

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA, MATEMÁTICA E EDUCAÇÃO

LEONARDO SILVA DE OLIVEIRA

O ESTREITAR DE LAÇOS MUSICAIS ATRAVÉS DA FÍSICA

ARARAS

2023

LEONARDO SILVA DE OLIVEIRA

O ESTREITAR DE LAÇOS MUSICAIS ATRAVÉS DA FÍSICA

Monografia apresentada no Curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal de São Carlos para obtenção do título de Licenciado.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Colato
Coorientador: Prof. Dr. Adilson Brandão

Universidade Federal de São Carlos
Licenciatura em Física

ARARAS
2023

Oliveira, Leonardo Silva de

O Estreitar de Laços Musicais através da Física /
Leonardo Silva de Oliveira -- 2023.
57f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos,
campus Araras, Araras

Orientador (a): Alexandre Colato

Banca Examinadora: Corinne Arrouvel, Luiz Antonio

Norder

Bibliografia

1. Ondas Sonoras. 2. Educação Musical. 3. Berimbau. I.
Oliveira, Leonardo Silva de. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Helena Sachi do Amaral - CRB/8
7083

Leonardo Silva de Oliveira
O ESTREITAR DE LAÇOS MUSICAIS ATRAVÉS DA FÍSICA

Monografia apresentada no Curso de
Licenciatura em Física da
Universidade Federal de São Carlos
para obtenção do título de Licenciado
em Física

Data da defesa: 03 de março de 2023

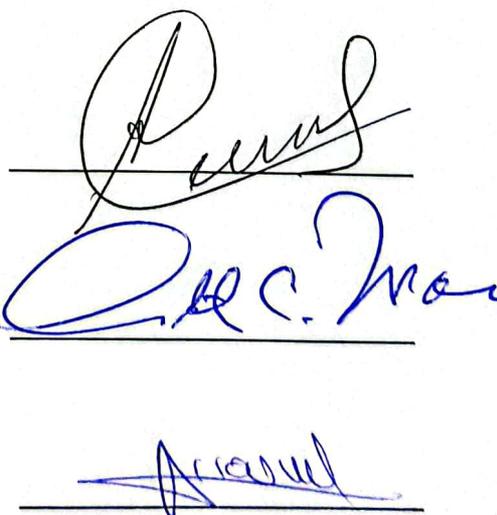
Resultado: APROVADO

BANCA EXAMINADORA

Prof. Alexandre Colato
Universidade Federal de São Carlos

Prof. Luiz Antonio Cabelo Norder
Universidade Federal de São Carlos

Prof. Corinne Arrouvel
Universidade Federal de São Carlos



The image shows three handwritten signatures in blue ink, each positioned above a horizontal line. The top signature is in black ink and appears to be 'Alexandre Colato'. The middle signature is in blue ink and appears to be 'Luiz Antonio Cabelo Norder'. The bottom signature is in blue ink and appears to be 'Corinne Arrouvel'.

*Dedico este trabalho a todos que se
fazem mover pela música*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai e minha mãe que propiciaram oportunidades inéditas dentro da família para meu estudo e foram meu alicerce enquanto estive distante de casa;

Meus companheiros e ex-companheiros da república Zona Rural que redefiniram o significado de lar e família desde os primeiros dias no município de Araras;

Professores orientadores que foram sensíveis ao enxergar e valorizar a franqueza no tema e cada estímulo dos mesmos durante todo desenvolvimento deste trabalho;

Aos companheiros de curso de licenciatura em física 2017, que são as pessoas que mais sabem todo esforço, dificuldade, disciplina, permanência e resistência envolvidos para chegar até aqui. Ajudamos e fomos ajudados ao longo de todo percurso;

Felipe Carneiro (Lemão), foi o primeiro formando em física que tive amizade e uma grande inspiração dentro e fora da universidade;

João Pedro, meu aluno no Cursinho Popular da UFSCar (UFSCurso) e um dos primeiros a ler um esboço deste trabalho. Quando notei lágrimas em seu rosto tive a real certeza de que tudo faria sentido;

Aos técnicos de laboratório, funcionários da limpeza, cozinha, motoristas, eletricitas e demais funcionários da Universidade que se empenharam e seguem empenhando um papel central para a estrutura do ambiente acadêmico;

A banca examinadora que pôde fornecer ainda mais riqueza e profundidade ao destinar um olhar carinhoso a esse trabalho.

Aos familiares, amigos, irmãos de banda que muito me ensinam sobre a vida e a música.

“A árvore da vida sabe que, aconteça o que acontecer, a música suave que a envolve jamais cessará. Não importa quantas mortes ocorram, quanto sangue se derrame: a música continuará a embalar homens e mulheres enquanto os ventos soprarem sobre eles, enquanto a terra os nutrir e amar.”
(Eduardo Galeano)

RESUMO

Motivado pela ausência de atividades musicais dentro da sala de aula e pelo desinteresse em um ensino de física mecanicamente estático, este trabalho visa estimular a sensibilidade musical dentro do cenário escolar, usando explicações físicas para explicitar os fenômenos ondulatórios envolvidos no berimbau. Pode-se também obter uma relação inversa, onde o estudo estimulará o estreitar com a física através da música. Após uma série de aulas que teorizem o conceito de ondas, ondas-sonoras, fenômenos ondulatórios, cordas vibrantes e tubos sonoros, torna-se possível detalhar o princípio acústico de um berimbau, que tem um simples modo de funcionamento, no qual sua caixa acústica vibra em ressonância com a corda percussionada. Os modos de vibração do instrumento podem ser conhecidos e reconhecidos por meio de cálculos amparados pela matemática básica que, com as devidas convenções, levam em conta somente as dimensões do berimbau. Espera-se que os alunos sejam sujeitos ativos ao medir, calcular, debater e inferir os harmônicos presentes no instrumento. Assim, busca-se evidenciar a percepção e apreciação musical relacionando os comprimentos de onda envolvidos com diferentes sons emitidos pelo instrumento, captando uma reflexão físico-musical do aluno que estimule uma sensibilidade capaz de notar a simples, distante e indissociável natureza matemática do instrumento. O público alvo desse trabalho são alunos do ensino médio, mais especificamente o segundo ano.

Palavras chave: Física. Ondas-Sonoras. Educação Musical. Berimbau.

ABSTRACT

Motivated by the lack of musical activities in classroom and by the lack of interest in teaching physics mechanically static, aims to stimulate the musical sensitivity in side school outlook, using physical explanations to specify the wavy phenomenon in berimbau. Not only it is possible to get an opposite reaction, that the study will stimulate physics through the music. Upon a series of classes that theorized the concept of waves, sound waves, wavy phenomenon, wriggling strings, audio pipes, it becomes possible to detail the acoustic principle of a berimbau, that has a simple way to work: its acoustic box (calabash) vibrates in resonance with the string. The modes of vibration in musical instruments can be known and recognized using basic maths formulas in taking into account the Berimbau dimensions. It is expected to the children to be active subjects able to measure, calculate, discuss and infer the harmonics present in the instrument. We seek to make clear the sound perception and appreciation linked to wave length in the instrument, to capture an afterthought physical-musical of the learner in order to stimulate a sensibility capable to note a simple and inseparable mathematical nature of the instrument. The target audience of these issue is high school students, specifically, the second year of high school.

Key words: Physic. Sound waves. Musical Education. Berimbau.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Pulso em uma corda.....	16
Figura 2 - Onda e suas Grandezas.....	16
Figura 3 - Onda Tracejada Defasada $0,05T$ em Relação a Onda Linear.....	17
Figura 4 - Instrumentos Musicais e suas Alturas	18
Figura 5 - Reflexão de Onda em Extremidade Fixa e Livre.....	19
Figura 6 - Refração em Cordas de Diferentes Propriedades	20
Figura 7 - Polarização de Onda	21
Figura 8 - Interferência Destrutiva e Construtiva entre dois Pulsos em Sentidos Opostos.....	22
Figura 9 - Ondas Estacionárias com Nós e Ventres Descriminados.....	22
Figura 10 - Frente de Onda pelo Princípio de Huygens	23
Figura 11 - Experimento de Young: Dada Onda Incidente sobre um Obstáculo de fenda dupla e logo após em um Anteparo. a Diferença entre os Comprimentos de onda que Chegam no Anteparo pode ser Encontrada através de uma Abordagem Trigonométrica do Triângulo q δx de \hat{A}	25
Figura 12 - Compressão e Rarefação Sonora com Comprimento de Onda Descriminado.....	27
Figura 13 - Mapeamento do Canal Auditivo	27
Figura 14 - Fontes sonoras e ondas associadas	32
Figura 15 - Duas Ondas Sonoras Distintas que Propiciando o Batimento.....	34
Figura 16 - Modos de Vibração de Cordas.....	36
Figura 17 - Tubo Aberto	37
Figura 18 - Tubo Fechado.....	38
Figura 19 -Dimensões de um Berimbau	43
Figura 20 - Plano de ação	49

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	14
2.1 Gerais	14
2.2 Específicos	14
2.3 Questão de Pesquisa	14
3 ONDAS	15
3.1 Fenômenos Ondulatórios	19
3.1.1 Reflexão.....	19
3.1.2 Refração	20
3.1.3 Polarização.....	20
3.1.4 Interferência.....	21
3.1.5 Ondas Estacionárias.....	22
3.1.6 Ondas Bidimensionais	23
3.1.7 Ondas Tridimensionais	24
3.2 Ondas Sonoras	26
3.2.1 Sistema Auditivo.....	28
3.2.2 Velocidade do Som	28
3.2.3 Qualidade do Som.....	29
3.2.3.1 <i>Altura</i>	29
3.2.3.2 <i>Intensidade</i>	30
3.2.3.3 <i>Timbre</i>	31
3.3 Fenômenos Ondulatórios Em Ondas Sonoras	32
3.3.1 Batimento.....	33
3.3.2 Ressonância.....	34
3.3.3 Cordas Vibrantes.....	35
3.3.4 Tubos Sonoros	36
3.3.4.1 <i>Tubo Aberto</i>	37
3.3.4.2 <i>Tubo Fechado</i>	37
4 O CASO DO BERIMBAU	39
4.1 Descrição do instrumento	39
4.2 Toques	39
4.3 Análise Científica	40
5 PLANO DE AÇÃO	42
6 CONCLUSÃO	51

1 INTRODUÇÃO

Inerentemente associada à vida de toda sociedade, a música surge desde as primeiras horas de vida até o fim da jornada do ser. Ainda no berço estamos sob influência de canções de ninar e sons emitidos por nossos pais para reconhecimento de suas ações; nossa resposta surge com o mesmo caráter para comunicação de emoções com choros e risos. Nesta proposta, procura-se então apropriar-se desse contato estreito das pessoas com a música para educar, utilizando conceitos físicos de acústica para abordar e, posteriormente, assimilar a música como uma ciência.

Nas escolas a educação musical está tradicionalmente ligada ao brincar e à reprodução de valores nacionais por meio de hinos e folclores. Além disso, ao aprender a contar, uma habilidade básica de ritmo e métrica é levada inconscientemente aos alunos. Ao passar dos anos, os currículos distanciam-se da música e a escola vai perdendo a oportunidade de utilizar um conteúdo com ligação íntima à vivência do aluno no processo de ensino-aprendizagem (GOHN; STRAVACAS, 2010). No que diz respeito às pesquisas, nota-se como a área da física da música é coadjuvante e pouco abordada em cursos de todos os níveis educacionais (CARVALHO, 2022). Isso pode ser o reflexo de uma educação conservadora, historicamente ligada à reprodução e ao mecanicismo que não fornece espaço para fenômenos naturais que permeiam o empírico das pessoas.

Apesar do contato musical ser construído ao longo do desenvolvimento do ser, nota-se uma relação frágil e contraditória: são minoria os que tocam (comumente o fazem por um curto período de tempo) e maioria os que desejam tocar. Ao pressupor o espaço educacional como ideal para uma troca legítima de saberes, torna-se notável realçar as habilidades já presentes em cada um dos alunos e alunas, descobrindo, fornecendo e compartilhando a virtude musical. Através da intencionalidade desse projeto, dar-se-á devida importância à verbalização e as práticas em conjunto, valorizando e propagando o saber. No presente trabalho, voltado para discentes do ensino médio como público-alvo, trabalhar-se-á através de conceitos físicos de oscilações, ondas e acústica para um maior entendimento sobre o funcionamento de instrumentos musicais.

A música se faz presente no desenvolvimento de habilidades de expressão, autoestima, liberdade vocal e corporal e, conseqüentemente, acaba influenciando as relações sociais e educacionais. No vão entre silêncio e som, habilidades como atenção, raciocínio, memória, associação e dissociação são trabalhadas. Além de

forte fonte estimulante para o cérebro, o ato de fazer música é único e intransferível, cada um emite para seu instrumento sua identidade composta de emoções, vivências e culturas não formais (SOUZA, 2016). Baden Powell não toca violão como João Gilberto que por sua vez não toca como Rosinha de Valença. Além disso, a prática em conjunto pode fornecer manifestações associadas ao senso crítico, respeito pelo diálogo musical e pela expressão artística, fomentando um desenvolvimento em sentido amplo e irrestrito (SANTOS, 2012). Pelo pensamento vygotkiano, tem-se a aprendizagem relacionada à interação com o meio, já o som *per se* é definido pela interação de ondas com o meio. Tem-se então o último atuando como ferramenta desse processo interacionista. Interessante notar que este tema gera curiosidades há tempos, diversos cientistas fizeram estudos sobre a música, tais como Kepler com “a harmonia do mundo (1619)” e Pitágoras com as escalas musicais, na Antiguidade.

Pesquisas mostram a relevância da aplicação da musicalização, definida como a interação entre ritmo-som-corpo, em diversas áreas do saber, como ciências exatas, ciências naturais, educação especial, educação ambiental, ensino de línguas, antropologia, filosofia e fisiologia. A entrada sensorial para pulsos e unidade sonora é o canal auditivo, que se baseia em conexões numéricas promovendo e organizando aprendizagens. Dentro das escolas, há a necessidade da criação de um ambiente musical saudável, envolvendo a escuta (sensibilização sonora), a liberdade e espontaneidade (expressão) e elaborações neurocognitivas (transcodificação), além da interação (contato com o meio), processos que estimulam a memória operacional do ser (GOMES, 2015).

Em 1971, com uma efervescência de pedagogias pró-criatividade, atividades de caráter musical tornaram-se obrigatórias nos currículos educacionais brasileiros através da Lei 5.692. Com o passar dos anos, no entanto, a mesma foi revogada pela Lei 9.394 de 1996, marcando o início do anulamento de práticas musicais nas escolas. A situação é agravada ao romper com a área de artes em prol do ensino técnico no novo ensino médio pela Lei 13.415 (CARVALHO, 2022). Há, parcialmente, algum estímulo às práticas musicais em escolas particulares ou em pedagogias alternativas. A educação musical é, portanto, não popularizada, elitizada e desvalorizada. Com esse rompimento, o valor musical ganha força em outros espaços sociais, como em práticas religiosas e em cursos ofertados por prefeituras, agentes esses que fornecem uma democratização e por conseguinte, uma atuação mais representativa que a própria escola no que tange à educação musical. A busca é,

portanto, reintroduzir a música e seus desdobramentos com projetos relevantes dentro da sala de aula.

Em recente estudo realizado no campus de ciências agrárias da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), levantou-se dados com um questionário estruturado sobre a relação dos discentes e docentes com a música. Mais da metade dos participantes que não tiveram formação musical manifestaram o interesse em sua aprendizagem (NORDER, *et al*, 2021). O agravante nesta situação é a ausência de pesquisas para essas situações em nível de ensino superior. Em levantamento exaustivo pelos acervos da Internet não foi possível encontrar mais desdobramentos sobre esse tema fora de instituições com cursos musicais.

Através da negligência na abordagem de um conteúdo musical em todos os níveis escolares, houve motivação para relacionar fenômenos físicos e musicais. No presente trabalho a ênfase é dada em ondas sonoras presentes no berimbau. No entanto, considera-se a importância de definir conceitos propedêuticos para que haja um entendimento mais abrangente por parte do leitor, partindo de ondas unidimensionais até chegar na configuração acústico do instrumento em questão.

É importante citar que grande parte das figuras presentes neste trabalho são adaptações manuscritas realizadas pelo autor.

2 OBJETIVOS

2.1 Gerais

Fornecer, através da física, um maior interesse e melhores condições para um fazer musical ativo dentro de um cenário educacional antagônico à arte.

2.2 Específicos

Dispor maior conhecimento teórico e prático ao abordar as relações entre física-música no ensino médio;

Dar maior atenção a conceitos que são facilmente associados com o cotidiano do aluno;

Partir do contexto sociocultural para cativar o ânimo dos alunos;

Propiciar um viés cultural-artístico dentro da escola;

Estimular sensibilidades e percepções com a música como agente central;

Detalhar a acústica de um instrumento musical específico, no caso o berimbau;

Explicitar uma raiz cultural com o resgate histórico do instrumento e sua importância;

Possibilitar locais de troca com atividades grupais e interdisciplinares.

2.3 Questão de Pesquisa

Considerando a presença do som ao longo da vida de cada um dos seres e sua abordagem pela física das ondas sonoras, por que tais conceitos ainda não são usados para apropriação e entendimento desse fenômeno no ambiente escolar?

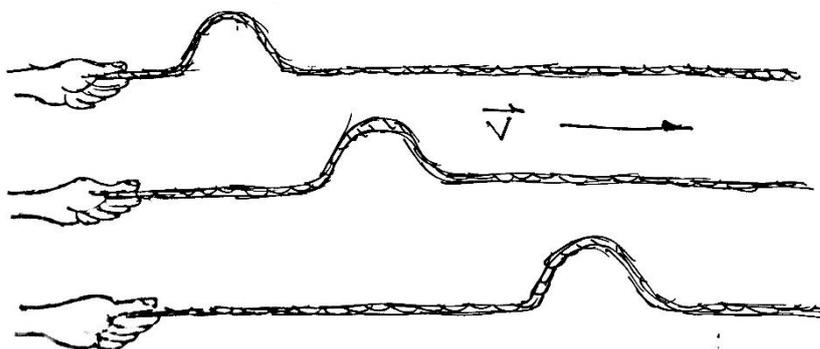
3 ONDAS

Os levantamentos teóricos percorridos nessa seção foram consultados no livro didático Física para o Ensino Médio, vol. 2 – Kazuhito Yamamoto, Luiz Felipe Fuke (YAMAMOTO, 2013) aprovado pelo Programa Nacional do Livro Didático (PNLD), do Ministério da Educação, no qual é possível ter em mãos os conceitos previstos no componente curricular de física para o ensino médio, centralizando-se nos temas oscilação, ondas e ondas sonoras. Complementar a esse levantamento, usou-se o livro de física de nível superior Física II: Termodinâmica e Ondas, de Young & Freedman (2008). Com isso, foi possível agregar informações mais detalhadas e ocasiões musicais relacionadas com o cotidiano, saindo da superficialidade em determinados momentos. Partiu-se da visão que, para poder falar de instrumentos musicais dentro da escola, é preciso ter o domínio de conceitos propedêuticos desta área que se seguem.

A natureza da onda pode ser mecânica e eletromagnética. Na primeira ocorrem deformações em meios elásticos na qual ela se propaga, por se tratar de um meio com tal propriedade elástica, há um componente restaurador no sistema que tende a voltá-lo para posição de equilíbrio. Na onda eletromagnética não há necessidade de um meio para propagação; as mesmas se sustentam pela conservação de energia, não sofrendo dissipação ao longo de seu trajeto.

Define-se uma onda mecânica como *uma oscilação perturbadora que se propaga em um meio, ocorrendo de ponto a ponto preservando o movimento harmônico original* (YAMAMOTO, 2013), como ilustrado na figura 1. A onda transporta energia, mas não matéria (podemos imaginar uma onda do mar que não é capaz de transportar objetos antes de sua quebra). Esse movimento ondulatório é uma espécie de trabalho realizado sobre o sistema que o perturba rompendo seu equilíbrio, ocasionando uma oscilação das partículas do meio, mas não do meio em si. A onda possui sua velocidade de propagação, enquanto as partículas do meio descrevem movimentos harmônicos simples com frequência estipulada.

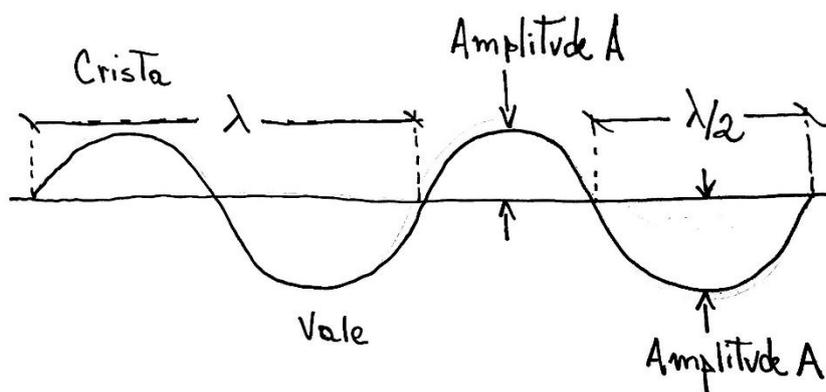
Figura 1 - Pulso em uma corda



Fonte: Oliveira, 2023, adaptado de Santos

Uma onda possui sua amplitude onde o ponto máximo é denominado cume ou crista, e o ponto mínimo denominado vale ou ventre. O comprimento de onda λ é dado pela distância que ela percorre entre um ciclo e outro, sendo esse ciclo definido pelo tempo (período τ) que a onda leva para se propagar de um ponto até o mesmo que se sucede. Em sua propagação, o ciclo se fecha quando ocorre a concordância de fase. Assim, os pontos distanciados de um comprimento de onda se movem sempre em fase.

Figura 2 - Onda e suas Grandezas

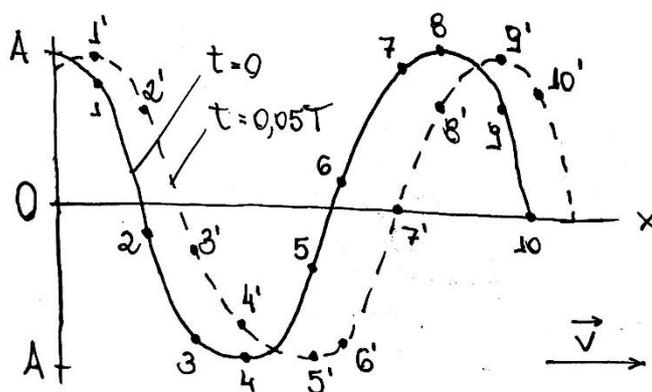


Fonte: Oliveira, 2023

São denominadas ondas transversais as que possuem o movimento vibratório perpendicular ao de propagação. Já as ondas longitudinais possuem a propagação e a vibração na mesma direção, paralelamente. Os conceitos supracitados são válidos para ambos os casos.

Ao analisar uma onda transversal periódica, nota-se simetria na sequência entre cristas e vales, ocasionando a corriqueira onda senoidal. Como cada ponto possui uma fase de movimento, nas frações do período que define um ciclo há diferentes sincronias entre os pontos, conhecida como defasagem ou diferença de fase. Um ponto que está na crista e outro no vale estão com uma defasagem de meio ciclo. A figura 3 ilustra a situação de duas ondas diferentes ligeiramente defasadas, defasagem essa que será sempre a mesma ao longo do percurso em um mesmo meio.

Figura 3 - Onda Tracejada Defasada $0,05T$ em Relação a Onda Linear



Fonte: Oliveira, 2023, adaptado de Santos

Pela cinemática, considerando v_p a velocidade de propagação, s o espaço e t o tempo, podemos escrever a derivada da seguinte maneira:

$$v_p = \frac{ds}{dt}. \quad (1)$$

Sabendo que o período τ é dado pelo inverso da frequência f :

$$\tau = \frac{1}{f}, \quad (2)$$

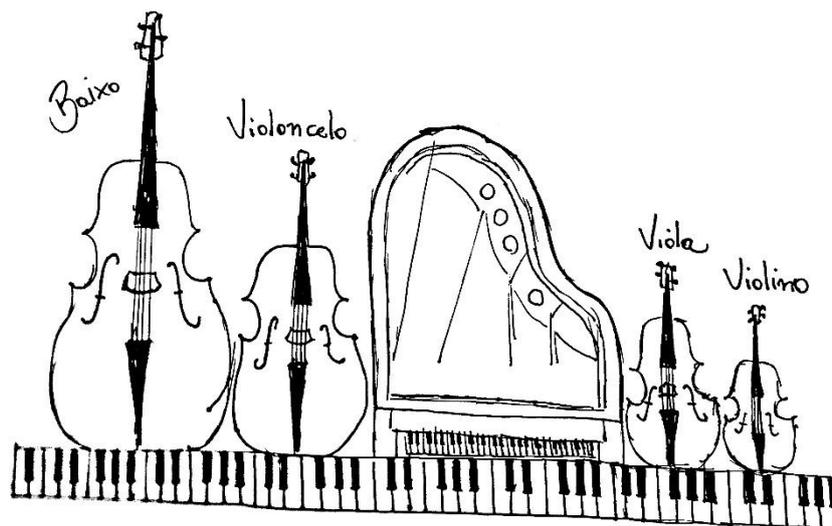
Chega-se na equação:

$$v_p = \frac{\lambda}{\tau}. \quad (3)$$

Sendo a fórmula (3) a Equação Fundamental das Ondas (EFO), que é válida para ondas de qualquer natureza.

Nota-se uma relação fundamental de proporcionalidade inversa entre comprimento de onda λ e frequência f . A figura 4 evidencia esse fato ao mostrar instrumentos graves com cordas mais longas e mais agudos com cordas mais curtas.

Figura 4 - Instrumentos Musicais e suas Alturas



Fonte: Oliveira, adaptado de Young, 2008.

No caso de ondas unidimensionais, a propagação ocorre de forma linear, a fórmula de Taylor abaixo define uma abordagem diferente com novas variáveis para sua velocidade de propagação, onde a mesma passa a depender da tensão T aplicada na corda pela densidade μ

$$v_p = \sqrt{\frac{T}{\mu}}, \quad (4)$$

Onde μ é dada através do quociente da massa m pela largura l da corda:

$$\mu = \frac{m}{l}. \quad (5)$$

Ou seja, a velocidade de propagação de um pulso em uma corda dependerá das propriedades do material. Com isso, tem-se diferentes velocidades de propagação para diferentes cordas. Ao esticar uma corda, aumenta-se sua tensão e conseqüentemente sua força restauradora, erguendo assim a velocidade de propagação da onda. Quanto maior a massa, porém, maior a densidade e mais lenta

a sua propagação. Um jogo entre restauração e inércia sempre presente em entes mecânicos.

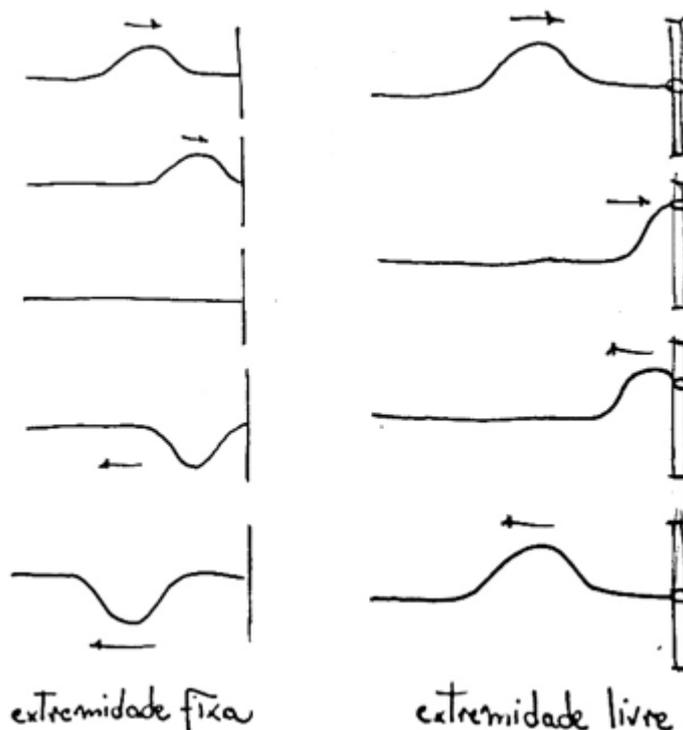
3.1 Fenômenos Ondulatórios

Pode-se abordar alguns fenômenos sonoros tais como os fenômenos ópticos, aqui eles serão descritos para o caso de ondas unidimensionais:

3.1.1 Reflexão

Ocorre quando o pulso atinge uma extremidade, através de suas condições de contorno, pode ocasionar uma inversão de fase (extremidade fixa) ou não (extremidade livre). A velocidade de propagação do pulso mantém a mesma magnitude, em sentido oposto. A figura 5 ilustra a situação para ambos os casos supracitados.

Figura 5 - Reflexão de Onda em Extremidade Fixa e Livre

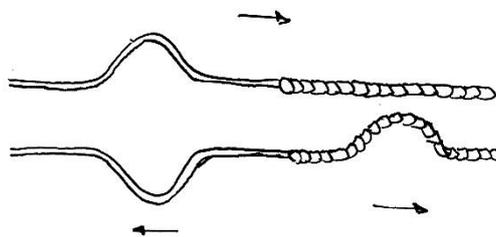


Fonte: Oliveira, 2023, adaptado de Young, 2008

3.1.2 Refração

Ocorre quando um pulso passa de uma corda para outra com diferentes propriedades. Caso o pulso se propague de uma corda densa para uma menos densa, não haverá inversão de fase (como na extremidade livre) na reflexão. Entretanto, no sentido oposto, quando o pulso vai para uma corda mais densa, haverá inversão de fase. Não haverá variação de frequência no pulso refratado, mas sua velocidade se altera como previsto pela EFO. É importante ressaltar que associada à refração, sempre haverá uma reflexão no ponto de junção dessas cordas.

Figura 6 - Refração em Cordas de Diferentes Propriedades

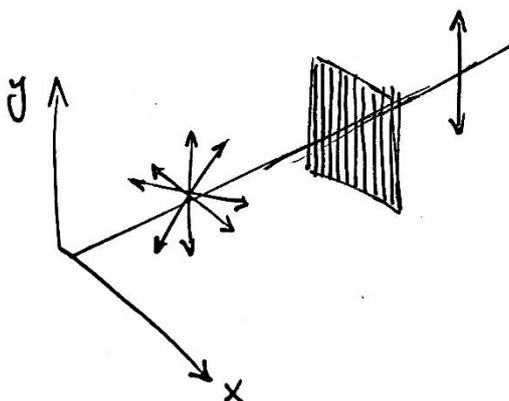


Fonte: Oliveira, 2023.

3.1.3 Polarização

Fenômeno ondulatório que ocorre quando uma onda que vibra em diversas direções incide sobre um polarizador, passando a fazê-lo em apenas uma direção. Em ondas longitudinais o fenômeno não ocorre. Na figura 7 uma onda que passa por um polarizador passa a vibrar apenas na direção horizontal (eixo x).

Figura 7 - Polarização de Onda



Fonte: Oliveira, 2023, adaptado de UFRGS

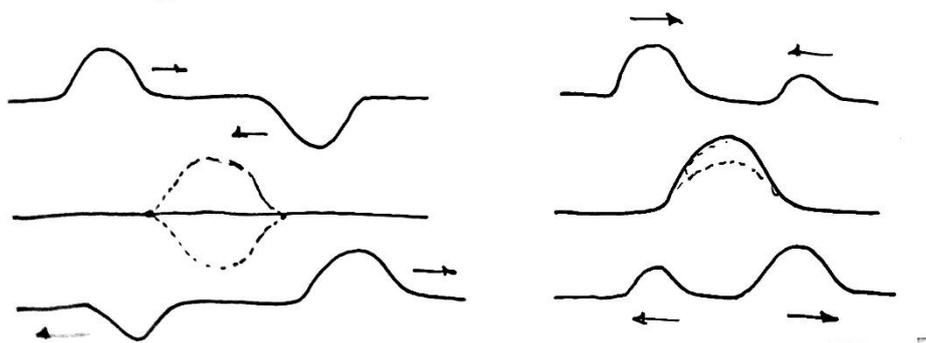
3.1.4 Interferência

A interferência ocorre quando duas ou mais ondas se sobrepõem na mesma região do espaço. Aqui há a junção de dois novos princípios:

- I. Princípio da superposição: em dado momento em que dois pulsos se cruzam, o resultante é dado pela soma algébrica das elongações desses pulsos;
- II. Princípio da Independência das Ondas: Após esse encontro, os pulsos prosseguem propagando-se de forma indiferente, como se nada tivesse ocorrido.

A interferência pode ser construtiva (IC), quando os pulsos possuem concordância de fase (distanciados por números inteiros de comprimento de onda), e destrutiva (ID) quando as fases dos pulsos são opostas (distanciados por números semi-inteiros de comprimento de onda). Quando os dois pulsos possuem magnitude equivalentes, a IC resultará no dobro da amplitude e a destrutiva na nulidade desses pulsos. O fenômeno é aplicável também em ondas luminosas e foi importante para provar a natureza oscilatória da luz. A figura 8 ilustra o caso de ID e IC entre dois pulsos que se propagam em sentidos opostos.

Figura 8 - Interferência Destrutiva e Construtiva entre dois Pulsos em Sentidos Opostos



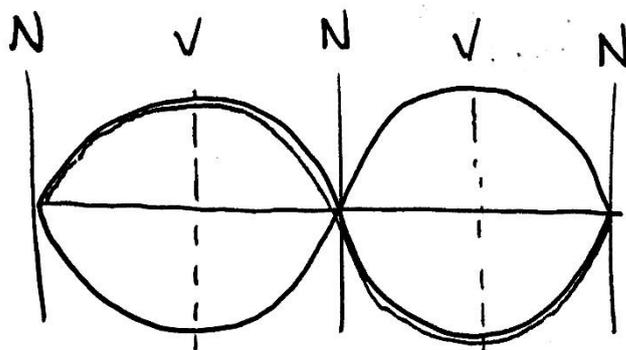
Fonte: Oliveira, 2023.

3.1.5 Ondas Estacionárias

Fundamental para o estudo de boa parte dos instrumentos musicais, aparecem com a combinação de dois fenômenos ondulatórios explicados anteriormente: reflexão e interferência.

As ondas que incidem sobre um tubo passam a ser refletidas no fim do mesmo, resultando em uma onda idêntica refletida, a qual passa a interagir com a onda original no processo de interferência. Isso ocorre nos instrumentos de sopro, havendo formação de pontos de amplitude mínima e máxima bem definidos. Os máximos são os *ventres*, onde há confinação de toda energia, os mínimos são os *nós*, como mostrado na figura 9. Sua configuração permanece imóvel, de onde surge o termo estacionário.

Figura 9 - Ondas Estacionárias com Nós e Ventres Discriminados



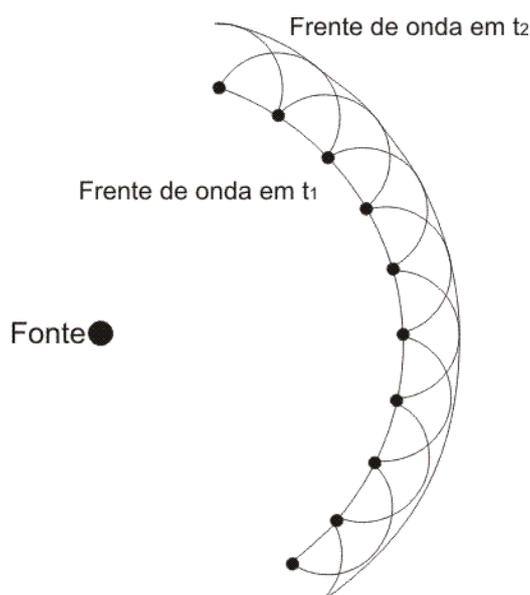
Fonte: Oliveira, 2023, adaptado de Young, 2008.

Partindo da definição inicial de comprimento de onda, é possível afirmar que a distância equivalente ao intervalo de dois ventres/nós é o comprimento de onda dessa onda estacionária.

3.1.6 Ondas Bidimensionais

Tais fenômenos ondulatórios citados anteriormente acontecem também em ondas bidimensionais, que se propagam superficialmente. Para melhor entendimento acentua-se a frente de onda baseada no Princípio de Huygens (SÓ FÍSICA), no qual uma onda é emitida esfericamente por sua fonte, sendo que a primeira linha de onda comporta-se como uma fonte secundária em $t = \tau$, formando uma frente de onda composta pela superfície tangencial aos pontos da onda secundária, como visto na figura 10.

Figura 10 - Frente de Onda pelo Princípio de Huygens



Fonte: Só Física, 2023.

Nessas ondas, a reflexão acontece respeitando a lei da óptica geométrica, na qual o ângulo de incidência é o mesmo da reflexão.

Já para a refração, há concordância com a Lei de Snell da óptica que relaciona a velocidade de propagação no meio com os diferentes comprimentos de onda associados. É possível exemplificar imaginando uma onda que passa para um meio

mais profundo, seu comprimento será alterado através da razão entre as velocidades v_1, v_2 e comprimentos λ_1, λ_2 em cada um dos meios.

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}. \quad (6)$$

No caso da difração para ondas bidimensionais, haverá semelhança com o caso da luz, na qual o fenômeno só ocorrerá quando o obstáculo e/ou abertura for de dimensão compatível à da onda. É possível lembrar de situações em que o som contorna obstáculos para ser escutado: atravessando portas ou janelas.

A interferência pode ser explicada através da idealização para um caso específico no qual trata-se duas fontes pontuais em concordância de fase e coerentes (dizemos coerentes ondas que possuem mesma amplitude e frequência). O caráter da interferência será definido através da equação:

$$\Delta = n \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (7)$$

Onde haverá uma interferência construtiva com n par e uma interferência destrutiva com n ímpar, sempre com n inteiro. Intuitivamente, para o caso de ondas com oposição de fase a regra será invertida.

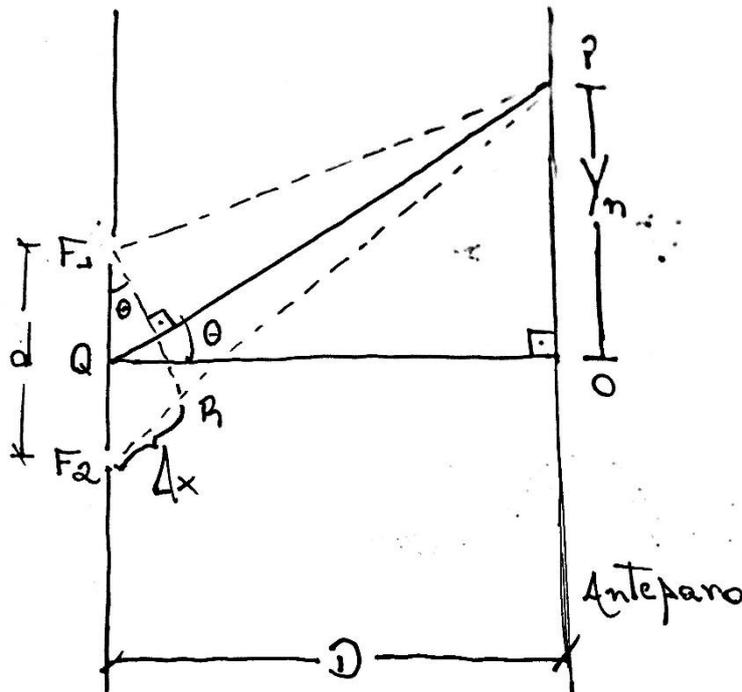
3.1.7 Ondas Tridimensionais

Ao abordar ondas tridimensionais, as quais se propagam pelo espaço, é estabelecido uma proximidade com os casos mais comuns do cotidiano e com a natureza do som propriamente. A maioria das ondas que nos atingem são tridimensionais pois nossa realidade é dada nos três eixos x, y, z .

Dada a abordagem feita até aqui, definir-se-á os fenômenos ondulatórios de forma sucinta para ondas tridimensionais:

- na reflexão há ocorrência de inversão de fase da onda para um meio mais refringente. O oposto ocorre para um meio menos refringente;
- a refração ocorre sem inversão de fase;
- a difração ocorre em obstáculos/aberturas da ordem de 10^{-7} metros;
- a polarização de uma onda tridimensional é possível devida sua transversalidade;
- a interferência é toda pautada pelo experimento ótico de Young (vide figura 11).

Figura 11 - Experimento de Young: Dada Onda Incidente sobre um Obstáculo de fenda dupla e logo após em um Anteparo. a Diferença entre os Comprimentos de onda que Chegam no Anteparo pode ser Encontrada através de uma Abordagem Trigonométrica do Triângulo $q \delta x$ de \hat{A}



Fonte: Oliveira, 2023 adaptado de ITA, 2021.

Com relação a esse famoso experimento, que em 1801 comprovou a natureza ondulatória da luz, tem-se a análise do comportamento de uma onda após a mesma ser difratada ao passar por fendas duplas. A distância descrita pela onda em cada uma dessas fendas até o ponto arbitrário P não é a mesma, essa diferença no comprimento Δx pode ocasionar uma interferência construtiva (diferença de um comprimento de onda ou um múltiplo de comprimento, ondas em fase) ou destrutiva (comprimentos intermediários não múltiplos naturais, ondas defasadas).

Para encontrar essa diferença de comprimento entre as ondas Δx há uma manobra trigonométrica ao considerar o triângulo que forma o ângulo θ com hipotenusa Q e cateto adjacente R . Não somente, parte-se de uma aproximação que considera D (a distância entre as fendas e o anteparo) muito maior que a distância d entre as fendas F_1 e F_2 , desse modo, podemos considerar raios paralelos e fazer uma análise trigonométrica do problema, onde:

$$\text{sen}\theta = \frac{(\text{cateto oposto})}{(\text{hipotenusa})} = \frac{\Delta x}{Q} \quad (8)$$

Logo,

$$\Delta x = Q \cdot \text{sen}\theta \quad (9)$$

Sendo assim, haverá IC quando Δx for um múltiplo inteiro e ID com Δx como um semi múltiplo do comprimento de onda incidente.

3.2 Ondas Sonoras

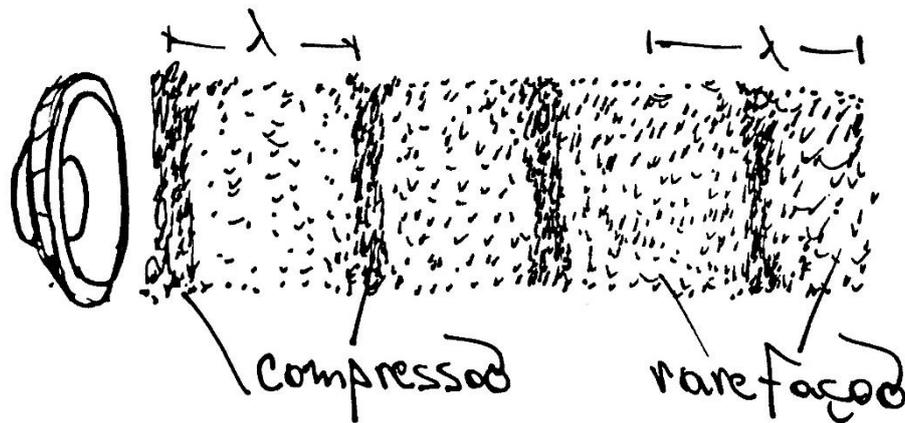
Ao apresentar fundamentos que conceituam as ondas nas três dimensões, tem-se corpo para adentrar conteúdos acústicos. É nele que haverá um aprofundamento na área do som, a ferramenta central deste trabalho.

Sabe-se que música é som, mas que nem todo som é música. Para que soe confortável aos ouvidos esses sons precisam estar organizados na trindade ritmo, melodia e harmonia, tripé que sustenta e define a música. Sendo esse um conceito moderno ocidentalizado que a define parcialmente, pois sabe-se que música é muito além de um tripé, gerada e modificada ao longo de milênios pelos mais plurais povos, culturas com diferentes finalidades. O estudo da música possui tamanha profundidade que possui uma área própria de atuação denominada *musicologia*, a qual considera o estudo da música tanto do ponto de vista acadêmico ou científico, quanto como um fenômeno estético e cultural (CASTAGNA, 2008).

Pode-se definir ondas sonoras como tridimensionais longitudinais. São ondas mecânicas que demandam de um meio para se propagarem (haja vista um espaço sideral sem som pela ausência de um meio).

O som é composto por camadas de ar que sofrem compressões (maior densidade) e rarefações (densidade reduzida) em uma frequência oscilatória bem estabelecida vide figura 12.

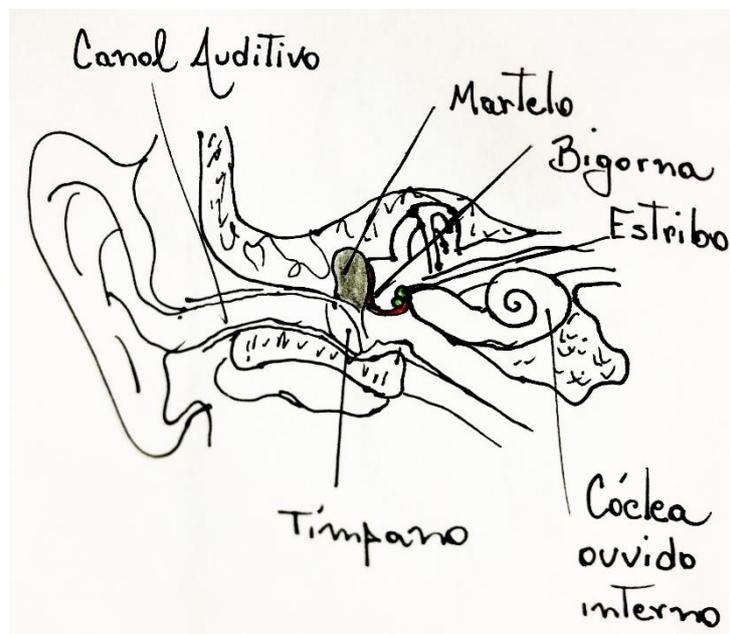
Figura 12 - Compressão e Rarefação Sonora com Comprimento de Onda Discriminado



Fonte: Oliveira, 2023 adaptado de Pimentel, 2017.

Essa diferença de pressão no ar é interpretada fisiologicamente pelo tímpano, que reconhece e passa a vibrar com mesma frequência, passando essa oscilação para o conjunto de ossos responsáveis por transmitir essa energia para a cóclea, onde fluídos perturbam as células capilares do ouvido interno, que recebem e transmitem esse sinal como pulso elétrico para o cérebro. O conjunto de ossículos presente nesse processo são os menores do corpo humano, denominados: martelo, bigorna e estribo. Vide figura 13.

Figura 13 - Mapeamento do Canal Auditivo



Fonte: Oliveira, 2023, adaptado de Young, 2008.

Há então um comprimento de onda na distância entre uma rarefação e compressão consecutiva. Importante ressaltar que os pontos de amplitude de pressão positiva (crista) ocasionam as compressões, já os pontos de amplitude de pressão negativa (vale) correspondem as rarefações.

Ondas agudas possuem comprimento de onda curtos, ocasionando uma configuração com máximos e mínimos mais próximos, portanto, nela há maiores variações de pressão, culminando uma maior Intensidade sonora. Sons com mesma amplitude, mas diferentes frequências ocasionam diferentes intensidades. A velocidade é dada pelo produto desse comprimento e da frequência do som recebido.

Portanto, no processo de escuta há uma física de conservação e conversão energética que assume diversas formas para só assim ser interpretada pelo cérebro, gerando estímulos nervosos que podem gerar uma gama de sentimentos como prazer, acolhimento, tristeza, euforia e tantos outros ao ouvinte.

3.2.1 Sistema Auditivo

O sistema auditivo humano compreende uma faixa de frequência que vai de 20 Hz a 20.000 Hz, sendo sons emitidos dentro dessas frequências os audíveis. Naturalmente, com o envelhecimento a pessoa acaba por diminuir a abrangência dessa faixa, não somente, a grande exposição corriqueira a sons compreendidos nos extremos da faixa também prejudica a saúde do ouvido. É importante citar que sons abaixo de 20Hz são denominados infrassons e os superiores a 20.000Hz ultrassons, os últimos sendo ouvidos por alguns animais como cães, morcegos e elefantes. O som escutado varia de acordo com a espécie e sua fisiologia auditiva.

3.2.2 Velocidade do Som

Assim como a velocidade do pulso em uma corda depende das propriedades do material, a velocidade do som depende das características do meio em que ele se propaga. Meios sólidos possuem ligações moleculares mais fortes, resultando numa propagação de energia mais efetiva e velocidade mais alta. Em meios gasosos, as ligações moleculares são mais fracas e o som leva mais tempo para se propagar, no entanto, é através do ar (meio gasoso) que o som é comumente recebido por nós. O valor padrão para a velocidade do som no ar v_{ar} a uma temperatura de 20° C é de

344 m/s, a dependência de v_{ar} é com o quadrado de $k \cdot T$. Mostrando que a afinação de um instrumento depende da temperatura a qual ele está exposto.

3.2.3 Qualidade do Som

Há diferentes propriedades que definem a qualidade do som, gerando características específicas para cada um. Essas qualidades são melhor tratadas a seguir:

3.2.3.1 *Altura*

É o que diferencia sons graves e agudos. Essa alteração é dada através da frequência. Altas frequências são responsáveis por sons agudos e baixas frequências por sons graves. Os instrumentos se amparam no entrelaço de diferentes frequências que são estrategicamente afinadas para interagirem entre si, fornecendo um traço musical específico.

Duas ondas de frequências idênticas compõem o uníssono (como nas cordas de um bandolim que é dotado de quatro pares de cordas uníssonas). Uma frequência que possui o dobro da outra está uma oitava acima, no caso contrário, para uma corda com metade da frequência da segunda, é dito em música que ela está uma oitava abaixo.

O intervalo de uma oitava pode ser entendido através da escala musical diatônica, onde tem-se um intervalo de sete notas com cinco tons e dois semitons. Naturalmente, começando em dó tem-se: DÓ - RÉ - MI - FÁ - SOL - LÁ - SI - DÓ. Ou seja, houve a ascensão de sete notas para retomar à nota Dó. No caso, por mais que sejam ambas notas dó, elas não soarão iguais, uma estará com o dobro da frequência da outra, diz-se uma oitava acima. Quando a razão entre as diferentes frequências for um número inteiro, as notas são oitavadas entre si. Além disso, o intervalo de nota a nota é dado por um quociente entre as frequências. Há músicas que demandam afinações não padronizadas, onde uma ou mais cordas mudam seu tom original para serem executadas.

3.2.3.2 Intensidade

Outra propriedade é a intensidade sonora (I), que diferencia um som forte de um som fraco. É a potência da energia desse som pela unidade de área. Ou seja, é através da intensidade do som que se tem o volume propriamente, e não a altura como evidenciado anteriormente (um miado é mais alto que um mugido). Para que a intensidade seja definida como volume é necessário considerar a sensibilidade do ouvido humano. Sons da faixa do ultrassom possuem grandes intensidades, mas não são reconhecidos pelos nossos ouvidos.

A equação que define a intensidade sonora é definida pela potência sobre a área. O limiar de audibilidade possui um limite inferior com intensidade de $10^{-12} \frac{W}{m^2}$ e limite superior de $1 \frac{W}{m^2}$, chamado limiar de dor. Levando em conta o fato do som se propagar radialmente, tem-se ondas em todas direções de maneira uniforme que perdem a intensidade com o inverso do quadrado da distância r . A equação 10 mostra a intensidade em termos de energia E pelo produto da área A com intervalo de tempo Δt , onde P é a potência (energia por tempo)

$$I = \frac{E}{A \cdot \Delta t} = \frac{P}{A}. \quad (10)$$

A equação 10 não é válida para sons que se propagam em uma só direção; nesse caso, a intensidade diminui mais lentamente que r^2 . Não somente: é inválida para espaços fechados, no qual o teto e as paredes podem refletir o som não deixando a energia contida no som escapar.

O nível sonoro β é alterado de forma logarítmica com o afastamento/aproximação da fonte sonora, dependendo do quociente entre intensidade emitida pela fonte sonora I e o limiar de audibilidade I_0 . Sua unidade de medida é o *bel*, popularmente dado em decibéis *dB*, que é um décimo de *bel*, como visto na equação 11:

$$\beta = (10dB) \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right). \quad (11)$$

Alguns exemplos de sons e seus diferentes níveis são listados abaixo. É importante ressaltar que cada nível possui um tempo de exposição associado recomendado para que não haja danos irreversíveis, lembrando que o ouvido é mais sensível a frequências intermediárias que a frequências muito altas/baixas.

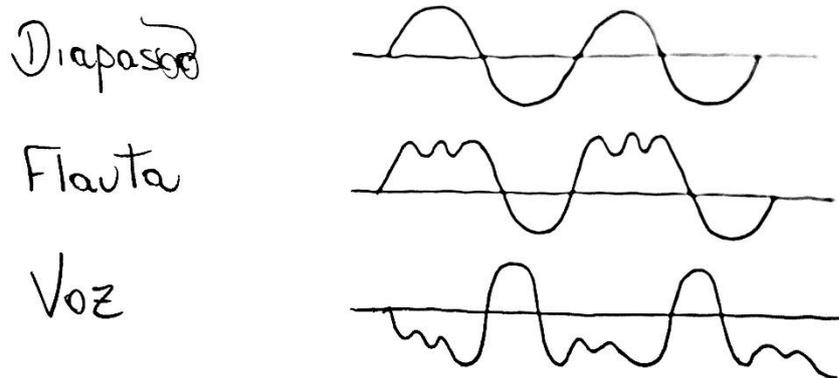
- 40dB: (calmo): como em um quarto vazio;
- 70dB (barulhento): como a chegada de um trem;
- 120dB: (poluído): como uma banda de rock.

3.2.3.3 *Timbre*

Já o timbre é uma espécie de personalidade intransferível do som, a propriedade que diferencia sons de mesma altura e intensidade. É através do timbre que se reconhece com quem se fala no telefone (diferentes alturas associadas para voz masculina e feminina) e se distingue a mesma nota em diferentes instrumentos. O contraste entre a nota LÁ de uma guitarra e a mesma nota LÁ de um piano é fornecida pelos timbres desses instrumentos, que depende do conjunto de frequências (harmônicos) que compõem esse espectro e das propriedades e dimensões do material do mesmo. A personalidade do emergir (ataque) do som e também de seu decaimento também são definidos pelos materiais envolvidos, que definem e constituem o timbre. Habitualmente, os músicos interpretam timbres com adjetivos que variam de aveludado, melodioso, metálico, rasgado.

Há ainda estudos que citam a característica temporal do timbre, ou seja, a análise através do estímulo inicial entre os materiais, o ângulo e o quão forte é esse estímulo. O espectro de onda formado naquele instante possui uma complexidade que define o seu som característico. Nenhum novo harmônico é criado após o estímulo, no entanto, diferentes impulsos que compõem a onda acabam sendo filtrados ao longo do tempo, resistindo somente a forma mais forte que é propriamente escutado (HUGH, 2022). Na Figura 14 são representados diferentes fontes sonoras e o formato para a onda associada as mesmas.

Figura 14 - Fontes sonoras e ondas associadas



Fonte: Oliveira, 2023, adaptado de Bonjardin, 2020.

3.3 Fenômenos Ondulatórios Em Ondas Sonoras

Partindo do pressuposto que a onda sonora é longitudinal, é possível inferir que não há polarização para a mesma. No restante, há semelhança entre os fenômenos apresentados para ondas no geral:

A reflexão do som é pautada pela denominada *persistência acústica*, na qual o intervalo de tempo Δt entre o som emitido e o som refletido definirá o fenômeno ocasionado:

- Eco: ocorre separação entre o som emitido e som refletido ($\Delta t \geq 0,1s$)
- Reverberação: uma sensação de prolongamento auditivo ($\Delta t < 0,1s$)
- Reforço: aumento da intensidade sonora ($\Delta t \cong 0$)

A refração ocorre com frequência constante, havendo alteração sobre a velocidade e o comprimento de onda, demais variáveis que definem a EFO (quando o som de um submarino incide sobre camadas de água em diferentes temperaturas, tem suas propriedades não preservadas).

A difração continua a respeitar o princípio de que os obstáculos/aberturas precisam ter dimensões comparáveis com o comprimento de onda do som.

Sabendo o limiar da frequência audível entre 20Hz e 20kHz e adotando a velocidade do som para o valor aproximado de 340m/s, é possível usar a EFO para obtenção das dimensões compreendidas neste caso

$$f_{min} = 20 \text{ Hz} -$$

$$f_{m\acute{a}x} = 20000 \text{ Hz},$$

Sendo,

$$\lambda_i = \frac{v}{f_i} \tag{12}$$

Tem-se:

$$\lambda_{m\acute{i}n} = 1,7 \text{ cm}$$

$$\lambda_{m\acute{a}x} = 17 \text{ m}$$

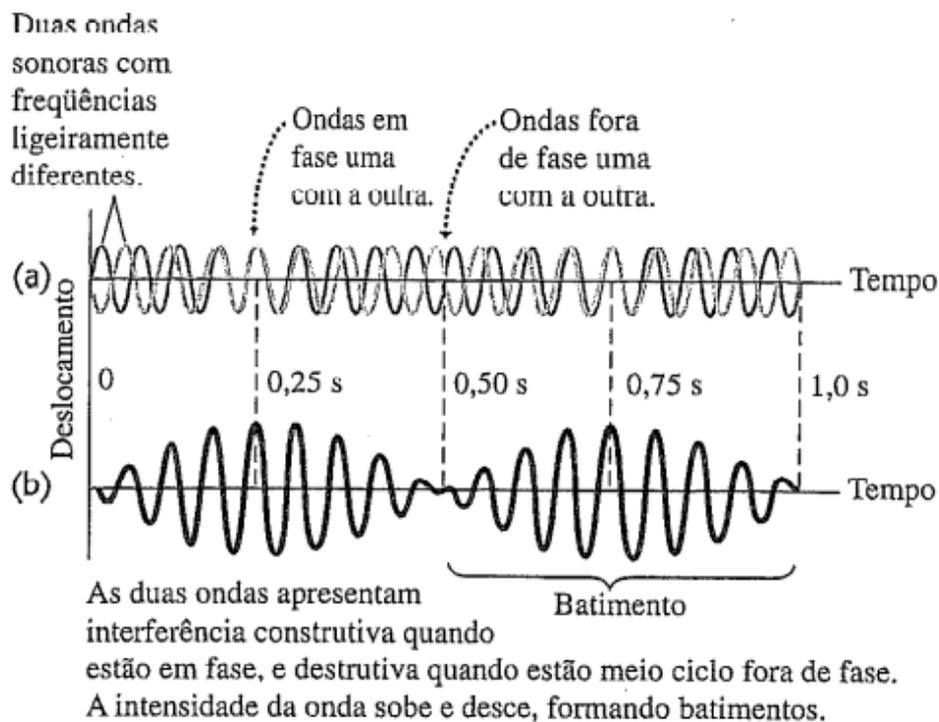
Portanto, as dimensões de comprimento de onda compreendidas para o fenômeno de difração têm o mínimo de 1,7cm e o máximo de 17m. Portas, janelas e tantos objetos presentes em nosso cotidiano estão dentro dessa faixa, evidenciando a natureza curvilínea do som escutado.

3.3.1 Batimento

Ainda sobre o âmbito das interferências, há também as frequências de batimento na qual ondas de mesma amplitude se interferem com frequências aproximadamente iguais. Ao longo do percurso elas descrevem interferências construtivas (em fase) e destrutivas (fora de fase). Não há uma interferência estática, pois são frequências diferentes. No entanto, as oscilações das interferências são padronizadas e tais variações de amplitude geram máximos de intensidade que formam os batimentos, como mostrado na figura 15: ao longo do intervalo de 1s, ondas com diferença de 2 Hz sobrepõem-se; no intervalo de 0,5s elas encontram-se totalmente defasadas, anulando-se; em 0,25s e 0,75s ocorre a sobreposição dos máximos; nesse intervalo de 1s ocorrem dois mínimos e dois máximos de amplitude que compõem a onda resultante e ilustram o fenômeno de batimento. A frequência de batimento f_{bat} é a diferença entre a frequência das duas ondas f_a e f_b como mostrado na equação 13. Ao abordar, a primeira frequência deve ser a mais elevada.

$$f_{bat} = f_a - f_b. \tag{13}$$

Figura 15 - Duas Ondas Sonoras Distintas que Propiciando o Batimento



Fonte: Young, 2008.

No âmbito musical, o batimento é quase sempre evitável, pois indica uma diferença de frequência entre tons, resultando em instrumentos desafinados.

3.3.2 Ressonância

Toda fonte oscila (pêndulo, diapasão, prédio, ponte, taça) com sua própria frequência, denominada *frequência natural*. A ressonância ocorre quando um sistema externo vibra sobre a fonte osciladora com a mesma frequência da sua natural, ocasionando um aumento em sua amplitude, podendo ocasionar, em casos extremos, riscos à integridade do material. Essa amplitude só não cresce infinitamente por conta das forças de atrito dissipadoras do sistema que funcionam como amortecimentos da energia. O fenômeno em questão ocorre em sistemas mecânicos, luminosos, acústicos, elétricos, atômicos, ou seja, todas áreas da física. É possível ocasionar desastres (responsável por pontes que se rompem ou pelas taças de vidro que quebram com cantorias), bastando a força propulsora aplicada fornecer uma frequência equivalente à frequência de um dos modos normais. Portanto, o fenômeno de ressonância depende diretamente do número de modos normais do sistema.

Os instrumentos musicais amparam-se sobre a ressonância para que tenham suas ondas amplificadas e posteriormente ouvidas. Instrumentos acústicos demandam de seus corpos ressonantes que passam a vibrar na mesma frequência da fonte osciladora (cordas ou tubos). No caso do berimbau, a cabaça atua como um corpo ressonante que passa a vibrar com a mesma frequência natural que oscila o fio de arame, intensificando o som que só assim pode ser claramente escutado. Instrumentos elétricos são amplificados não só pelos corpos, mas por amplificadores elétricos propriamente ditos. Por meio disso, nota-se que a ressonância atua diretamente sobre a intensidade sonora supracitada no item 3.2, mas não somente, atua também de forma a fornecer um timbre específico associado às propriedades do corpo ressonante.

3.3.3 Cordas Vibrantes

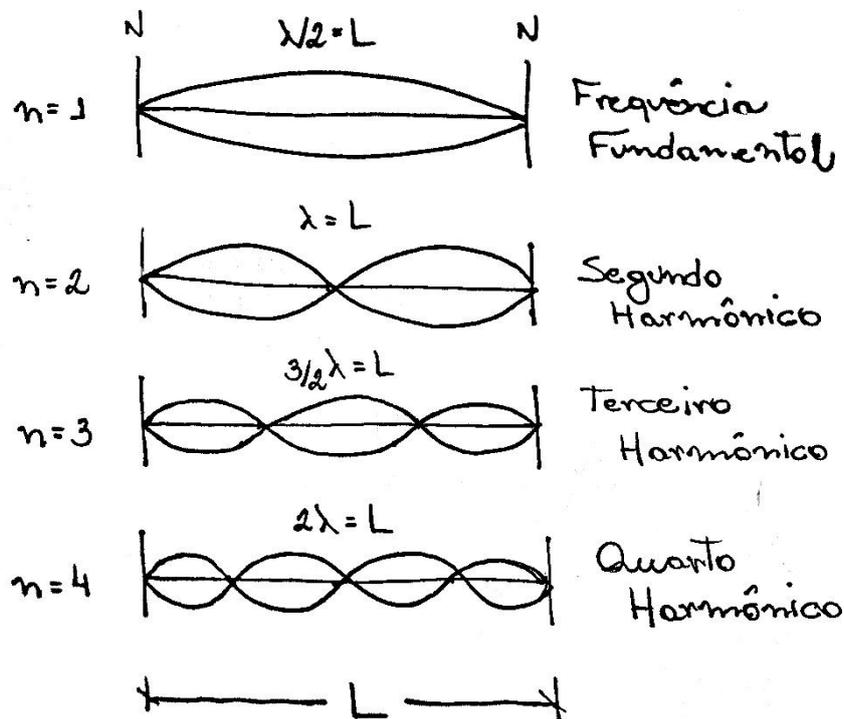
Nesse caso, o estudo é compatível com as ondas estacionárias; no entanto, as duas extremidades estão fixadas, propiciando um comprimento L fixo, compatível com as cordas presentes em diversos instrumentos. Essas cordas possuem diversos modos de vibração que dependem da frequência emitida. Em todo caso o som fundamental é chamado de primeiro harmônico $n = 1$, de menor frequência e maior comprimento de onda.

$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2}, \text{ onde } n = 1, 2, 3 \dots$$

$$\lambda = \frac{2L}{n}. \tag{14}$$

Através da EFO (3) é possível definir a frequência de cada um dos modos de vibração que são múltiplos inteiros do harmônico fundamental. Essas frequências são chamadas de harmônicos e sua sucessão de série harmônica. A figura 16 representa os quatro primeiros modos normais de uma corda com as duas extremidades fixas.

Figura 16 - Modos de Vibração de Cordas



Fonte: Oliveira, 2023, adaptado Young, 2008

Importante ressaltar que esses modos não são preservados ao se propagarem livremente no ar. No exemplo do som, a configuração não é tão simples pois a onda em questão é acompanhada de sobretons definidos pela série harmônica. Apesar da composição harmônica, a música não é literalmente pura.

3.3.4 Tubos Sonoros

De modo geral, os instrumentos de sopro são compostos por tubos sonoros que são preenchidos por uma coluna de ar que vibra em ressonância com uma paleta. Nesses tubos o som pode comportar-se de modo vibracional como visto nas cordas. Prossegue validado o percurso da onda que é emitida, refletida, sobreposta e culminada em uma onda estacionária.

No entanto, há duas formas diferentes de tubo. No tubo aberto as duas extremidades estão abertas e no tubo fechado há uma extremidade aberta e outra fechada. Para o mesmo comprimento L fixo do tubo, haverá diferentes frequências associadas em cada forma. Naturalmente, no tubo fechado os sons soam mais graves. Isso é explicado pelo fato de uma extremidade aberta equivaler a uma

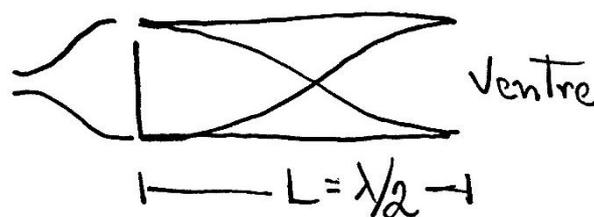
interferência construtiva, resultando um ventre nessa região (variação de pressão e densidade máximas). Já uma extremidade fechada corresponde a uma interferência destrutiva, resultando em um nó, onde há movimento nulo e compressão máxima do gás (pressão e densidade não variam).

3.3.4.1 Tubo Aberto

No caso de um tubo aberto, haverá um ventre em cada extremidade e um nó no meio do tubo, como visto na Figura 17. A distância entre dois ventres consecutivos é de um meio de onda. Neste caso, obtêm-se frequências naturais de todos os harmônicos. Portanto, meio comprimento de onda corresponde à largura do tubo

$$L = \frac{\lambda}{2} \quad (\text{considerando a EFO } (f = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2L})). \quad (15)$$

Figura 17 - Tubo Aberto



Fonte: Oliveira, 2023, adaptado Young, 2008.

Para qualquer tubo aberto com diferentes níveis n tem-se:

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad (n = 1, 2, 3 \dots) \quad (16)$$

Logo,

$$f_n = \frac{vn}{2L} \quad (n = 1, 2, 3 \dots) \quad (17)$$

Onde $n = 1$ corresponde ao nível fundamental.

3.3.4.2 Tubo Fechado

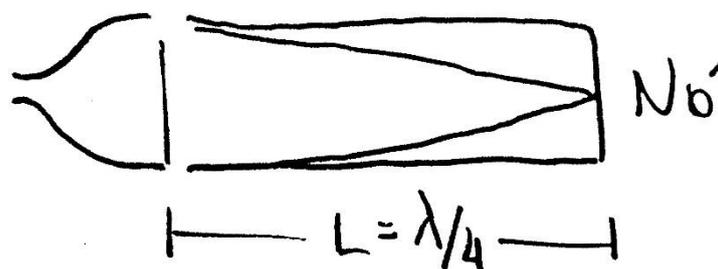
Em um tubo fechado haverá uma extremidade aberta que corresponde a um ventre e uma outra extremidade fechada, correspondendo a um nó, como visto na

figura 18. Nessa situação, o distanciamento entre um ventre e um nó equivale a um quarto de onda

$$(L = \frac{\lambda}{4}), \text{ considerando a EFO } (f = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{4L}). \quad (18)$$

Nesse caso, há uma frequência duas vezes menor que no tubo aberto. Musicalmente falando, tem-se uma oitava abaixo considerando o mesmo comprimento para os tubos.

Figura 18 - Tubo Fechado



Fonte: Oliveira, 2023, adaptado Young, 2008.

Somente os harmônicos de ordem ímpar são possíveis no caso do tubo fechado, então:

$$\lambda_n = \frac{4L}{n}, (n = 1, 3, 5 \dots) \quad (19)$$

Logo,

$$f_n = \frac{vn}{4L}. (n = 1, 3, 5 \dots) \quad (20)$$

Onde $n = 1$ corresponde também ao modo fundamental.

Uma maneira prática de imaginar os tubos sonoros é através das flautas: são instrumentos de sopro com diversos orifícios que podem ser tampados pelos dedos, através disso haverá mudança no comprimento L do tubo e conseqüentemente da altura (nota).

Um tubo com ambas as extremidades fechadas não teria ar propagando-se em ressonância pelo tubo, ocasionando a ausência do caráter musical.

4 O CASO DO BERIMBAU

4.1 Descrição do instrumento

O berimbau é um instrumento de percussão tradicionalmente relacionado às práticas de capoeira no Brasil. Foi escolhido justamente por sua composição simples: um arco de madeira chamado biriba, um fio de arame (antigamente tecidos animais) e uma cabaça de madeira. Apesar de ser um monocórdio (possuir apenas uma corda) o instrumento consegue fornecer vastas variações rítmicas com poucas frequências associadas. Diz-se que o instrumento surgiu dos arcos musicais, característica essa não presente nos povos indígenas brasileiros, sendo então conduzido para o país através de escravos africanos. Dentro do país ganhou notoriedade compondo a dança dos escravos, que posteriormente virou a luta capoeira. No entanto, dentro dessas histórias há diferentes teorias sobre o modo que o berimbau foi difundido no país, faltam fontes científicas que o contextualizem com precisão, o que se deve ao caráter majoritariamente verbal nesses estudos. De acordo com o apêndice no trabalho de Kandus, a capoeira surgiu com palmas e cantos, sendo o berimbau posteriormente incorporado à prática. Dentre os musicistas que se destacam no uso do berimbau pode-se citar: Naná Vasconcelos (eleito oito vezes o melhor percussionista do mundo) e Mestre Pastinha (principal nome da capoeira de Angola).

A cabaça é amarrada na biriba por pequenos furos presentes na extremidade oposta à boca da cabaça, de acordo com seu posicionamento define-se um comprimento L para o fio de arame, variável essa que reflete sobre a afinação do instrumento. Esse fio é percutido com uma vareta e na mesma mão usa-se o caxixi, que é uma espécie de chocalho, na outra mão usa-se uma pedra que pode ser pressionada no fio de arame, condição essa que origina um novo timbre, dinamizando o som do instrumento. Dentro da capoeira de Angola há três diferentes berimbaus (viola, médio e gunga) que são afinados de ouvido entre si, cada um com uma medida l da cabaça associada, esses diferentes comprimentos relacionam-se com a frequência e os modos presentes em cada um dos instrumentos. Não somente, a característica do som pode ser alterada pela dimensão da biriba, espessura do fio de arame e formato da cabaça.

4.2 Toques

Dentro das especificidades do toque do berimbau, tem-se diferentes configurações que dependerão grosso modo da posição da pedra e da cabaça. Como supracitado, o fio pressionado ou não trará diferentes sons para o mesmo toque, geralmente quando o fio está pressionado tem-se um som mais agudo. Além disso, a cabaça pode ser tocada apoiada ou não sobre a barriga. Essa alteração no apoio que definirá o tratamento de um tubo aberto (3.3.4.1) ou fechado (3.3.4.2), considerando que os furos da extremidade oposta à boca da cabaça permitem que naquele ponto a pressão do ar seja igual a pressão externa, definindo uma extremidade aberta. Nessa seguinte análise, a configuração considera apenas a variação do apoio da cabaça sobre a barriga.

4.3 Análise Científica

Um estudo interessante sobre a relação entre fenômenos físicos e instrumentos musicais toma como alicerce o berimbau. O trabalho “A física das oscilações mecânicas em instrumentos musicais: exemplo do berimbau” (KANDUS, 2006) foi publicado pelo laboratório de astrofísica teórica e observacional da Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC) e pelo Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia (UFBA) serviu como base ideal para esta proposta.

Nele, há um estudo sobre os modos de vibração de uma onda propagada ao percussionar a corda do berimbau e como isso se relaciona com a razão entre o comprimento da corda e da cabaça (caixa de ressonância). A cabaça em questão é aproximada como um cilindro para facilitar os cálculos envolvidos, poupando a abordagem de coordenadas esféricas, tornando sua leitura mais acessível e sua divulgação científica mais abrangente.

Pautado pelo conceito de tubos sonoros (seção 3.3.4), os autores definem dois casos para a onda sonora do berimbau: tubo fechado quando a cabaça é apoiada na barriga de quem toca o instrumento e tubo aberto no caso de ausência de um apoio para a cabaça. Assim, busca-se evidenciar as diferenças do som do instrumento.

Após uma abordagem conceitual que envolve parte da seção 3 abordada neste trabalho, obtêm-se resultados que mostram sons mais graves (frequências menores) em caso de um tubo fechado, e sons agudos no caso do tubo aberto. Além disso, evidencia-se uma relação direta entre a razão dos comprimentos da corda e da cabaça. Essa razão define comprimentos de onda específicos que se adequem ao

instrumento, os quais resultarão em harmônicos ressoantes na cabaça para cada caso. No trabalho em questão, considera-se um berimbau que possui o comprimento do fio L seis vezes maior que o comprimento da cabaça l , ou seja:

$$\frac{L}{l} = 6. \quad (21)$$

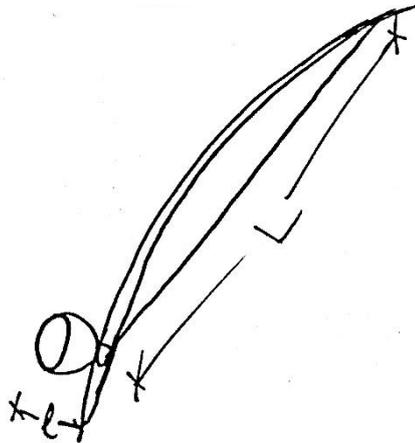
5 PLANO DE AÇÃO

A intenção é, portanto, considerando a diversidade da prática musical, seu caráter multidisciplinar, histórico e lúdico, aplicar os estudos de ondas sonoras presentes na seção 3 (reflexão de onda, interferência e ondas estacionárias) para explicitar a ciência do berimbau para os alunos do ensino médio, pormenorizando o entendimento da acústica de um instrumento específico e quais propriedades físicas estão envolvidas nessa prática musical.

Além disso, valores ancestrais-culturais da capoeira poderão ser abordados ao analisar as diferentes dimensões dos berimbaus presentes. A roda de capoeira de angola geralmente funciona com berimbaus de tamanhos diferentes, propiciando distintas razões entre comprimento da corda e da cabaça (gunga: 8, médio: 10, viola:12), obtendo atributos e toques específicos para a roda. Assim, será possível estudar as dimensões do instrumento ilustradas na figura 19, e a forma como elas associam-se às diferentes ondas ressoadas pela cabaça. Essas ondas terão seus modos de vibração calculados através do quociente entre os comprimentos medidos pelos próprios alunos, para então serem assimiladas pelo sistema auditivo do mesmo. O objetivo é propiciar que o aluno compare os dados encontrados para o berimbau com o som percebido pelo seu sistema auditivo, gerando assim um eixo condutor entre a resolução de frações com a percepção sonora.

Pautado pelo estudo do caso do berimbau, torna-se possível definir quais comprimentos de onda estarão associados a um berimbau de determinada dimensão. Nesse caso, haverá o levantamento de dados para o berimbau gunga e o berimbau viola na configuração com e sem apoio na barriga.

Figura 19 -Dimensões de um Berimbau



Fonte: Oliveira, 2023.

Através de uma pesquisa sobre a construção de um berimbau, foi possível realizar o levantamento das medidas associadas ao instrumento. Com o denominado “Portal Capoeira” (MILANI, 2005), foram padronizadas as seguintes dimensões para um berimbau gunga (tons graves): $l = 0,18\text{m}$ (comprimento da cabaça) e $L = 1,48\text{m}$ (comprimento do fio).

Logo, neste caso:

$$\frac{L}{l} = 8,2 \cong 8 \quad (22)$$

A razão entre os comprimentos é aproximadamente oito. Nesse caso, o arredondamento é feito para baixo justamente por levar em consideração o caminho de um harmônico, obtendo desse modo valores que estejam comportados na onda propriamente.

Com essa informação oriunda de duas medidas, tem-se o suficiente para definição de quais modos de vibração serão ressoados pela cabaça.

Sendo n o harmônico de vibração, sabe-se que o menor valor possível para que o mesmo ressoe deve ser maior ou igual à razão dos comprimentos, portanto

$$n \geq 8 \quad (23)$$

Relaciona-se então o comprimento de onda do fio λ_n com o comprimento de onda da cabaça aberta λ_m através das equações:

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}, n = 1, 2, 3 \dots \quad (24)$$

$$\lambda_m = \frac{2l}{m}, m = 1, 2, 3 \dots \quad (25)$$

Admitindo que a cabaça só ressoará quando $\lambda_n = \lambda_m$, tem-se:

$$\frac{2L}{n} = \frac{2l}{m} \Rightarrow m = \frac{l}{L}n \quad (26)$$

Assim é possível dizer que n relaciona-se diretamente com m . É notável que ambos precisam ser números naturais para que haja uma onda inteira associada. Após uma simples manipulação algébrica pode-se obter o harmônico m associado em cada caso pela equação 25:

$$n = \frac{L}{l}m. \quad (27)$$

Através da equação 27 obtém-se os harmônicos que servirão para este instrumento em específico:

$$m = 1 \Rightarrow n = 8 \quad (28)$$

$$m = 2 \Rightarrow n = 16 \quad (29)$$

Portanto, para o modo fundamental da corda $m = 1$, tem-se o oitavo harmônico $n = 8$ na cabaça, para $m = 2$, $n = 16$ e assim sucessivamente.

No caso da cabaça com extremidade fechada considera-se o comprimento de onda da cabaça fechada λ_p , sendo ele:

$$\lambda_p = \frac{4l}{2p + 1}, p = 0, 1, 2, \dots \quad (30)$$

Analogamente ao caso da cabaça com ambas extremidades abertas, é feita uma relação dos comprimentos de onda λ_n (eq. 24) com λ_p (eq. 30), chegando-se na equação 31:

$$\lambda_n = \lambda_p \Rightarrow \frac{2L}{n} = \frac{4l}{2p + 1}. \quad (31)$$

Sabe-se que a cabaça só ressoará em casos em que p e n forem naturais. Com isso, isolando p para obter os dois primeiros modos:

$$2p + 1 = \frac{4l}{2L}n \Rightarrow p = \frac{l}{L}n - \frac{1}{2}. \quad (32)$$

Com a equação 32 define-se os harmônicos presentes:

$$p = 0 \Rightarrow n = 4 \quad (33)$$

$$p = 1 \Rightarrow n = 12 \quad (34)$$

Assim, diferentes harmônicos estarão associados quando o berimbau gunga é tocado na configuração com apoio na barriga. Como o valor de n define harmônicos menores nessas condições, notar-se-á um som mais grave.

Percebe-se a presença de um fator contrastante de menos meio $\left(-\frac{1}{2}\right)$ entre a equação 25 e 28, isso se dá justamente pelos diferentes comportamentos associados a uma onda em um tubo de extremidade fechada e aberta. A onda da extremidade fechada passa a definir um nó em uma das extremidades, enquanto que a onda contida em um tubo com extremidade aberta definirá um ventre. O termo meio representa a defasagem de meio comprimento de onda.

Esses cálculos podem ser realizados também no caso de um berimbau viola, de timbre agudo com a cabaça ligeiramente menor. A medida associada à cabaça desse instrumento é de $l' = 0,12\text{m}$.

Calcula-se a nova razão entre o comprimento do fio fixando $L = 1,48\text{m}$ e o comprimento da cabaça $l' = 0,12\text{m}$.

$$\frac{L}{l'} = 12,33 \Rightarrow 12 \quad (35)$$

Mais uma vez o arredondamento é feito para baixo por razões já evidenciadas, com isso o menor harmônico n nesse caso é igual a 12. Um valor maior para um instrumento mais agudo, em consonância com o previsto.

$$n \geq 12 \quad (36)$$

Analogamente ao caso anterior, tem-se a razão dos comprimentos associados aos harmônicos pela equação 35, no caso do berimbau viola tocado sem apoio na barriga:

$$m = 1 \Rightarrow n = 12 \quad (37)$$

$$m = 2 \Rightarrow n = 24 \quad (38)$$

Para o modo fundamental da corda $m = 1$, tem-se o harmônico décimo segundo $n = 12$ na cabaça, para o segundo harmônico da corda $m = 2$, tem-se o vigésimo quarto harmônico $n = 24$ na cabaça, e assim sucessivamente no caso de ambas extremidades abertas.

Usando a equação 30 é possível obter os harmônicos para o berimbau viola tocado apoiado na barriga:

$$p = 0 \Rightarrow n = 6 \quad (39)$$

$$p = 1 \Rightarrow n = 18 \quad (40)$$

Com isso, associa-se harmônicos menores para os modos de vibração com uma das extremidades fechadas, ocasionando sons mais graves para uma cabaça tocada encostada na barriga, como previsto pela teoria.

É notável que a familiaridade musical é o cerne desse projeto, portanto se faz necessário ao adentrar as escolas, pesquisar sobre a relação musical dos alunos, seu leque musical, quais deles tocam algum instrumento e suas possíveis atividades que envolvem a música.

Para levar essa proposta de modo integral aos alunos pensa-se em 5 aulas expositivas de 50 minutos de duração:

Na primeira aula, a proposta será introduzir o cenário que o berimbau está inserido e evidenciar suas raízes culturais. Em meio a essa interação, buscar-se-á citar uma grande figura esquecida da música brasileira: Naná Vasconcelos.

Será exibido um vídeo em que Naná faz um solo de berimbau na Itália, em 1976 (Don Cherry & Organic Music Theatre, 2012). Interessante notar seu uso da técnica de afastar e aproximar a cabaça do instrumento de sua barriga, situação estratégica para nossa abordagem. Além disso, haverá a explicitação de toda uma espontaneidade e criatividade no tocar. Essa exibição parte da necessidade de um resgate cultural dentro da sala de aula, além de redefinir as percepções de uma relação com o instrumento musical dos alunos. Logo após, serão iniciados os conceitos fundamentais para entendimento de uma onda presentes na subseção 3.1 deste trabalho.

Na segunda aula, haverá a conclusão da exposição teórica desses temas em específico: ondas, fenômenos ondulatórios (reflexão, interferência e ondas estacionárias). Interessante notar que o caráter estacionário da onda fundamenta a acústica dos instrumentos musicais, o mesmo pode ser explicado através da junção da reflexão com a interferência. Será necessário portanto firmar uma base sólida com esses fenômenos a fim de familiarizar e reforçar a simbiose dessa esfera da física com o fazer musical.

Na terceira aula, partindo do entendimento de comprimento de onda, frequência e interferências, a subseção 3.2 ondas sonoras será abordada, adentrando de vez no estudo físico do som. Assim, definir-se-á o sistema auditivo (3.2.1), a velocidade do som (3.2.2), sua altura (3.2.3.1), intensidade (3.2.3.2), timbre (3.2.3.3). Nessa altura, haverá um maior viés anatômico e instrumental, sugerindo maiores participações com exemplos da presença desses fenômenos no cotidiano e citação a instrumentos musicais específicos.

A quarta aula será iniciada com a apresentação do fenômeno ondulatório em onda sonora (3.3), centralizando a ressonância (3.3.2) que possui papel fundamental para a composição de todo instrumento. No caso do berimbau, que é nosso objeto de estudo, a vibração da corda sendo ressoada pelo corpo ressonante é o que possibilita uma maior intensidade e escuta de seu som. Dando continuidade busca-se apresentar o conceito de cordas vibrantes (3.3.3) evidenciando instrumentos que possuem esse modo de funcionamento como violão, baixo, violoncelo, violino e viola e tubos sonoros (3.3.4) para ambos os casos: aberto (3.3.4.1) e fechado (3.3.4.2), nesse momento haverá espaço para citação de instrumentos de sopro, metais como trombone, trompete, tuba, didgeridoo¹. Nessa aula, toda atenção será redobrada pois o viés matemático entrará em voga, há chance de barreiras estruturais impedirem o avanço. A defasagem dos alunos na área de exatas é uma das fragilidades educacionais que mais afligem o saber há tempos, frações podem ser suficientemente assustadoras e a conexão com a turma fragilizada e nos piores casos perdida.

A quinta e última aula será o momento mais prático da proposta. Partindo do caso do berimbau (seção 4) tem-se a importância de explicitar a diferença acústico-sonora entre as duas configurações e seu teor matemático. Nesse momento pressupõe-se uma atuação direta dos alunos nos resultados obtidos. Fundamentados por todas as últimas quatro aulas, eles podem reconhecer a importância histórica do instrumento (aula 1), os agentes físicos que fundamentam seu funcionamento (aula 2 e 3) e os modos vibracionais presentes no instrumento para ambos casos (aula 4). Com a medição das dimensões do berimbau e uso das equações 20, 24, 25 descobrirão o modo vibracional do instrumento afastado da barriga e equações 26, 27 e 28 para o instrumento apoiado sobre a barriga. Portanto, é nessa altura que se terá um estudo sistemático do caso do berimbau. O ponto não é chegar no resultado precisamente, mas conseguir fazer assimilações entre o som e como a física dos instrumentos musicais fundamenta-o.

Nessa altura, a intenção é que eles tenham os instrumentos em mãos para tocá-lo podendo assim correlacionar os dados obtidos com as características do som emitido, havendo nesse processo o desenvolvimento de uma percepção sonora por parte de cada um. O berimbau será tocado por todos que se interessarem,

¹ Instrumento de sopro aborígine. Mais informações em: SOUSA, Milene. Didgeridoo: Instrumento de sopro aborígine. *In: Arte e Sintonia. Arte e Sintonia.* [S.l.], 18 mar. 2019. Disponível em: <https://www.artesintonia.com.br/blogs/blog/didgeridoo-instrumento-de-sopro-aborigene>. Acesso em: 14 fev. 2023.

propiciando um momento para performance e improvisação. Caso falte aptidão, pode-se ter uma figura presente com o objetivo único de demonstrar os toques do berimbau. Uma questão é saber o melhor momento para ter o estudo teórico do berimbau e o prático, fugindo de uma lógica binária sem consonância entre ambas as abordagens.

Outro ponto importante é obter uma regularidade com as aulas. Como o plano de ação é pautado por um acompanhamento longitudinal de conceitos que se complementam, é vital que haja ao menos duas aulas por semana. Julga-se uma aula por semana arriscada, os conceitos perderão o frescor e mais dificuldades serão encontradas para assimilação e conexão entre os mesmos. Além disso, é importante um momento reservado exclusivamente para práticas em conjunto, evidenciando interação e criatividade dos alunos. Uma aula extra pode ser reservada para a performance, coroando todo o processo educacional de forma lúdica.

Ao fim do plano e conseqüente conclusão do projeto, é sugerível que os alunos escrevam e/ou discutam de forma voluntária sobre como a dinâmica foi associada por eles, evidenciando pontos fortes e fracos. Com isso, fomenta-se uma troca horizontal entre aluno-professor visando o refinamento do projeto através de discursos verbais e/ou escritos.

A figura 20 sintetiza o plano de ação que envolve as cinco aulas com seus específicos temas, seções/subseções e objetivos.

Figura 20 - Plano de ação

	Tema	Seções/Subseções	Objetivos
Aula 1	Introdução, Resgate Cultural, Ondas	3	Estreitar laços com a música introduzindo o contexto musical na sala de aula; Compreender o repertório dos alunos.
Aula 2	Ondas, Fenômenos Ondulatórios, Reflexão, Interferência, Ondas Estacionárias.	3.1.1 3.1.4 3.1.5	Tratar conceitos propedêuticos para firmar bases físicas sólidas que servirão para o desenvolvimento da proposta.
Aula 3	Ondas Sonoras, Sistema Auditivo Velocidade do Som, Altura, Intensidade e Timbre.	3.2.1 3.2.2 3.2.3.1 3.2.3.2 3.2.3.3	Adentrar a fisiologia envolvida na escuta; definir a tríade que compõe a qualidade sonora; fazer analogias com instrumentos musicais.
Aula 4	Ressonância, Cordas Vibrantes e Tubos Sonoros	3.3.2 3.3.3 3.3.4 3.3.4.1 3.3.4.2	Evidenciar como instrumentos musicais se fundamentam pelo fenômeno de ressonância; diferenciar a natureza de instrumentos de cordas e tubos.
Aula 5	O caso do berimbau	4 5	Tirar medidas das dimensões do instrumento; calcular seus modos de vibração; confrontar dados obtidos com som escutado.
			Cont.

	Tema	Seções/Subseções	Objetivos
Aula 6	Performance		Propiciar um momento exclusivo para prática musical em conjunto como forma de coroação do processo investigativo.

Fonte: Oliveira, 2023.

6 CONCLUSÃO

Por meio da monografia é possível dar início a um estudo teórico sobre a física da música e seu caráter marginalizado no ambiente escolar. Pretende-se com o projeto explicitar aos alunos a relevância na abordagem de conceitos acústicos correlacionando física e música, indagando interesse por um saber presente na realidade do aluno.

Através disso, poder-se-á analisar e atuar sobre um trabalho que aborda o caso do berimbau e os fenômenos que ocorrem em seu tocar. A intenção é viabilizar o contato musical esmiuçando a física por trás do instrumento em questão. Assim, considerando os levantamentos sobre ondas e tubos sonoros, a intenção final é possibilitar aos alunos entendimento sobre o funcionamento do instrumento e dos conceitos físicos envolvidos, além do desenvolvimento da percepção sonora, espontaneidade e capacidade investigativa do aluno. A grande motivação desse trabalho é não ter tido nenhuma experiência dentro da escola que relaciona um instrumento qualquer com conhecimentos teóricos. Ao longo de todos esses anos de estudo em escolas públicas, nunca houve um professor que abordasse a música como ferramenta central de estudo.

É importante ressaltar que atualmente o ensino passa por mudanças. A remodelação do novo Ensino Médio propõe espaços para Unidades Complementares que sugerem resgates culturais, práticas em conjunto e musicalização. Assim, o projeto age de forma a fornecer práticas artísticas na sala de aula, alinhando-se com a era de projetos educacionais que buscam por espontaneidade, pluralidade e interdisciplinaridade. A música nos leva a olhar cada aluno com unicidade, haja vista que cada um expressará sua subjetividade através dela, além do estudo de ondas sonoras estar prevista pela Base Nacional Curricular Comum (BNCC) dentro das habilidades de matemática. (BRASIL, [2023]).

As próximas etapas para um potencial sucesso nessa experiência envolve o meio escolar propriamente dito: seria possível a utilização de um afinador para medição das frequências obtidas em cada caso de configuração de berimbau, atrelando uma nova ótica que relacionará as razões entre as frequências com os intervalos das notas musicais? Os alunos aprovarão essa abordagem? Como trazer os instrumentos para sala de aula? É possível obter soluções criativas ao incluir construção de instrumentos com materiais sustentáveis? Garrafa pet, colheres e grão de arroz podem ser úteis como instrumentos para acompanhamento musical de forma

ecológica? Como usar aplicativos na web e simuladores que incentivem a apreciação musical na educação? Quais experimentos físicos já foram realizados nesse cenário de educação musical que possam ser resgatados? A teoria será aplicada juntamente com a prática? Ou haverá um momento para cada uma delas? É preciso evitar um caráter binário entre conceito e instrumento. Esse projeto se ampara pela criatividade e precisa, portanto, ser aplicado no ambiente escolar para que enriqueça e tenha essas perguntas respondidas.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. Lei nº 5692. Fixa diretrizes e bases para o ensino do 1º e 2º graus e dá outras providências. **Lei No 5.692, de 11 de agosto de 1971**. Brasília: DF, 12 set. 1971. Disponível em:
https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l5692.htm#:~:text=LEI%20No%205.692%20C%20DE%2011%20DE%20AGOSTO%20DE%201971.&text=Fixa%20Diretrizes%20e%20Bases%20para,graus%2C%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%A2ncias. Acesso em: 14 fev. 2023.
- BRASIL. Lei nº 9.394, Estabelece as diretrizes e bases da educação nacional. **Lei Nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996**. Brasília: DF, 23 dez. 1996. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9394.htm. Acesso em: 14 fev. 2023.
- BRASIL. Ministério da Educação **Base Nacional Comum Curricular**. [Brasília, DF]: Ministério da Educação (BNCC), [2023].
- BONJARDIN, Leonardo, Rigaldi. **Fisiologia da Audição**. São Paulo, SP. FOB/USP. 26 ago. 2020. Apresentação Elaborada em PowerPoint salva em PDF. 32 slides. P&B. Disponível em:
https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7308379/mod_resource/content/1/Fisiologia%20da%20Audi%C3%A7%C3%A3o_Equil_grad_2020.pdf. Acesso em: 15 mar. 2023.
- CARVALHO, Edvaldo do Nascimento. O componente curricular Arte no contexto do Novo Ensino Médio – abordagem, desafios e perspectivas. **Revista Educação Pública**, Rio de Janeiro, v. 22, nº 39, 18 de outubro de 2022. Disponível em:
<https://educacaopublica.cecierj.edu.br/artigos/22/39/o-componente-curricular-arte-no-contexto-do-novo-ensino-medio-r-abordagem-desafios-e-perspectivas>. Acesso em: 15 mar. 2023.
- CASTAGNA, Paulo. A musicologia enquanto método científico. **Revista do conservatório de música da UFPel**, Pelotas nº1, p. 7-31, 2008. Disponível em:
<https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/RCM/article/view/2430>. Acesso em: 08 fev. 2023.
- DON Cherry & Organic Music Theatre. [S.], 2012. 1 vídeo (40min49s). Publicado pelo canal La Cueva Boreal. Disponível em:
<https://www.youtube.com/watch?v=lu3OLnQvl-g>. Acesso em: 08 fev. 2023.
- GOHN, Maria da Glória; STRAVACAS, Isa. O Papel da Música na Educação Infantil. **EccoS Revista Científica**, vol. 12, n. 2, 2010. Disponível em:
<https://periodicos.uninove.br/eccos/article/view/1563/1887>. Acesso em: 08 fev. 2023.
- GOMES, Herica Cambraia; MANRIQUE, Ana Lucia. A musicalização (ritmo-som-corporeidade) como intervenção neurocognitiva de habilidades matemáticas. **Revista de Ensino de Ciências e Matemática**, v. 6, n. 1, p. 75–83, 2015. Disponível em:
<https://revistapos.cruzeirodosul.edu.br/index.php/rencima/article/view/1036>. Acesso em: 08 fev. 2023.

HUGH, Ben Mc. **The beauty of sound:** Timbre as grounds for aesthetic and artistic value in music. 2021. Master Degreee (Master's program in aesthetics) - Department of philosophy, Uppsala University, Uppsala, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/360450009_The_beauty_of_sound_Timbre_as_grounds_for_aesthetic_and_artistic_value_in_music. Acesso em: 15 mar. 2023.

ITA 2021: No experimento de dupla fenda de Young, suponha que a separação entre as fendas seja de 16 m. **Indagação.** [S.], 28 de novembro de 2020. Disponível em: <https://www.indagacao.com.br/2020/11/ita-2021-no-experimento-de-dupla-fenda-de-young-suonha-que-a-separacao-entre-as-fendas-seja-de-16-m.html>. Acesso em: 08 fev. 2023.

KANDUS, Alejanda; GUTMANN, Friedrich Wolfgang; CASTILHO, Caio Mário Castro de. A física das oscilações mecânicas em instrumentos musicais: exemplo do berimbau. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 28, n. 4, p. 427-433, 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/bitstream/ri/13253/1/a04v28n4.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2023.

MILANI, Luciano. **Portal Capoeira;** A construção do berimbau; [S.], 2005. Disponível em: <https://portalcapoeira.com/capoeira/curiosidades/a-construcao-do-berimbau/>. Acesso em: 08 fev. 2023.

NORDER, Luiz Antonio; MELO, Amanda Araujo Dias de; POYARES, Gustavo de Andrade, OLIVEIRA, Leonardo Silva de. Educação Musical na Universidade: Uma análise a partir da criação de um estúdio de ensaios em Araras (SP). **Teoria e Prática da Educação**, v.24, n.2, 2021. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/TeorPratEduc/article/view/57748>. Acesso em: 08 fev. 2023.

PIMENTEL, Neide. Som e ondas: algumas características das ondas.[S.], 27 de janeiro de 2017, 12p., [apresentação de slides em formato pdf]. Disponível em: <https://pfqpimentel.files.wordpress.com/2017/01/m18-pb.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2023.

PRINCÍPIOS de Huygens. **Só Física.** [S.], [2023]. Disponível em: <https://www.sofisica.com.br/conteudos/Ondulatoria/Ondas/principiodehuygens.php>. Acesso em: 08 fev. 2023.

SANTOS, Cristina Bertoni dos. Aula de música e escola: concepções e expectativas de alunos do ensino médio sobre a aula de música da escola. **Revista ABEM**, Londrina, v. 20, 2012. Disponível em: <http://www.abemeducacaomusical.com.br/revistas/revistaabem/index.php/revistaabem/article/view/162/97>. Acesso em: 08 fev. 2023.

SANTOS, José Carlos Fernandes dos. **Ondas.** Globo. Educação. Física.[2023]. Disponível em: <http://educacao.globo.com/fisica/assunto/ondas-e-luz/ondas.html>. Acesso em: 08 fev. 2023.

SOUZA, Laís Verônica Ferreira de; *et al.* O vínculo na musicalização de crianças em situação de abrigo. *In:* CONGRESSO BRASILEIRO DE EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA, 7, 2016, Ouro Preto. **Anais [...].** Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2016, 1-10 p. Disponível em:

https://cbeu.ufop.br/anais_files/bcef4cf60b27e457549da07e438b14eb.pdf. Acesso em: 08 fev. 2023.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. FIS 184 - Quarto Laboratório. [2023]. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/tex/fisica-4/lab4.html>. Acesso em: 08 fev. 2023.

YAMAMOTO, Kazuhito. **Física para o Ensino Médio 2**. São Paulo: Saraiva, 2013.

YOUNG Hugh D. **Física II: Termodinâmica e Ondas**. São Paulo: Addison Wesley, 2008.