1, de forma aproximada, como sendo um pêndulo simples, ou seja, um sistema constituído de um corpo puntiforme com determinada massa e suspenso por um fio ideal, ou seja, inextensível e com massa desprezível, com determinado comprimento e que executa oscilações desenvolvendo pequenos deslocamentos.

Desprezando-se as possíveis resistências, como a do ar e atrito, o pêndulo descrito realiza um movimento periódico [2][3]. Esta regularidade do movimento de oscilação de um pêndulo foi utilizada por muito tempo

para controlar o movimento dos relógios, por exemplo [1].

Considerando a situação em que o pequeno orifício da tampa do pêndulo descrito da figura 1 é aberto, este irá marcar o papel com a tinta quando em movimento. Ao deslocar do ponto de equilíbrio e soltar a garrafa, deixando cair uma pequena quantidade de líquido do seu interior sobre um papel, ela irá produzir um segmento de linha reta, como demonstrado na figura 2.

Figura 2 - Um pêndulo oscilando sobre um ponto de equilíbrio.



Fonte: O autor.

É importante observar que, neste caso, haverá uma pequena variação da massa, uma vez que há perda de líquido. No entanto, para o propósito aqui apresentado e simplificações,

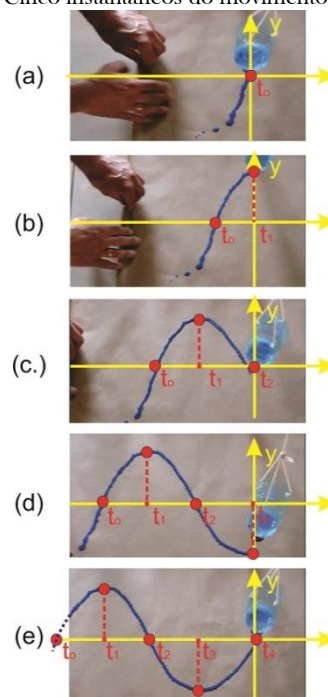
essa variação de massa (perda de tinta) não será considerada.

O movimento oscilatório de um pêndulo balançando através de um pequeno arco em torno de um ponto central, como mostrado na figura 2, denomina-se movimento harmônico simples (MHS), considerando as devidas aproximações, tais como fio ideal e inextensível. Há outras situações no dia-a-dia em que o MHS está presente, com boas aproximações, sendo o movimento do pêndulo simples um exemplo.

Ao puxar o papel que está sob e próximo à base do pêndulo com velocidade constante, este fará uma marcação no papel, como mostrada na figura 1. Para analisar o movimento do pêndulo em relação ao tempo, mantendo o referencial no ponto fixo na posição de equilíbrio do pêndulo, onde este fica parado, foram tiradas cinco fotografias mostradas na figura 3, que representam cinco momentos que são chamados de “instantâneos” do movimento do mesmo.

Podemos observar que no instantâneo em (a), o qual é o tempo inicial da observação, representado por t_0 , este elemento está com um deslocamento $y=0$. Em (b), momento t_1 , pode-se perceber que o ponto se encontra em seu deslocamento extremo para cima (denominado pico). No ponto (c), momento t_2 , desce novamente para $y=0$. No quarto instantâneo (d), momento t_3 , está com seu deslocamento extremo para baixo (denominado vale) e no quinto instantâneo (e), momento t_4 , está novamente em $y=0$, completando o ciclo de oscilação [2] e recomeçando o movimento.

Figura 3 - Cinco instantâneos do movimento do pêndulo.



Fonte: O autor

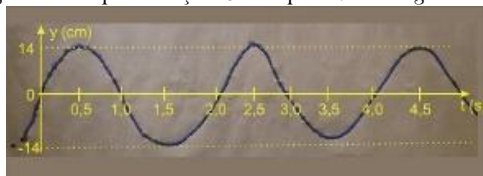
No final deste movimento, observa-se uma marcação da tinta no papel, como apresentada na figura 4, representando o movimento do pêndulo em função do tempo.

Figura 4 - Marcação do deslocamento do pêndulo em função do tempo.



Fonte: O autor.

Colocando-se um eixo de coordenadas na figura 4, da posição do pêndulo em y em função do tempo, verifica-se a representação mostrada na figura 5. Observe que a posição em y fornece a oscilação do pêndulo entre um valor máximo e um mínimo, compare esta figura com as figuras 2 e 3.

Figura 5 – Representação do tempo sobre um gráfico $y(t)$.

Fonte: O autor.

Buscando uma comparação da figura 5 com a análise feita anteriormente referente à figura 3, apresenta-se a tabela 1 com valores de tempo e deslocamento máximo para vários instantâneos, onde é fácil perceber que:

Tabela 1 – Vários instantâneos.

instantâneo	tempo (s)	deslocamento máximo em y (cm)
t_0	0	0
t_1	0,5	14
t_2	1,0	0
t_3	1,5	-14
t_4	2,0	0

Além disso, também a partir da figura 5, é possível analisar as propriedades do MHS, como período, amplitude e frequência de oscilação.

PROPRIEDADES DO MHS

Período do movimento de um pêndulo

O MHS é um movimento periódico, desta forma, como foi descrito na seção anterior, é possível atribuir a esse tipo de movimento um período, T , que é o intervalo de tempo necessário para o pêndulo realizar uma oscilação completa (ou um ciclo) [2], como o demonstrado na figura 3. Desta forma, é possível perceber que o período do movimento na figura 5 é de 2 s.

Frequência

Outro elemento importante que caracteriza os movimentos periódicos e, portanto, o MHS, é a sua frequência, f , cuja grandeza também estudada na seção anterior, onde neste caso indica o número de oscilações completas do pêndulo por segundo [2]. Desta forma, ao escolher o número de oscilações completas e dividir pelo tempo que o pêndulo levou para fazê-las, é possível estimar a frequência descrita pelo movimento do pêndulo usando a figura 5, o qual é de

$$f = \frac{2}{4} = \frac{1}{2} ;$$

$$f = 0,5 \text{ Hz}$$

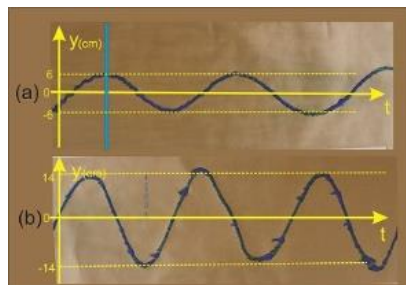
Amplitude de oscilação

Quando o pêndulo é deslocado com um pequeno ângulo em relação ao seu ponto de equilíbrio, ponto central, a marcação da sua posição em relação ao tempo será feita próximo a este. Já quando o pêndulo for deslocado para um ponto mais afastado do seu ponto de equilíbrio, ou seja, um ângulo um pouco maior, a marcação torna-se maior. Vale lembrar que em ambos os casos as amplitudes são devidas a ângulos pequenos. Ao deslocamento máximo de oscilação do pêndulo em relação ao ponto de equilíbrio, ponto central, em um dos sentidos é denominado amplitude, representado pela letra A [2]. Pode-se dizer, então, em relação à figura 5, que a amplitude de oscilação do pêndulo é $A = \underline{14}$ cm.

A figura 6(a) mostra a marcação do movimento do pêndulo em função do tempo segundo uma determinada amplitude, já na figura 6(b) é possível observar a marcação do

movimento do pêndulo em função do tempo descrevendo uma amplitude pouco maior que ao descrito na figura 6(a).

Figura 6 - As amplitudes de um movimento oscilatório.



Fonte: O autor.

Referências

- [1] HEWITT, Paul G. Física Conceitual. 9ªed. São Paulo: Bookman, 2002.
- [2] HALLIDAY, D. RESNICK, R. WALKER, J.. Fundamentos da Física. Rio de Janeiro: LTC, 2009. v.2
- [3] HOUUAISS PÊNDULO SIMPLES. In: RODITI, I. **Dicionário Houaiss de Física**. Rio de Janeiro: Objetiva, 2005.

Atividade

Com base no texto, ligue os conceitos descritos na coluna A com as definições da coluna B:

A	B
Frequência	Constituído de um corpo puntiforme com uma determinada massa e suspenso por um fio inextensível com um determinado comprimento e massa desprezível e que executa pequenas oscilações.
Aproximação do Pêndulo Simples	Deslocamento máximo de oscilação em relação ao ponto central (ponto de equilíbrio).
Amplitude	Movimento descrito por um objeto preso à ponta de uma corda que oscila em torno de um ponto central (ponto de equilíbrio) executando um pequeno arco.
MHS	Número de oscilações realizadas por um pêndulo em um segundo.
Pêndulo simples	Tempo que o pêndulo leva para descrever uma volta completa em torno de um ponto de referência que pode ser tomado como ponto central (ponto de equilíbrio), por exemplo.
Período	Movimento periódico descrito por um corpo que oscila em torno de um ponto de equilíbrio executando deslocamentos simétricos e em torno deste.
Aproximação do Movimento Harmônico Simples	Aparato mostrado na figura 1 contendo um fio esticado e uma determinada massa presa em sua extremidade e que oscila em torno de um ponto central.

Seção 4

“Um pulso...”

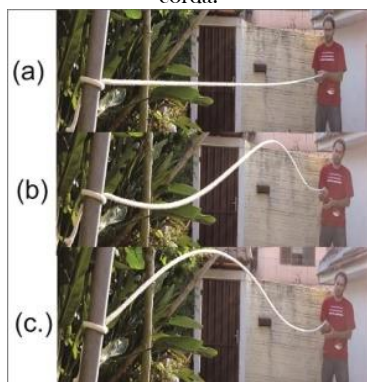
Figura 1 – Um pulso formado em uma corda esticada.



Fonte: O autor.

Ao sacudir uma corda esticada para cima e para baixo, é obtido um pulso que se propaga ao longo da mesma [1] como apresentado na figura 1. Observando a ilustração da figura 2, pode-se verificar três situações que representam um pulso em uma corda: em (a) tem-se uma corda esticada e em (b) e (c) um pulso se propagando ao longo da corda.

Figura 2 – Um pulso de onda se propagando em uma corda.



Fonte: O autor.

A velocidade de propagação de um pulso na corda depende da tração e da sua densidade linear. Desta forma, é possível determinar o valor da velocidade do pulso pela equação 1,

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

Na equação 1, a tração é a força com que é esticada a corda e está representada pela letra T.

A densidade linear da corda é representada pela letra grega μ . Essa grandeza é definida dividindo-se a massa da corda pelo seu comprimento, conforme indicado na equação 2,

$$\mu = \frac{m}{l} \quad (2)$$

Obs.: os valores aqui utilizados foram aferidos em sala de aula juntamente com os educandos, logo, se utilizar uma nova corda deverão ser realizadas novas medidas.

Desta forma, se uma corda tem massa 0,459 kg e comprimento 5,7 m, a sua densidade linear terá valor de:

$$\mu = \frac{0,459}{5,7} ;$$

$$\mu = 0,08 \text{ kg/m}$$

Se considerar que a tração nessa mesma corda, aferida a partir de um dinamômetro, seja de 19,6 N, pode-se determinar a velocidade de propagação de um

pulso nesta corda usando a equação 1 e esta será de

$$v = \sqrt{\frac{19,6}{0,08}}, \text{ então}$$

$$v = 15,6 \text{ m/s.}$$

O resultado anterior de velocidade de propagação do pulso juntamente com a equação 1, sugere que:

Uma corda puxada com uma tração de maior intensidade, ou seja, mais esticada, tem velocidade de propagação de um pulso maior do que a mesma corda menos esticada, ou seja, com uma tração de menor intensidade.

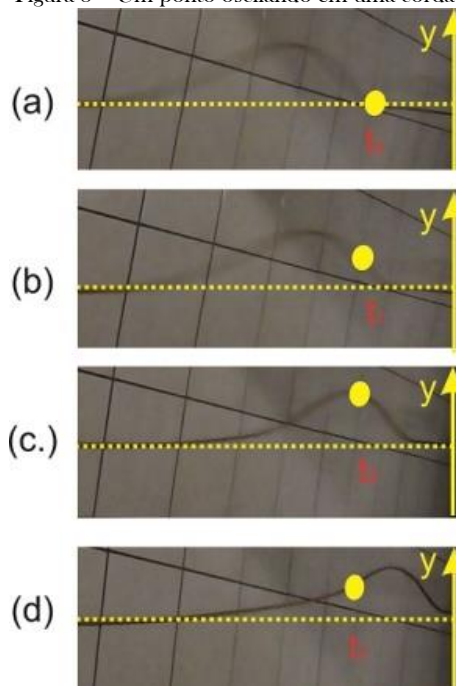
Se a corda for substituída por outra corda, cuja densidade linear é maior, e essa outra corda for esticada com as mesmas intensidades de tração da anterior, isto é, maior e menor tração, as velocidades de propagação de um pulso serão menores nessa outra corda, respectivamente.

Quando se produz um pulso isolado em uma corda esticada, ao analisar um elemento da corda, o qual está demarcado como um ponto na figura 3, este se desloca para cima e depois para baixo quando o pulso passa por ele [4].

A figura 3 representa quatro instantâneos da propagação do pulso, na qual quando analisado um ponto demarcado na corda tem-se que: em (a) o ponto se encontra em sua posição de equilíbrio sobre o eixo da corda; em (b) o pulso encontra o ponto da corda, onde este se move para cima; em (c) o ponto alcança sua máxima amplitude; e em (d) o ponto inicia retorno à posição original. Esta

situação pôde ser observada na seção 3, quando analisado o movimento de oscilação do pêndulo simples.

Figura 3 - Um ponto oscilando em uma corda.

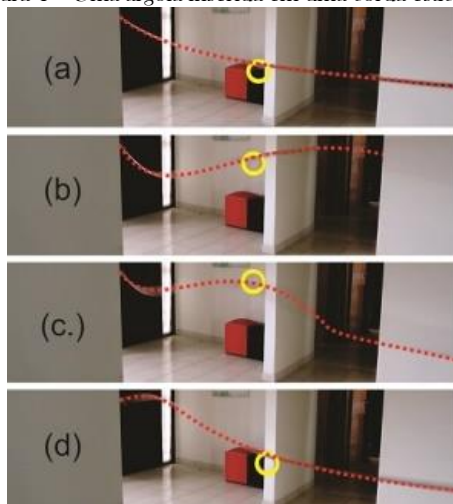


Fonte: O autor.

Também é possível verificar, a partir da figura 3, que à medida que o pulso se propaga para a esquerda na corda, sua parte da frente está se movendo para cima, enquanto a parte posterior, na direita, está se movendo para baixo [1].

Uma situação em que é possível observar que um pulso não transporta massa e sim energia é ilustrada na figura 4, onde é colocada uma argola em uma corda esticada (a) e um pulso é aplicado (b). Quando o pulso alcança a argola (c), a mesma faz um movimento de subida e descida, e, após a passagem do pulso ela permanece no mesmo lugar (d).

Figura 4 - Uma argola inserida em uma corda esticada.



Fonte: O autor.

Reflexão de um pulso

Quando o pulso de onda incide sobre um obstáculo e retorna ao meio de propagação, mantendo as características da onda incidente, diz-se que ela sofreu uma reflexão.

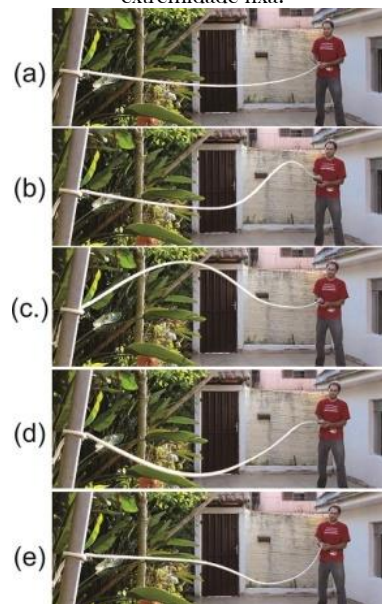
Uma vez que a onda continua se propagando no mesmo meio, o módulo da sua velocidade permanece inalterado após a reflexão, porém o sentido da propagação e da velocidade tornam-se contrários do sentido inicial.

A reflexão de um pulso em uma corda pode ocorrer com a extremidade da mesma fixa ou móvel.

A reflexão em uma corda com a extremidade fixa pode ser ilustrada da seguinte maneira: suponha que um pulso atinge uma extremidade fixa, como uma barra (figura 1). A força aplicada nela, pelo princípio da ação e reação, reage sobre a corda, causando um movimento. Esse movimento é na direção da aplicação do pulso, e o sentido da propagação e da velocidade são contrários ao sentido inicial e com o pulso invertido, sendo esse o pulso refletido. A figura 5 mostra o pulso em uma

corda: em (a) (b) e (c) um pulso incidente em três instantâneos diferentes e em (d) e (e) a reflexão do mesmo pulso em dois outros instantâneos [2].

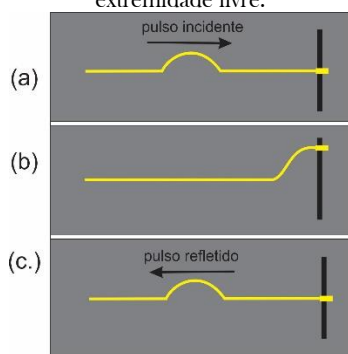
Figura 5 - Um pulso refletindo em uma corda com a extremidade fixa.



Fonte: O autor.

Agora, suponha que um pulso atinge uma extremidade de uma corda que contém um anel preso a uma haste vertical. Digamos que a haste possa movimentar-se livremente para cima e para baixo (figura 6). Como essa extremidade da corda com o anel pode oscilar livremente, um pulso incidente desloca essa extremidade da corda para cima, e ao refletir, o anel retorna à sua posição original. O pulso refletido não se inverte, retorna na mesma direção de propagação e no sentido contrário ao sentido do pulso incidente. A figura 6 representa um pulso sendo refletido por uma corda com a extremidade livre, onde se tem: em (a) um pulso incidente, em (b) o anel sobe junto com o pulso e em (c) ocorre a reflexão do mesmo pulso [2].

Figura 6 - A reflexão de um pulso em uma corda com extremidade livre.



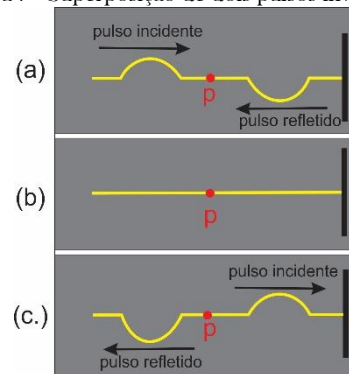
Fonte: O autor.

Superposição de dois pulsos

Quando dois pulsos estão se movendo em direção oposta, seja em uma corda com extremidade fixa ou móvel, ao se encontrar em um determinado ponto, ocorre a superposição. O deslocamento resultante, em qualquer ponto da corda em qualquer instante, é obtido somando-se os deslocamentos individuais que cada ponto deveria ter caso não existisse o outro deslocamento [3].

A figura 7 representa uma corda com extremidade fixa e dois pulsos subsequentes: um incidente, com sua direção de propagação voltada para cima, e um outro já refletido, invertido em relação ao incidente e se movendo em sentido contrário, em três situações. Em (a) tem-se a situação antes da superposição dos dois pulsos. Em (b) tem-se a situação em que os pulsos se encontram no ponto p, o deslocamento para cima do pulso incidente soma-se com o deslocamento para baixo do pulso refletido, se anulando naquele ponto. Em (c), ilustra-se a situação após os pulsos passarem pelo ponto p; ambos se deslocam e continuam seus movimentos independentes com na situação inicial mostrada em (a).

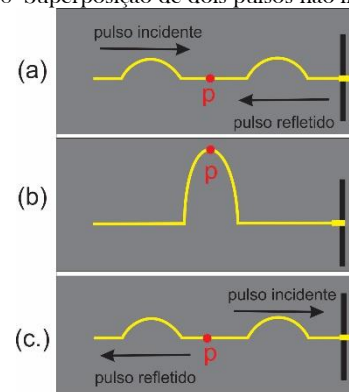
Figura 7- Superposição de dois pulsos invertidos.



Fonte: O autor.

Quando dois pulsos que se deslocam na mesma direção de propagação, um incidente e outro já refletido, se movendo em sentidos contrários como representado na figura 8, onde se tem uma corda com extremidade presa a uma argola livre para oscilar para cima e para baixo, observa-se três situações: em (a) tem-se a situação antes da superposição dos dois pulsos. Em (b) ao se encontrarem no ponto p, os pulsos somam-se, formando um pulso com amplitude igual à soma dos dois pulsos individuais. Em (c), ilustra-se a situação após a passagem dos pulsos pelo ponto p, na qual ambos se deslocam de forma independente e igual ao da situação inicial mostrada em (a).

Figura 8-Superposição de dois pulsos não invertidos.



Fonte: O autor.

Referências

[1] NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica vol. 2.** 4ª ed. Edgard Blucher, 2002.
 [2] GRUPO VIRTUOUS - Tecnologia Educacional. **Reflexão de ondas.** Disponível em: <http://www.sofisica.com.br/conteudos/Ondulatoria/Ondas/reflexao.php>. Acesso em 20 Out. 2015.

[3] YOUNG, D. Hugh. FREEDMAN Roger A.. **Física II.** 10ª ed. São Paulo: Ed. Pearson Addison Wesley, 2003.
 [4] HALLIDAY, Resnick. WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física.** Volume 2. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

Atividade:

Pesquise no texto, completando as lacunas nas frases abaixo:

- 1) Quando dois pulsos estão em sentidos contrários e na mesma direção em uma corda de extremidade fixa, ao se encontrarem em um ponto, eles se **ANULAM**.
- 2) Um pulso em uma corda com extremidade **FIXA**, ao se refletir, retorna invertido em relação ao pulso incidente.
- 3) Quando dois pulsos estão em sentidos contrários e na mesma direção, ao se encontrarem ocorre a **SUPERPOSIÇÃO** deles.
- 4) **PULSO**: é uma perturbação que se propaga ao longo de uma corda.
- 5) Tração na corda é a **FORÇA** com a qual a corda é esticada (puxada).
- 6) Quando dois pulsos estão em sentidos contrários e na mesma direção em uma corda de extremidade **LIVRE**, ao se encontrarem em um ponto, eles se **SOMAM**.
- 7) A velocidade de propagação de um pulso em uma corda depende da tração e da **DENSIDADE LINEAR** da corda.
- 8) Um pulso representa uma perturbação no meio, o qual pode ser uma corda, que transporta **ENERGIA**, porém não transporta **MATÉRIA**.

Seção 5

“Com a onda toda!”

Figura 1 – As ondas se propagando em uma corda.



Fonte: O autor.

Ondas constituem um dos principais assuntos da Física [1] e a compreensão desse conceito se faz necessário para o entendimento de ondulatória, óptica física e eletromagnetismo. Define-se onda como sendo uma perturbação que se propaga no espaço vazio (vácuo) e em meios materiais. As ondas que necessitam de um meio para se propagarem são classificadas como ondas mecânicas e aquelas que se propagam no vácuo são classificadas como ondas eletromagnéticas. Assim, de acordo com a necessidade de um meio de propagação ou não da onda, atribui-se a onda a natureza: mecânica ou eletromagnética [1]. Também é possível classificar as ondas de acordo com a direção de propagação da perturbação. Quando a perturbação é na direção transversal, como na figura 1, a onda é dita transversal, caso ela seja paralela a direção de propagação, diz-se que ela é longitudinal [2]. As ondas mecânicas são classificadas em ondas transversais, como as formadas no experimento da figura 1, ou longitudinais. As ondas eletromagnéticas são apenas transversais.

Nesta seção será dado ênfase às ondas transversais, como a onda produzida na corda mostrada da figura 1, onde a corda ao ser agitada para cima e para baixo, repetidas vezes, produz uma onda transversal. É possível notar

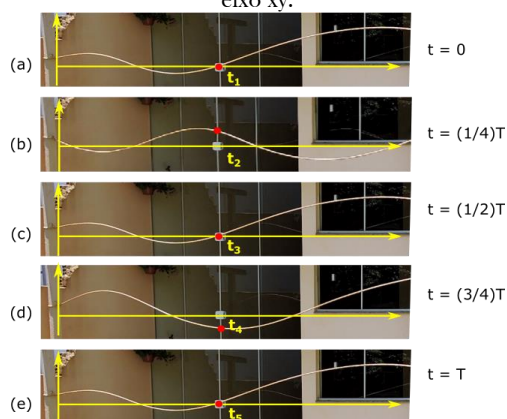
que nesta figura a onda aparece em um plano, isto se deve ao fato de que o movimento da mão que produz a oscilação está alinhado a esse plano, ou seja, a mão sobe e desce em uma linha paralela e sobre esse plano. Neste caso, como a oscilação e a onda estão em único plano, diz-se que a onda se propaga neste plano e a onda está contida nesse plano. Há ondas transversais que não estão contidas em um único plano apenas e para o estudo presente, não será dado enfoque a essas ondas e sim as que se propagam em um único plano. De qualquer forma, ondas transversais são ondas que se propagam na direção perpendicular à direção de perturbação que a produz.

É possível analisar uma onda transversal, como a onda produzida em uma corda, sobre os seguintes aspectos:

A) Posição de um ponto da corda em momentos diferentes e específicos

Neste caso, analisa-se o movimento oscilatório para cima e para baixo de um ponto específico da corda. Para isso, admite-se um sistema de coordenadas xy , a oscilação desse ponto da corda ocorrendo no eixo y , ou seja, na direção vertical (movimento para cima e para baixo) e a onda contida e se propagando no plano xy , como indicado na figura 2.

Figura 2- Os instantâneos do movimento de uma onda no eixo xy.



Fonte: O autor.

Observa-se o ponto da corda, marcado na figura 2 com um círculo vermelho, em cinco momentos diferentes em tempos específicos, ou seja, em cinco instantâneos diferentes do movimento do ponto em estudo. Devido à limitação do aparelho de filmagem não foi possível a captura dos instantâneos em que se obtivesse um padrão de ondas, porém, para a análise em questão, de um ponto específico da corda, tal observação não acarretará na alteração da ideia central da proposta.

Pode-se observar ainda na figura 2, para qualquer instantâneo, que a forma assumida pela corda é senoidal, isto é, tem a forma de uma função seno, se propagando no plano xy. Não haveria problemas se fosse admitido que a forma assumida pela corda fosse cossenoidal [1]. Porém, neste estudo vamos admitir a forma da onda na corda como senoidal.

A partir destes cinco instantâneos mostrados na figura 2, considerando que a posição do ponto não muda em relação ao eixo x, pode-se observar que o ponto da corda marcado com um círculo vermelho não se desloca no eixo x, mas se desloca na vertical, ou seja, somente muda de posição em relação ao

eixo y. É possível observar que: em (a) o ponto se encontra em $y = 0$ e x fixo, ou seja, neste instantâneo ele tem deslocamento zero; em (b) o ponto está na posição $y = +y_{\max}$ para cima e x fixo, ou seja, neste instantâneo ele tem deslocamento máximo para cima; em (c) o ponto se encontra em $y = 0$ novamente e x fixo, ou seja, neste instantâneo ele tem deslocamento zero; em (d) o ponto está na posição $y = -y_{\max}$ para baixo e x fixo, ou seja, neste instantâneo ele tem deslocamento máximo para baixo; em (e) o ponto se encontra em $y = 0$ mais uma vez e x fixo, ou seja, neste instantâneo ele tem deslocamento zero.

Assim, depois de completar uma subida e uma descida, o ponto volta à posição inicial, isto é, ele oscila periodicamente em uma linha reta na direção vertical, paralela ao eixo y e em torno do ponto de equilíbrio. Isto é semelhante ao que foi mostrado na seção 3 e figura 2 para o movimento do pêndulo que imprimiu uma linha reta quando a folha sobre ele estava parada.

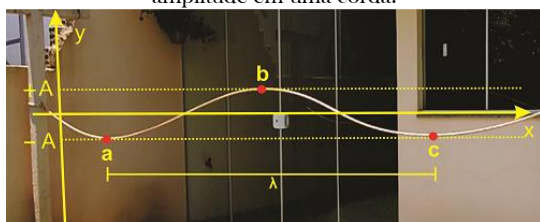
B) Movimento do ponto ao longo de um intervalo de tempo

Ainda, quando se analisa os instantâneos do ponto da corda, mostrados na figura 2 desta seção, e se faz uma comparação com a figura 3 da seção 3, supondo possível registrar o movimento do ponto da corda marcado em vermelho ao longo de um intervalo de tempo, ou seja, em função do tempo, esse registro seria uma curva de mesmo formato, ou seja, em ambos os casos são curvas senoidais.

Portanto, ao analisar o movimento descrito pelo ponto da corda marcado em vermelho, ou por qualquer outro ponto da corda, este desenvolve um movimento harmônico simples (MHS).

Como dito anteriormente, os instantâneos da figura 2, ou ainda outro instantâneo qualquer como o apresentado na figura 3, mostram a forma assumida pela corda, quando a onda passa pela mesma, de modo que é possível definir algumas grandezas que caracterizam a onda através da corda.

Figura 3 - A representação de comprimento de onda e amplitude em uma corda.



Fonte: O autor.

Ao observar a figura 3, tem-se três pontos demarcados: a , b e c . O ponto b é um ponto de máximo positivo, ou extremo para cima, assumido pela corda no instantâneo fotografado enquanto a onda a percorre. Esse ponto b é denominado de crista da onda. Por outro lado, os pontos a e c são pontos de máximo negativo, ou extremos para baixo, assumido pela corda no instantâneo fotografado enquanto a onda a percorre. Os pontos a e c são denominados de vales da onda.

Ainda, a partir da observação da figura 3, considera-se também, a distância entre a linha de referência central ao ponto de uma crista da onda, ou ao ponto de um vale da onda, assumido pela corda, e define-se amplitude da onda, representado pela letra A .

A amplitude de uma onda é sempre tomada como o módulo do deslocamento máximo positivo (extremo para cima), ou negativo (extremo para baixo), dos elementos a partir da linha de referência quando a onda passa por eles [1]. A amplitude na figura 3 é a distância do ponto: a , b ou c à linha de referência que foi adotada como o eixo x .

Usando mais uma vez a figura 3, considera-se também a distância entre duas cristas ou dois vales da onda como sendo o comprimento de onda, representado pela letra grega λ [3]. Na figura 3, o comprimento de onda está representado entre os pontos a e c , portanto, entre dois vales da onda que atravessa a corda.

C) Movimento de qualquer ponto da corda em qualquer tempo

Uma vez que se tem a ideia de como um ponto escolhido na corda, como o marcado em vermelho na figura 2, se comporta ao ser atravessado por uma onda (MHS). Pode-se generalizar este movimento para todos os pontos da corda a qualquer tempo e, desta forma, descrever a forma da onda se propagando em uma corda. Uma representação da onda que se propaga na corda é dada pela função senoidal que está indicada na equação 1,

$$y(x, t) = y_m \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - ft \right). \quad (1)$$

Na equação 1, $y(x, t)$ representa o deslocamento transversal de qualquer ponto da corda, em qualquer tempo; λ é o comprimento de onda; f é a frequência linear do movimento ondulatório que é um MHS.

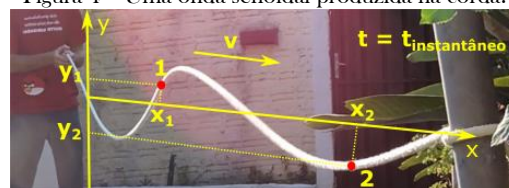
Ao imaginar uma onda senoidal percorrendo uma corda existiriam várias imagens semelhantes às mostradas na figura 4. Neste caso, ela é um instantâneo de qualquer ponto da corda, se propagando no sentido positivo do eixo x com velocidade v . Se fosse possível assistir o vídeo, ou ver alguém oscilar a corda ao vivo, certamente seria possível ver a onda se propagar, assumindo em cada instante a forma semelhante como mostrada na figura 4.

Utilizando a figura 4, se for escolhido um ponto da corda e marcá-lo com um círculo em vermelho, em um determinado instante t , que no caso é o tempo em que foi tirada a foto (instantâneo), o deslocamento y do ponto marcado da corda situado na posição x é dado pela equação 1.

Assim, como a equação 1 está escrita em termos da posição x , ela pode ser usada para calcular os deslocamentos de todos os

elementos da corda para qualquer tempo. Pode-se observar que o ponto da corda demarcado como x_2 , para o mesmo instantâneo, tem um $y = y_2$. Portanto, é possível dizer qual é a posição da onda em qualquer instante de tempo e como esta forma varia quando a onda se move ao longo da corda [1].

Figura 4 - Uma onda senoidal produzida na corda.



Fonte: O autor.

Referências

- [1] HALLIDAY, Resnick. WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física**. Volume 2. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- [2] HEWITT, Paul G. **Física Conceitual**. 9ª ed. São Paulo: Bookman, 2002.
- [3] NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica**. Volume 2. 4ª ed. Edgard Blucher, 2002.

1-						T	E	M	P	O			
2-	T		R	A	N	S	V	E	R	S	A	I	S
3-								C	I	M	A		
4-	I	N	S	T	A	N	T	Â	N	E	O	S	
5-			E	L	E	M	E	N	T	O			
6-				S	E	N	O	I	D	A	L		
7-								C	O	R	D	A	
8-	P	E	R	T	U	R	B	A	Ç	Ö	E	S	
9-			A	N	A	L	I	S	A	R			

Seção 6

“Uma onda parada?”

Figura 1 – Uma onda estacionária.



Fonte: O autor.

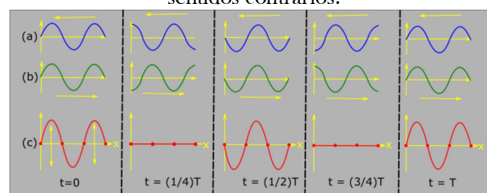
Quando uma corda está presa nas duas extremidades, como as cordas de um violão, ou até mesmo quando uma das extremidades está presa, mas a outra tensionada por uma determinada massa, como a corda do experimento mostrado em perspectiva na figura 1, em ambos os casos, ao vibrar a corda haverá ondas atravessando a mesma. Estas sofrerão reflexões nas duas extremidades, fazendo com que viajem nos dois sentidos da corda, conforme ilustrado na figura 5 da seção 4.

Estas ondas superpostas sofrem interferência, de acordo com o princípio da superposição, como foi visto e ilustrado na figura 7 (seção 4) para diferentes pulsos em cordas com uma extremidade presa [1]. Vale observar que no caso do piano, do violão e do experimento da figura 1, o efeito da interferência das ondas ocorre para as duas extremidades fixas independentemente, e ainda, no caso específico do experimento da figura 1, trata-se de uma aproximação.

A figura 2 mostra duas ondas: em (a) cinco instantâneos de uma onda se propagando para a esquerda, em (b) os cinco instantâneos respectivos de outra onda se propagando para a direita, em (c) representa-se os cinco instantâneos respectivos do movimento destas

ondas para cada ponto da corda, ou seja, a superposição das duas ondas. [2]

Figura 2 – Cinco instantâneos de ondas se deslocando em sentidos contrários.

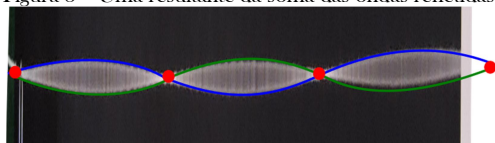


Fonte: O autor.

Na figura 2, ainda, é possível observar a existência de pontos, os quais estão demarcados com um círculo vermelho, onde a corda permanece imóvel. Os pontos imóveis na corda são denominados **nós**. Nas regiões entre dois nós vizinhos existem pontos onde as resultantes da superposição das ondas possuem amplitude máxima positiva ou amplitude máxima negativa. A estes pontos onde a amplitude é máxima são denominados **antinós** ou **ventres** [2]. Em uma situação real, a resultante da soma das ondas apresentadas na figura 2 está representada na figura 3.

Assim, a situação ilustrada e idealizada na figura 2 se assemelha ao que está mostrado na figura 1 e figura 3.

Figura 3 - Uma resultante da soma das ondas refletidas.



Fonte: O autor.

Ao se manter uma corda esticada e colocá-la para oscilar em MHS de pequena amplitude tem-se: duas ondas que se propagam pela corda com frequência e direção iguais e sentidos contrários gerando um padrão que é idealizado na figura 2 e representa um padrão de onda estacionária. Este padrão da figura 2 pode ser comparado às situações reais mostradas nas figuras 1, 3 e 4.

Porém, estes padrões têm número de nós e ventres diferentes porque são produzidos com certas frequências denominadas **frequências de ressonância** da corda [1]. A cada frequência de ressonância que produz ondas estacionárias dá-se o nome de modo de oscilação [2].

Assim, à menor frequência de ressonância denomina-se **frequência fundamental**, representado por f_1 . A frequência fundamental produz o padrão mostrado na figura 4 (a), que é chamado de **modo fundamental** de vibração ou de **primeiro harmônico** [1].

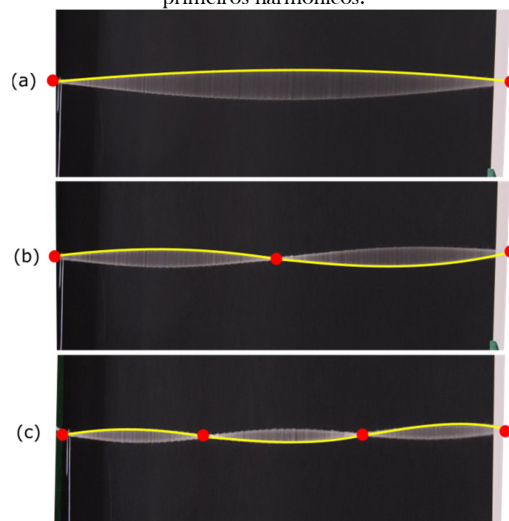
A figura 4 (b) representa a segunda menor frequência de ressonância. Este modo de oscilação tem o dobro da frequência fundamental, o qual é representado por f_2 , e também chamado de **segundo harmônico**. Em 4 (c) tem-se a terceira menor frequência, a qual é três vezes maior que a frequência fundamental, representada por f_3 , e também chamado de **terceiro harmônico** [1]. A mesma

ideia pode ser estendida para o quarto, quinto harmônico, etc..

A todo o conjunto de frequências de ressonância de uma determinada corda, que produzem seus respectivos modos de oscilação, é denominado **espectro de ressonância** da corda [1].

Ao analisar o segundo harmônico de uma onda estacionária a partir de uma fotografia, ou seja, de um instantâneo do modo de oscilação ou padrão da onda estacionária na corda no respectivo harmônico, é possível observar que este harmônico corresponde a um comprimento de onda inteiro específico. A representação do comprimento de onda inteiro específico é indicada na figura 4 (b) pela linha desenhada em amarelo na foto.

Figura 4 - Um instantâneo de uma onda nos três primeiros harmônicos.



Fonte: O autor.

Desta forma, lembrando que a corda do experimento tem comprimento fixo de valor L , é fácil perceber que no primeiro harmônico a corda de comprimento L contém apenas metade de um certo comprimento de onda específico, o que pode ser expresso como

$(\lambda_1/2)$. Isto pode ser observado na figura 4 (a) pela linha desenhada em amarelo na foto.

Seguindo esta ideia, fazendo-se a mesma observação para os outros dois harmônicos representados na figura 4, percebe-se que:

- no segundo harmônico a corda de comprimento L contém duas metades de um certo comprimento de onda, o que pode ser expresso como $(2\lambda_2/2)$; nota-se que esse comprimento de onda é diferente do primeiro harmônico, observando a linha desenhada em amarelo na foto da figura 4 (b);
- no terceiro harmônico a corda de comprimento L contém três metades de um certo comprimento de onda específico, o que pode ser expresso como $(3\lambda_3/2)$; observa-se que esse comprimento de onda é diferente do primeiro e segundo harmônicos, observando a linha desenhada em amarelo na foto da figura 4 (c);

Desta forma, para uma corda com comprimento L qualquer, uma onda estacionária somente poderá existir se satisfizer à equação 1 [1],

$$L = n \frac{\lambda_n}{2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) . \quad (1)$$

Para o experimento apresentado na figura 1, existem ondas na corda que não possuem os comprimentos de ondas representados pela equação 1, portanto, tais ondas não podem formar ondas estacionárias com nós e ventres.

A equação 1 ilustra as ondas estacionárias formadas pelo experimento da figura 3, onde a corda tem um comprimento L fixo e há a formação de ondas com certos comprimentos de onda específicos correspondentes aos $n = 1, 2$ e 3 , respectivamente [1].

A velocidade de propagação da onda na corda, além da forma vista na equação 1 da seção 4 onde foi mostrada sua dependência com a tensão e densidade linear da corda, pode ser expressa em termos do comprimento de onda e respectiva frequência, como é mostrada na equação 2 [2],

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

Na equação 2, o módulo da velocidade de propagação da onda na corda é fixa e constante. Isso pode ser admitido porque a densidade linear da corda não se modifica, ou seja, é a mesma corda, e também porque se escolhe uma tração fixa.

Então, considerando o módulo da velocidade de propagação fixo, de acordo com o que foi exposto anteriormente, pode-se reescrever a equação 2, conforme expresso na equação 3,

$$f = \frac{v}{\lambda} . \quad (3)$$

Desta forma, para uma série harmônica produzida em uma corda com uma velocidade de propagação fixa, como no experimento da figura 4, ou ainda figuras 1 e 3, nos quais se usou uma corda de densidade linear específica e uma tração devido à força peso, foi possível observar vários modos de oscilação, estes

correspondendo a uma série de valores possíveis de λ_n e uma série de respectivas frequências f_n , e que pode ser generalizado na equação 4,

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) . \quad (4)$$

O comprimento de onda, λ_n , da equação 4 pode ser escrito a partir da equação 1 e, portando, dado pela equação 5,

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) . \quad (5)$$

Considerando a equação 4 pode-se determinar a menor frequência, f_1 , $n = 1$ dada pela equação 6,

$$f_1 = \frac{v}{2L} \quad (6),$$

e que corresponde ao maior comprimento de onda, $\lambda_1 = 2L$, este determinado pela equação 5.

O valor obtido a partir da equação 6 é denominado **frequência fundamental**, porque corresponde ao menor n admitido na equação 1, ou seja, L igual à metade do respectivo comprimento de onda, ou seja, λ_1 . As demais

frequências das ondas estacionárias, então, podem ser expressas da forma mostrada nas equações 7 e 8:

$$f_2 = \frac{2v}{2L} = 2 \left(\frac{v}{2L} \right); \quad n = 2 \quad (7)$$

$$f_3 = \frac{3v}{2L} = 3 \left(\frac{v}{2L} \right); \quad n = 3 . \quad (8)$$

Assim, é possível verificar que os valores apresentados pelas equações 7 e 8 são múltiplos inteiros da frequência fundamental f_1 , tais como $2f_1$, $3f_1$, $4f_1$, ...

Generalizando as observações feitas anteriormente, chega-se à equação demonstrada em 9,

$$f_n = n \frac{v}{2L} \quad (n=1, 2, 3, \dots) , \quad (9)$$

ou simplesmente, à expressão da equação 10,

$$f_n = n f_1 \quad (n=1,2,3) . \quad (10)$$

As frequências obtidas a partir das equações 9 e 10 são denominadas **harmônicos**, e a série que contém todos os valores de frequências para uma corda é chamada **série harmônica** [1].

Uma situação real

Ao considerar uma situação experimental, usando o aparato do experimento mostrado na figura 1, na qual são utilizados dois fios diferentes e dois corpos diferentes, isto é, dois objetos de massas diferentes, os quais proporcionam tensões diferentes nos fios por causa da força gravitacional, tem-se os dados apresentados na tabela 1. Os fios são considerados ideais. O fio 1 utilizado neste caso é o nylon 0,45 mm e o fio 2 nylon 0,60 mm. O valor da aceleração da gravidade utilizada para os cálculos foi $g = 9,78 \text{ m/s}^2$ [3].

Tabela 1 - Valores da velocidade de propagação da onda em duas cordas diferentes.

	μ (kg/m)[4]	T (N)	v (m/s)
fio 1	$2,003 \cdot 10^{-4}$	0,1956	31,24
fio 1	$2,003 \cdot 10^{-4}$	0,5868	54,12
fio 2	$3,235 \cdot 10^{-4}$	0,1956	24,58
fio 2	$3,235 \cdot 10^{-4}$	0,5868	42,59

Fonte: do autor

A partir dos dados apresentados na tabela 1, é possível verificar que:

- Quando o fio 1 está esticado com maior intensidade, isto é, coloca-se um corpo de massa maior, a tensão na corda AUMENTA (aumenta/diminui), em consequência a velocidade de propagação de uma onda será MAIOR (maior/menor) neste fio;
- Da mesma forma, ao considerar os dois fios diferentes, fio 1 e fio 2, mas mantendo-se a mesma tensão no fio, isto é, o corpo utilizado em ambos os fios é o mesmo, pode-se afirmar que o fio 2 (1/2), cuja densidade linear é maior que a do fio 1 (1/2), tem velocidade de propagação de onda MENOR (menor/menor) do que o fio 1 (1/2).

Assim, é possível concluir a partir das observações feitas na tabela 1, que quanto MAIOR (maior/menor) a **densidade** do fio, MENOR (maior/menor) será a velocidade de propagação de um pulso ou de uma onda neste fio. E quanto MAIOR (maior/menor) a **tensão** aplicada no fio, MAIOR (maior/menor) será a velocidade de propagação de um pulso ou de uma onda.

Com base nos dados fornecidos na tabela 1, e considerando que o comprimento da corda utilizada no experimento seja $L = 0,75 \text{ m}$, é possível obter o espectro de frequências para as cordas 1 e 2 a partir da equação 8. O resultado do experimento está mostrado na tabela 2.

Tabela 2 - Valores das frequências de ressonância de duas cordas diferentes.

	fio 1	fio 1	fio 2	fio 2
	$\mu = 2,003 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}$	$\mu = 2,003 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}$	$\mu = 3,235 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}$	$\mu = 3,235 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}$
	$T = 0,1956 \text{ N}$	$T = 0,5868 \text{ N}$	$T = 0,1956 \text{ N}$	$T = 0,5868 \text{ N}$
f_1	20,8 Hz	36,08 Hz	16,38 Hz	28,40 Hz
f_2	41,6 Hz	72,16 Hz	32,76 Hz	56,8 Hz
f_3	62,4 Hz	108,24 Hz	49,12 Hz	85,2 Hz
f_4	83,2 Hz	144,32 Hz	65,52 Hz	113,6 Hz
f_5	104 Hz	180,4 Hz	81,9 Hz	142 Hz

Fonte: do autor

A partir dos dados apresentados na tabela 2, é possível verificar que:

- Ao se utilizar um mesmo fio, quanto maior a tensão aplicada no fio, isto é, ao se utilizar um corpo de massa maior para puxar o fio, **MAIOR** (maior/menor) será a frequência fundamental para este fio.
- Ao se utilizar dois fios de densidades lineares diferentes, ao se aplicar a mesma tensão em cada um dos fios, isto é o mesmo corpo para puxar o fio, quanto maior a densidade linear do fio, **MENOR** (maior/menor) será a frequência fundamental para esta tensão.

Referências

- [1] YOUNG, D. Hugh. FREEDMAN Roger A.. **Física II**. 10ª ed. São Paulo: Ed. Pearson Addison Wesley, 2003.
- [2] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos da Física**. Volume 2. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- [3] LOPES, Wilson. **Variação da aceleração da gravidade com a latitude e altitude**. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 25, n. 3: p. 561-568, dez. 2008. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/issue/view/1160>. Acesso em: 28 Nov. 2015.
- [4] INSTITUTO DE FÍSICA DA USP. **Tabela de densidades lineares de fios de nylon**. Disponível em: <http://portal.if.usp.br/labdid/pt-br/tabelas-e-constantes>. Acesso em: 28 Nov. 2015.

Seção 7

“Voltando ao início”

Figura 1 - O monocórdio de Pitágoras.



Fonte: O autor.

Ao se fazer uma retrospectiva das seções anteriores, é possível perceber relações dos conceitos apresentados a um instrumento de cordas, como o violão, o piano, ou até mesmo o monocórdio apresentado na figura 1. O monocórdio, o qual será tratado na presente seção, será considerado como base de exemplo de aplicação dos conceitos da ondulatória, vistos em seções anteriores, como as propriedades das ondas mecânicas e o comportamento de uma corda ou fio preso nas duas extremidades, bem como a formação das notas musicais a partir das relações com os comprimentos das cordas. Porém, os conceitos e fundamentações observadas na presente seção podem ser aplicados a todos os demais tipos de instrumentos de cordas, independentes da forma como é construído e o método de produção do som (percutidas, friccionadas ou dedilhadas).

O monocórdio, como o apresentado na figura 1, consiste em um instrumento confeccionado basicamente por uma corda, a qual pode ser de aço ou nylon, por exemplo, onde a mesma é presa em uma das extremidades e tensionada na outra.

Um sistema onde uma corda é presa em uma das extremidades e tensionada em outra por uma determinada massa, foi apresentado na seção 6. Como foi visto, a partir do experimento da corda, estudou-se a formação de ondas estacionárias em uma corda presa nas extremidades, sendo que uma das extremidades estava fixa e a outra possuindo uma determinada massa, a qual era variável e proporcionava tensão à corda.

O monocórdio, como o mostrado na figura 1, foi inventado por Pitágoras (580-497 a.C.), um importante matemático e filósofo grego da Antiguidade [1]. Segundo conta a lenda, ao passar em frente a uma oficina de um ferreiro, Pitágoras percebeu que as batidas de martelos de diferentes pesos produziam sons que eram agradáveis ao ouvido e se combinavam muito bem [2].

Pitágoras utilizou o monocórdio para estudar a relação dos comprimentos das cordas com o som produzido por estas, tentando encontrar as relações onde os sons eram mais agradáveis aos ouvidos. Seu monocórdio consistia basicamente de uma corda, cujas extremidades eram tensionadas por objetos de determinada massa, apoiada sobre dois

cavaletes em uma mesa. Esta mesa também possuía um terceiro cavalete móvel, cuja função era dividir a corda em frações perfeitas do comprimento original [3]. A figura 2 apresenta uma gravura onde se tem uma representação de Pitágoras realizando seus estudos sobre o som formado pelas cordas em um monocórdio.

Figura 2 - Pitágoras realizando seus estudos no monocórdio.



Fonte: [4].

Foi a partir dos seus estudos, com o uso do monocórdio, que Pitágoras chegou às 7 notas musicais conhecidas no ocidente (dó-ré-mi-fá-sol-lá-si-dó). Ele percebeu que quando dividia a corda do monocórdio em $\frac{2}{3}$ do seu tamanho original, ele obtinha um intervalo musical de quinta (exemplo: dó-sol). Ao dividir essa mesma corda em $\frac{3}{4}$ do tamanho original ele obtinha o intervalo musical de quarta (exemplo: dó-fá). E quando ele dividia a corda na metade do comprimento ele obtinha o intervalo de oitava (exemplo: dó₁-dó₂). Para a obtenção das demais notas Pitágoras utilizou o ciclo das quintas, o qual consistia em encontrar as notas **dó-ré-mi-fá-sol-lá-si-dó**, através da superposição de quintas ascendentes. A utilização do ciclo das quintas proporciona a seguinte ordem das notas musicais: **dó-sol-ré-lá-mi-si** [3].

As relações entre as notas musicais e o comprimento da corda encontrada por Pitágoras estão descritas na tabela 1.

Tabela 1-Relação pitagórica entre comprimento de uma corda e a nota emitida.

Notas	Dó	Ré	Mi	Fá	Sol	Lá	Si	Dó
Comprimento da corda em relação à Dó	1	$\frac{8}{9}$	$\frac{64}{81}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{16}{27}$	$\frac{128}{243}$	$\frac{1}{2}$

Fonte: [3].

Por exemplo, se a corda que Pitágoras utilizou possuísse 1 m de comprimento entre os pontos de apoio, ao se dividir ($\frac{64}{81}$) obtém-se o valor de 0,79. Isto é, ao se diminuir o comprimento da corda para 0,79 m, é obtida a nota Mi. Isto pode ser observado para qualquer razão descrita na tabela 1.

É importante destacar que a escala obtida por Pitágoras foi baseada nos comprimentos da corda. Porém, a associação da frequência a uma nota musical, a qual é utilizada nos dias de hoje para afinar um instrumento musical, foi introduzida por Galileu Galilei (1564-1642) [3].

Após a construção da escala musical por Pitágoras, houve muitas outras tentativas de construção de escalas musicais, as quais possuísem sonoridades agradáveis aos ouvidos. Gioseffo Zarlino (1517-1590), teórico musical italiano, sistematizou a escala de Pitágoras buscando os intervalos por meio da soma de médias harmônicas e aritméticas a partir de uma nota fundamental. Ou seja, Zarlino se utilizou de passos matemáticos para chegar à escala musical, onde as relações entre os comprimentos de cordas, a partir das

proporções encontradas por ele, estão apresentadas na tabela 2 [3].

Tabela 2 - Relação natural entre comprimento de uma corda e a nota emitida.

Notas	Dó	Ré	Mi	Fá	Sol	Lá	Si	Dó
Comprimento da corda em relação à Dó	1	$\frac{8}{9}$	$\frac{4}{5}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{3}{5}$	$\frac{8}{15}$	$\frac{1}{2}$

Fonte: [3].

Ao se fazer uma comparação entre as relações de Pitágoras e Zarlino, utilizando como exemplo uma corda de 1 m de comprimento entre os pontos da corda que estão apoiados no cavalete, é possível obter os valores apresentados na tabela 03, onde estão representados os comprimentos das cordas em metros para determinada nota musical.

Tabela 3 - Comparação entre as relações de Pitágoras e Zarlino.

Nota	Pitágoras		Zarlino	
	relação	Comprimento (m)	relação	Comprimento (m)
Dó	1	1,000	1	1,000
Ré	8/9	0,889	8/9	0,889
Mi	64/81	0,790	4/5	0,800
Fá	3/4	0,750	3/4	0,750
Sol	2/3	0,667	2/3	0,667
Lá	16/27	0,593	3/5	0,600
Si	128/243	0,527	8/15	0,533
Dó	1/2	0,500	1/2	0,500

Fonte: O autor.

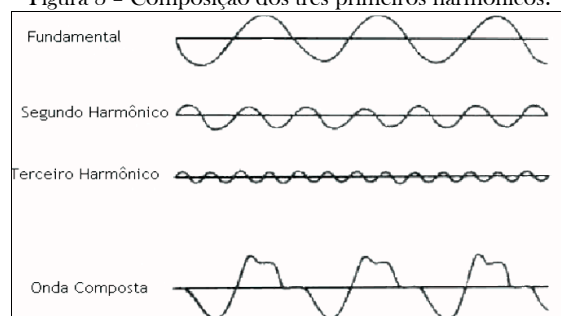
É possível perceber que a escala adotada por Zarlino é muito próxima à elaborada por Pitágoras, porém as relações com os comprimentos são apresentadas de uma forma mais simples para construção da escala. A relação das divisões feitas por Zarlino apresentada na tabela 2 foi a utilizada para a

construção do monocórdio de Pitágoras apresentado na figura 1.

Composição harmônica

Ao se dedilhar a corda de um monocórdio ou de um violão, esta irá oscilar. Como esta corda está confinada entre dois pontos, a onda irá sofrer inúmeras reflexões e múltiplas interferências, como visto na seção 6. Ao se tirar um instantâneo de uma corda vibrando é possível observar que a corda possui um formato diferente de uma onda senoidal, como visto na seção 5, logo, ela possui uma função de onda mais complexa. Quando a corda de um instrumento vibra, sua vibração resultante é a combinação do harmônico fundamental juntamente com vários sobretons; desta forma, o movimento da corda será a superposição de vários modos normais. A figura 3 ilustra a superposição de 3 harmônicos.

Figura 3 - Composição dos três primeiros harmônicos.

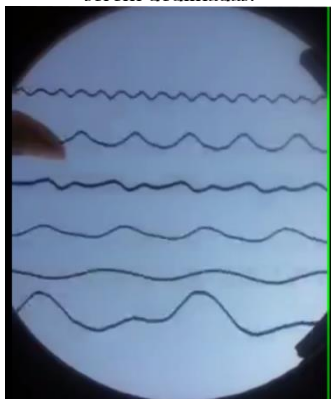


Fonte: [8].

A composição harmônica da corda também depende da forma com que esta foi inicialmente perturbada, isto é, se a corda for tocada próximo à abertura da caixa de ressonância, a corda terá uma determinada composição harmônica. Já se a corda for tocada próximo à outra extremidade, por exemplo, a sua composição harmônica terá um formato

diferente [5]. A composição harmônica das cordas de um violão ao serem dedilhadas é ilustrada na figura 4.

Figura 4 – Um instantâneo das cordas de um violão ao serem dedilhadas.



Fonte: [6].

Timbre

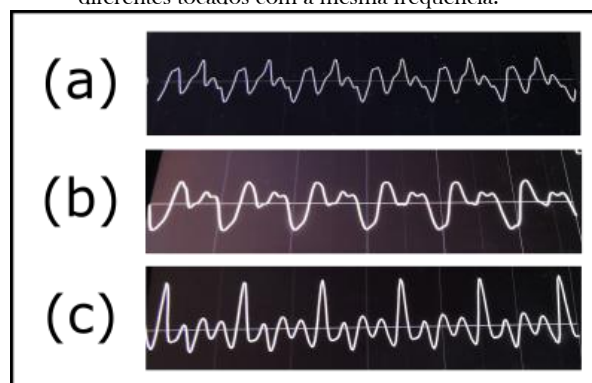
Ao se produzir duas notas musicais, as quais possuam a mesma frequência, através de dois instrumentos diferentes, como o monocórdio e o violão rudimentar, apresentados na seção 1, estas possuem a mesma frequência fundamental, porém, são percebidas de maneiras diferentes pelo ouvido. Isto ocorre devido à presença de intensidades diferentes dos diversos harmônicos, ou mesmo ausência de alguns deles.

O que vai determinar o número de harmônicos que acompanhará uma nota musical, além do tamanho e tensão da corda, é o tipo de corda utilizada, bem como a forma de confecção do instrumento musical. Desta forma, duas notas serão idênticas se forem tocadas por dois instrumentos musicais que possuam as mesmas características. Por exemplo, dois violões produzirão a mesma nota se as cordas utilizadas forem iguais (duas cordas de nylon com mesma densidade linear, por exemplo) e as dimensões, bem como o tipo de

madeira utilizada para sua confecção sejam idênticas.

À diferença do som produzido pelos instrumentos musicais ao tocarem uma nota musical cuja frequência é a mesma dá-se o nome de **timbre** do instrumento. A figura 5 representa o timbre de três instrumentos diferentes tocando a mesma nota, ou seja, a mesma frequência, onde em (a) é a representação do timbre do violino, em (b) do piano e em (c) do trompete.

Figura 5 – os harmônicos formados por três instrumentos diferentes tocados com a mesma frequência.



Fonte: O autor.

Referências

- [1] **Pitágoras.** Disponível em: <http://pensador.uol.com.br/autor/pitagoras/>. Acesso em: 25 dez. 2015.
- [2] SOARES, L. C. **O monocórdio de Pitágoras.** Disponível em: <<http://www.ghc.usp.br/server/Sites-HF/Lucas-Soares/Home.html>>. Acesso em: 21 mar. 2015.
- [3] RIBEIRO JÚNIOR, I. S.; CROCHIK, L. . A Construção de Escalas Musicais e Instrumentos Musicais de Baixo Custo Como Recurso Didático Para o Ensino de Física Ondulatória. In: Simpósio Nacional de Ensino de Física, 2009, Vitoria. **Anais do XVIII SNEF**, 2009. Disponível em: <http://www.cienciamao.usp.br/dados/snef/_aconstrucaodeescalasmusi.trabalho.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2015.
- [4] HERRERO, Raul. Pitágoras en el momento del triunfo del cristianismo. Disponível em: <<http://raulherrero.blogia.com/2006/071801-pitagoras-en-el>>

3 - Ao ler o texto, quando o autor descreve “aumentar a altura”, ele se refere:

- () aumentar a amplitude da onda.
 (X) aumentar a frequência da onda.
 () aumentar o comprimento de onda da corda.

4- Ao se fazer o procedimento proposto no texto de se enrolar uma corda com um fio, faz com que:

- (X) a densidade linear da corda aumente.
 () a densidade linear da corda diminua.
 () nada se altera.

Monocórdios e os violões rudimentares: um breve relato!

5- Com base no que você estudou no decorrer das seções anteriores, juntamente com as observações e investigações feitas nos instrumentos: monocórdios e violões rudimentares, faça um breve relato sobre os conceitos físicos envolvidos ao tocá-los.

QUESTÃO DE LIVRE RESPOSTA

Algumas fórmulas e os instrumentos de corda!

6 - Considerando que a nota lá da corda do instrumento que o *luthier* está desenvolvendo será a sua nota fundamental, calcule a tensão com a qual o equipamento deverá proporcionar à corda para que esta mantenha a afinação.

RESPOSTA:

Sabendo que

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \text{ e } f_1 = \frac{v}{2L}$$

$$\text{tem-se } f_1 \cdot 2L = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad \text{isso implica:} \quad 440 \cdot 2 \cdot 0,7 = \sqrt{\frac{T}{1,0 \cdot 10^{-5}}}$$

(x²)

$$(616)^2 = \frac{T}{1,0 \cdot 10^{-5}} \quad \text{donde:} \quad 379.456 \times 1,0 \cdot 10^{-5} = T \quad \text{portanto:}$$

$$T = 3,79 \text{ N}$$

7 - Com base no que foi visto na seção 7 sobre o monocórdio e usando a tabela 2 também da seção 7, onde deverá conter um traste para demarcar a nota ré:?

RESPOSTA:

Como a nota Ré é a 4ª. nota depois da fundamental:

Lá - Si - Dó - Ré

Vemos que a 4ª. nota tem razão $\frac{3}{4}$, logo, se a corda tem 0,70 m, $\frac{3}{4}$ dessa medida é 0,525 m

A marcação tem que ser feita a 0,525 m do traste, retirando 0,175 m do tamanho total da corda.

Dê sua opinião, pois ela é importante!

8 - Neste espaço, você poderá dar a sua contribuição sobre as aulas presenciadas referentes às ondas mecânicas. Primeiramente, tente expressar sobre o seu aprendizado dizendo o que você aprendeu e se você consegue relacionar o funcionamento de um violão ou um monocórdio com conceitos de Física. Em seguida, descreva o que você mais gostou nas aulas, e também o que gostou menos.. Também, descreva se você acha esse modelo de aula interessante, ou qual modelo seria o mais apropriado. Enfim, esta parte é livre para sua participação, insira suas críticas, elogios, sugestões de possíveis melhoras, etc. Fique à vontade!

QUESTÃO DE LIVRE RESPOSTA

Referências

[1] YOUNG, D. Hugh. FREEDMAN Roger A.. **Física II**. 10ª ed. São Paulo: Ed. Pearson Addison Wesley, 2003.

Muito obrigado!

TEXTOS DE APOIO AO EDUCANDO

MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA - POLO 35 - UEPG

Luís Alexandre Rauch¹, Luiz Fernando Pires², André Maurício Brinatti²

¹ Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física / Universidade Estadual de Ponta Grossa/ UEPG, PR, Brasil

² Departamento de Física/ Universidade Estadual de Ponta Grossa/ UEPG, PR, Brasil

Colégio _____

Nome: _____

Nas cordas dos instrumentos musicais

2016



APRESENTAÇÃO

O presente conjunto de textos é parte do Produto elaborado pelo mestrando Luís Alexandre Rauch, sob orientação do Prof. Dr. André Maurício Brinatti e coorientação do Prof. Dr. Luiz Fernando Pires, no Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física – Mestrado Profissional, da Universidade Estadual de Ponta Grossa, vinculado ao Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física – MNPEF, da Sociedade Brasileira de Física – SBF, como polo 35, sendo referente a uma sequência de aulas como unidade didática, a qual contempla o estudo das ondas mecânicas em cordas.

Este conjunto de textos consiste em oferecer apoio ao educando, permitindo a sua utilização como forma de revisão e contam com exercícios diferenciados, tendo por objetivo auxiliar na assimilação dos conteúdos estudados, possibilitando avanços no processo de ensino-aprendizagem a partir do mesmo sobre o tema. Além disso, os textos são também utilizados juntamente com materiais didáticos constante no Produto que são apresentados em cada seção. À medida que se avança nas seções, novos conhecimentos serão agregados.

Por fim, o referido trabalho consiste em uma versão final, a qual foi reformulada após sua primeira aplicação, sendo providenciadas as devidas correções.

Os autores

Seção 1 “Com a corda toda!”

Figura 1 - Um violão rudimentar.



Fonte: O autor.

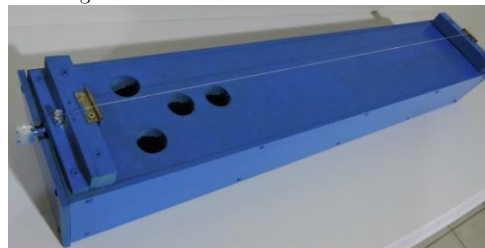
Os _____ musicais estão associados ao ser humano desde o seu surgimento na Terra. Na Idade da Pedra Lascada (quando o homem produzia objetos com pedra e madeira), surgiram os primeiros chocalhos e apitos, feitos com materiais retirados da natureza. Ossos, por exemplo, serviam como flautas e apitos. O homem começou a construí-los para imitar os sons da natureza, como o vento e o trovão, o canto dos pássaros e até o rugido das feras [1].

As culturas primitivas atribuíam a criação dos instrumentos aos deuses, pois acreditavam que a música tinha origem divina [2].

Dentre os tipos de instrumentos musicais destaca-se uma classe em especial, os instrumentos de _____ os quais consistem em cordas de _____ e _____ diferentes com diversos tipos de tensão, que quando combinadas formam os sons. Dois exemplos destes instrumentos são apresentados nas Figuras 1 e 2 iniciais desta seção, à esquerda (Figura 1), tem-se um _____ rudimentar e à direita (Figura 2) um _____.

A história dos instrumentos de cordas também é muito antiga. Há registros de 3.000 a.C com relatos de instrumentos parecidos às harpas na Mesopotâmia [3].

Figura 2 - Um monocórdio rudimentar.



Fonte: O autor.

Os instrumentos de corda são classificados de acordo como são tocados, podendo ser:

Instrumentos de cordas _____.

São os instrumentos cujo som é emitido através de cordas postas em vibração por meio de um arco, através do _____ entre as cordas e um arco, o qual é normalmente confeccionado com crina de cavalo [4]

Figura 3 - Um violino.



Fonte: O autor.

Dentre os instrumentos desta modalidade podemos citar o violino, ilustrado na figura 3. Esse instrumento foi desenvolvido no século XVI pelos italianos Andrea Amati, de Cremona, e Gasparo da Salò, de Brescia, a partir do aperfeiçoamento do primitivo instrumento de 3 cordas. De aparência simples, é um instrumento de extraordinária complexidade, composto de quase 70 peças diferentes. Constitui-se basicamente de quatro cordas, afinadas em quintas (mi⁴, lá³, ré³ e

sol2), uma caixa de _____ em forma de oito e um braço preso à caixa por um cepo. No interior da caixa, há uma prancheta chamada “cadeira” e um pequeno cilindro vertical denominado “alma”. Ambos têm por finalidade melhorar a sonoridade, além de dar mais solidez à parte superior da caixa de ressonância, o “tampo harmônico”, em cuja parte central encontra-se o “caveleto”, por onde passam as cordas. O violino, o mais agudo e versátil instrumento de cordas, é indispensável na orquestra sinfônica e no quarteto de câmara [5].

Figura 4 - Um violoncelo.



Fonte: O autor.

O violoncelo, ilustrado na figura 4, foi construído no século XVI, à maneira do violino e para ser tocado como a viola da gamba, pelos mestres italianos Andres Amati, Gasparo da Salò, Maggini e outros. Esse instrumento de timbre _____ e aveludado tem como principal função a de reforçar os baixos da orquestra. Em seus primórdios, exercia papel secundário, sendo utilizado ora como baixo contínuo, juntamente com o cravo, ora como simples pedal da orquestra. Somente a partir do final do século XVII é que se firmou como instrumento solista, substituindo a “viola da gamba”. De estrutura semelhante à do violino e

à da viola, diferencia-se destes pelo _____ (1,19m), como também pela caixa de ressonância, proporcionalmente mais funda. Possui 4 cordas afinadas uma oitava abaixo das cordas da viola, também em quintas (dó1, sol1, ré2 e lá2), e seu registro médio é de 3 oitavas e meia [6].

Instrumentos de cordas _____.

O som é produzido a partir da _____ das cordas após serem dedilhadas pelos dedos ou por palhetas [4].

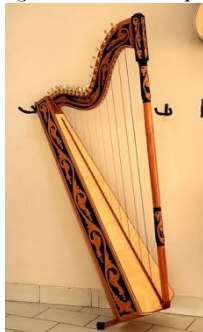
Figura 5 - Um violão.



Fonte: O autor.

A figura 5 representa o mais popular dos instrumentos de corda dedilhada, o violão, também chamada “guitarra espanhola”. Trata-se de um instrumento de cordas dedilhadas, sobre cuja origem não acordam os pesquisadores, embora sua presença e difusão na Espanha tenha a ver com a invasão dos árabes na Península Ibérica. Ele consta de uma caixa de ressonância, de um braço com 19 trastes, que termina numa cravelha. Tem seis cordas, tocadas com a ponta dos dedos ou arranhadas com as unhas [6].

Figura 6 - Uma harpa.



Fonte: [8]

Talvez o mais antigo dos instrumentos musicais de corda, cujos exemplares foram encontrados em um túmulo da rainha dos sumérios, Schub-ad, na Mesopotâmia, que viveu 3000 a.C., seja a harpa, ilustrada na figura 6, tem construção sempre triangular, lembrando um arco de caça [3]. A harpa utilizada nas orquestras sinfônicas atuais contém cerca de 46 cordas presas a uma armação triangular. Seu registro abrange seis oitavas e meia (dó bemol1 a sol bemol6). Usada como instrumento solista por alguns compositores, é amplamente empregada na orquestra sinfônica por uma gama interessante de compositores [6].

Instrumentos de cordas _____. O som é produzido a partir da vibração das cordas após estas serem percutidas.

Figura 7 - Um piano.



Fonte: O autor.

A figura 7 ilustra o piano, cujo som é produzido por peças feitas em _____ e

cobertas por um material macio (geralmente feltro) designadas martelos. Os martelos são ativados através de um _____ e tocam nas cordas _____ e presas numa estrutura rígida de madeira ou metal. As cordas _____ e produzem o som.

Figura 8 - Um berimbau.



Fonte: [9]

O berimbau, ilustrado na figura 8, é um instrumento de _____, porém, é tocado através de uma corda. É um instrumento característico do Brasil, figura indispensável em todas as rodas de capoeira, apesar de estar presente em outros contextos, como por exemplo, as celebrações do candomblé-de-caboclo. Nos tempos de escravidão, os africanos utilizavam-se do berimbau para comunicar-se de modo sigiloso. Apesar de uma ou outra discordância, o instrumento é considerado de origem africana, tendo como construtores os povos Bantus. O instrumento é composto de uma cabaça, um arco geralmente feito da madeira chamada biriba, a qual é envergada por um cabo de _____, uma _____ com a qual se percute o arame; ao mesmo tempo em que a mão da baqueta percute o arame, a mesma segura o caxixi, um pequeno cesto contendo pequenas sementes ou algo similar dentro, que ajuda no som percussivo; com a outra mão, o instrumentista segura uma pedra ou um pedaço de metal

(popularmente chamado de dobrão) que é levado de encontro ao arame, causando _____ nos tons emitidos pelo arco. Ele produz, basicamente, três texturas de sons, que são a solta (sem a pedra, com o instrumento longe do corpo), presa (com a pedra friccionando o arame, com a baqueta atuando acima da pedra, com o instrumento longe do corpo) e chiado (com a pedra tocando o arame de modo solto, livre, com a baqueta atuando

acima da pedra, com o instrumento preso ao corpo). [7]

Palavras utilizadas:

monocórdio, espessuras, vibram, dedilhadas, variação, instrumentos, ressonância, madeira, arame, teclado, tamanhos, esticadas, comprimento, violão, baqueta, percutidas, atrito, percussão, friccionadas, grave, vibração, cordas.

Agradecimentos

- Colégio Getúlio Vargas - Fernandes Pinheiro, pela autorização em fotografar o piano do Colégio;
- Geraldo Baranoski Junior - pelo empréstimo do violão para fotografar;
- André Rauch Baranoski - pelo empréstimo para fotografar e utilização do violino;
- Lilly Cristina Flores Schnepfer - pelo empréstimo do violoncelo para fotografar.

Referências

- [1] - FERNANDES, N. **Como surgiram os instrumentos musicais**. 2010. Disponível em: <http://www.dgabc.com.br/Noticia/101965/como-surgiram-os-instrumentos-musicais>. Acesso em: 08 Out. 2015.
- [2] - PASCOAL, E. G. **INSTRUMENTOS : ORIGEM E CLASSIFICAÇÃO**. Banda Musical da casa do povo de Vilarandelo. Disponível em: <http://www.angelfire.com/musicals/bandadevilarandelo/instrumentos.htm>. Acesso em: 04 Out. 2015.
- [3] - ORTEGA, G. **A Harpa e seu mistério**. DEMAP - Adoração Irresistível. Disponível em: <http://www.adoracaoirresistivel.com/2015/05/a-harpa-e-seu-misterio/>. Acesso em: 08 Out. 2015.
- [4] - CAMPAGNOLI, D. **Instrumentos de corda**. Violinando.com - Tudo sobre Violino. 2014. Disponível em: <http://violinando.com/instrumentos-de-cordas/>. Acesso em: 08 Out. 2015.
- [5] - MUSICAL MENDELSSOHN. **Instrumentos de Corda**. Disponível em: <http://www.musicalmendelssohn.com/#!cordas/c1bhj>. Acesso em: 04 Out. 2015.
- [6] - RODRIGUES, A. **A história dos instrumentos**. 2011. Disponível em: <http://www.movimento.com/2011/09/a-historia-dos-instrumentos/>. Acesso em: 04 Out. 2015.
- [7] - SANTIAGO, E. **Berimbau**. Disponível em: <http://www.infoescola.com/musica/berimbau/>. Acesso em: 12 Out. 2015.
- [8] - Paraguayan Harp. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Paraguayan_harp.jpg. Acesso em: 18 Out. 2015.
- [9] - Berimbau. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Berimbau_1.jpg. Acesso em: 18 Out. 2015.

Seção 2

“Com que frequência?”

Figura 1 - Um relógio trabalhando.



Fonte: O autor.

Quando se observa o **movimento** dos ponteiros dos relógios, como ilustrado na Figura 1, de um ponto qualquer demarcado em um aro de uma bicicleta que anda com velocidade **constante**, como ilustrado na Figura 2, ou até mesmo o movimento realizado pelos planetas em torno do Sol, a posição, velocidade e aceleração do corpo móvel se **repetem** em intervalos de tempos **iguais**. Ao movimento que exibe este tipo de regularidade dá-se o nome de movimento **periódico** [1].

Imagine uma roda, na qual existe um ponto marcado próximo ao pneu e ao aro, que gira livremente em torno do seu eixo.

Figura 3 - Uma roda girando.



Fonte: O autor.

Quando ela está girando, como ilustrado na figura 3, o ponto gasta um certo intervalo de **tempo** para percorrer uma volta **completa** em torno de um ponto de referência (o braço, por exemplo). Em Física, este

Figura 2 - Uma bicicleta em movimento.



Fonte: O autor.

intervalo de tempo é definido como **Período** [2] sendo, em geral, representado pela letra T. No Sistema Internacional de Unidades (S.I.), a unidade de medida de período é o **segundo** (s).

Para exemplificar: observe o ponteiro dos segundos do relógio da sua sala de aula, o período do ponteiro dos segundos é de 60s, ou $T = 60s$.

Suponha que você esteja na situação em que se observa um determinado ponto da roda e com o uso do cronômetro conta o número de voltas completas que este ponto realiza em determinado intervalo de tempo. Ao medir um tempo de ___s, você contou ____ voltas completas. Ao dividir o número de voltas completas pelo tempo que foi medido, tem-se uma grandeza denominada **frequência**, a qual é representada na Física muitas vezes com a letra **f**. Assim, pode-se definir frequência como o número de ciclos que um movimento se repete na unidade de tempo [3], sendo que no caso da roda, é o número de voltas que o ponto da roda completa no intervalo de tempo.

Assim, é possível calcular frequência a partir da seguinte equação:

$$f = \frac{\text{número de ciclos}}{\text{unidade de tempo}}$$

A unidade de medida de frequência é $\frac{1}{s}$, denominado de **hertz**, cujo símbolo é Hz [3]. O número 1 no numerador indica que o número de ciclos não possui unidade de medida.

A unidade hertz foi assim designada em homenagem ao físico alemão Heinrich Hertz (1857-1898), um pioneiro nas investigações das ondas eletromagnéticas [3].

Assim, quando se diz, por exemplo, que uma determinada estação de rádio possui frequência de 99,7 megahertz, isto quer dizer que a onda de rádio emitida por essa estação possui 99,7 milhões de oscilações por segundo [5] (tal conceito será mais bem explorado na seção 5).

Voltando ao problema da roda, a frequência do seu movimento será de:

$$f = \frac{\text{---} \text{voltas}}{\text{---} \text{segundos}} = \text{---} \text{Hz}$$

Referências

- [1] MHS - Movimento oscilatório e periódico. Disponível em: <http://www.sofisica.com.br/conteudos/Ondulatoria/MHS/movpereosc.php>. Acesso em 12 Out. 2015.
- [2] HALLIDAY, D. RESNICK, R. WALKER, J.. Fundamentos da Física. Rio de Janeiro: LTC, 2009. v.2
- [3] YOUNG, D. H.. FREEDMAN R. A.. **Física II**. 10. ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2003.
- [4] SILVA, Junior. **O que é frequência elétrica?** Disponível em: <http://www.eletricante.com.br/2012/07/o-que-e-frequencia-eletrica.html>. Acesso em 21 Out. 2015.
- [5] GRUPO VIRTUOUS. **Frequência de uma onda**. Disponível em: http://www.sobiologia.com.br/conteudos/oitava_serie/Ondas2.php. Acesso em 29 Out. 2015.

Atividade:

Procure no quadro abaixo as palavras que estão destacadas no texto:

M	E	R	N	L	O	D	S	E	G	U	N	D	O	E	R	G	H	M	B
O	S	Ó	F	Ã	S	Ç	D	S	F	A	P	M	L	B	S	D	E	J	K
V	D	M	F	R	E	Q	U	Ê	N	C	I	A	S	A	G	D	Y	T	R
I	F	B	N	T	I	Y	U	E	V	M	J	F	S	D	I	X	P	D	U
M	D	O	T	G	G	K	J	S	N	S	R	E	J	D	A	Ô	E	B	K
E	G	E	Q	E	A	Ç	Ã	O	Ú	A	X	D	A	F	G	P	R	A	U
N	Y	A	G	A	M	O	M	W	M	Q	Y	E	Y	L	M	Í	I	J	N
T	U	P	F	T	É	P	E	T	E	T	R	Ç	L	E	H	Y	O	K	I
O	I	M	C	H	A	Y	O	Y	R	A	S	M	I	D	G	T	D	M	D
A	L	T	O	Ç	Ú	L	R	I	O	Y	H	E	R	T	Z	H	I	T	A
D	K	G	M	V	G	E	T	N	D	O	K	D	T	M	Ã	O	C	B	D
E	O	E	P	D	P	Ô	F	M	E	H	D	I	R	H	M	S	O	L	E
A	O	R	L	E	A	M	R	E	C	J	M	T	D	E	E	B	D	M	D
S	D	S	E	G	F	R	I	D	I	N	C	O	N	S	T	A	N	T	E
F	H	S	T	I	Ó	F	Q	S	C	R	T	W	E	Ã	E	U	W	I	T
F	G	W	A	S	Í	D	S	F	L	Y	E	Í	F	M	P	Q	C	D	E
R	Y	T	O	F	R	E	G	T	O	O	T	W	D	X	E	R	E	T	M
I	T	K	L	A	S	W	H	F	S	E	Ó	R	F	G	R	E	W	O	P
I	G	U	A	I	S	P	O	I	K	L	F	R	E	D	U	I	Y	F	O
A	S	R	E	R	D	L	E	P	E	R	Í	O	D	O	R	E	J	K	M

Seção 3

“Um balançar legal!”

Figura 1 - O movimento de um pêndulo.



Fonte: O autor.

A foto da figura 1 consiste em um corpo de certa massa variável colocado para balançar na extremidade de um fio longo [2]. Neste caso, a massa é composta por uma garrafa pet que possui um líquido colorido no seu interior e um pequeno orifício em sua tampa. Esta é a representação de um pêndulo. O mesmo sistema pode ser observado em várias situações em nosso dia a dia, como o movimento de um relógio de pêndulos ou no balançar de uma criança em um balanço infantil, e ambos exemplificam o caso de um pêndulo.

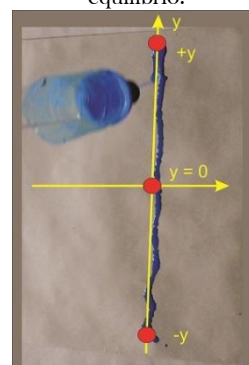
Porém, pode-se considerar a situação da figura 1, de forma aproximada, como sendo um pêndulo simples, ou seja, um sistema constituído de um corpo puntiforme com determinada massa e suspenso por um fio ideal, ou seja, inextensível e com massa desprezível, com determinado comprimento e que executa oscilações desenvolvendo pequenos deslocamentos.

Desprezando-se as possíveis resistências, como a do ar e atrito, o pêndulo descrito realiza um movimento periódico [2][3]. Esta regularidade do movimento de oscilação de um pêndulo foi utilizada por muito tempo

para controlar o movimento dos relógios, por exemplo [1].

Considerando a situação em que o pequeno orifício da tampa do pêndulo descrito da figura 1 é aberto, este irá marcar o papel com a tinta quando em movimento. Ao deslocar do ponto de equilíbrio e soltar a garrafa, deixando cair uma pequena quantidade de líquido do seu interior sobre um papel, ela irá produzir um segmento de linha reta, como demonstrado na figura 2.

Figura 2 - Um pêndulo oscilando sobre um ponto de equilíbrio.



Fonte: O autor.

É importante observar que, neste caso, haverá uma pequena variação da massa, uma vez que há perda de líquido. No entanto, para o propósito aqui apresentado e simplificações,

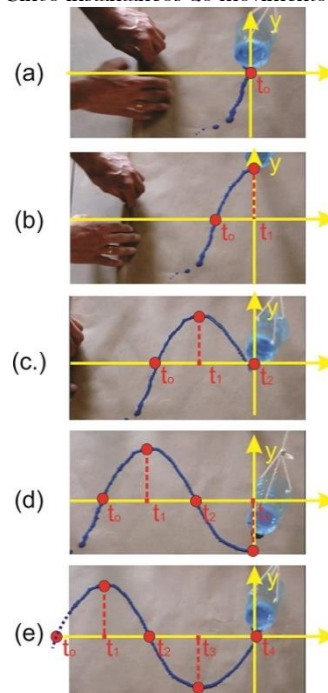
essa variação de massa (perda de tinta) não será considerada.

O movimento oscilatório de um pêndulo balançando através de um pequeno arco em torno de um ponto central, como mostrado na figura 2, denomina-se movimento harmônico simples (MHS), considerando as devidas aproximações, tais como fio ideal e inextensível. Há outras situações no dia-a-dia em que o MHS está presente, com boas aproximações, sendo o movimento do pêndulo simples um exemplo.

Ao puxar o papel que está sob e próximo à base do pêndulo com velocidade constante, este fará uma marcação no papel, como mostrada na figura 1. Para analisar o movimento do pêndulo em relação ao tempo, mantendo o referencial no ponto fixo na posição de equilíbrio do pêndulo, onde este fica parado, foram tiradas cinco fotografias mostradas na figura 3, que representam cinco momentos que são chamados de “instantâneos” do movimento do mesmo.

Pode ser observado que no instantâneo em (a), o qual é o tempo inicial da observação, representado por t_0 , este elemento está com um deslocamento $y=0$. Em (b), momento t_1 , pode-se perceber que o ponto se encontra em seu deslocamento extremo para cima (denominado pico). No ponto (c), momento t_2 , desce novamente para $y=0$. No quarto instantâneo (d), momento t_3 , está com seu deslocamento extremo para baixo (denominado vale) e no quinto instantâneo (e), momento t_4 , está novamente em $y=0$, completando o ciclo de oscilação [2] e recomeçando o movimento.

Figura 3 - Cinco instantâneos do movimento do pêndulo.



Fonte: O autor.

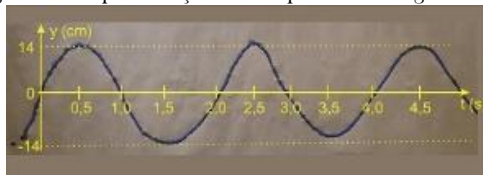
No final deste movimento, observa-se uma marcação da tinta no papel, como apresentada na figura 4, representando o movimento do pêndulo em função do tempo.

Figura 4 - Marcação do deslocamento do pêndulo em função do tempo.



Fonte: O autor.

Colocando-se um eixo de coordenadas na figura 4, da posição do pêndulo em y em função do tempo, verifica-se a representação mostrada na figura 5. Observe que a posição em y fornece a oscilação do pêndulo entre um valor máximo e um mínimo, compare esta figura com as figuras 2 e 3.

Figura 5 - Representação do tempo sobre um gráfico $y(t)$.

Fonte: O autor.

Buscando uma comparação da figura 5 com a análise feita anteriormente referente à figura 3, apresenta-se a tabela 1 com valores de tempo e deslocamento máximo para vários instantâneos, onde é fácil perceber que:

Tabela 1 - Vários instantâneos.

instantâneo	tempo (s)	deslocamento máximo em y (cm)
t_0	0	0
t_1	0,5	14
t_2	1,0	0
t_3	1,5	-14
t_4	2,0	0

Além disso, também a partir da figura 5, é possível analisar as propriedades do MHS, como período, amplitude e frequência de oscilação.

PROPRIEDADES DO MHS

Período do movimento de um pêndulo

O MHS é um movimento periódico, desta forma, como foi descrito na seção anterior, é possível atribuir a esse tipo de movimento um período, T , que é o intervalo de tempo necessário para o pêndulo realizar uma oscilação completa (ou um ciclo) [2], como o demonstrado na figura 3. Desta forma, é possível perceber que o período do movimento na figura 5 é de _____s.

Frequência

Outro elemento importante que caracteriza os movimentos periódicos e, portanto, o MHS, é a sua frequência, f , cuja grandeza também estudada na seção anterior, onde neste caso indica o número de oscilações completas do pêndulo por segundo [2]. Desta forma, ao escolher o número de oscilações completas e dividir pelo tempo que o pêndulo levou para fazê-las, é possível estimar a frequência descrita pelo movimento do pêndulo usando a figura 5, o qual é de:

$$f = \frac{\text{Número de oscilações}}{\text{Tempo}} = \frac{\text{_____}}{\text{_____}} ;$$

$$f = \text{_____ Hz}$$

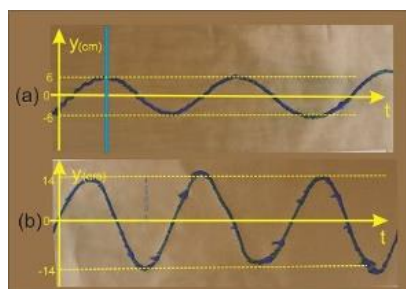
Amplitude de oscilação

Quando o pêndulo é deslocado com um pequeno ângulo em relação ao seu ponto de equilíbrio, ponto central, a marcação da sua posição em relação ao tempo será feita próximo a este. Já quando o pêndulo for deslocado para um ponto mais afastado do seu ponto de equilíbrio, ou seja, um ângulo um pouco maior, a marcação torna-se maior. Vale lembrar que em ambos os casos as amplitudes são devidas a ângulos pequenos. Ao deslocamento máximo de oscilação do pêndulo em relação ao ponto de equilíbrio, ponto central, em um dos sentidos é denominado amplitude, representado pela letra A [2]. Pode-se dizer, então, em relação à figura 5, que a amplitude de oscilação do pêndulo é $A = \text{_____ cm}$.

A figura 6(a) mostra a marcação do movimento do pêndulo em função do tempo

segundo uma determinada amplitude, já na figura 6(b) é possível observar a marcação do movimento do pêndulo em função do tempo descrevendo uma amplitude pouco maior que ao descrito na figura 6(a).

Figura 6 - As amplitudes de um movimento oscilatório.



Fonte: O autor.

Referências

- [1] HEWITT, Paul G. Física Conceitual. 9ªed. São Paulo: Bookman, 2002.
- [2] HALLIDAY, D. RESNICK. R. WALKER, J.. Fundamentos da Física. Rio de Janeiro: LTC, 2009. v.2
- [3] HOUUAISS PÊNDULO SIMPLES. In: RODITI, I. **Dicionário Houaiss de Física**. Rio de Janeiro: Objetiva, 2005.

Atividade

Com base no texto, ligue os conceitos descritos na coluna A com as definições da coluna B:

A	B
Frequência	Constituído de um corpo puntiforme com uma determinada massa e suspenso por um fio inextensível com um determinado comprimento e massa desprezível e que executa pequenas oscilações.
Aproximação do Pêndulo Simples	Deslocamento máximo de oscilação em relação ao ponto central (ponto de equilíbrio).
Amplitude	Movimento descrito por um objeto preso à ponta de uma corda que oscila em torno de um ponto central (ponto de equilíbrio) executando um pequeno arco.
MHS	Número de oscilações realizadas por um pêndulo em um segundo.
Pêndulo simples	Tempo que o pêndulo leva para descrever uma volta completa em torno de um ponto de referência que pode ser tomado como ponto central (ponto de equilíbrio), por exemplo.
Período	Movimento periódico descrito por um corpo que oscila em torno de um ponto de equilíbrio executando deslocamentos simétricos e em torno deste.
Aproximação do Movimento Harmônico Simples	Aparato mostrado na figura 1 contendo um fio esticado e uma determinada massa presa em sua extremidade e que oscila em torno de um ponto central.

Seção 4

“Um pulso...”

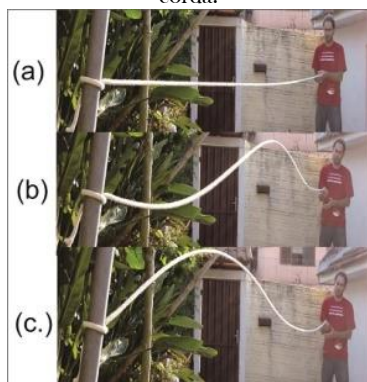
Figura 1 - Um pulso formado em uma corda esticada.



Fonte: O autor.

Ao sacudir uma corda esticada para cima e para baixo, é obtido um pulso que se propaga ao longo da mesma [1] como apresentado na figura 1. Observando a ilustração da figura 2, pode-se verificar três situações que representam um pulso em uma corda: em (a) tem-se uma corda esticada e em (b) e (c) um pulso se propagando ao longo da corda.

Figura 2 - Um pulso de onda se propagando em uma corda.



Fonte: O autor.

A velocidade de propagação de um pulso na corda depende da tração e da sua densidade linear. Desta forma, é possível determinar o valor da velocidade do pulso pela equação 1,

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

Na equação 1, a tração é a força com que é esticada a corda e está representada pela letra T.

A densidade linear da corda é representada pela letra grega μ . Essa grandeza é definida dividindo-se a massa da corda pelo seu comprimento, conforme indicado na equação 2,

$$\mu = \frac{m}{l}. \quad (2)$$

Desta forma, se uma corda tem massa _____kg e comprimento _____m, a sua densidade linear terá valor de:

$$\mu = \frac{\text{_____}}{\text{_____}} ;$$

$$\mu = \text{_____} \text{ kg/m}$$

Se considerar que a tração nessa mesma corda, aferida a partir de um dinamômetro, seja de _____N, pode-se determinar a velocidade de propagação de um pulso nesta corda usando a equação 1 e esta será de

$$v = \sqrt{\frac{\text{_____}}{\text{_____}}}, \text{ então}$$

$$v = \text{---} m/s.$$

O resultado anterior de velocidade de propagação do pulso juntamente com a equação 1, sugere que:

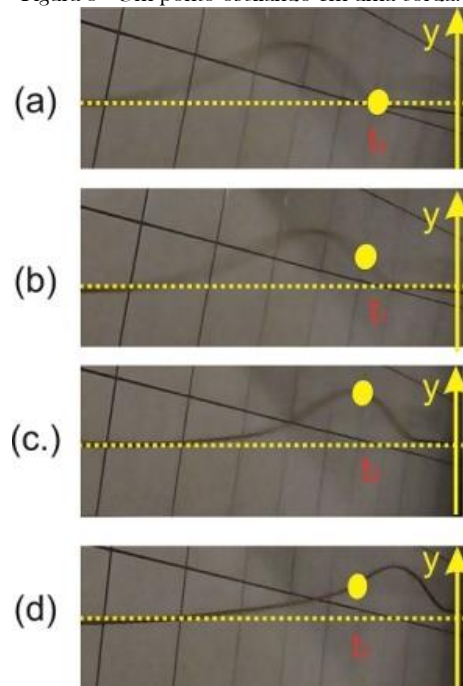
Uma corda puxada com uma tração de maior intensidade, ou seja, mais esticada, tem velocidade de propagação de um pulso maior do que a mesma corda menos esticada, ou seja, com uma tração de menor intensidade.

Se a corda for substituída por outra corda, cuja densidade linear é maior, e essa outra corda for esticada com as mesmas intensidades de tração da anterior, isto é, maior e menor tração, as velocidades de propagação de um pulso serão menores nessa outra corda, respectivamente.

Quando se produz um pulso isolado em uma corda esticada, ao analisar um elemento da corda, o qual está demarcado como um ponto na figura 3, este se desloca para cima e depois para baixo quando o pulso passa por ele [4].

A figura 3 representa quatro instantâneos da propagação do pulso, na qual quando analisado um ponto demarcado na corda tem-se que: em (a) o ponto se encontra em sua posição de equilíbrio sobre o eixo da corda; em (b) o pulso encontra o ponto da corda, onde este se move para cima; em (c) o ponto alcança sua máxima amplitude; e em (d) o ponto inicia retorno à posição original. Esta situação pôde ser observada na seção 3, quando analisado o movimento de oscilação do pêndulo simples.

Figura 3 - Um ponto oscilando em uma corda.

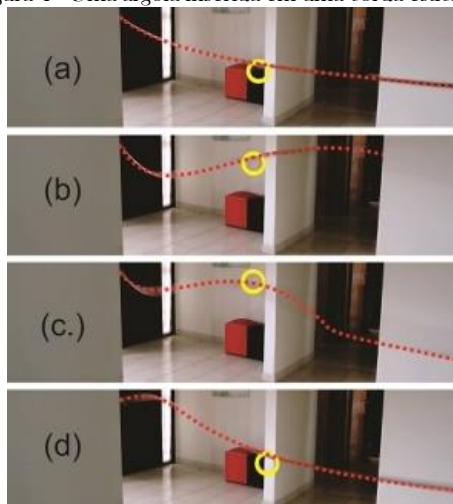


Fonte: O autor.

Também é possível verificar, a partir da figura 3, que à medida que o pulso se propaga para a esquerda na corda, sua parte da frente está se movendo para cima, enquanto a parte posterior, na direita, está se movendo para baixo [1].

Uma situação em que é possível observar que um pulso não transporta massa e sim energia é ilustrada na figura 4, onde é colocada uma argola em uma corda esticada (a) e um pulso é aplicado (b). Quando o pulso alcança a argola (c), a mesma faz um movimento de subida e descida, e, após a passagem do pulso ela permanece no mesmo lugar (d).

Figura 4 - Uma argola inserida em uma corda esticada.



Fonte: O autor.

Reflexão de um pulso

Quando o pulso de onda incide sobre um obstáculo e retorna ao meio de propagação, mantendo as características da onda incidente, diz-se que ela sofreu uma reflexão.

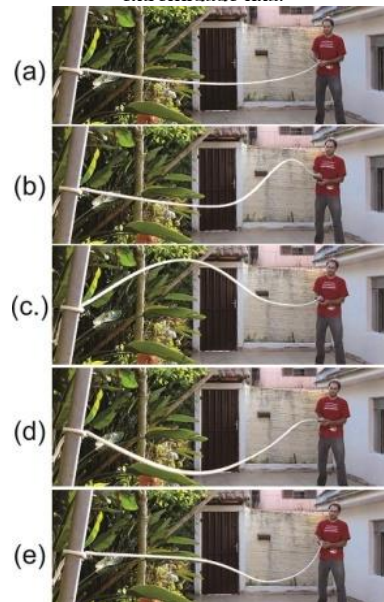
Uma vez que a onda continua se propagando no mesmo meio, o módulo da sua velocidade permanece inalterado após a reflexão, porém o sentido da propagação e da velocidade tornam-se contrários do sentido inicial.

A reflexão de um pulso em uma corda pode ocorrer com a extremidade da mesma fixa ou móvel.

A reflexão em uma corda com a extremidade fixa pode ser ilustrada da seguinte maneira: suponha que um pulso atinge uma extremidade fixa, como uma barra (figura 1). A força aplicada nela, pelo princípio da ação e reação, reage sobre a corda, causando um movimento. Esse movimento é na direção da aplicação do pulso, e o sentido da propagação e da velocidade são contrários ao sentido inicial e com o pulso invertido, sendo esse o pulso refletido. A figura 5 mostra o pulso em uma

corda: em (a) (b) e (c) um pulso incidente em três instantâneos diferentes e em (d) e (e) a reflexão do mesmo pulso em dois outros instantâneos [2].

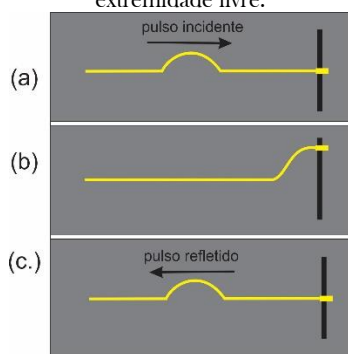
Figura 5 - Um pulso refletindo em uma corda com a extremidade fixa.



Fonte: O autor.

Agora, suponha que um pulso atinge uma extremidade de uma corda que contém um anel preso a uma haste vertical. Digamos que a haste possa movimentar-se livremente para cima e para baixo (figura 6). Como essa extremidade da corda com o anel pode oscilar livremente, um pulso incidente desloca essa extremidade da corda para cima, e ao refletir, o anel retorna à sua posição original. O pulso refletido não se inverte, retorna na mesma direção de propagação e no sentido contrário ao sentido do pulso incidente. A figura 6 representa um pulso sendo refletido por uma corda com a extremidade livre, onde se tem: em (a) um pulso incidente, em (b) o anel sobe junto com o pulso e em (c) ocorre a reflexão do mesmo pulso [2].

Figura 6 - A reflexão de um pulso em uma corda com extremidade livre.



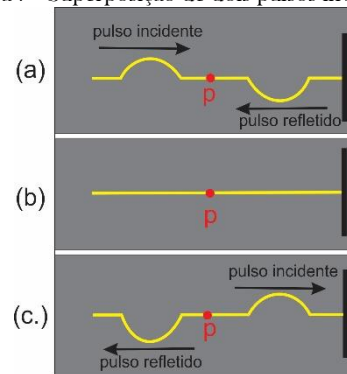
Fonte: O autor.

Superposição de dois pulsos

Quando dois pulsos estão se movendo em direção oposta, seja em uma corda com extremidade fixa ou móvel, ao se encontrar em um determinado ponto, ocorre a superposição. O deslocamento resultante, em qualquer ponto da corda em qualquer instante, é obtido somando-se os deslocamentos individuais que cada ponto deveria ter caso não existisse o outro deslocamento [3].

A figura 7 representa uma corda com extremidade fixa e dois pulsos subsequentes: um incidente, com sua direção de propagação voltada para cima, e um outro já refletido, invertido em relação ao incidente e se movendo em sentido contrário, em três situações. Em (a) tem-se a situação antes da superposição dos dois pulsos. Em (b) tem-se a situação em que os pulsos se encontram no ponto p, o deslocamento para cima do pulso incidente soma-se com o deslocamento para baixo do pulso refletido, se anulando naquele ponto. Em (c), ilustra-se a situação após os pulsos passarem pelo ponto p; ambos se deslocam e continuam seus movimentos independentes com na situação inicial mostrada em (a).

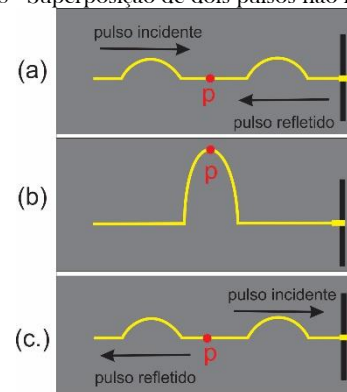
Figura 7 - Superposição de dois pulsos invertidos.



Fonte: O autor.

Quando dois pulsos que se deslocam na mesma direção de propagação, um incidente e outro já refletido, se movendo em sentidos contrários como representado na figura 8, onde se tem uma corda com extremidade presa a uma argola livre para oscilar para cima e para baixo, observa-se três situações: em (a) tem-se a situação antes da superposição dos dois pulsos. Em (b) ao se encontrarem no ponto p, os pulsos somam-se, formando um pulso com amplitude igual à soma dos dois pulsos individuais. Em (c), ilustra-se a situação após a passagem dos pulsos pelo ponto p, na qual ambos se deslocam de forma independente e igual ao da situação inicial mostrada em (a).

Figura 8 - Superposição de dois pulsos não invertidos.



Fonte: O autor.

Referências

[1] NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica vol. 2.** 4ª ed. Edgard Blucher, 2002.
 [2] GRUPO VIRTUOUS - Tecnologia Educacional. **Reflexão de ondas.** Disponível em: <http://www.sofisica.com.br/conteudos/Ondulatoria/Ondas/reflexao.php>. Acesso em 20 Out. 2015.

[3] YOUNG, D. Hugh. FREEDMAN Roger A.. **Física II.** 10ª ed. São Paulo: Ed. Pearson Addison Wesley, 2003.
 [4] HALLIDAY, Resnick. WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física.** Volume 2. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

Atividade:

Pesquise no texto, completando as lacunas nas frases abaixo:

- 1) Quando dois pulsos estão em sentidos contrários e na mesma direção em uma corda de extremidade fixa, ao se encontrarem em um ponto, eles se _____.
- 2) Um pulso em uma corda com extremidade _____, ao se refletir, retorna invertido em relação ao pulso incidente.
- 3) Quando dois pulsos estão em sentidos contrários e na mesma direção, ao se encontrarem ocorre a _____ deles.
- 4) _____: é uma perturbação que se propaga ao longo de uma corda.
- 5) Tração na corda é a _____ com a qual a corda é esticada (puxada).
- 6) Quando dois pulsos estão em sentidos contrários e na mesma direção em uma corda de extremidade _____, ao se encontrarem em um ponto, eles se _____.
- 7) A velocidade de propagação de um pulso em uma corda depende da tração e da _____ da corda.
- 8) Um pulso representa uma perturbação no meio, o qual pode ser uma corda, que transporta _____, porém não transporta _____.

Seção 5

“Com a onda toda!”

Figura 1 – As ondas se propagando em uma corda.



Fonte: O autor.

Ondas constituem um dos principais assuntos da Física [1] e a compreensão desse conceito se faz necessário para o entendimento de ondulatória, óptica física e eletromagnetismo. Define-se onda como sendo uma perturbação que se propaga no espaço vazio (vácuo) e em meios materiais. As ondas que necessitam de um meio para se propagarem são classificadas como ondas mecânicas e aquelas que se propagam no vácuo são classificadas como ondas eletromagnéticas. Assim, de acordo com a necessidade de um meio de propagação ou não da onda, atribui-se a onda a natureza: mecânica ou eletromagnética [1]. Também é possível classificar as ondas de acordo com a direção de propagação da perturbação. Quando a perturbação é na direção transversal, como na figura 1, a onda é dita transversal, caso ela seja paralela a direção de propagação, diz-se que ela é longitudinal [2]. As ondas mecânicas são classificadas em ondas transversais, como as formadas no experimento da figura 1, ou longitudinais. As ondas eletromagnéticas são apenas transversais.

Nesta seção será dado ênfase às ondas transversais, como a onda produzida na corda mostrada da figura 1, onde a corda ao ser agitada para cima e para baixo, repetidas vezes, produz uma onda transversal. É possível notar

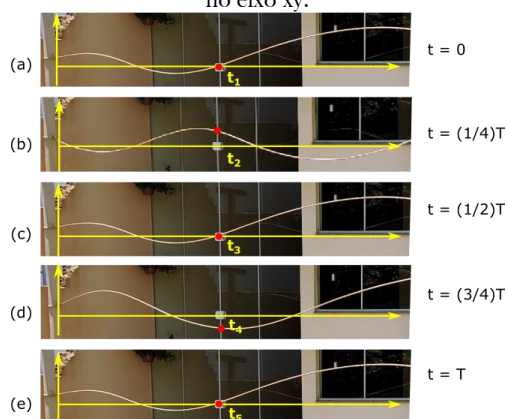
que nesta figura a onda aparece em um plano, isto se deve ao fato de que o movimento da mão que produz a oscilação está alinhado a esse plano, ou seja, a mão sobe e desce em uma linha paralela e sobre esse plano. Neste caso, como a oscilação e a onda estão em único plano, diz-se que a onda se propaga neste plano e a onda está contida nesse plano. Há ondas transversais que não estão contidas em um único plano apenas e para o estudo presente, não será dado enfoque a essas ondas e sim as que se propagam em um único plano. De qualquer forma, ondas transversais são ondas que se propagam na direção perpendicular à direção de perturbação que a produz.

É possível analisar uma onda transversal, como a onda produzida em uma corda, sobre os seguintes aspectos:

A) Posição de um ponto da corda em momentos diferentes e específicos

Neste caso, analisa-se o movimento oscilatório para cima e para baixo de um ponto específico da corda. Para isso, admite-se um sistema de coordenadas xy , a oscilação desse ponto da corda ocorrendo no eixo y , ou seja, na direção vertical (movimento para cima e para baixo) e a onda contida e se propagando no plano xy , como indicado na figura 2.

Figura 2 – Os instantâneos do movimento de uma onda no eixo xy.



Fonte: O autor.

Observa-se o ponto da corda, marcado na figura 2 com um círculo vermelho, em cinco momentos diferentes em tempos específicos, ou seja, em cinco instantâneos diferentes do movimento do ponto em estudo. Devido à limitação do aparelho de filmagem não foi possível a captura dos instantâneos em que se obtivesse um padrão de ondas, porém, para a análise em questão, de um ponto específico da corda, tal observação não acarretará na alteração da ideia central da proposta.

Pode-se observar ainda na figura 2, para qualquer instantâneo, que a forma assumida pela corda é senoidal, isto é, tem a forma de uma função seno, se propagando no plano xy. Não haveria problemas se fosse admitido que a forma assumida pela corda fosse cossenoidal [1]. Porém, neste estudo vamos admitir a forma da onda na corda como senoidal.

A partir destes cinco instantâneos mostrados na figura 2, considerando que a posição do ponto não muda em relação ao eixo x, pode-se observar que o ponto da corda marcado com um círculo vermelho não se desloca no eixo x, mas se desloca na vertical, ou seja, somente muda de posição em relação ao

eixo y. É possível observar que: em (a) o ponto se encontra em $y = 0$ e x fixo, ou seja, neste instantâneo ele tem deslocamento zero; em (b) o ponto está na posição $y = +y_{\max}$ para cima e x fixo, ou seja, neste instantâneo ele tem deslocamento máximo para cima; em (c) o ponto se encontra em $y = 0$ novamente e x fixo, ou seja, neste instantâneo ele tem deslocamento zero; em (d) o ponto está na posição $y = -y_{\max}$ para baixo e x fixo, ou seja, neste instantâneo ele tem deslocamento máximo para baixo; em (e) o ponto se encontra em $y = 0$ mais uma vez e x fixo, ou seja, neste instantâneo ele tem deslocamento zero.

Assim, depois de completar uma subida e uma descida, o ponto volta à posição inicial, isto é, ele oscila periodicamente em uma linha reta na direção vertical, paralela ao eixo y em torno do ponto de equilíbrio. Isto é semelhante ao que foi mostrado na seção 3 e figura 2 para o movimento do pêndulo que imprimiu uma linha reta quando a folha sobre ele estava parada.

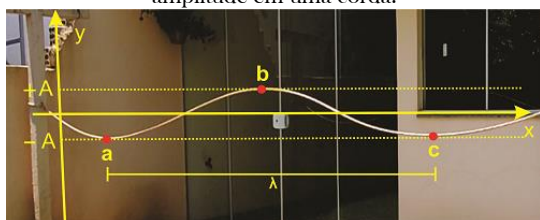
B) Movimento do ponto ao longo de um intervalo de tempo

Ainda, quando se analisa os instantâneos do ponto da corda, mostrados na figura 2 desta seção, e se faz uma comparação com a figura 3 da seção 3, supondo possível registrar o movimento do ponto da corda marcado em vermelho ao longo de um intervalo de tempo, ou seja, em função do tempo, esse registro seria uma curva de mesmo formato, ou seja, em ambos os casos são curvas senoidais.

Portanto, ao analisar o movimento descrito pelo ponto da corda marcado em vermelho, ou por qualquer outro ponto da corda, este desenvolve um movimento harmônico simples (MHS).

Como dito anteriormente, os instantâneos da figura 2, ou ainda outro instantâneo qualquer como o apresentado na figura 3, mostram a forma assumida pela corda, quando a onda passa pela mesma, de modo que é possível definir algumas grandezas que caracterizam a onda através da corda.

Figura 3 - A representação de comprimento de onda e amplitude em uma corda.



Fonte: O autor.

Ao observar a figura 3, tem-se três pontos demarcados: a , b e c . O ponto b é um ponto de máximo positivo, ou extremo para cima, assumido pela corda no instantâneo fotografado enquanto a onda a percorre. Esse ponto b é denominado de crista da onda. Por outro lado, os pontos a e c são pontos de máximo negativo, ou extremos para baixo, assumido pela corda no instantâneo fotografado enquanto a onda a percorre. Os pontos a e c são denominados de vales da onda.

Ainda, a partir da observação da figura 3, considera-se também, a distância entre a linha de referência central ao ponto de uma crista da onda, ou ao ponto de um vale da onda, assumido pela corda, e define-se amplitude da onda, representado pela letra A .

A amplitude de uma onda é sempre tomada como o módulo do deslocamento máximo positivo (extremo para cima), ou negativo (extremo para baixo), dos elementos a partir da linha de referência quando a onda passa por eles [1]. A amplitude na figura 3 é a distância do ponto: a , b ou c à linha de referência que foi adotada como o eixo x .

Usando mais uma vez a figura 3, considera-se também a distância entre duas cristas ou dois vales da onda como sendo o comprimento de onda, representado pela letra grega λ [3]. Na figura 3, o comprimento de onda está representado entre os pontos a e c , portanto, entre dois vales da onda que atravessa a corda.

C) Movimento de qualquer ponto da corda em qualquer tempo

Uma vez que se tem a ideia de como um ponto escolhido na corda, como o marcado em vermelho na figura 2, se comporta ao ser atravessado por uma onda (MHS). Pode-se generalizar este movimento para todos os pontos da corda a qualquer tempo e, desta forma, descrever a forma da onda se propagando em uma corda. Uma representação da onda que se propaga na corda é dada pela função senoidal que está indicada na equação 1,

$$y(x, t) = y_m \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - ft \right). \quad (1)$$

Na equação 1, $y(x, t)$ representa o deslocamento transversal de qualquer ponto da corda, em qualquer tempo; λ é o comprimento de onda; f é a frequência linear do movimento ondulatório que é um MHS.

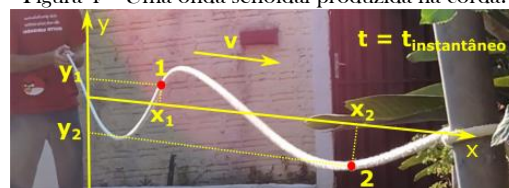
Ao imaginar uma onda senoidal percorrendo uma corda existiriam várias imagens semelhantes às mostradas na figura 4. Neste caso, ela é um instantâneo de qualquer ponto da corda, se propagando no sentido positivo do eixo x com velocidade v . Se fosse possível assistir o vídeo, ou ver alguém oscilar a corda ao vivo, certamente seria possível ver a onda se propagar, assumindo em cada instante a forma semelhante como mostrada na figura 4.

Utilizando a figura 4, se for escolhido um ponto da corda e marcá-lo com um círculo em vermelho, em um determinado instante t , que no caso é o tempo em que foi tirada a foto (instantâneo), o deslocamento y do ponto marcado da corda situado na posição x é dado pela equação 1.

Assim, como a equação 1 está escrita em termos da posição x , ela pode ser usada para calcular os deslocamentos de todos os

elementos da corda para qualquer tempo. Pode-se observar que o ponto da corda demarcado como x_2 , para o mesmo instantâneo, tem um $y = y_2$. Portanto, é possível dizer qual é a posição da onda em qualquer instante de tempo e como esta forma varia quando a onda se move ao longo da corda [1].

Figura 4 - Uma onda senoidal produzida na corda.



Fonte: O autor.

Referências

- [1] HALLIDAY, Resnick, WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física**. Volume 2. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- [2] HEWITT, Paul G. **Física Conceitual**. 9ª ed. São Paulo: Bookman, 2002.
- [3] NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica**. Volume 2. 4ª ed. Edgard Blucher, 2002.

Atividade

Com base no texto desta seção, complete as lacunas das frases, colocando as respostas nos campos das palavras cruzadas:

Ondas **MECÂNICAS**: são as ondas que se propagam a partir de um meio material.

- 1 - As ondas transversais de uma corda podem ser estudadas em função do _____ e da posição dos elementos da corda.
- 2 - Ondas _____, são as ondas cuja a perturbação que a produz ocorre perpendicularmente a direção de sua propagação.
- 3 - Amplitude: é o máximo deslocamento de um ponto da corda para _____ ou para baixo em relação à crista da onda ou ao vale da onda.
- 4 - Todas as figuras do texto são representações de _____ de ondas se propagando em uma corda.
- 5 - Ao se analisar um _____ da corda ao se produzir uma onda nela, observa-se que este se desloca no eixo vertical (y), porém não se desloca no eixo x.
- 6 - As ondas que se propagam em uma corda possuem forma _____.
- 7 - A _____ é um meio material em que ondas mecânicas podem se propagar.
- 8 - Ondas são sequências periódicas de _____ que se deslocam no espaço e em meios materiais.
- 9 - Com o instantâneo de uma onda em uma corda é possível _____ a posição de qualquer elemento da corda.

1 -							M				
2 -							E				
3 -							C				
4 -							Â				
5 -							N				
6 -							I				
7 -							C				
8 -							A				
9 -							S				

Seção 06

“Uma onda parada?”

Figura 1 - Uma onda estacionária.



Fonte: O autor.

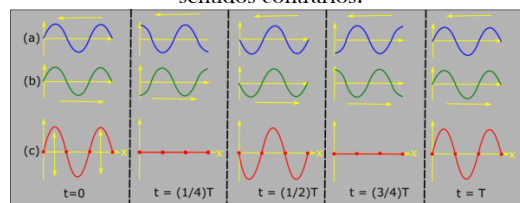
Quando uma corda está presa nas duas extremidades, como as cordas de um violão, ou até mesmo quando uma das extremidades está presa, mas a outra tensionada por uma determinada massa, como a corda do experimento mostrado em perspectiva na figura 1, em ambos os casos, ao vibrar a corda haverá ondas atravessando a mesma. Estas sofrerão reflexões nas duas extremidades, fazendo com que viajem nos dois sentidos da corda, conforme ilustrado na figura 5 da seção 4.

Estas ondas superpostas sofrem interferência, de acordo com o princípio da superposição, como foi visto e ilustrado na figura 7 (seção 4) para diferentes pulsos em cordas com uma extremidade presa [1]. Vale observar que no caso do piano, do violão e do experimento da figura 1, o efeito da interferência das ondas ocorre para as duas extremidades fixas independentemente, e ainda, no caso específico do experimento da figura 1, trata-se de uma aproximação.

A figura 2 mostra duas ondas: em (a) cinco instantâneos de uma onda se propagando para a esquerda, em (b) os cinco instantâneos respectivos de outra onda se propagando para a direita, em (c) representa-se os cinco instantâneos respectivos do movimento destas

ondas para cada ponto da corda, ou seja, a superposição das duas ondas. [2]

Figura 2 - Cinco instantâneos de ondas se deslocando em sentidos contrários.

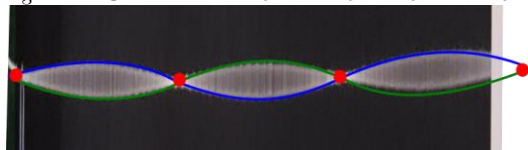


Fonte: O autor.

Na figura 2, ainda, é possível observar a existência de pontos, os quais estão demarcados com um círculo vermelho, onde a corda permanece imóvel. Os pontos imóveis na corda são denominados **nós**. Nas regiões entre dois nós vizinhos existem pontos onde as resultantes da superposição das ondas possuem amplitude máxima positiva ou amplitude máxima negativa. A estes pontos onde a amplitude é máxima são denominados **antínós** ou **ventres** [2]. Em uma situação real, a resultante da soma das ondas apresentadas na figura 2 está representada na figura 3.

Assim, a situação ilustrada e idealizada na figura 2 se assemelha ao que está mostrado na figura 1 e figura 3.

Figura 3 – Uma resultante da soma das ondas refletidas.



Fonte: O autor.

Ao se manter uma corda esticada e colocá-la para oscilar em MHS de pequena amplitude tem-se: duas ondas que se propagam pela corda com frequência e direção iguais e sentidos contrários gerando um padrão que é idealizado na figura 2 e representa um padrão de onda estacionária. Este padrão da figura 2 pode ser comparado às situações reais mostradas nas figuras 1, 3 e 4.

Porém, estes padrões têm número de nós e ventres diferentes porque são produzidos com certas frequências denominadas **frequências de ressonância** da corda [1]. A cada frequência de ressonância que produz ondas estacionárias dá-se o nome de modo de oscilação [2].

Assim, à menor frequência de ressonância denomina-se **frequência fundamental**, representado por f_1 . A frequência fundamental produz o padrão mostrado na figura 4 (a), que é chamado de **modo fundamental** de vibração ou de **primeiro harmônico** [1].

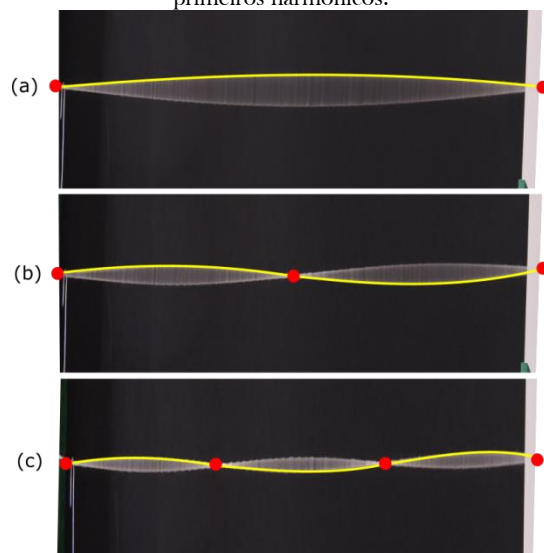
A figura 4 (b) representa a segunda menor frequência de ressonância. Este modo de oscilação tem o dobro da frequência fundamental, o qual é representado por f_2 , e também chamado de **segundo harmônico**. Em 4 (c) tem-se a terceira menor frequência, a qual é três vezes maior que a frequência fundamental, representada por f_3 , e também chamado de **terceiro harmônico** [1]. A mesma

ideia pode ser estendida para o quarto, quinto harmônico, etc..

A todo o conjunto de frequências de ressonância de uma determinada corda, que produzem seus respectivos modos de oscilação, é denominado **espectro de ressonância** da corda [1].

Ao analisar o segundo harmônico de uma onda estacionária a partir de uma fotografia, ou seja, de um instantâneo do modo de oscilação ou padrão da onda estacionária na corda no respectivo harmônico, é possível observar que este harmônico corresponde a um comprimento de onda inteiro específico. A representação do comprimento de onda inteiro específico é indicada na figura 4 (b) pela linha desenhada em amarelo na foto.

Figura 4 – Um instantâneo de uma onda nos três primeiros harmônicos.



Fonte: O autor.

Desta forma, lembrando que a corda do experimento tem comprimento fixo de valor L , é fácil perceber que no primeiro harmônico a corda de comprimento L contém apenas metade de um certo comprimento de onda específico, o que pode ser expresso como

$(\lambda_1/2)$. Isto pode ser observado na figura 4 (a) pela linha desenhada em amarelo na foto.

Seguindo esta ideia, fazendo-se a mesma observação para os outros dois harmônicos representados na figura 4, percebe-se que:

- no segundo harmônico a corda de comprimento L contém duas metades de um certo comprimento de onda, o que pode ser expresso como $(2\lambda_2/2)$; nota-se que esse comprimento de onda é diferente do primeiro harmônico, observando a linha desenhada em amarelo na foto da figura 4 (b);
- no terceiro harmônico a corda de comprimento L contém três metades de um certo comprimento de onda específico, o que pode ser expresso como $(3\lambda_3/2)$; observa-se que esse comprimento de onda é diferente do primeiro e segundo harmônicos, observando a linha desenhada em amarelo na foto da figura 4 (c);

Desta forma, para uma corda com comprimento L qualquer, uma onda estacionária somente poderá existir se satisfazer à equação 1 [1],

$$L = n \frac{\lambda_n}{2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) . \quad (1)$$

Para o experimento apresentado na figura 1, existem ondas na corda que não possuem os comprimentos de ondas representados pela equação 1, portanto, tais ondas não podem formar ondas estacionárias com nós e ventres.

A equação 1 ilustra as ondas estacionárias formadas pelo experimento da figura 4, onde a corda tem um comprimento L fixo e há a formação de ondas com certos comprimentos de onda específicos correspondentes aos $n = 1, 2$ e 3 , respectivamente [1].

A velocidade de propagação da onda na corda, além da forma vista na equação 1 da seção 4 onde foi mostrada sua dependência com a tensão e densidade linear da corda, pode ser expressa em termos do comprimento de onda e respectiva frequência, como é mostrada na equação 2 [2],

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

Na equação 2, o módulo da velocidade de propagação da onda na corda é fixa e constante. Isso pode ser admitido porque a densidade linear da corda não se modifica, ou seja, é a mesma corda, e também porque se escolhe uma tração fixa.

Então, considerando o módulo da velocidade de propagação fixo, de acordo com o que foi exposto anteriormente, pode-se reescrever a equação 2, conforme expresso na equação 3,

$$f = \frac{v}{\lambda} . \quad (3)$$

Desta forma, para uma série harmônica produzida em uma corda com uma velocidade de propagação fixa, como no experimento da figura 4, ou ainda figuras 1 e 3, nos quais se usou uma corda de densidade linear específica e uma tração devido à força peso, foi possível observar vários modos de oscilação, estes

correspondendo a uma série de valores possíveis de λ_n e uma série de respectivas frequências f_n , e que pode ser generalizado na equação 4,

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) . \quad (4)$$

O comprimento de onda, λ_n , da equação 4 pode ser escrito a partir da equação 1 e, portando, dado pela equação 5,

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) . \quad (5)$$

Considerando a equação 4 pode-se determinar a menor frequência, f_1 , $n = 1$ dada pela equação 6,

$$f_1 = \frac{v}{2L} \quad (6),$$

e que corresponde ao maior comprimento de onda, $\lambda_1 = 2L$, este determinado pela equação 5.

O valor obtido a partir da equação 6 é denominado **frequência fundamental**, porque corresponde ao menor n admitido na equação 1, ou seja, L igual à metade do respectivo comprimento de onda, ou seja, λ_1 . As demais

frequências das ondas estacionárias, então, podem ser expressas da forma mostrada nas equações 7 e 8:

$$f_2 = \frac{2v}{2L} = 2 \left(\frac{v}{2L} \right); \quad n = 2 \quad (7)$$

$$f_3 = \frac{3v}{2L} = 3 \left(\frac{v}{2L} \right); \quad n = 3 . \quad (8)$$

Assim, é possível verificar que os valores apresentados pelas equações 7 e 8 são múltiplos inteiros da frequência fundamental f_1 , tais como $2f_1$, $3f_1$, $4f_1$, ...

Generalizando as observações feitas anteriormente, chega-se à equação demonstrada em 9,

$$f_n = n \frac{v}{2L} \quad (n=1, 2, 3, \dots) , \quad (9)$$

ou simplesmente, à expressão da equação 10,

$$f_n = n f_1 \quad (n=1,2,3) . \quad (10)$$

As frequências obtidas a partir das equações 9 e 10 são denominadas **harmônicos**, e a série que contém todos os valores de frequências para uma corda é chamada **série harmônica** [1].

Uma situação real

Ao considerar uma situação experimental, usando o aparato do experimento mostrado na figura 1, na qual são utilizados dois fios diferentes e dois corpos diferentes, isto é, dois objetos de massas diferentes, os quais proporcionam tensões diferentes nos fios por causa da força gravitacional, tem-se os dados apresentados na tabela 1. Os fios são considerados ideais. O fio 1 utilizado neste caso é o nylon 0,45 mm e o fio 2 nylon 0,60 mm. O valor da aceleração da gravidade utilizada para os cálculos foi $g = 9,78 \text{ m/s}^2$ [3].

Tabela 1 – Valores da velocidade de propagação da onda em duas cordas diferentes.

	μ (kg/m)[4]	T (N)	v (m/s)
fio 1	$2,003 \cdot 10^{-4}$	0,1956	31,24
fio 1	$2,003 \cdot 10^{-4}$	0,5868	
fio 2	$3,235 \cdot 10^{-4}$	0,1956	
fio 2	$3,235 \cdot 10^{-4}$	0,5868	

Fonte: do autor

A partir dos dados apresentados na tabela 1, é possível verificar que:

- Quando o fio 1 está esticado com maior intensidade, isto é, coloca-se um corpo de massa maior, a tensão na corda _____ (aumenta/diminui), em consequência a velocidade de propagação de uma onda será _____ (maior/menor) neste fio;
- Da mesma forma, ao considerar os dois fios diferentes, fio 1 e fio 2, mas mantendo-se a mesma tensão no fio, isto é, o corpo utilizado em ambos os fios é o mesmo, pode-se afirmar que o fio _____ (1/2), cuja densidade linear é maior que a do fio _____ (1/2), tem velocidade de propagação de onda _____ (menor/menor) do que o fio ____ (1/2).

Assim, é possível concluir a partir das observações feitas na tabela 1, que quanto _____ (maior/menor) a **densidade** do fio, _____ (maior/menor) será a velocidade de propagação de um pulso ou de uma onda neste fio. E quanto _____ (maior/menor) a **tensão** aplicada no fio, _____ (maior/menor) será a velocidade de propagação de um pulso ou de uma onda.

Com base nos dados fornecidos na tabela 1, e considerando que o comprimento da corda utilizada no experimento seja $L = 0,75 \text{ m}$, é possível obter o espectro de frequências para as cordas 1 e 2 a partir da equação 8. O resultado do experimento está mostrado na tabela 2.

Tabela 2 - Valores das frequências de ressonância de duas cordas diferentes.

	fio 1	fio 1	fio 2	fio 2
	$\mu = 2,003 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}$	$\mu = 2,003 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}$	$\mu = 3,235 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}$	$\mu = 3,235 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}$
	$T = 0,1956 \text{ N}$	$T = 0,5868 \text{ N}$	$T = 0,1956 \text{ N}$	$T = 0,5868 \text{ N}$
f_1	20,8 Hz	36,08 Hz	16,38 Hz	28,40 Hz
f_2	41,6 Hz		32,76 Hz	
f_3	62,4 Hz		49,12 Hz	
f_4	83,2 Hz		65,52 Hz	
f_5	104 Hz	180,4 Hz	81,9 Hz	142 Hz

Fonte: do autor

A partir dos dados apresentados na tabela 2, é possível verificar que:

- Ao se utilizar um mesmo fio, quanto maior a tensão aplicada no fio, isto é, ao se utilizar um corpo de massa maior para puxar o fio, _____ (maior/menor) será a frequência fundamental para este fio.
- Ao se utilizar dois fios de densidades lineares diferentes, ao se aplicar a mesma tensão em cada um dos fios, isto é o mesmo corpo para puxar o fio, quanto maior a densidade linear do fio, _____ (maior/menor) será a frequência fundamental para esta tensão.

Referências

- [1] YOUNG, D. Hugh. FREEDMAN Roger A.. **Física II**. 10ª ed. São Paulo: Ed. Pearson Addison Wesley, 2003.
- [2] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos da Física**. Volume 2. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- [3] LOPES, Wilson. **Variação da aceleração da gravidade com a latitude e altitude**. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 25, n. 3: p. 561-568, dez. 2008. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/issue/view/1160>. Acesso em: 28 Nov. 2015.
- [4] INSTITUTO DE FÍSICA DA USP. **Tabela de densidades lineares de fios de nylon**. Disponível em: <http://portal.if.usp.br/labdid/pt-br/tabelas-e-constantes>. Acesso em: 28 Nov. 2015.

Seção 7

“Voltando ao início”

Figura 1 - O monocórdio de Pitágoras.



Fonte: O autor.

Ao se fazer uma retrospectiva das seções anteriores, é possível perceber relações dos conceitos apresentados a um instrumento de cordas, como o violão, o piano, ou até mesmo o monocórdio apresentado na figura 1. O monocórdio, o qual será tratado na presente seção, será considerado como base de exemplo de aplicação dos conceitos da ondulatória, vistos em seções anteriores, como as propriedades das ondas mecânicas e o comportamento de uma corda ou fio preso nas duas extremidades, bem como a formação das notas musicais a partir das relações com os comprimentos das cordas. Porém, os conceitos e fundamentações observadas na presente seção podem ser aplicados a todos os demais tipos de instrumentos de cordas, independentes da forma como é construído e o método de produção do som (percutidas, friccionadas ou dedilhadas).

O monocórdio, como o apresentado na figura 1, consiste em um instrumento confeccionado basicamente por uma corda, a qual pode ser de aço ou nylon, por exemplo, onde a mesma é presa em uma das extremidades e tensionada na outra.

Um sistema onde uma corda é presa em uma das extremidades e tensionada em outra por uma determinada massa, foi apresentado na seção 6. Como foi visto, a partir do experimento da corda, estudou-se a formação de ondas estacionárias em uma corda presa nas extremidades, sendo que uma das extremidades estava fixa e a outra possuindo uma determinada massa, a qual era variável e proporcionava tensão à corda.

O monocórdio, como o mostrado na figura 1, foi inventado por Pitágoras (580-497 a.C.), um importante matemático e filósofo grego da Antiguidade [1]. Segundo conta a lenda, ao passar em frente a uma oficina de um ferreiro, Pitágoras percebeu que as batidas de martelos de diferentes pesos produziam sons que eram agradáveis ao ouvido e se combinavam muito bem [2].

Pitágoras utilizou o monocórdio para estudar a relação dos comprimentos das cordas com o som produzido por estas, tentando encontrar as relações onde os sons eram mais agradáveis aos ouvidos. Seu monocórdio consistia basicamente de uma corda, cujas extremidades eram tensionadas por objetos de

determinada massa, apoiada sobre dois cavaletes em uma mesa. Esta mesa também possuía um terceiro cavalete móvel, cuja função era dividir a corda em frações perfeitas do comprimento original [3]. A figura 2 apresenta uma gravura onde se tem uma representação de Pitágoras realizando seus estudos sobre o som formado pelas cordas em um monocórdio.

Figura 2 – Pitágoras realizando seus estudos no monocórdio.



Fonte: [4].

Foi a partir dos seus estudos, com o uso do monocórdio, que Pitágoras chegou às 7 notas musicais conhecidas no ocidente (dó-ré-mi-fá-sol-lá-si-dó). Ele percebeu que quando dividia a corda do monocórdio em $\frac{2}{3}$ do seu tamanho original, ele obtinha um intervalo musical de quinta (exemplo: dó-sol). Ao dividir essa mesma corda em $\frac{3}{4}$ do tamanho original ele obtinha o intervalo musical de quarta (exemplo: dó-fá). E quando ele dividia a corda na metade do comprimento ele obtinha o intervalo de oitava (exemplo: dó1-dó2). Para a obtenção das demais notas Pitágoras utilizou o ciclo das quintas, o qual consistia em encontrar as notas **dó-ré-mi-fá-sol-lá-si-dó**, através da superposição de quintas ascendentes. A utilização do ciclo das quintas proporciona a seguinte ordem das notas musicais: **dó-sol-ré-lá-mi-si** [3].

As relações entre as notas musicais e o comprimento da corda encontrada por Pitágoras estão descritas na tabela 1.

Tabela 1 - Relação pitagórica entre comprimento de uma corda e a nota emitida.

Notas	Dó	Ré	Mi	Fá	Sol	Lá	Si	Dó
Comprimento da corda em relação à Dó	1	$\frac{8}{9}$	$\frac{64}{81}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{16}{27}$	$\frac{128}{243}$	$\frac{1}{2}$

Fonte: [3].

Por exemplo, se a corda que Pitágoras utilizou possuísse 1 m de comprimento entre os pontos de apoio, ao se dividir ($\frac{64}{81}$) obtém-se o valor de 0,79. Isto é, ao se diminuir o comprimento da corda para 0,79 m, é obtida a nota Mi. Isto pode ser observado para qualquer razão descrita na tabela 1.

É importante destacar que a escala obtida por Pitágoras foi baseada nos comprimentos da corda. Porém, a associação da frequência a uma nota musical, a qual é utilizada nos dias de hoje para afinar um instrumento musical, foi introduzida por Galileu Galilei (1564-1642) [3].

Após a construção da escala musical por Pitágoras, houve muitas outras tentativas de construção de escalas musicais, as quais possuísem sonoridades agradáveis aos ouvidos. Gioseffo Zarlino (1517-1590), teórico musical italiano, sistematizou a escala de Pitágoras buscando os intervalos por meio da soma de médias harmônicas e aritméticas a partir de uma nota fundamental. Ou seja, Zarlino se utilizou de passos matemáticos para chegar à escala musical, onde as relações entre os comprimentos de cordas, a partir das

proporções encontradas por ele, estão apresentadas na tabela 2 [3].

Tabela 2 - Relação natural entre comprimento de uma corda e a nota emitida.

Notas	Dó	Ré	Mi	Fá	Sol	Lá	Si	Dó
Comprimento da corda em relação à Dó	1	$\frac{8}{9}$	$\frac{4}{5}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{3}{5}$	$\frac{8}{15}$	$\frac{1}{2}$

Fonte: [3].

Ao se fazer uma comparação entre as relações de Pitágoras e Zarlino, utilizando como exemplo uma corda de 1 m de comprimento entre os pontos da corda que estão apoiados no cavalete, é possível obter os valores apresentados na tabela 03, onde estão representados os comprimentos das cordas em metros para determinada nota musical.

Tabela 3 - Comparação entre as relações de Pitágoras e Zarlino.

Nota	Pitágoras		Zarlino	
	relação	Comprimento (m)	relação	Comprimento (m)
Dó	1	1,000	1	1,000
Ré	8/9	0,889	8/9	0,889
Mi	64/81	0,790	4/5	0,800
Fá	3/4	0,750	3/4	0,750
Sol	2/3	0,667	2/3	0,667
Lá	16/27	0,593	3/5	0,600
Si	128/243	0,527	8/15	0,533
Dó	1/2	0,500	1/2	0,500

Fonte: O autor.

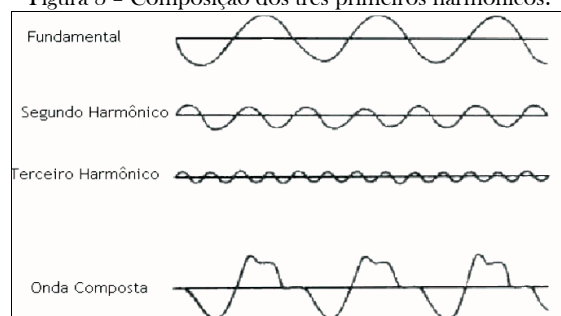
É possível perceber que a escala adotada por Zarlino é muito próxima à elaborada por Pitágoras, porém as relações com os comprimentos são apresentadas de uma forma mais simples para construção da escala. A relação das divisões feitas por Zarlino apresentada na tabela 2 foi a utilizada para a

construção do monocórdio de Pitágoras apresentado na figura 1.

Composição harmônica

Ao se dedilhar a corda de um monocórdio ou de um violão, esta irá oscilar. Como esta corda está confinada entre dois pontos, a onda irá sofrer inúmeras reflexões e múltiplas interferências, como visto na seção 6. Ao se tirar um instantâneo de uma corda vibrando é possível observar que a corda possui um formato diferente de uma onda senoidal, como visto na seção 5, logo, ela possui uma função de onda mais complexa. Quando a corda de um instrumento vibra, sua vibração resultante é a combinação do harmônico fundamental juntamente com vários sobretons; desta forma, o movimento da corda será a superposição de vários modos normais. A figura 3 ilustra a superposição de 3 harmônicos.

Figura 3 - Composição dos três primeiros harmônicos.

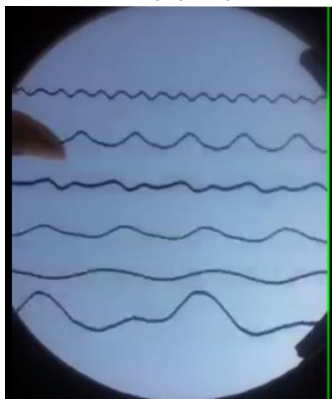


Fonte: [8].

A composição harmônica da corda também depende da forma com que esta foi inicialmente perturbada, isto é, se a corda for tocada próximo à abertura da caixa de ressonância, a corda terá uma determinada composição harmônica. Já se a corda for tocada próximo à outra extremidade, por exemplo, a sua composição harmônica terá um formato

diferente [5]. A composição harmônica das cordas de um violão ao serem dedilhadas é ilustrada na figura 4.

Figura 4 - Um instantâneo das cordas de um violão ao serem dedilhadas.



Fonte: [6].

Timbre

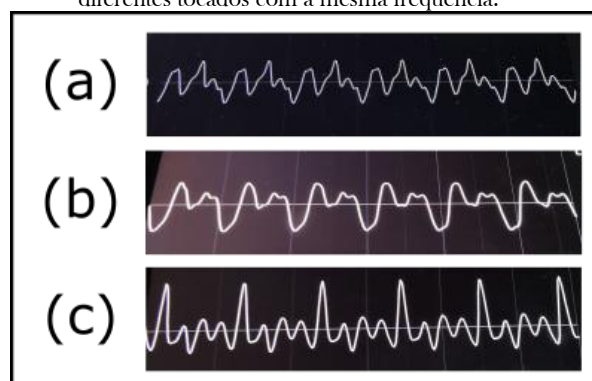
Ao se produzir duas notas musicais, as quais possuam a mesma frequência, através de dois instrumentos diferentes, como o monocórdio e o violão rudimentar, apresentados na seção 1, estas possuem a mesma frequência fundamental, porém, são percebidas de maneiras diferentes pelo ouvido. Isto ocorre devido à presença de intensidades diferentes dos diversos harmônicos, ou mesmo ausência de alguns deles.

O que vai determinar o número de harmônicos que acompanhará uma nota musical, além do tamanho e tensão da corda, é o tipo de corda utilizada, bem como a forma de confecção do instrumento musical. Desta forma, duas notas serão idênticas se forem tocadas por dois instrumentos musicais que possuam as mesmas características. Por exemplo, dois violões produzirão a mesma nota se as cordas utilizadas forem iguais (duas cordas de nylon com mesma densidade linear, por

exemplo) e as dimensões, bem como o tipo de madeira utilizada para sua confecção sejam idênticas.

À diferença do som produzido pelos instrumentos musicais ao tocarem uma nota musical cuja frequência é a mesma dá-se o nome de **timbre** do instrumento. A figura 5 representa o timbre de três instrumentos diferentes tocando a mesma nota, ou seja, a mesma frequência, onde em (a) é a representação do timbre do violino, em (b) do piano e em (c) do trompete.

Figura 5 - os harmônicos formados por três instrumentos diferentes tocados com a mesma frequência.



Fonte: O autor.

Referências

- [1] **Pitágoras.** Disponível em: <http://pensador.uol.com.br/autor/pitagoras/>. Acesso em: 25 dez. 2015.
- [2] O Monocórdio de Pitágoras . <http://www.ghsc.usp.br/server/Sites-HF/Lucas-Soares/monocordio%20de%20pitagoras.html>
- [3] RIBEIRO JÚNIOR, I. S.; CROCHIK, L. . A Construção de Escalas Musicais e Instrumentos Musicais de Baixo Custo Como Recurso Didático Para o Ensino de Física Ondulatória. In: Simpósio Nacional de Ensino de Física, 2009, Vitoria. **Anais do XVIII SNEF**, 2009. Disponível em: http://www.cienciamao.usp.br/dados/snef/_aconstrucaodeescalasmusi.trabalho.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2015.
- [4] HERRERO, Raul. **Pitágoras en el momento del triunfo del cristianismo.** Disponível em: <

<http://raulherrero.blogia.com/2006/071801-pitagoras-en-el-momento-del-triunfo-del-cristianismo.php>>. Acesso em: 28 mai. 2016.

[5] YOUNG, D. Hugh. FREEDMAN Roger A.. **Física II**. 10ª ed. São Paulo: Ed. Pearson Addison Wesley, 2003.

[6] DAVE, P. **Como se vem las cuerdas dentro de la guitarra**. Disponível em:

<https://www.youtube.com/watch?v=xYcSy146LAM>.

Acesso em: 10 Out. 2015.

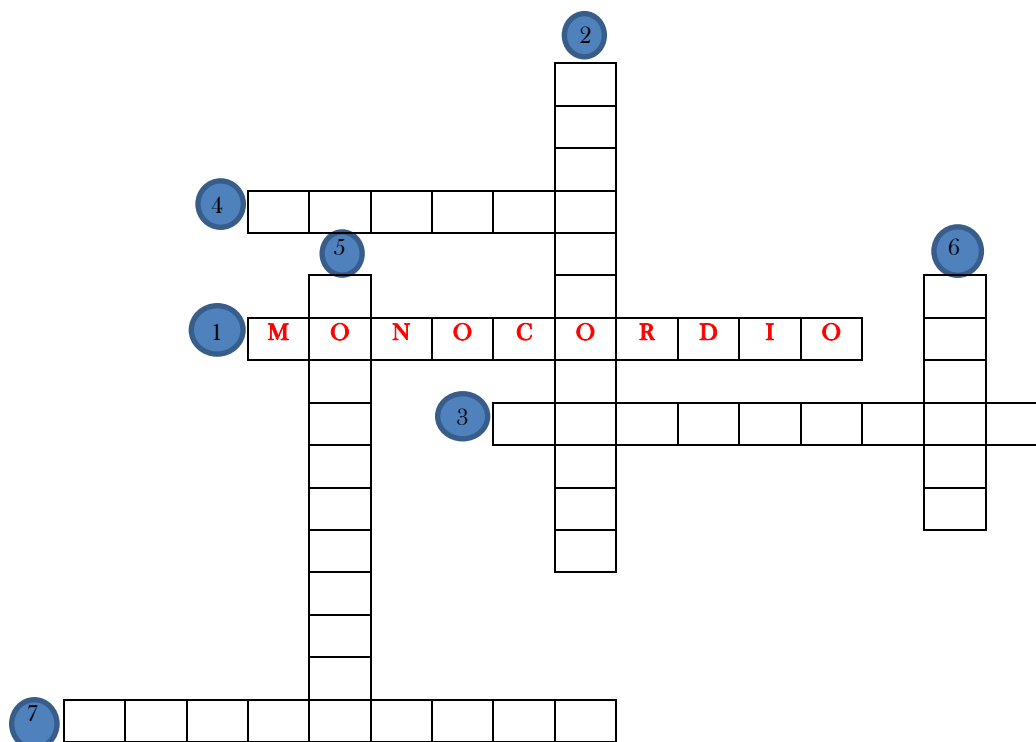
[7] **Note the diferente timbres below**. Disponível em: <http://www.simplifyingtheory.com/timbre/>. Acesso em: 26 Jun. 2016.

[8] Wuensche, C. A. **A física da música**. Disponível em: <http://www.cea.inpe.br/~alex/FisicadaMusica/fisica_da_musica.pdf>, 2005. Acesso em 04 Dez. 2015.

Atividade:

Com base no texto, responda à palavra cruzada proposta:

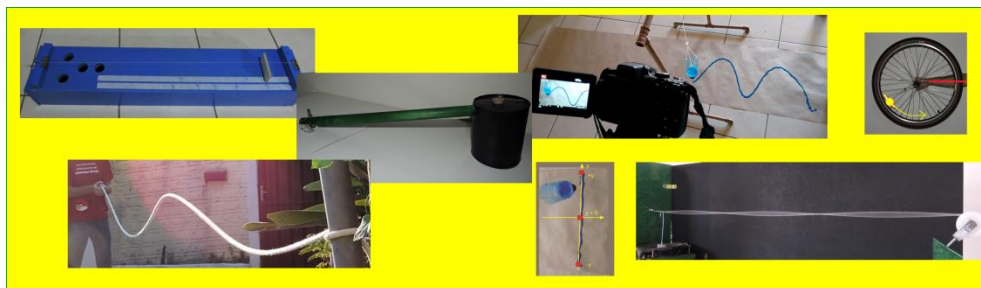
- 1 - **MONOCÓRDIO** : instrumento constituído por uma única corda musical.
- 2 - Ao se refletirem, duas ondas percorrendo sentidos opostos na corda, produzem _____ das ondas.
- 3 - Matemático que criou o monocórdio com o intuito de estudar a relação do comprimento da corda com o som produzido: _____.
- 4 - Nome que se dá ao som característico de um instrumento: _____.
- 5 - Uma nota musical com determinada frequência, tocada em um instrumento musical, depende além da tensão produzida na corda, também do seu _____.
- 6 - Ao estudar as relações das notas com o som, Pitágoras dividiu as cordas em frações _____.
- 7 - Composição _____ é a combinação de uma frequência fundamental juntamente com os harmônicos subsequentes.



Seção 8

“Um final para um novo começo!”

Figura 1 – Registro de alguns materiais utilizados nos estudos.



Fonte: O autor.

Até agora, foram estudadas propriedades físicas das ondas mecânicas presentes nos instrumentos musicais e um registro de alguns materiais utilizados é apresentado na figura 1. Chegou a hora de colocar em prática o conhecimento adquirido, levando em consideração que a Física está presente em todas as situações, a saber: desde a construção de um “simples” instrumento musical, a sua afinação e também a tocar músicas prediletas. Para isso, são apresentados dois textos breves que trazem aplicações práticas sobre a funcionalidade e construção de instrumentos musicais. Então, após a leitura dos mesmos, são feitas algumas perguntas, as quais deverão ser respondidas. Recomenda-se fortemente que a utilização dos textos de apoio fornecidos anteriormente sirva como base para respondê-las.

“...Todos os instrumentos de cordas são “afinados” para as frequências corretas fazendo-se variar a tensão; diminuímos o tamanho da corda para aumentar a altura. Finalmente, quando a massa da corda por unidade de comprimento, μ , aumenta, ocorre a diminuição da velocidade da onda, e portanto, da frequência. As notas mais baixas da corda de aço de uma guitarra são produzidas por cordas mais grossas, e uma técnica para se obter a baixa frequência desejada no piano, consiste em enrolar as cordas dos sons graves do piano com um fio sem a necessidade de se usar uma corda extensivamente longa.” [1]

A frequência, f , padrão para afinação de instrumentos musicais é 440 Hz, a qual corresponde à nota lá. Baseado em tal conhecimento, um *luthier* (pessoa que constrói instrumentos musicais) está desenvolvendo um novo modelo de instrumento de cordas, no qual a distância entre os suportes de sua corda precisa ser de 0,70 m. Ele pretende utilizar uma corda de nylon, cuja densidade linear, μ , é $1,0 \times 10^{-3} \text{ kg/m}$.

O *luthier* está testando uma inovação tecnológica nesse instrumento, ou seja, ele pretende utilizar uma tarraxa (equipamento que tensiona a corda) eletrônica, a qual irá proporcionar uma afinação constante no instrumento. Tal inovação evitará a necessidade de afinar o instrumento sempre ocorra alguma modificação fazendo-o desafinar, pois a sua afinação será automática. (O autor.)

Escolha a melhor alternativa para as questões de 1 a 4!

1 - Quando se aumenta o comprimento de uma corda, a velocidade de propagação de uma onda nesta:

- | | |
|--------------------------------|--|
| ☐ aumenta. | ☐ dobra. |
| ☐ diminui. | ☐ não modifica sua velocidade. |

2 - Ao trocar uma corda por outra corda do mesmo material, porém, com densidade linear maior, a velocidade de propagação da onda na corda:

- | | |
|--------------------------------|--|
| ☐ aumenta. | ☐ dobra. |
| ☐ diminui. | ☐ não modifica sua velocidade. |

3 - Ao ler o texto, quando o autor descreve “aumentar a altura”, ele se refere:

- () aumentar a amplitude da onda.
- () aumentar a frequência da onda.
- () aumentar o comprimento de onda da corda.

4- Ao se fazer o procedimento proposto no texto de se enrolar uma corda com um fio, faz com que:

- () a densidade linear da corda aumente.
- () a densidade linear da corda diminua.
- () nada se altera.

Monocórdios e os violões rudimentares: um breve relato!

5- Com base no que você estudou no decorrer das seções anteriores, juntamente com as observações e investigações feitas nos instrumentos: monocórdios e violões rudimentares, faça um breve relato sobre os conceitos físicos envolvidos ao tocá-los.

Algumas fórmulas e os instrumentos de corda!

6 - Considerando que a nota lá da corda do instrumento que o *luthier* está desenvolvendo será a sua nota fundamental, calcule a tensão com a qual o equipamento deverá proporcionar à corda para que esta mantenha a afinação.

7 - Com base no que foi visto na seção 7 sobre o monocórdio e usando a tabela 2 também da seção 7, onde deverá conter um traste para demarcar a nota ré?

Dê sua opinião, pois ela é importante!

8 - Neste espaço, você poderá dar a sua contribuição sobre as aulas presenciais referentes às ondas mecânicas. Primeiramente tente expressar sobre o seu aprendizado dizendo o que você aprendeu e se você consegue relacionar o funcionamento de um violão ou um monocórdio com conceitos de Física. Em seguida, descreva o que você mais gostou nas aulas, e também o que gostou menos. Também, descreva se você acha esse modelo de aula interessante, ou qual modelo seria o mais apropriado. Enfim, esta parte é livre para sua participação, insira suas críticas, elogios, sugestões de possíveis melhoras, etc. Fique à vontade!

Referências

[1] YOUNG, D. Hugh. FREEDMAN Roger A.. **Física II**. 10ª ed. São Paulo: Ed. Pearson Addison Wesley, 2003.

Muito obrigado!

5 - MANUAIS DE MONTAGEM

Neste Capítulo apresentam-se os manuais de montagem dos instrumentos musicais (monocórdio e violão) e experimentos (experimento da corda e experimento do pêndulo) utilizados na elaboração e aplicação do Produto, a fim de explicar detalhadamente cada passo para a montagem dos aparatos, além disso, vem acompanhado de imagens, para, não só ilustrá-lo, como ajudar na compreensão e reprodução.

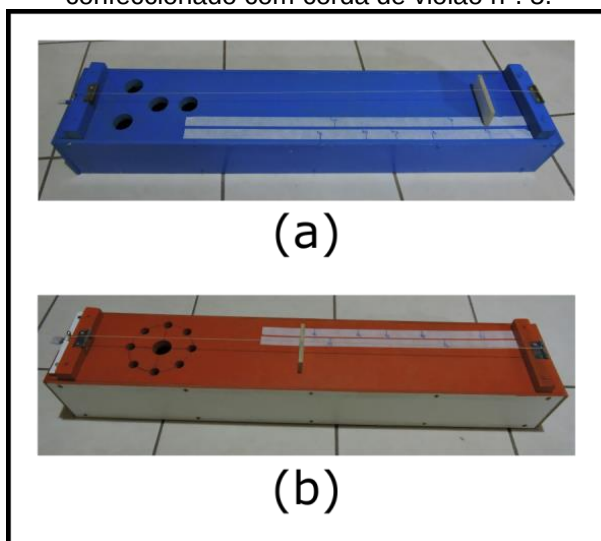
Vale salientar que a montagem não contempla a ordem cronológica dos materiais a serem utilizados porque os mesmos poderão ser utilizados de formas independentes, de acordo com o planejamento do professor.

5. MANUAL DE MONTAGEM DOS MATERIAIS

5.1 Monocórdio de Pitágoras

Foram construídos dois monocórdios a partir dos trabalhos realizados por Mützenbergl (2014) e Ribeiro Júnior e Crochik (2009), com adaptações, onde o trabalho apresentado por Mützenbergl (2014) foi possível a idealização da montagem da caixa de ressonância, enquanto o trabalho proposto por Ribeiro Júnior e Crochik (2009) proporcionaram os cálculos para a divisão da corda para produção das notas musicais. A Figura 5.1 apresenta os dois monocórdios construídos, sendo que as diferenças entre eles são a) furação da caixa de ressonância e as cordas, sendo em (a), confeccionado com uma corda de violão nº. 3 e em (b), uma corda de violão nº. 5.

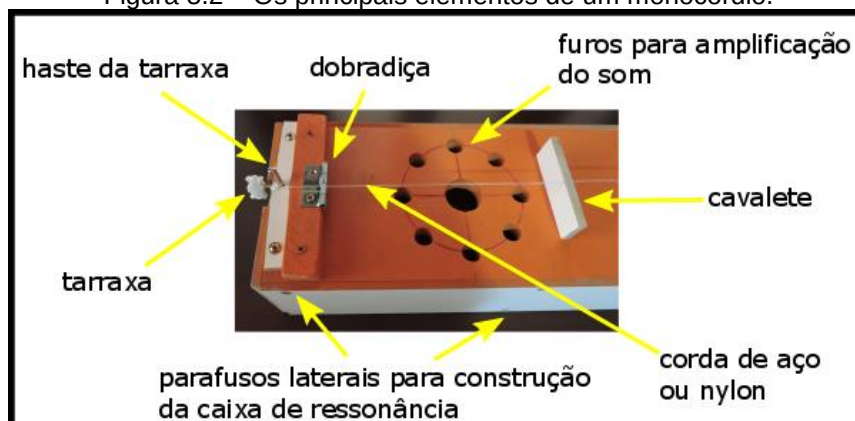
Figura 5.1 – Dois monocórdios de Pitágoras: (a) confeccionado com corda de violão nº. 3 e (b) confeccionado com corda de violão nº. 5.



Fonte: O autor.

Para melhor entender a construção, na Figura 5.2 é apresentado um dos monocórdios com seus principais elementos.

Figura 5.2 – Os principais elementos de um monocórdio.



Fonte: O autor.

E, em seguida, no Quadro 5.1, são apresentados os materiais utilizados para a confecção de apenas um monocórdio e suas respectivas funções.

Quadro 5.1 – Materiais necessários para a confecção de um monocórdio.

item	quantia	material	função
01	02	placa de madeira tipo MDF de 15,0 mm de espessura com medidas 82x15 cm	tampo e base do monocórdio
02	02	placa de madeira 6,0 mm com medidas 82x10cm	laterais do monocórdio
03	02	placa de madeira 6,0 mm com medidas 16,5x10 cm	tampas da caixa acústica do monocórdio
04	02	madeira de 3x2 cm e comprimento de 15 cm	suporte da corda
05	01	tira de madeira 6,0 mm 1,5x14 cm	suporte para prender a tarraxa
06	01	placa de madeira 6,0 mm 3x10 cm	função de cavalete para modificar a nota musical
07	01	corda para violão de aço ou nylon nº. 3 ou nº. 5	produzir os sons dos instrumentos
08	01	tarraxa de cavaquinho	usará para a afinação do instrumento
09	02	dobradiça de 4,0 cm	base para segurar a corda
10	34	parafuso 20 mm	montagem da caixa
11	02	parafuso com porca 20 mm	prender a tarraxa
12	04	parafuso 35 mm	prender o suporte da corda
13	-	fita crepe	realizar a marcação da posição das notas
14	-	furadeira ou parafusadeira, chave de fenda, serra ferro, martelo, brocas para madeira 1.5 mm e 6.0 mm.	montagem do monocórdio

Fonte: O autor.

A montagem do monocórdio é descrita a seguir, porém para facilitar a mesma, siga pela sequência apresentada na Figura 5.3.

- **Passo 1 (Figura 5.3a)** - Faça uma caixa com as madeiras dos itens 01 e 02 (Quadro 5.1). A madeira de 15 mm servirá como base e tampo da caixa, enquanto a de 6 mm servirá como paredes. Em cada lateral coloque 10 (dez) parafusos do item 10 do Quadro 5.1, sendo 5 (cinco) na parte superior e 5 (cinco) na parte inferior.

Obs.: Faça uma linha-guia a 0,7 cm da borda das laterais, de modo que o parafuso fique no centro do tampo e da base da caixa, como mostrado na Figura 5.3a;

- **Passo 2 (Figura 5.3b)** - Na parte superior da caixa, faça um furo com uma broca nº. 1,5, conforme item 14 do Quadro 5.1, à distância de 0,5 cm da borda, o qual servirá posteriormente para passar a corda para violão, constante no item 07 do Quadro 5.1;
- **Passo 3 (Figura 5.3c)** - Na outra extremidade da tampa superior, faça um corte com dimensões onde se possa encaixar a tarraxa do cavaquinho e a prenda na madeira. A referida tarraxa pode ser verificada na Figura 5.2;
- **Passo 4 (Figura 5.3d)** - Prenda as duas madeiras do item 04 (Quadro 5.1) à distância de 2,0 cm da borda da tampa;
- **Passo 5 (Figura 5.3e)** - Faça um furo no centro da tira de madeira de 6,0 mm do item 05 (Quadro 5.1) com o auxílio de uma broca nº 6.0 (item 14 - Quadro 5.1), e certifique-se de que a haste da tarraxa passe firme pelo furo (a) e prenda a tira na extremidade da caixa (b);
- **Passo 6 (Figura 5.3f)** - Prenda as dobradiças do item 09 (Quadro 1) no centro das madeiras do item 04 (Quadro 5.1). Neste caso, coloque apenas um parafuso em cada aba da dobradiça, de modo que fiquem na diagonal um do outro, como indicado na Figura 5.3f (a);
Obs.: Na extremidade onde se encontra a tarraxa, prenda a dobradiça no lado interno do instrumento, como mostrado na Figura. 5.3f (b);
- **Passo 7 (Figura 5.3g)** - Faça furos na tampa superior da caixa, próximo à extremidade em que se encontra a tarraxa. Eles poderão ter quaisquer

formatos e tamanhos, pois servirão como a saída do som na caixa acústica;

- **Passo 8 (Figura 5.3h)** - Coloque a corda do violão - item 07 (Quadro 5.1) de baixo para cima no furo feito na extremidade da caixa 5.3h(a) e a estique, laçando-a na tarraxa 5.3h(b);
- **Passo 9** - Coloque as madeiras do item 03 (Quadro 5.1) tampando as laterais do monocórdio.

Obs: Faça um desbaste em uma das tampas, de modo que encaixe a tarraxa, conforme observado na Figura 5.3h(b);

- **Passo 10 (Figura 5.3i)** - Pinte o instrumento ao seu gosto;
- **Passo 11** - Coloque duas tiras de fita crepe na tampa superior, como mostrado na Figura 5.1, e faça as marcações das notas seguindo as medidas apresentadas no Quadro 5.2.

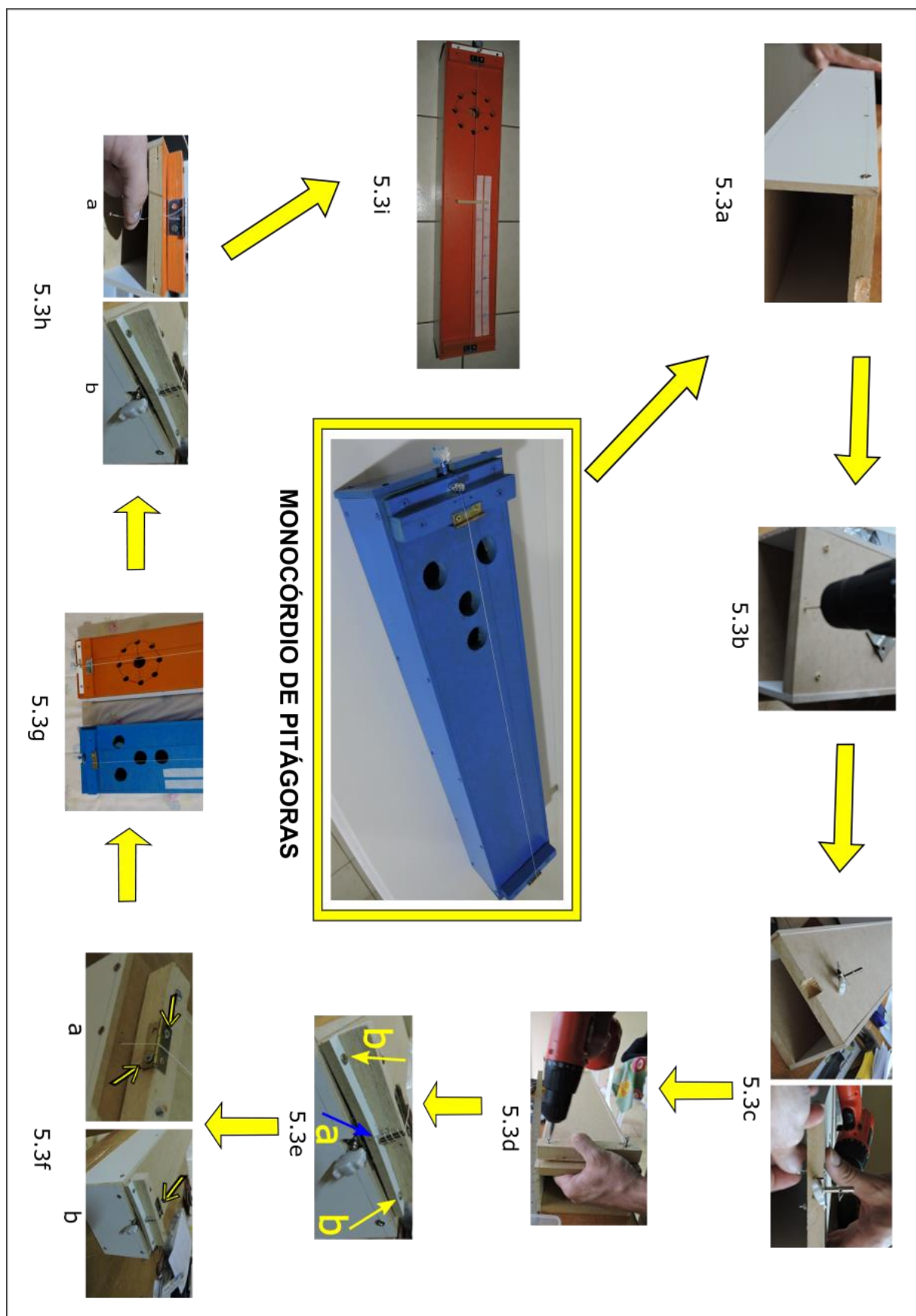
Quadro 5.2 – Distância das notas a partir da dobradiça.

Distância entre as dobradiças: 75,5 cm	
Fração	Distância (cm)
8/9	8,38
4/5	15,1
3/4	18,87
2/3	25,16
3/5	30,2
8/15	35,23
1/2	37,75

Fonte: O autor.

Passo 12 - Coloque a madeira do item 06 (Quadro 5.1) por baixo da corda sobre as marcações feitas, de modo que encoste na corda. Ela servirá como um cavalete, conforme observado na Figura 5.2.

Figura 5.3 – Ilustração dos passos para a construção do Monocórdio de Pitágoras.

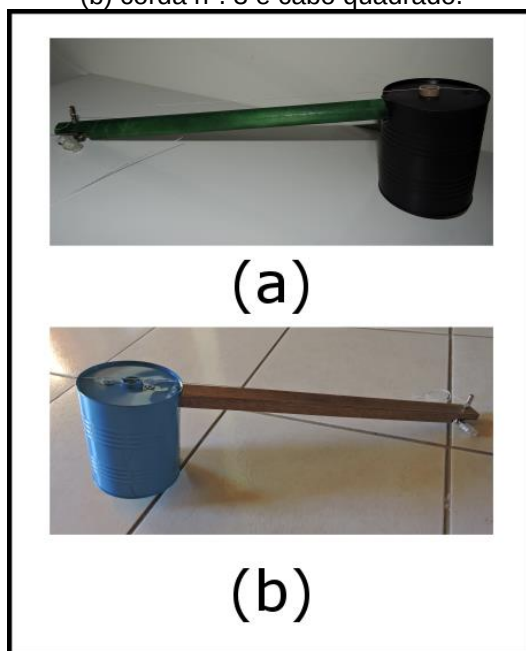


Fonte: O autor.

5.2 Violão de lata

Foram construídos dois violões a partir de adaptações dos trabalhos propostos por Moura e Neto (2011) e Vasconcelos (2014), onde as principais mudanças foram em um dos violões, a substituição do cabo de vassoura sugerido por um cabo quadrado e a fixação da argola que suspende a corda da lata com cola quente. A Figura 5.4 apresenta os dois violões construídos, sendo que as diferenças entre eles são, em (a) um violão construído com a corda de violão nº. 5 e cabo de vassoura redondo e em (b) um violão construído com cabo quadrado e corda de violão nº. 3.

Figura 5.4 - Violão de lata: (a) construído com cabo de vassoura redondo e corda nº. 5 e (b) corda nº. 3 e cabo quadrado.



Fonte: O autor.

Para melhor entender a construção, na Figura 5.5 é apresentado um dos violões com seus principais elementos.

Figura 5.5 – Principais elementos para a construção de um violão de lata.



Fonte: O autor.

E em seguida no Quadro 5.3 são apresentados os materiais utilizados para a confecção de apenas um violão e suas respectivas funções.

Quadro 5.3 - Materiais necessários para a confecção de um violão.

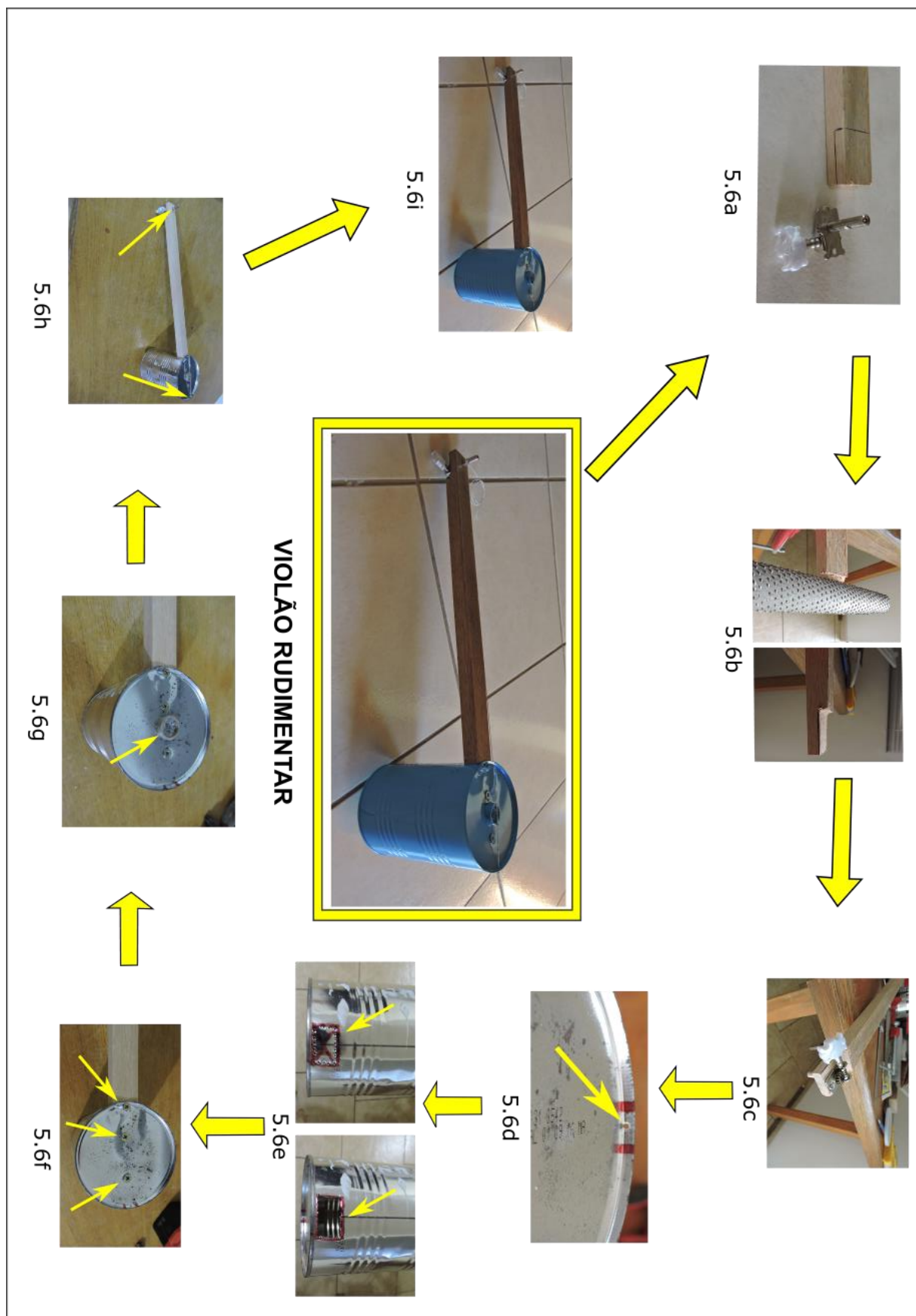
item	quantia	material	função
01	01	lata de achocolatado em pó ou leite em pó 400 g	caixa acústica
02	01	madeira de 1,5x2,5 cm com 47 cm de comprimento	braço do violão
03	01	tarraxa de cavaquinho	tencionar a corda do violão
04	01	corda de violão de aço ou de nylon nº. 3 ou nº. 5	produzir som
05	01	argola de cano de pvc 20 mm com 0,5 cm de comprimento	afastar a corda do violão da lata
06	03	parafuso de 10 mm	prender o cabo de vassoura à caixa
07	02	parafuso de 5 mm	prender a tarraxa
08		furadeira ou parafusadeira; brocas nº 1,5 mm e 6,0 mm; chave de fenda; grossa; lima; pistola de cola quente.	montagem do violão

Fonte: O autor.

A montagem do violão é descrita a seguir, porém para facilitar a mesma, siga pela sequência apresentada na Figura 5.6.

- **Passo 1 (Figura 5.6a)** - faça uma marcação na extremidade da madeira do item 02 (Quadro 5.3) com o auxílio da tarraxa, cuidando para que ao colocar a tarraxa, o furo da corda fique a aproximadamente 0,5 cm de distância da madeira;
- **Passo 2 (Figura 5.6b)** - com o auxílio da grosa (item 08 do Quadro 5.3) desbaste a região demarcada;
- **Passo 3 (Figura 5.6c)** - com o auxílio de uma broca de 6,0 mm (item 08 do Quadro 5.3) faça um furo no meio da região desbastada e coloque a tarraxa, a fixando com os parafusos de 5 mm (item 07 do Quadro 5.3);
- **Passo 4 (Figura 5.6d)** - faça um pequeno furo com uma broca de 1,5 mm (item 08 do Quadro 5.3) na aba da lata do item 01 (Quadro 5.3);
- **Passo 5 (Figura 5.6e)** – na extremidade oposta ao furo realizado no passo 4, demarque com o auxílio da madeira na parede da lata e corte a região demarcada;
DICA: Fure com prego a região ao redor da marca e depois com o auxílio de uma faca corte entre os pontos;
- **Passo 6 (Figura 5.6f)** - Introduza a madeira no orifício feito na lata e a prenda com 3 (três) parafusos de 10mm (item 06 do Quadro 5.3);
- **Passo 7 (Figura 5.6g)** - Cole com cola quente a argola do item 05 (Quadro 5.3) no centro da lata;
- **Passo 8 (Figura 5.6h)** - Estique a corda, introduzindo-a pelo pequeno orifício feito na aba da lata, laçando-o na tarraxa;
- **Passo 9 (Figura 5.6i)** - Se desejar, pinte o violão ao seu gosto, antes de colocar a corda.

Figura 5.6 – Construção do violão rudimentar.



Fonte: O autor.

5.3 Aparato para o experimento do pêndulo

Foi construído um aparato para o experimento do pêndulo a partir de Hewit (2002) e PETFísica (2012) com algumas adaptações, onde foi realizada a construção de uma armação de PVC para suporte da corda do pêndulo e como massa foi utilizado líquido colorido, o qual ao pêndulo oscilar escoava através de um orifício produzido na tampa da garrafa PET para demarcar o papel sob o aparato. A Figura 5.7 apresenta o aparato construído sendo usado em um determinado momento.

Figura 5.7 – Registro de um momento do aparato do experimento do pêndulo em uso.



Fonte: O autor.

Para melhor entender a construção, na Figura 5.8 é apresentado o aparato do experimento do pêndulo com seus principais elementos.

Figura 5.8 – Principais elementos para a construção de um pêndulo.



Fonte: O autor.

E em seguida no Quadro 5.4 são apresentados os materiais utilizados para a confecção do aparato do experimento do pêndulo e suas respectivas funções.

Quadro 5.4 - Materiais necessários para a confecção do aparato do experimento do pêndulo.

item	quantia	material	função
01	02	cano de pvc 20mm com 80cm	laterais
02	01	cano de pvc 20mm com 50cm	parte superior
03	04	cano pvc 20mm de 20cm	base
04	06	cotovelo soldável de pvc 20mm	conexões
05	02	“tê” de pvc soldável 20mm	conexões
06	02	garrafa pet de água mineral de 500ml vazia	massa do pêndulo
07	2m	barbante	montagem do pêndulo
08	01	tinta guaxe colorida	fazer a marcação no papel
09	10m	papel craft com 40cm de largura	fazer o desenho do movimento pendular
10		estilete, prego, martelo, tesoura	montagem do pêndulo

Fonte: O autor.

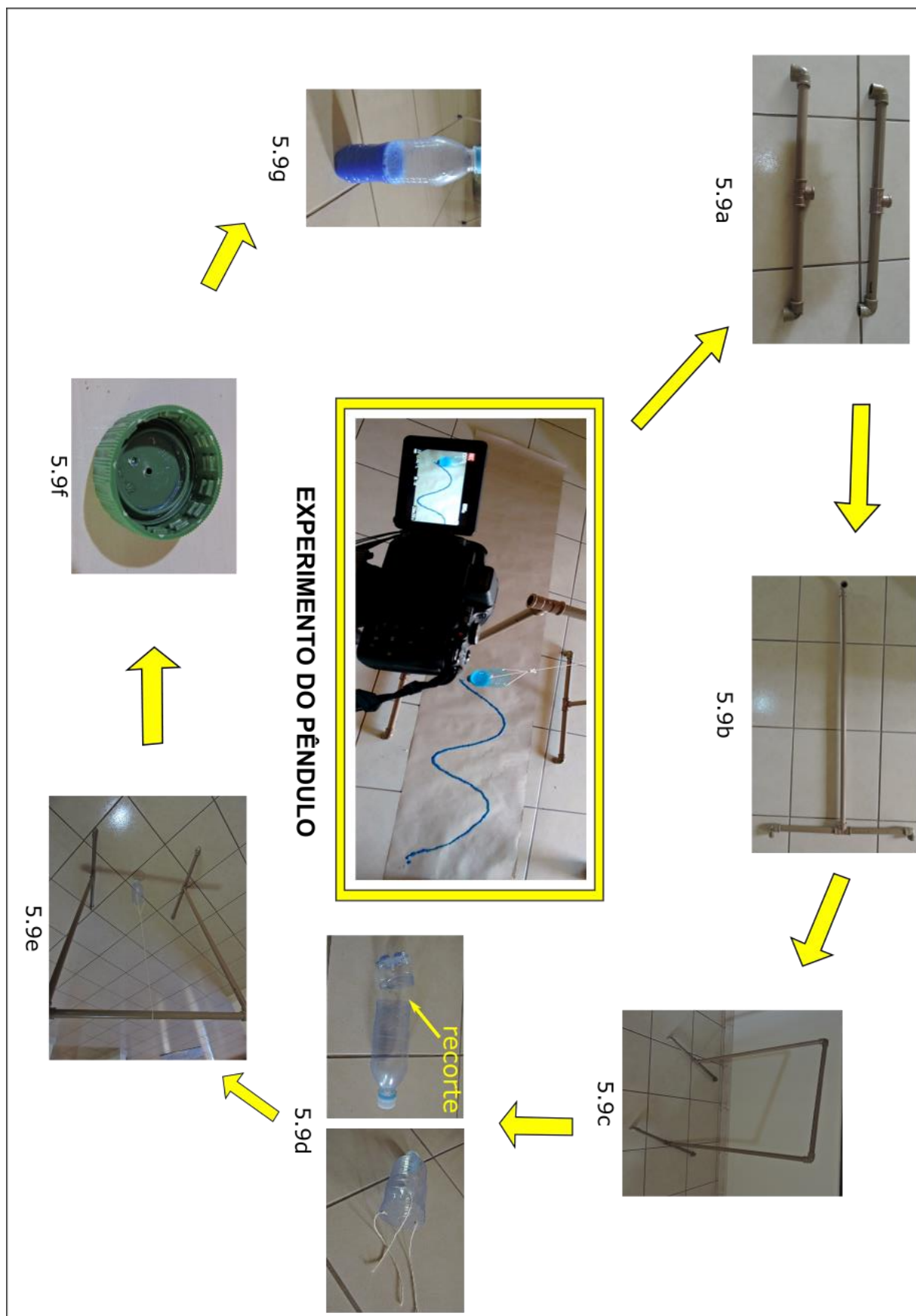
A montagem do aparato do experimento do pêndulo é descrita a seguir, porém para facilitar a mesma, siga pela sequência apresentada na Figura 5.9.

- **Passo 1 (Figura 5.9a)** - Encaixe dois canos do item 03 (Quadro 5.4) a um “tê” item 5 (Quadro 5.4) e na outra extremidade encaixe os dois cotovelos item 4 (Quadro 5.4) com a boca virada para o lado oposto da abertura central do “tê”. Faça o procedimento 2 vezes.
- **Passo 2 (Figura 5.9b)** - Encaixe um cotovelo item 4 (Quadro 5.4) na extremidade do cano do item 01 (Quadro 5.4) e a outra extremidade encaixe com um ângulo de 90° com a montagem do passo 1. Faça o procedimento 2 vezes.
- **Passo 3 (Figura 5.9c)** - Encaixe o cano do item 02 (Quadro 5.4) nos cotovelos que ficaram a 90°, formando a armação do experimento.
- **Passo 4 (Figura 5.9d)** - Recorte uma garrafa pet do item 06 (Quadro 5.4) em aproximadamente 2/3 do seu tamanho, com a parte maior

contendo o bico da garrafa. Faça três furos equidistantes na borda do corte da parte maior cortada e amarre um pedaço de barbante de 20 cm (Quadro 5.4) em cada furo.

- **Passo 5 (Figura 5.9e)** – Amarre os três fios do item anterior juntamente com um pedaço de barbante de 55 cm (Quadro 5.4) de comprimento e amarre a outra extremidade deste ao travessão superior da armação feita no passo 3.
- **Passo 6 (Figura 5.9f)** - Com o auxílio de um prego e martelo, faça um pequeno furo central na tampa da garrafa pet do item 06 (Quadro 5.4) que foi cortada.
- **Passo 7 (Figura 5.9g)** – Dilua um vidro de tinta guache com cor de sua preferência com 250 ml de água aproximadamente e armazene na outra garrafa pet do item 06 (Quadro 5.4).

Figura 5.9 – Construção do experimento do pêndulo.



Fonte: O autor.

5.4 Aparato para o experimento da corda

Foi construído um aparato para o experimento do pêndulo a partir do projeto de extensão de Ignácio, et.al. (2012) bem como o artigo de Mello (2007), onde foram realizadas adaptações, como a fixação do arame ao cone central do alto falante encaixando uma peça móvel feita de tampa plástica e cola quente, bem como a troca do lápis por arame mole. A Figura 5.10 apresenta o aparato experimental completo.

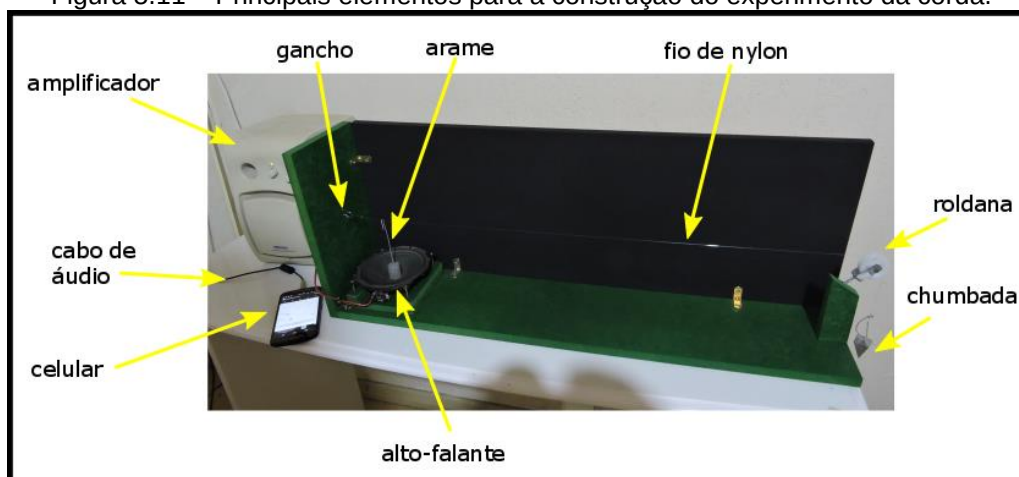
Figura 5.10 – Aparato do experimento da corda.



Fonte: O autor.

Para melhor entender a construção, na Figura 5.11 é apresentado o aparato do experimento da corda com seus principais elementos.

Figura 5.11 – Principais elementos para a construção do experimento da corda.



Fonte: O autor.

E em seguida no Quadro 5.5 são apresentados os materiais utilizados para a confecção do aparato do experimento da corda. e suas respectivas funções.

Quadro 5.5 - Materiais necessários para a confecção do aparato do experimento da corda.

item	quantidade	material	função
01	01	placa de MDF de 15mm com dimensões 30x81,5cm pintado de preto	parede do fundo
02	01	placa de MDF de 15mm com dimensões 30x80cm	base
03	01	placa de MDF de 15mm com dimensões 30x15cm	parede lateral
04	01	placa de MDF de 11x4cm com um corte em diagonal formando ângulo de 45° em um dos lados	suporte da corda
05	01	placa de MDF de 12x12cm	suporte do alto-falante
06	02	tira de MDF de 12x1,5cm	suporte do alto-falante
07	01	roldana de plástico de 4cm de diâmetro	suporte da corda
08	01	gancho aberto pequeno	suporte da corda
09	08	cantoneiras pequenas	montagem da armação do experimento
10	16	parafusos de 10mm	prender as cantoneiras
11	04	parafusos de 30mm	prender o alto-falante à base
12	1	alto-falante de automóvel de 5"	produzir a vibração na corda
13	1,5m	fio para som preto e vermelho	conectar o amplificador ao alto-falante
14	01	tampa plástica (batom, esmalte, etc.) cuja espessura acople ao cone central do alto-falante	suporte para acoplar o alto-falante ao fio do experimento
15	01	arame de aço mole de 30cm de	conectar alto falante ao fio
16	01	amplificador de áudio	amplificar o som produzido pelo celular
17	01	celular com sistema Android contendo o aplicativo "Signal Generator"	produzir a frequência a ser aplicada na corda

18	03*	arame de aço mole de 10cm	suporte das massas massa tencionar a corda; suporte para vibrar a corda
19	02**	chumbadas de pesca em forma de pirâmide, com massas de 20g e 60g.	massas para tencionar a corda
20	01*	pedaço de 110cm de fios de nylon 0.20, 0.40 e 0.60mm	linha para produzir as ondas estacionárias
21	01	cabo de áudio	conectar o celular ao amplificador
22		furadeira ou parafusadeira; chave de fenda, grossa, tesoura, cola quente, serra- ferro, ferro de solda e fio de solda de estanho	montagem do experimento da corda

* A quantidade pode variar de acordo com o número de linhas que for utilizar.

** A quantidade pode variar dependendo do número de experimentos que for realizar.

Fonte: O autor.

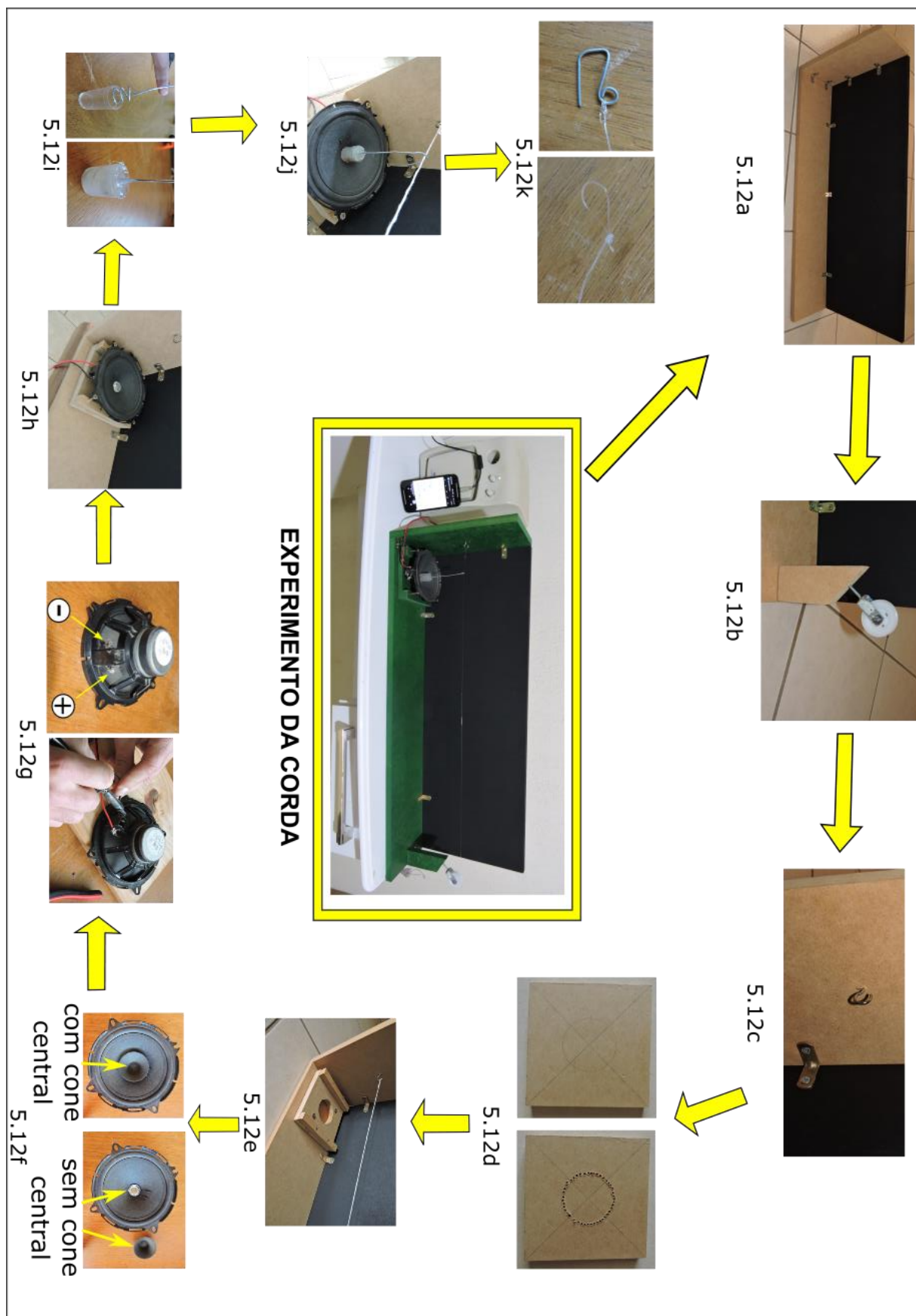
A montagem do aparato do experimento da corda é descrita a seguir, porém para facilitar a mesma, siga pela sequência apresentada na Figura 5.12.

- **Passo 1 (Figura 5.12a)** - Junte as madeiras dos itens 01, 02 e 03 (Quadro 5.5) com o auxílio de 2 cantoneiras item 09 (Quadro 5.5) em cada aresta, formando a estrutura apresentada na figura;
- **Passo 2 (Figura 5.12b)** - Prenda a madeira do item 04 (Quadro 5.5) na extremidade oposta da parede lateral com o auxílio de uma cantoneira item 09 (Quadro 5.5), com o corte em diagonal voltado para a parte de fora; coloque a roldana sobre o chanfro;
- **Passo 3 (Figura 5.12c)** - Na parede lateral da caixa coloque o gancho no centro da mesma, e com a mesma altura da roldana (para que a corda fique nivelada). Veja na Figura 5.11 a altura do gancho em relação à roldana;
- **Passo 4 (Figura 5.12d)** – Faça um furo no centro da placa do item 05 (Quadro 5.5), de modo que encaixe a base do alto-falante.

Dica: Caso você não possua um serra-copos, faça vários furos com uma broca ao longo da linha do círculo que deseja cortar e depois desbaste com uma grossa;

- **Passo 5 (Figura 5.12e)** – Prenda as tiras do item 06 (Quadro 5.5) nas laterais da placa do passo anterior e prenda o conjunto próximo à parede onde se encontra o gancho no aparato do passo 3;
- **Passo 6 (Figura 5.12f)** – Retire o cone central do alto-falante do item 12 (Quadro 5.5);
Passo 7 (Figura 5.12g) – Na parte inferior do alto-falante, com o auxílio de um ferro de solda e fio de solda de estanho, prenda o fio de do item 13 (Quadro 5.5). Ao observar o alto-falante através da parte inferior, por padrão de convenção, o conector do lado esquerdo tem polaridade negativa e do lado direito tem polaridade positiva. Desta forma, solde o fio vermelho no conector do lado direito e o fio preto no conector do lado esquerdo;
- **Passo 8 (Figura 5.12h)** – Prenda o alto-falante à base com o auxílio dos parafusos do item 04 (Quadro 5.5);
- **Passo 9 (Figura 5.12i)** – Com o arame do item 15 (Quadro 5.5), faça uma pequena base de espiral, coloque dentro do tubo do item 14 (Quadro 5.5) e preencha de cola quente;
- **Passo 10 (Figura 5.12j)** – Encaixe a tampa de esmalte no alto-falante e forme um gancho na extremidade do arame, de modo que lace o fio;
- **Passo 11 (Figura 5.12k)** – Com os arames do item 18 (Quadro 5.5), forme pequenos ganchos, prendendo em cada um os fios do item 20 (Quadro 5.5). Na extremidade oposta do fio, faça um laço, para poder prender no gancho da parede do aparato.

Figura 5.12 – Construção do Experimento da corda.



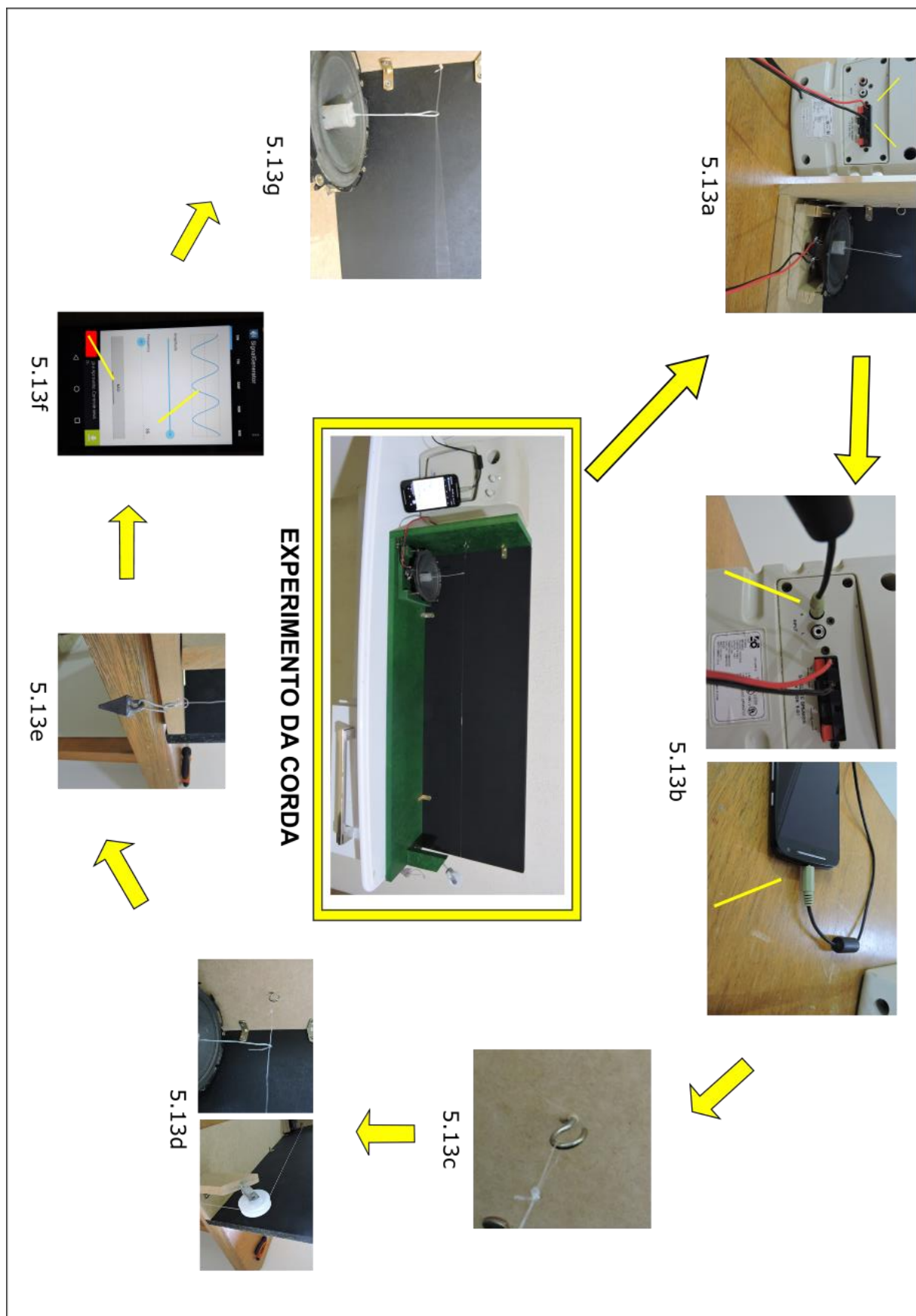
Fonte: O autor.

5.4.1 Procedimento de montagem do experimento de corda

A montagem para a experiência em sala de aula usando o aparato do experimento da corda é descrita a seguir, porém para facilitar a mesma, siga pela sequência apresentada na Figura 5.13.

- **Passo 1 (Figura 5.13a)** – Conecte os fios vermelho e preto do alto-falante ao amplificador (item 16 do Quadro 5.5);
- **Passo 2 (Figura 5.13b)** – Conecte o cabo de áudio (item 21 do Quadro 5.5) à entrada “input” do amplificador e a outra extremidade ao celular;
- **Passo 3 (Figura 5.13c)** – Lace o fio de nylon (item 20 do Quadro 5.5) na argola da parede do aparato;
- **Passo 4 (Figura 5.13d)** – Estique o fio de nylon, passando o mesmo sob o arame preso ao alto-falante, encaixando-o no vão da roldana;
- **Passo 5 (Figura 5.13e)** – Coloque a chumbada, item 19 (Quadro 5.5) na extremidade do fio de nylon;
- **Passo 6 (Figura 5.13f)** – Com o programa “Signal Generator” no celular (item 17 do Quadro 5.5), selecione a frequência desejada, colocando no campo “frequency”, e em seguida tecle o campo “não”. Pronto, o seu aparato experimental está em funcionamento.

Figura 5.13 – Montagem para realização do experimento da corda.



Fonte: O autor.

6 – VÍDEOS, SLIDES E SIMULAÇÕES

Por fim neste capítulo são apresentados os vídeos, slides e simulações utilizados para a aplicação das aulas, visando contribuir para a dinâmica em sala de aula, como sendo elementos que auxiliem na execução das Seções. Por se tratar de materiais desta natureza, são indicados os arquivos e/ou sites onde poderão ser encontrados conforme os Quadros 6.1, 6.2 e 6.3. Vale ressaltar que nos casos em que os materiais não são de autoria própria, estes estão disponíveis para acesso livre e sua fonte foi devidamente citada.

Quadro 6.1 – Lista de vídeos para aplicação em sala de aula.

Arquivo	Seção	Aula	Disponível
Vid01 ^a	01	Aula 1	https://www.youtube.com/watch?v=xYcSy146LAM
Vid02	04	Aula 1	entrar em contato com o autor: luisrauch@yahoo.com.br
Vid03	05	Aula 1	
Vid04 ^b	07	Aula 1	https://www.youtube.com/watch?v=66l6MBQgcRg

a – PRADO, D. **¡Como se ven las cuerdas dentro de la guitarra!...¡Increíble!**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=xYcSy146LAM>>. Acesso em: 10 out. 2015;

b – BRITTO, J. Pitágoras e a Música - Donald no País da Matemática. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=66l6MBQgcRg>. Acesso em 20 Fev. 2015.

Fonte: O autor.

Quadro 6.2 – Lista de slides para aplicação em sala de aula.

Arquivo	Seção	Aula	Disponível
Sld01	01	Aula 1	entrar em contato com o autor: luisrauch@yahoo.com.br
Sld02	02	Aula 1	
Sld03	03	Aula 2	
Sld04	04	Aula 2	
Sld05	05	Aula 1	
Sld06	06	Aula 3	
Sld07	07	Aula 1	

Nota: Estes slides foram reproduzidos no capítulo 2 nos planos de aulas.

Fonte: O autor.

Quadro 6.3 – Lista de simulação para aplicação em sala de aula.

Arquivo	Seção	Aula	Alternativa
Sim01 ^a	04 e 05	Aulas 1 e 2	https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/wave-on-a-string

a – Phet - Simulações Interativas Em Ciências E Matemática. **Onda em corda**. Disponível em: <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/wave-on-a-string>. Acesso em: 13 jun. 2015.

Fonte: O autor.

REFERÊNCIAS

ARNOLD, F. J. et al. Estudo do amortecimento do pêndulo simples: uma proposta para aplicação em laboratório de ensino. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 4. 2011. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/334311.pdf>>. Acesso em 01 jul. 2016.

BRASIL, MEC. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. **Parâmetros Curriculares Nacionais - Ensino Médio**: orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais. Brasília, 2002. 144p. Disponível em <portal.mec.gov.br/seb/arquivo/pdf/cienciasnatureza.pdf>. Acesso em: 01 out. 2014.

_____. **Falta de professores preocupe especialistas**. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/busca-geral/222-noticias/537011943/9885-sp-604135961>>. Acesso em: 13 abr. 2015.

CAMPAGNOLI, D. **Instrumentos de corda**. Disponível em: <<http://violinando.com/instrumentos-de-cordas/>>. Acesso em: 08 out. 2015.

CRUZ, A. R. L. da, et al. **Pêndulo Simples**. 2012. 20f. Relatório de laboratório (Laboratório de Física) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/RobertoLeao/relatrio-pndulo-simples-turma-t5>>. Acesso em 23 abr. 2016.

DONOSO, J. P. et al. A acústica do violino. **CiênCia Hoje**, v. 45, n. 267, 2010. Disponível em: <<http://www.escolamobile.com.br/emedio/e-sapiens/fisica/arquivos/artigos/a-acustica-do-violino.pdf>>. Acesso em: 29 mai. 2016.

GABRIEL, A. **Instrumentos que utilizam cordas**. Disponível em: <<http://theguitar10.blogspot.com.br/2011/03/historia-o-primeiro-instrumento-de.html>>. Acesso em: 25 jun. 2016.

GOMES, P. **Currículo do ensino médio é grande demais**. Disponível em: <<http://porvir.org/porpensar/curriculo-ensino-medio-e-grande-demaish/20130807>>. Aceso em: 13 abr. 2015.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos da Física**. v. 2, 8. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

HEWITT, P. G. **Física Conceitual**. 9. ed. São Paulo: Bookman, 2002.

IGNACIO, B. S. F. et al. **Cordas Vibrantes**. Universidade do Estado de São Paulo. Sorocaba, 2012. Disponível em: <http://www.sorocaba.unesp.br/Home/Extensao/Engenhocas/Carculetas_Atomicas_-_Roteiro_Final.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2014.

KELLER, F.J.; GETTIS W. E.; SKOVE, M. J. **Física, Volume 2**. São Paulo: Pearson, 1999.

LAHERA, J.; FORTEZA, A. **Ciências físicas no ensino fundamental e médio: modelos e exemplos**. Porto Alegre: Artmed, 2006.

LIMA, F. D. A. **As disciplinas de física na concepção dos alunos do ensino médio na rede pública de fortaleza/CE**. 2011, 36f. Monografia (Graduação em Física) – Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2011. Disponível em: <http://www.uece.br/fisica/index.php/arquivos/doc_download/113-as-disciplinas-de-fisica-na-concepcao-dos-alunos-do-ensino-medio-na-rede-publica-de-fortalezace>. Acesso em 15 abr. 2015.

MELLO, G. I. de. Produzindo ondas transversais em cordas de nylon. **A Física na Escola**, V. 8, n. 2, 2007. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol8/Num2/v08n02a08.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2015.

MORENO, A. C. **Só 2% dos professores participam de treino prático na carreira, diz estudo**. Disponível em <<http://g1.globo.com/educacao/noticia/2014/07/falta-incentivo-para-formacao-continuada-de-professores-diz-estudo.html>>. Acesso em: 13 abr. 2015.

MOURA, D. de A.; NETO, P. B. O ensino de acústica no Ensino Médio por meio de instrumentos musicais de baixo custo. **A Física na Escola**, V. 12, n. 1, 2011. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol12/Num1/acustica.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2015.

MÜTZENBERG, L. A. **Monocórdio**. 2004. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/cref/ntef/gram/monocordio.pdf>>. Acesso em 15 abr. 2015

PARANÁ. Secretaria de Estado da Educação. **Diretrizes Curriculares da Educação Básica: Física**. Curitiba: SEED-PR, 2008. Disponível em:

<www.educadores.diaadia.pr.gov.br/arquivos/file/diretrizes/dce_fis.pdf>. Acesso em: 22 Set. 2014.

_____. Secretaria de Estado da Educação. **Caderno de expectativas de aprendizagem**. (Departamento de Educação Básica). Curitiba: SEED-PR, 2012. Disponível em: <www.educadores.diaadia.pr.gov.br/arquivos/file/diretrizes/caderno_expectativas.pdf>. Acesso em: 21 set. 2014.

PERES, L. S. **Matemática e Música: em busca da harmonia**. Disponível em: <<http://www.contrabaixobr.com/t17527-musica-e-matematica-a-relacao-harmoniosa-entre-sons-e-numeros>>. Acesso em 18 jun. 2016.

PETFísica Uem. **Oficina de experimentos PET:** Pendulo de Areia. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=1y5hZAQw0OI>>. Acesso em 22 mai. 2016.

RIBEIRO JÚNIOR, I. S.; CROCHIK, L. . A Construção de Escalas Musicais e Instrumentos Musicais de Baixo Custo Como Recurso Didático Para o Ensino de Física Ondulatória. In: Simpósio Nacional de Ensino de Física, 2009, Vitória. **Anais do XVIII SNEF**, 2009. Disponível em: <http://www.cienciamao.usp.br/dados/snef/_aconstrucaodeescalasmusi.trabalho.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2015.

SÓ MATEMÁTICA. **Mundo Matemático.** Disponível em: <<http://www.somatematica.com.br/mundo/musica6.php>>. Acesso em 18 jun. 2016.

SOARES, L. C. **O monocórdio de Pitágoras.** Disponível em: <<http://www.ghtc.usp.br/server/Sites-HF/Lucas-Soares/Home.html>>. Acesso em: 21 mar. 2015.

TIPLER, P. A; MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros.** V.1, 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

VASCONCELOS, J. **Como fazer uma viola de lata.** Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=Ubb3D1YkM_w>. Acesso em 06 nov. 2015.

YOUNG, D. H.; FREEDMAN R. A. **Física II.** 10. ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2003.