

MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



USO DAS FIGURAS DE CHLADNI NO ENSINO DE FÍSICA

Márcio Antonio de Lima

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal Rural de Pernambuco 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. Wictor Carlos Magno

Recife - agosto de 2020.

USO DAS FIGURAS DE CHLADNI NO ENSINO DE FÍSICA

Márcio Antonio de Lima

Orientador:

Prof. Dr. Wictor Carlos Magno

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

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Wictor Carlos Magno

Prof. Dr. Francisco Nairon Monteiro Júnior

Prof. Dr. Pedro Hugo de Figueiredo

Recife - agosto de 2020.

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

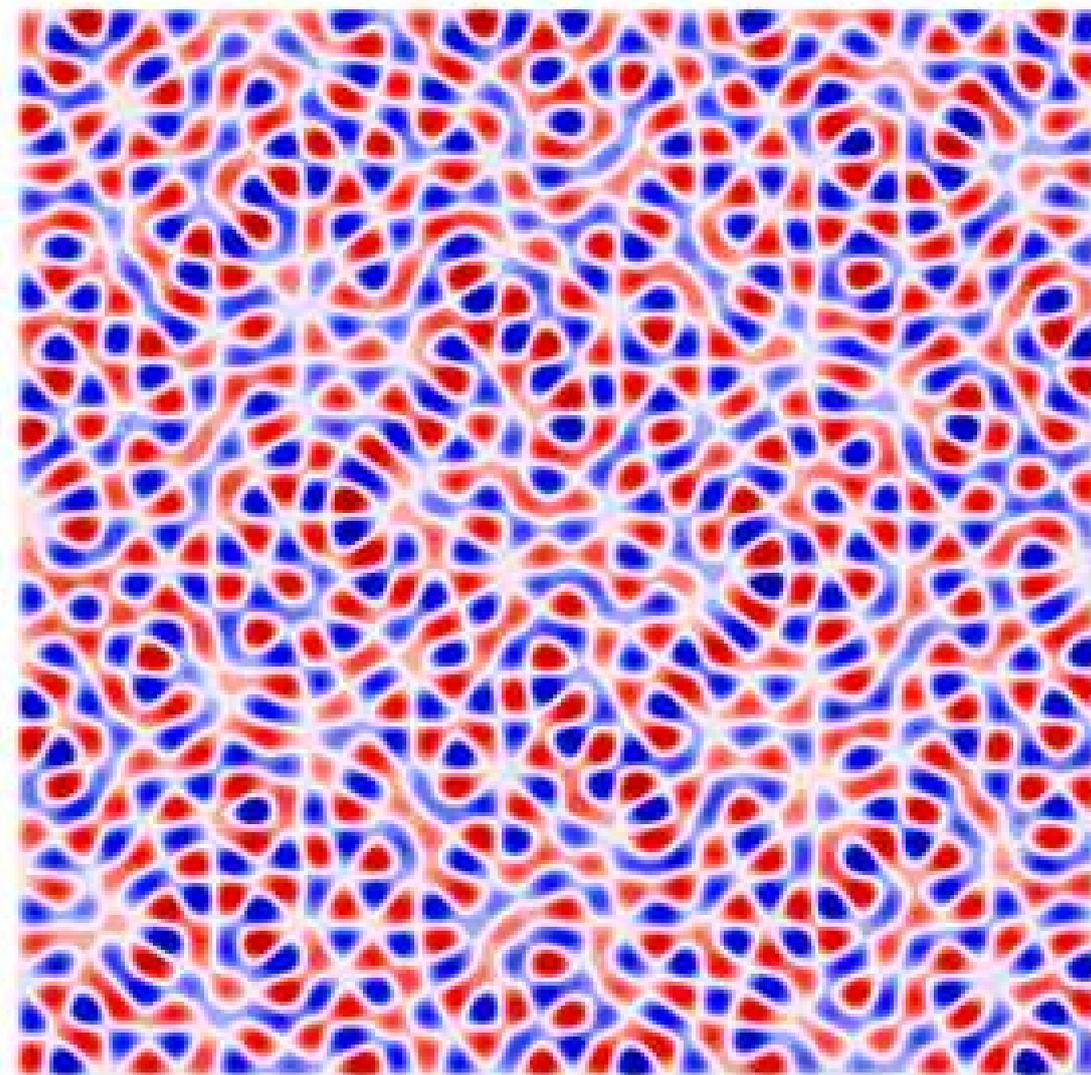
L732u Lima, Márcio Antonio de
Uso das Figuras de Chladni no Ensino de Física / Márcio Antonio de
Lima - Recife: UFRPE, 2020.

123 f. : il.

Orientador: Wictor Carlos Magno
Inclui referências, apêndice(s) e anexo(s).

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de
Pernambuco, Programa de Mestrado Profissional em Ensino de Física
(PROFIS), Recife, 2020.

1. Acústica. 2. Ressonância. 3. Figura de Chladni. I. Magno, Wictor
Carlos, orient. II. Título



(*) Figura de Chladni gerada por computador, correspondendo aos harmônicos de altas ordens

(*) Fonte: <http://chalkdustmagazine.com/features/when-truchet-met-chladni/>

Dedico este trabalho aos meus pais, principalmente a minha mãe que é uma guerreira, pois sou o que sou hoje graça a ela, a minha esposa e filhos que tiveram serenidade de sempre me estimular nas horas de dificuldades durante a elaboração desta dissertação.

Agradecimentos

Quero deixar aqui registrada a minha gratidão a todos os professores do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal Rural de Pernambuco.

Agradeço ao meu orientador pela paciência e discernimento durante a execução desta dissertação.

Aos meus colegas de turma por toda ajuda que tive durante o curso.

Aos alunos do 9º ano da escola municipal Professora Janise dos Santos Oliveira, na cidade de Vitória de Santo Antão - PE e sua equipe gestora.

À banca examinadora, pelo tempo dedicado à análise deste trabalho e pelas possíveis contribuições e correções a serem sugeridas, sempre oportunas visando à melhoria do trabalho.

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo sobre a utilização dos padrões ressonantes de Chladni no ensino de física para estudantes do 9º ano do ensino fundamental. Desenvolvemos uma sequência didática com o tema geral Acústica com uma turma de estudantes de uma escola pública do ensino fundamental, a qual teve contato com os conteúdos de física pela primeira vez. Alguns conceitos da Teoria de Aprendizagem Significativa de David Ausubel foram aplicados nesta sequência didática, objetivando sondar o nível de conhecimento intuitivo e o senso comum destes estudantes, através da realização de algumas atividades práticas e do desenvolvimento de alguns roteiros de experimentação com um aparato proposto, servindo como material útil de apoio ou como tutorial para professores de ciências em geral, dos ensinos fundamental e médio; bem como podendo ser utilizado por alunos de graduação dos cursos de licenciatura e bacharelado em física da universidade. O uso do aparato experimental proposto aqui pretende intermediar o processo de obtenção de conhecimentos físicos abstratos como: ondas sonoras, ondas estacionárias, ressonância, modos normais de vibração de uma membrana, dentre outros assuntos. Pretendemos com este trabalho tornar tais conceitos mais acessíveis e contextualizados para os alunos. É possível utilizar os padrões ressonantes de Chladni no ensino de física como um forte aliado do professor no ensino da Acústica, pois ele contribui para aumentar o interesse dos estudantes e professores em sala de aula, com a finalidade de tornar mais significativa a aprendizagem da física para todos os envolvidos.

Palavras-chave: acústica, ressonância, figuras de Chladni.

Abstract

This work presents a study on the use of the resonant Chladni patterns in the physics teaching for ninth grade (9th) students from the elementary school. We developed a didactic sequence with the general theme Acoustics with a class of students from a public elementary school, who had contact with the contents of physics for the first time. Some concepts of David Ausubel's Meaningful Learning Theory were applied in this didactic sequence, aiming to probe the level of intuitive knowledge and common sense of these students, through the accomplishment of some practical activities and the development of some experimentation scripts with a proposed apparatus, serving as useful support material or as a tutorial for teachers of general science in elementary and high school, as well as for use by undergraduate students of the university's undergraduate and bachelor of physics courses. The use of the experimental apparatus proposed in this work intends to intermediate the process of obtaining abstract physical knowledge such as: sound waves, standing waves, resonance, normal modes of vibration of a membrane, among other subjects. We intend with this work to make such concepts more relevant and contextualized for the students. It is possible to use Chladni's resonant patterns in the teaching of physics as a strong ally of the teacher in the teaching of Acoustics, as it contributes to increase the interest of students and teachers in the classroom, improving also the overall learning for everybody.

Keywords: acoustics, resonance, Chladni figures.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO.....	14
---------------------------	-----------

CAPÍTULO II

2. REFERÊNCIAL TEÓRICO.....	17
2.1. Teoria da aprendizagem significativa.....	17
2.2. Figuras de Chladni.....	2020
2.3. Estudo da acústica.....	24
2.3.1. Componentes características das ondas.....	26
2.3.2. Princípio da superposição.....	27
2.3.3. Ondas estacionárias.....	29
2.3.4. Cordas vibrantes.....	29
2.3.5. Ondas sonoras.....	30
2.3.6. Velocidade do som em vários meios materiais.....	32
2.3.7. Formato das ondas sonoras em determinados instrumentos musicais.....	33
2.3.8. Equação de onda para membranas vibrantes.....	34
2.3.8.1. Membrana retangular.....	34
2.3.8.2. Membrana circular.....	37
2.4. Uso do COMSOL - Multiphysics.....	39
2.5. Parte Experimental.....	48

CAPÍTULO III

3. PRODUTO EDUCACIONAL: SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA A APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA DA ACÚSTICA UTILIZANDO AS FIGURAS DE CHLADNI.....	51
3.1. Materiais utilizados na confecção do experimento.....	51
3.2. Detalhamento dos itens principais do experimento.....	51
3.3. Sequência didática pautada na teoria de Ausubel.....	56
3.4. Detalhamento das aulas da Sequência Didática.....	58

CAPÍTULO IV

4. APLICAÇÃO DO PRODUTO.....	65
5. CONCLUSÕES.....	76
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77

APÊNDICE A - QUESTIONÁRIO I E II.....	79
APÊNDICE B - TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DIVULGAÇÃO DE IMAGENS DOS ALUNOS.....	83
APÊNDICE C - REQUERIMENTO PARA APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL EM SALA DE AULA.....	84
APÊNDICE D - PRODUTO EDUCACIONAL.....	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa conceitual sobre ondas.....	19
Figura 2 - Fotografia de Ernst Chladni.....	20
Figura 3 - Primeiro instrumento musical construído por Chladni: o Euphon.....	22
Figura 4 - Padrões de Chladni em uma placa circular vibrando, excitada por um arco de violino.....	23
Figura 5 - Fotografia das Figuras de Chladni formadas na superfície de um violino vibrando.....	24
Figura 6 - Onda mecânica produzida na superfície de um lago.....	25
Figura 7 - Vibração longitudinal do som através da membrana de um tambor.....	26
Figura 8 - Componentes características de uma onda genérica.....	27
Figura 9 - Interferência construtiva entre duas ondas propagando-se em uma corda.....	28
Figura 10 - Interferência destrutiva de ondas em uma corda.....	28
Figura 11 - Exemplo de produção de uma onda estacionária em uma corda esticada.....	29
Figura 12 - Primeiro harmônico ou modo de vibração fundamental de uma corda vibrante.....	30
Figura 13 - Segundo harmônico de uma corda vibrante.....	30
Figura 14 - Aparelho auditivo humano.....	32
Figura 15 - Ondas com o mesmo comprimento de onda, porém com diferentes timbres.....	33
Figura 16 - Propagação de uma frente de onda esférica com uma fonte pontual localizada na origem.....	34
Figura 17 - Evolução do modo fundamental de vibração da membrana retangular com $m = n = 1$	36
Figura 18 - Modos normais de vibração de uma membrana retangular. (a) Modo de vibração com $m = 2$ e $n = 1$. (b) Modo de vibração com $m = 3$ e $n = 2$	36
Figura 19 - Modos normais de uma membrana circular com suas respectivas frequências angulares de vibração ω_{mn} , definidas em função da frequência do modo fundamental ω_{01}	38
Figura 20 - Simulação no COMSOL dos primeiros modos normais de vibração de uma membrana circular de aço com raio $R = 0.25$ m e suas respectivas frequências de vibração em Hertz.....	40
Figura 21 - Simulação no COMSOL da geração dos padrões de Chladni em uma membrana circular.....	42
Figura 22 - Algumas Figuras de Chladni geradas no COMSOL para uma membrana circular.....	42
Figura 23 - Frequências de vibração para a placa circular, em função de $l = m + 2n$, com $n = 0$ e $m \neq 0$	45
Figura 24 - Frequências de vibração para a placa circular, em função de $l = m + 2n$, com $n = 1$ e $m \neq 0$	46
Figura 25 - Frequências de vibração para a placa circular, em função de $l = m + 2n$, com $n = 2$ e $m \neq 0$	46
Figura 26 - Frequências de vibração para a placa circular, em função de $l = m + 2n$, com $n = 3$ e $m \neq 0$	47
Figura 27 - Placa quadrada com lados $a = b = 20$ cm, vibrando na frequência 1.422 Hz.....	49
Figura 28 - Placa circular com raio igual a 20 cm, vibrando na frequência 1.500 Hz.....	49
Figura 29 - Placa triangular com lados iguais a $l = 20$ cm, vibrando na frequência 2.100 Hz.....	49
Figura 30 - Explicação da formação das Figuras de Chladni nos pontos nodais de uma placa vibrante.....	50
Figura 31 - Alto-falante usado no experimento.....	52
Figura 32 - Amplificador de som utilizado no experimento.....	52
Figura 33 - Placas vibrantes, construídas em acrílico, para observação das Figuras de Chladni.....	53
Figura 34 - Cano de PVC com parafuso centrado para acoplamento das placas ao alto-falante.....	53

Figura 35 - Aplicativo usado em um <i>smartphone</i> para controle da frequência de vibração das placas.....	54
Figura 36 - Areias coloridas usadas sobre as superfícies das placas vibrantes.....	55
Figura 37 - Confirmação experimental da lei de Chladni para uma placa vibrante de acrílico.....	55
Foto 01 – Fachada da Escola.....	65
Foto 02 – Pátio da Escola.....	65
Foto 03 - Sala de aula do 9º ano do Ensino Fundamental.....	65
Foto 04 – Aplicação do primeiro questionário de “sondagem”	66
Foto 05 – Mola de aço usada para trabalhar conceitos de mecânica ondulatória.....	69
Foto 06 – Analisando o período, o comprimento de onda e a frequência de uma onda mecânica.....	69
Foto 07 – Demonstração da propagação de ondas transversal.....	69
Foto 08 – Demonstração de ondas longitudinais.....	70
Fotos 09 e 10 – Aula prática demonstrativa da ressonância do som em uma taça de vidro.....	70
Foto 11 – Aplicação do segundo questionário de avaliação e sondagem.....	71
Foto 12 – Alunos preparando a montagem do experimento de observação das Figuras de Chladni.....	72
Fotos 13 e 14 – Alunos polvilhando areia numa placa circular e observando as Figuras de Chladni.....	73
Foto 15 - Polvilhando areia colorida numa placa triangular e observando uma Figura de Chladni.....	73
Foto 16 - Polvilhando areia colorida numa placa quadrada e observando uma Figura de Chladni formada.....	73
Foto 17 – Aplicação do último questionário avaliativo como atividade de fechamento.....	74

LISTA DE TABELAS E GRÁFICOS

Tabela 1 - Percepção do som no campo do infrassom, som audível e infrassom.....	31
Tabela 2 - Módulo da velocidade do som em vários meios.....	32
Tabela 3 - Primeiros zeros α_{mn} ($n = 1,2,3,4$) das cinco primeiras funções de Bessel ($m = 0,1,2,3,4$).....	38
Tabela 4 - Frequências calculadas no COMSOL das Figuras de Chladni para $n = 0$ e $m \neq 0$	43
Tabela 5 - Frequências calculadas no COMSOL das Figuras de Chladni para $n = 1$ e $m \neq 0$	43
Tabela 6 - Frequências calculadas no COMSOL das Figuras de Chladni para $n = 2$ e $m \neq 0$	43
Tabela 7 - Frequências calculadas no COMSOL das Figuras de Chladni para $n = 3$ e $m \neq 0$	43
Tabela 8 - Frequências calculadas no COMSOL das Figuras de Chladni para $n = 4$ e m variando.....	44
Tabela 9 - Frequências calculadas no COMSOL das Figuras de Chladni para $n = 5$ e m variando.....	44
Tabela 10 - Comprovando a Lei de Chladni.....	44
Tabela 11 - Sequência didática sobre acústica, aplicada a uma turma do 9º ano do ensino fundamental.....	57
Gráfico I - Resultado da aplicação do questionário de sondagem em porcentagem.....	67
Gráfico II - Resultado da aplicação do questionário de sondagem analisado por número de acertos, erros considerados e erros.....	68
Gráfico III - Resultado da aplicação do II questionário.....	71
Gráfico IV - Resultado da aplicação do segundo questionário analisado por número de acertos, erros considerados e erros.....	72
Gráfico V - Resultado da reaplicação do primeiro questionário em porcentagem.....	74
Gráfico VI - Resultado da reaplicação do primeiro questionário analisado por número de acertos, erros considerados e erros.....	75

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

Em geral, o ensino de física para alunos do ensino fundamental da rede pública de ensino está limitado ao conteúdo teórico, mais relacionado com a matemática e seus cálculos complexos, ao invés de se pautar por uma investigação e busca pela compreensão dos fenômenos físicos que de fato estão relacionados. Não que a matemática não seja importante para o estudo da física; porém, deve ser dosada de forma que os alunos consigam diferenciar a física da matemática.

Em particular, quando o assunto estudado é sobre acústica, destacando-se o estudo das ondas sonoras, por exemplo, em sua maioria, os professores de física utilizam quase sempre uma abordagem descontextualizada, sem prática e excessivamente formal ou teórica. Essa prática gera alunos desmotivados em estudar física, alunos que enxergam a ciência como um conjunto de fórmulas e que os exercícios se resumem a decorar e aplicar essas fórmulas. Também é possível destacar que o currículo imposto para a disciplina de ciências do 9º ano exige um nível de abstração e habilidade, com formalismo matemático excessivo, além da capacidade cognitiva do estudante nesta faixa etária.

Segundo Ostermann e Moreira (1999) as crianças tendem a perder o interesse em aprender ciências com o passar do tempo, principalmente no início do segundo ciclo do ensino fundamental; não sendo muito diferente também no final do Ensino Fundamental. Os autores dizem que parte desse fato se deve a falta de estrutura das escolas de proporcionar um ensino cativante. Relatam, ainda, que esta incapacidade estaria também na formação científica inadequada dos professores. Isso se deve a diversos fatores, dentre os quais, se destacam a metodologia utilizada pelos professores, os temas abordados e, não raro, o seu despreparo para tratar temas relacionados à física e à química no ensino fundamental. Também podemos destacar que em muitas escolas os professores que lecionam as disciplinas de ciências possuem formação acadêmica em outras áreas, em alguns casos até em áreas não correlatas, a fim de complementar sua carga-horária ou ainda, devido à falta de professores com formação específica na escola, principalmente nas áreas de ciências e em matemática.

Pensando no melhor dentro do propósito em termos de aprendizado do conteúdo de física, e numa associação com experimentos relacionados ao conteúdo para auxiliar numa melhor aprendizagem, além de despertar o interesse científico dos alunos e melhorar a qualidade do ensino básico das escolas públicas, é essencial utilizar práticas

pedagógicas modernas, explorar os sentidos e os conhecimentos prévios dos alunos, em destaque para o 9º ano do ensino fundamental.

Lopes afirma que o ensino-aprendizagem da física é uma realidade complexa (LOPES, 2004). Isso porque muitos alunos não querem aprender os conteúdos da física tradicional. Nesse sentido, torna-se importante o uso de experimentos didáticos durante as aulas, assim como explorar temas atuais, contemporâneos e que estejam presentes na tecnologia do dia a dia do aluno; simplesmente não apenas por despertar no aluno o interesse, sua curiosidade, motivação e seu espírito crítico, mas também porque “se pretendemos que haja uma aprendizagem significativa dos conceitos físicos, entendemos que é preciso que os alunos passem a dispor de elementos necessários à construção desses conceitos” (PIETROCOLA, 2005). Visto dessa forma, entende-se que a realização de experiências científicas no ensino de física representa uma importante ferramenta para que o aluno tome consigo o conteúdo experimental e possa estabelecer relação entre a teoria estudada e a prática vivencial dos fenômenos presentes em seu cotidiano.

Além disso, podemos ter como orientação norteadora os Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (PCN, 1997), os quais são diretrizes e referências para o ensino das disciplinas curriculares de todos os segmentos e discutem os objetivos sobre ensinar Física no Brasil. Em outras palavras, os PCNs recomendam acima de tudo que a apropriação dos conhecimentos físicos deve ser feita a partir de elementos vivenciais do aluno e assim formar, sobretudo o cidadão, capaz de compreender o seu meio e os desenvolvimentos tecnológicos da sociedade em que vive.

Nesta tese de Mestrado propomos o uso das Figuras de Chladni, obtidas pela vibração de placas de diferentes materiais por um oscilador, com observação da formação dos padrões de ondas estacionárias e observação dos modos normais de vibração destas placas, com a finalidade de facilitar o ensino de acústica no 9º ano do ensino fundamental, despertando o interesse e a motivação dos alunos para estudar este assunto. A figura que aparece no início desta dissertação como uma arte ilustrativa, foi retirada da referência (<http://chalkdustmagazine.com/features/when-truchet-met-chladni/>) e mostra uma Figura de Chladni calculada por computador para altas frequências. O objetivo principal deste trabalho então é introduzir os conceitos de ondulatória e acústica para alunos da série final do ensino fundamental, usando o experimento das Figuras de Chladni para alcançar uma aprendizagem mais significativa. O público alvo deste trabalho são os professores de Física do ensino médio ou do nono ano do ensino fundamental. Estudantes de graduação

em Física (licenciatura ou bacharelado) também podem utilizar os resultados deste trabalho na elaboração de suas aulas sobre acústica e mecânica ondulatória.

No Capítulo 2 desta dissertação, discutimos o referencial teórico baseado na teoria de aprendizagem significativa de David Ausubel, para embasar as discussões teóricas deste trabalho. Apresentamos ainda neste Capítulo um estudo teórico sobre ondulatória e acústica que servirão como base teórica para este trabalho. Além de apresentamos os materiais e métodos utilizados neste trabalho para a obtenção dos resultados principais desta tese. No Capítulo 3 apresentamos uma sequência didática de aulas desenvolvidas para explorar a temática de acústica com uma turma de alunos do 9º ano do ensino fundamental. No Capítulo 4, aplicamos o produto e apresentamos as conclusões deste trabalho no Capítulo 5. As referências bibliográficas consultadas estão apresentadas no Capítulo final 6.

CAPÍTULO II

2. REFERÊNCIAL TEÓRICO

Visando uma abordagem centrada no processo de ensino e aprendizagem, o presente trabalho dispõe-se a construir uma sequência didática utilizando como base a Teoria da Aprendizagem Significativa de David Paul Ausubel. Para tanto, discutiremos no item 2.1, a teoria de aprendizagem baseada nos trabalhos de David Ausubel; bem como alguns conteúdos teóricos da área de Física, os quais foram trabalhados ao longo desta Tese de Mestrado.

2.1. Teoria da Aprendizagem Significativa

A fundamentação teórica do presente trabalho teve como referência básica o processo de ensino/aprendizagem desenvolvido por David Paul Ausubel, conhecido como Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS), cuja finalidade é produzir uma sequência didática utilizando como base os conhecimentos prévios dos alunos. As referências básicas utilizadas neste Capítulo foram os trabalhos do pesquisador Marcos Antônio Moreira: (MOREIRA, M. A. Aprendizagem Significativa. A teoria de David Ausubel, 2016) e (MOREIRA, M. A. Aprendizagem Significativa: a teoria e textos complementares, 2012).

Para David Ausubel, a ideia central é de que o fator isolado mais importante influenciando a aprendizagem é aquilo que o aprendiz já sabe. Aqui o termo “aprendiz” é usado no sentido geral de “o ser que aprende”, e não no sentido específico de “aquele que aprende arte ou ofício”. A ideia é simples, mas a explicação de como e por que essa ideia é defensável é complexa (NOVAK, 1977a).

Segundo Ausubel, a aprendizagem significativa é:

“um processo pelo qual uma nova informação se relaciona com um aspecto relevante da estrutura do conhecimento do indivíduo”. (MOREIRA, 2006)

Um fator primordial para Ausubel na aprendizagem significativa é que exista no aluno um elemento pré-existente na estrutura cognitiva chamada subsunçor. Os subsunçores são as ideias prévias que o indivíduo já dispunha no seu alicerce sobre determinado tema e a partir desse elemento fundamental que as ideias posteriores seriam ensinadas e conectadas a estrutura cognitiva. Dessa forma, a qualidade da aprendizagem seria diretamente proporcional à qualidade da compreensão do subsunçor para o aluno,

ou seja, significa que varias ideias vão se intercalando de acordo com a relação que se estabelecem entre elas, quanto maior o entendimento que ele possui das ideias prévias dentro da sua própria estrutura cognitiva melhor seria a sedimentação dos novos conteúdos expostos. (AUSUBEL, 2000)

São duas condições para a aprendizagem significativa segundo Ausubel. A primeira condição pressupõe que o material de aprendizagem seja ele livro, revista, mídias, aulas, dentre outros, tenha significado lógico, em outras palavras, se relacione de maneira não-arbitrária e não-literal a uma estrutura cognitiva apropriada e relevante. Já a segunda condição, diz que o aprendiz tenha sua estrutura cognitiva “ancorada”, ou seja, que suas ideias estejam interligadas com as quais esses materiais estejam relacionados, isso quer dizer, que o material deve ser relacionável a determinado conhecimento e o indivíduo deve ter conhecimentos e o aprendiz deve ter esses conhecimentos prévios necessários para fazer esse relacionamento de forma não-arbitrária e não-literal. (MOREIRA, 2012)

Na ausência de teorias de ensino, os professores são levados a valerem-se das normas disponíveis no folclore educacional ou basearem-se no exemplo de seus próprios professores ou, ainda, tentar descobrir técnicas de ensino através de tentativas de ensaio e erro.

Uma teoria de ensino tem por base a construção de princípios que possam ser adaptados tanto a diferentes sujeitos como a diferentes situações.

Um grande seguidor da obra de David Ausubel é o Professor Marco Antonio Moreira, professor da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, principalmente no campo da Física, onde podemos destacar como um de seus trabalhos a construção dos mapas conceituais.

"Num sentido amplo, mapas conceituais são apenas diagramas indicando relações entre conceitos." (MOREIRA, 2006)

A Fig.1 mostra um mapa conceitual sobre ondas com base na teoria de Ausubel.

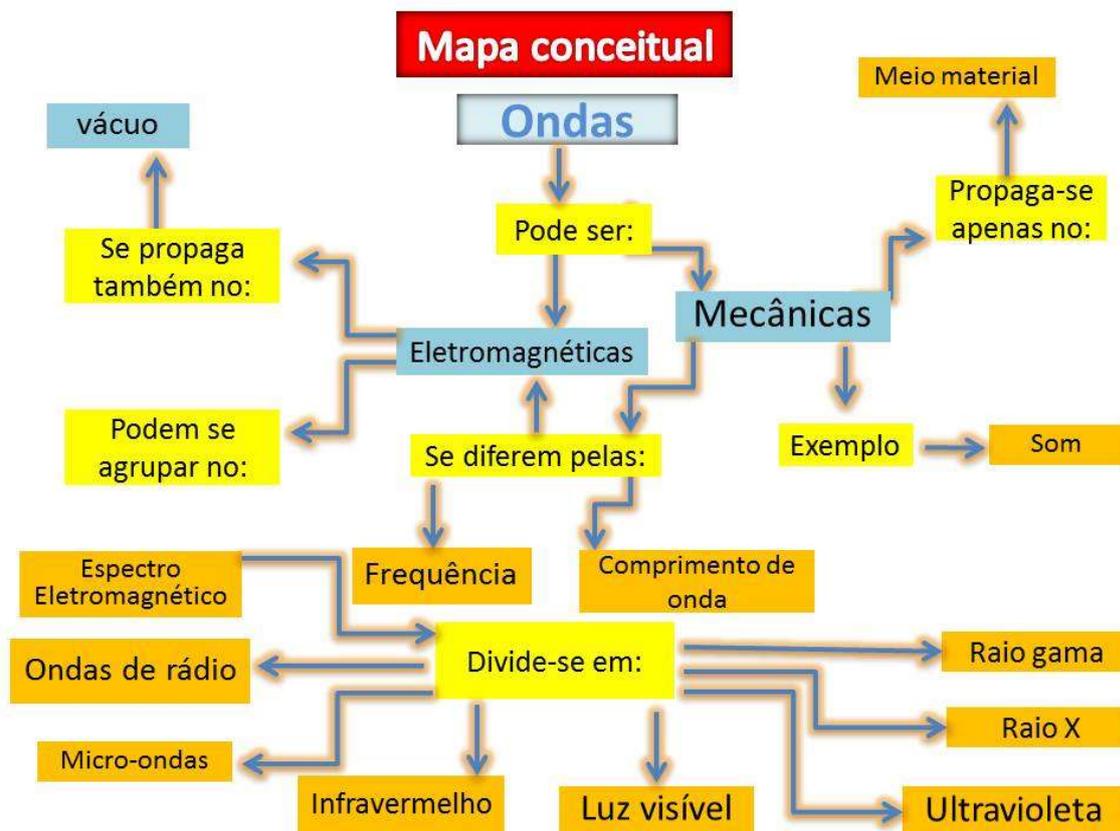


Figura 1 - Mapa conceitual sobre ondas.

No livro **Aprendizagem Significativa** de 2006, Moreira descreve o passo a passo de como se deve planejar uma aula, mostrando os principais tipos de mapas conceituais, em que, segundo Moreira, os livros didáticos comumente abordam sequências temáticas lineares como: Carga Elétrica; Força Elétrica; Campo Elétrico; Potencial Elétrico; Corrente Elétrica; Força Magnética; Campo Magnético; Indução Eletromagnética e Equações de Maxwell, etc. Moreira se baseia em métodos que abordam conceitos básicos sobre a evolução da Física, sua natureza, dentre outros, permeando os assuntos e ancorando com ênfase nos conteúdos que se referem.

Deve-se destacar ainda que o modelo teórico proposto por Ausubel, de uma forma particular, deve ser aplicado de modo a transferir novos conhecimentos sem deixar para trás os conhecimentos prévios já adquiridos pelos alunos. Nesse caso devemos relacionar os conhecimentos prévios, ou até mesmo empíricos dos alunos, com as novas informações a serem adquiridas.

Para finalizar, devemos separar a realidade das escolas com a que vamos ensinar, não deixando que as dificuldades venham interferir no processo de ensino aprendizagem para com os alunos.

2.2. Figuras de Chladni

Ernst Florens Friedrich Chladni foi um físico e músico alemão que nasceu em 30 de novembro de 1756 na cidade de Wittenberg (ver Fig. 2). Era filho de Ernst Martin Chladni e Johanna Sophia Chladni. Iniciou seus estudos na Universidade de Wittenberg, onde fez direito devido à exigência do pai, que era reitor e professor da Universidade. Porém, sua maior paixão era a música, sonho esse que só foi realizado após a morte do seu pai, mesmo tendo esse desejo e indo contra a sua vontade, chegou a lecionar nessa mesma universidade após passar por dificuldades econômicas (Petraglia, 2014).



Figura 2 – Fotografia de Ernst Chladni.

(Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Ernst_Chladni)

Quando Ernst Chladni concluiu sua licenciatura em direito, ele queria alçar novos rumos no estudo da acústica, o que só foi alcançada pouco tempo depois do falecimento do seu pai. Hoje Chladni é reconhecido como o pai da acústica. No início ele tinha interesse em estudar os materiais que produzissem diferentes tipos de sons em superfícies planas que vibrassem; posteriormente desenvolveu um experimento com o auxílio de um arco de violino com a finalidade de tornar visíveis os harmônicos produzidos pelas placas vibrantes.

Em meados da segunda metade do século XVIII Chladni tornou-se o pioneiro na visualização das ondas sonoras vibrando em diferentes meios materiais. Em um dos seus experimentos, uma placa de metal foi posta para vibrar com o auxílio do arco de violino. Diferentes figuras foram observadas, correspondendo aos vários modos normais ou naturais de vibração da placa, conforme serão descritas e estudadas nas seções mais adiante deste trabalho. Muitos cientistas apoiaram-se em suas teorias para desenvolver ou melhorar os seus experimentos, dentre eles podemos destacar: Savart, Young e Faraday.

Um interessante experimento em particular foi realizado quando ele adicionou areia em uma placa de vidro e em outra de metal. Com o auxílio do arco do violino, observou a formação de imagens de diferentes formas em ambas as placas quando ele apoiava seus dedos da mão em diferentes regiões das placas. A explicação dos resultados de tais experimentos só foi possível, pois ele se apoiava na descrição feita por Georg C. Lichtenberg (1742-1799), o qual afirmava que, se uma descarga elétrica fosse aplicada a uma placa vibrante, seria possível observar diferentes tipos de figuras geométricas em uma superfície onde existisse óxido vermelho de chumbo e pó de enxofre. Então seria possível observar a formação dessas figuras em uma placa de vidro ou de metal vibrante com areia. Chladni passou a chamar esse fenômeno de figuras sonoras. Posteriormente, outros autores passaram a chamar essas figuras de “Figuras de Chladni”, nome pelo qual são conhecidas atualmente e que será adotado nesta dissertação.

Além de amante da acústica, Chladni também tinha interesse na confecção de instrumentos musicais novos e “alternativos”. Em 1790 confeccionou seu primeiro instrumento, o “Euphon”. Este instrumento pode ser visto na Fig. 3 e era fabricado com várias lâminas de metal, fixadas em uma caixa acústica. Seu manuseio era feito por bastões de vidro presos na caixa. Esse aparato era interligado a uma caixa de ressonância e as lâminas eram então afinadas. É o que se pode chamar de um esboço rudimentar de um cravo ou órgão musical moderno, como hoje é conhecido.

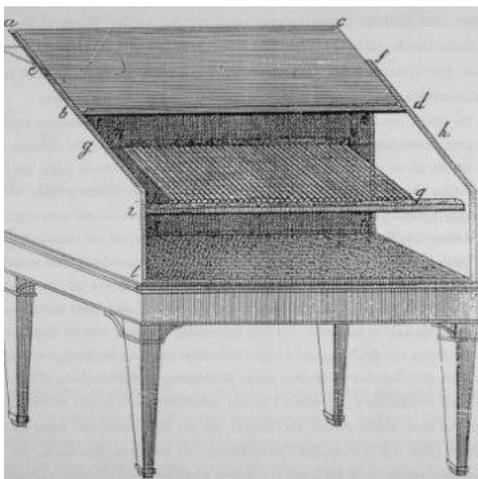


Figura 3 – Primeiro instrumento musical construído por Chladni: o Euphon.

(Fonte <http://ouvirativo.com.br/?p=345>)

Por volta de 1808, Ernst Chladni demonstrou seu experimento da placa vibrante pela primeira vez na Academia Francesa de Ciência. Atraiu tanta atenção na época que grandes multidões ficaram impressionadas com as figuras esteticamente sofisticadas formadas pelas placas vibratórias. O próprio imperador francês Napoleão Bonaparte ficou tão impressionado com o trabalho de Chladni que ofereceu um quilograma de ouro à primeira pessoa que explicasse os padrões observados. Enquanto os métodos e equipamentos experimentais foram muito aprimorados nos últimos 200 anos, a lei de Chladni e os padrões originais ainda são empregados regularmente para estudar hoje em dia as vibrações de placas. (Rossing, 1982).

As principais publicações literárias de Chladni foram:

“Entdeckungen über die Theorie des Klanges” - Descobertas sobre a teoria do som, 1787;

“Die Akustik” - A Acústica, 1802;

“Neue Beyträge zur Akustik” - Novas contribuições para a acústica, 1817;

“Ueber Feuer-Meteore, und die mit denselben herabgefallenen Massen” - Sobre Meteoros de fogo e massas caídas com eles, 1819.

Outro importante feito de Chladni foi sua descoberta sobre o cálculo da velocidade do som para diferentes gases e a produção de linhas nodais na extremidade de uma placa circular de metal. Nesse último experimento, ele utilizou uma placa circular apoiada em

uma base fixa, ao qual foi polvilhada areia fina e atritada com auxílio de um arco de violino. Como resultado, ele constatou a formação de linhas nodais sobre a placa circular. Chladni mostrou que a frequência de vibração da placa circular variava através de uma lei de potência do tipo: $f = C(m+2n)^2$, onde m é o número de nós lineares, n é o número de nós radiais (circulares) vistos sobre a placa. O coeficiente C é uma constante empírica que depende das propriedades da placa: espessura, densidade, tipo de material, módulo de elasticidade, dentre outros parâmetros. Na Fig. 4 vemos imagens de um experimento análogo ao realizado por Chladni com a formação dos nodos em uma placa com geometria circular. Uma força vertical é aplicada ao arco em contato com a placa para criar atrito. Dependendo da intensidade da força aplicada, diferentes frequências e amplitudes de vibrações podem ser geradas. Como se pode observar, diferentes padrões e figuras são observados. Na primeira figura superior à esquerda, temos: $m = 2$ e $n = 0$. Na segunda figura superior ao centro, temos: $m = 3$ e $n = 0$. Na terceira figura superior à direita, temos: $m = 1$ e $n = 1$. Na primeira figura inferior à esquerda, temos: $m = 1$ e $n = 2$. Na segunda figura inferior ao centro, temos: $m = 0$ e $n = 2$. Já na segunda figura inferior à direita, temos: $m = 2$ e $n = 1$. Quanto maior os índices m e o n , maior a frequência do modo vibrante (maior a ordem dos harmônicos excitados).

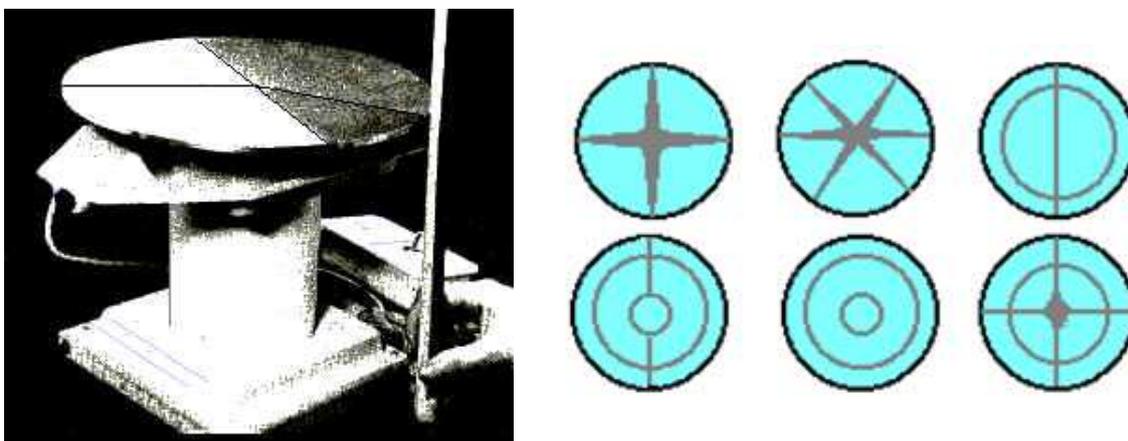


Figura 4. Padrões de Chladni em uma placa circular vibrando, excitada por um arco de violino.

<http://w3.ualg.pt/~pjsilva/guias/FIGURAS%20DE%20CHLADNI.htm>

A lei de potência descoberta por Chladni foi chamada de Lei de Chladni por Lord Rayleigh. No subtítulo 2.4 deste trabalho apresentamos uma confirmação desta lei por meio de uma simulação computacional realizada com o software COMSOL; bem como,

apresentaremos uma comprovação experimental desta lei, através da realização de um experimento didático com materiais de baixo custo e fácil acesso.

Em alguns instrumentos musicais, como por exemplo, um violino e outros instrumentos de cordas (violões, violões cellos, pianos, etc...) é possível visualizar as diferentes geometrias produzidas pelo experimento de Chladni através das vibrações produzidas na superfície do instrumento musical, a qual funciona tal qual uma placa de Chladni (Rossing, 2010). Observe na Fig. 5 a geometria da placa de um violino vibrando, formando um padrão semelhante às Figuras de Chladni.

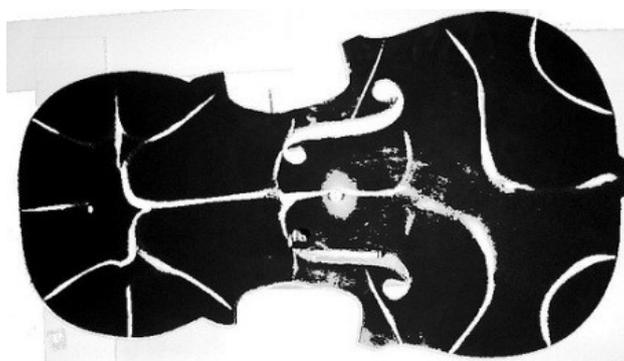


Figura 5 - Fotografia das Figuras de Chladni formadas na superfície de um violino vibrando. Fonte: (Rossing, 2010)

Dependendo do tipo de placa (formato geométrico) e do seu material, podemos produzir diferentes padrões de Figuras de Chladni. Dentre as possibilidades, destacamos três formatos em particular que serão estudados neste trabalho: a placa circular, a placa retangular (ou quadrada) e a placa triangular. Também podemos estudar uma placa com formato genérico, por exemplo, parecendo-se com a forma ou com o corpo de qualquer instrumento de corda de sua preferência; como por exemplo, um violino ou um violão. É importante que a superfície vibrante tenha um ponto de ancoragem fixo, em geral colocado no centro geométrico da placa.

2.3. Estudo da Acústica

Nesta seção apresentamos o estudo da acústica, baseando-se na referência (Halliday, Resnick e Walker, 2016). O estudo da acústica é importante para entender alguns conceitos físicos mais fundamentais como: ondas, ressonâncias, modos normais de vibração, dentre outros conceitos. Começamos então pelo conceito de onda. Uma onda

é um tipo de perturbação que transporta energia, sem que haja necessariamente transporte de matéria associada. Ondas circulares podem ser facilmente produzidas na superfície da água quando uma pedra atinge um lago, como mostra a Fig. 6. Neste exemplo, uma onda mecânica está se propagando, movendo-se para fora do ponto da criação em círculos concêntricos que se expandem até atingir a margem do lago.

O mundo é cheio de ondas. Os dois tipos principais são: ondas *mecânicas* e ondas *eletromagnéticas*. No caso das primeiras, algum meio físico está sendo perturbado. No exemplo da pedra no lago, o meio de propagação da onda é a água do lago. Já as ondas eletromagnéticas não necessitam de um meio para se propagar. Podem viajar mesmo no vácuo com a velocidade da luz, $c \approx 3 \cdot 10^8$ metros/segundo. Alguns exemplos são: as microondas, as ondas de rádio frequência (sinais de rádio, televisão, celular, etc...), o infravermelho, a luz visível, o ultravioleta, os raios X e os raios gama. Nessa dissertação, iremos focar apenas no estudo das ondas mecânicas.

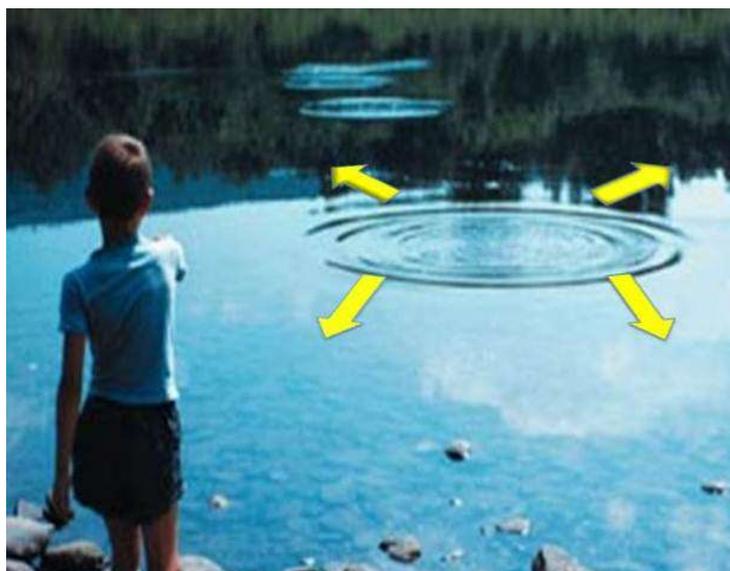


Figura 6 – Onda mecânica produzida na superfície de um lago.

<http://storage.ning.com/topology/rest/1.0/file/get/75782894?profile=original>

Com relação às ondas mecânicas, podemos classificá-las de várias maneiras.

Quanto à sua direção de propagação:

- **Unidimensional:** existe apenas uma direção de propagação. Como exemplo, as ondas propagando-se em cordas;

- **Bidimensional:** existem duas direções de propagação. Por exemplo, ondas propagando-se na superfície de líquidos ou de membranas vibrantes;
- **Tridimensional:** existem três direções de propagação. Por exemplo, o som e as ondas sísmicas propagando-se no espaço.

Quanto à direção de vibração do meio de suporte

- **Longitudinal:** a direção da oscilação coincide com a direção da propagação da onda. Por exemplo, as ondas sonoras. Na Fig. 7 vemos a propagação longitudinal do som através do ar.



Figura 7 – Vibração longitudinal do som através da membrana de um tambor.

<http://fisicaemclasse.blogspot.com/2016/03/ondas-gravitacionais-uma-nova-janela.html>

- **Transversal:** a direção da oscilação é perpendicular à direção de propagação da onda. Exemplo: onda se propagando em uma corda esticada.

2.3.1. Componentes características das ondas:

A Fig. 8 mostra os pontos característicos de uma onda genérica.

- **Vale (V_1 e V_2):** ponto mais baixo da onda;
- **Crista (C_1 e C_2):** ponto mais alto da onda;
- **Comprimento de onda (λ):** distância entre dois pontos consecutivos onde a perturbação ondulatória se repete. Unidade no SI: metro (m);
- **Frequência (f):** número de perturbações (ou oscilações) por unidade de tempo. Unidade no SI: Hertz ($1 \text{ Hz} = 1/\text{s}$);
- **Período (T):** intervalo de tempo entre um comprimento de perturbações iguais. Unidade no SI: segundo (s). Note que: $T = 1/f$;

- **Velocidade de fase (v):** razão entre o comprimento de onda e o período. $v = \lambda/T = \lambda \cdot f$. Unidade no SI: metro/segundo;
- **Amplitude (A):** representa fisicamente a "altura" máxima deslocada pelo meio físico, ocasionada pela passagem da onda mecânica. É a distância entre o eixo da onda até sua crista. Quanto maior a amplitude da onda, maior será a quantidade de energia transportada, pois a potência da onda, ou sua energia transportada por intervalo de tempo, dependerá do valor da amplitude da onda ao quadrado.

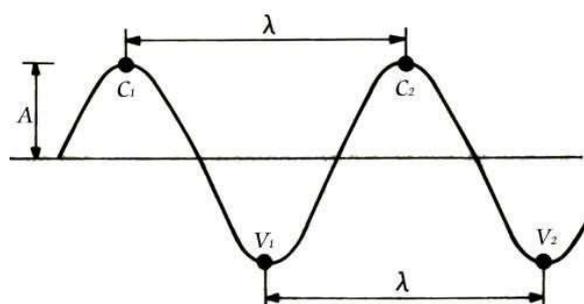


Figura 8 - Componentes características de uma onda genérica.
<http://s3-sa-east-1.amazonaws.com/descomplica-blog/wp-content/uploads/2015/10/onda.jpg>

2.3.2. Princípio da Superposição

Devido ao fato da equação de onda que governa a propagação ondulatória ser linear (a ser visto em detalhe no Capítulo seguinte), vale o princípio da superposição que pode ser resumido da seguinte forma: quando duas ou mais ondas se superpõem em um meio, o efeito resultante será a soma dos efeitos que seriam produzidos pelas ondas agindo separadamente. Como resultado, dependendo da fase relativa entre as ondas que se superpõem, pode-se observar o fenômeno da interferência entre as ondas. Existem dois tipos principais de interferências:

- **Interferência construtiva:** quando a amplitude da onda resultante é maior do que a amplitude de cada uma das ondas separadas. No caso de interferência máxima construtiva, as duas ondas estão exatamente em fase e a amplitude da onda resultante é o dobro da amplitude de cada uma das ondas separadamente (quadro b). A Fig. 9 mostra como o exemplo a formação de uma interferência totalmente construtiva entre duas ondas propagando-se em uma corda esticada.

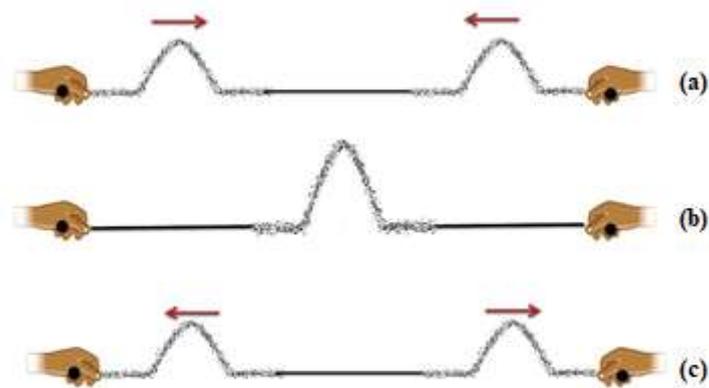


Figura 9 - Interferência construtiva entre duas ondas propagando-se em uma corda.

- **Interferência destrutiva:** quando a amplitude da onda resultante é menor do que a amplitude de cada uma das ondas separadamente. No caso de interferência máxima destrutiva, as duas ondas estão em oposição de fase e a amplitude da onda resultante anula-se no ponto de encontro entre as ondas viajantes (quadro c na figura abaixo). A Fig. 10 mostra como o exemplo a formação de uma interferência totalmente destrutiva entre duas ondas propagando-se em uma corda esticada.

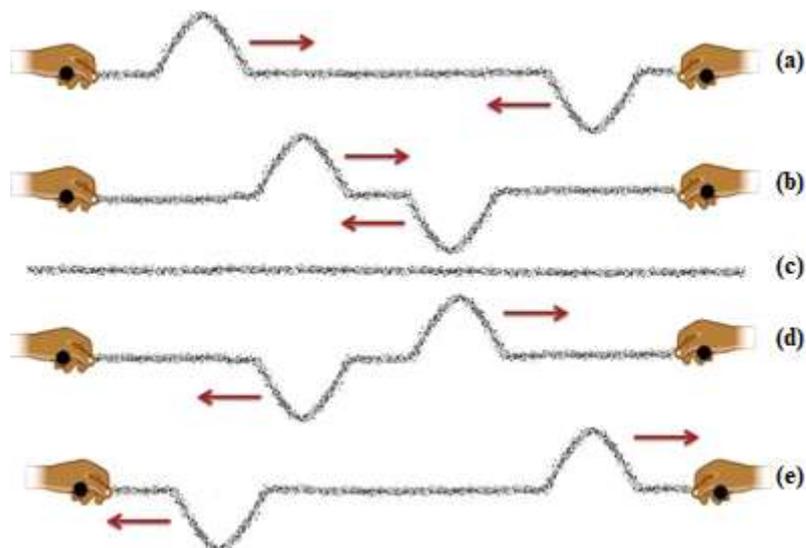


Figura 10 - Interferência destrutiva de ondas em uma corda.

2.3.3. Ondas estacionárias

As ondas estacionárias podem se formar quando duas ondas periódicas de frequência, comprimento de onda e amplitude iguais estão se propagando em um meio material em sentidos opostos. O caso mais simples é quando se tem uma corda esticada em suas extremidades e as ondas produzidas em uma extremidade se superpõem às ondas refletidas na extremidade oposta da corda.

Os pontos onde a interferência é sempre destrutiva chamam-se nós (ou nodos), enquanto os pontos de amplitude máxima são chamados de ventres. Já a distância entre dois nós consecutivos (ou entre dois ventres consecutivos) correspondente exatamente à meio comprimento de onda ($\lambda/2$), conforme mostra a Fig. 11 abaixo.

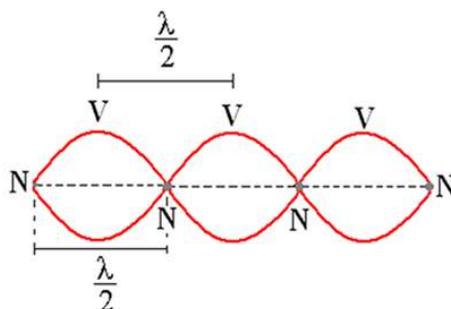


Figura 11 - Exemplo de produção de uma onda estacionária em uma corda esticada.

2.3.4. Cordas vibrantes

Ao dedilhar uma corda de um instrumento musical, podemos formar um padrão de onda estacionária porque a corda tem suas extremidades fixas. Na verdade, a onda resultante na corda vibrante será o resultado de várias ondas estacionárias se superpondo, uma vez que a corda pode suportar vários modos diferentes de vibração. A maneira mais simples de uma corda vibrar chama-se o primeiro harmônico ou o modo fundamental. A Fig. 12 mostra o modo fundamental de vibração de uma corda esticada em suas extremidades. Essa onda terá um comprimento de onda $\lambda = 2L$, onde L é o comprimento da corda em repouso. A frequência fundamental f_1 deste modo corresponde ao inverso do tempo Δt em que a onda percorre duas vezes o comprimento L da corda, na ida e na volta: $v = (2L) / \Delta t \rightarrow f_1 = 1/\Delta t = v/2L$.

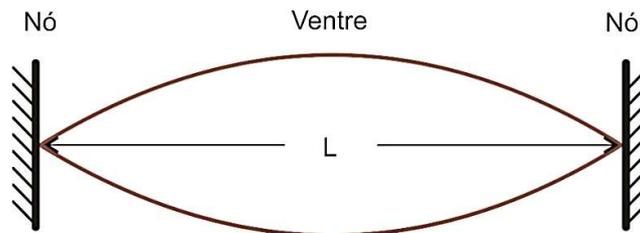


Figura 12 - Primeiro harmônico ou modo de vibração fundamental de uma corda vibrante.

<http://s3-sa-east-1.amazonaws.com/descomplica-blog/wp-content/uploads/2015/10/tubos1.png>

O segundo harmônico é caracterizado por ter agora dois ventres na corda e a presença de um terceiro nó, o qual ocorre no centro da corda; além dos outros dois nós que já se encontram nas extremidades da corda. Essa onda terá um comprimento de onda $\lambda = L$ e frequência $f_2 = 2 \cdot f_1 = v/L$. A Fig. 13 mostra o segundo harmônico de uma corda vibrante.

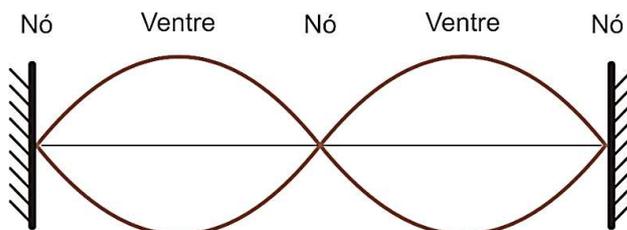


Figura 13 - Segundo harmônico de uma corda vibrante.

<http://s3-sa-east-1.amazonaws.com/descomplica-blog/wp-content/uploads/2015/10/tubos2.png>

De forma geral, podemos deduzir o comprimento de onda e a frequência de um harmônico superior de ordem N em uma corda vibrante, como sendo respectivamente: $\lambda = 2L/N$ e $f_N = N \cdot f_0 = N \cdot v/2L$ (NUSSENZVEIG, 2014).

2.3.5. Ondas Sonoras

Ondas sonoras são ondas mecânicas, longitudinais e tridimensionais. O ouvido humano é capaz de captar sons de frequência desde 20 Hz até 20.000 Hz. Esse intervalo é chamado de intervalo audível. Sons de frequência abaixo de 20 Hz são chamados de **infrassom** e de frequência superior a 20.000 Hz são chamados de **ultrassom**. O quadro a seguir (Tabela 1) apresenta um resumo das várias faixas sonoras existentes.

Tabela 1 - Percepção do som no campo do infrassom, som audível e infrassom.

Frequência (Hz)	Denominação	Método de excitação	Aplicação
0,5 ---- 20	Infrassom	Vibração da água em grandes reservatórios, batidas do coração.	Prognóstico do tempo, diagnóstico de doenças do coração.
20 ---- 2.10 ⁴	Sons audíveis	Voz humana e sons dos animais. Instrumentos musicais, apitos comuns, alto-falantes.	Para comunicação e sinalização, assim como para a medição de distâncias.
2.10 ⁴ ---- 10 ¹⁰	Ultrassom	Cerâmicas piezoeléctricas, apitos especiais (Galton). Também podem ser produzidos por animais (golfinhos, morcegos) e insetos (grilos, gafanhotos).	Sensor de distância em automóveis. Detecção submarina por sonar. Limpeza e detecção de defeitos em peças e estruturas de construções. Diagnósticos em medicina, biologia e física molecular.

Como exemplo, quando uma pessoa fala, o som que ela emite é produzido pelas vibrações das cordas vocais. Quando batemos em um tambor, em um copo ou em um metal, esses corpos vibram e emitem sons. As cordas de um violão também emitem sons quando vibram. Todos os corpos vibrantes podem ser fontes sonoras, os quais produzem ondas que se propagam no ar. Ao penetrarem na orelha externa, essas ondas provocam vibrações na fina membrana timpânica, conforme pode ser visto na Fig. 14. Os três ossículos martelo, estribo e bigorna, levam as vibrações captadas pelo tímpano para a orelha interna, provocando as sensações sonoras.

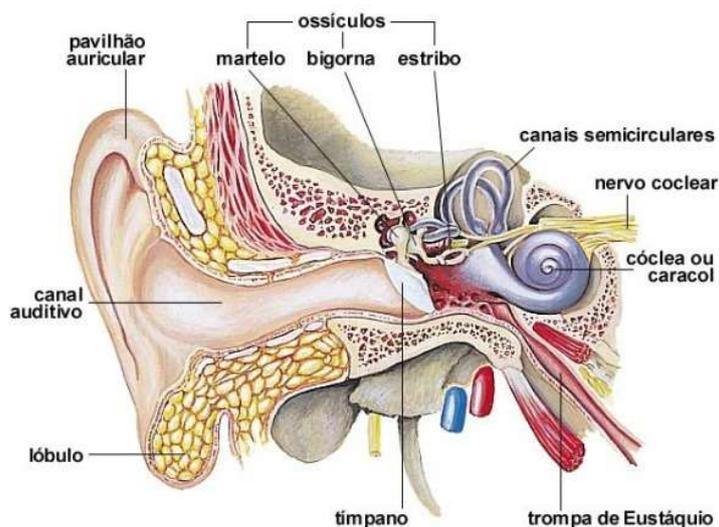


Figura 14 – Aparelho auditivo humano.

<https://www.anatomiaemfoco.com.br/aparelho-auditivo-audicao/>

Como o som é uma onda mecânica, sua velocidade depende do meio em que está se propagando. Quanto mais rígido for o meio, ou mais denso, maior a velocidade de propagação sonora no meio.

2.3.6. Velocidade do som em vários meios materiais

A Tabela 2 mostra alguns valores do módulo da velocidade de propagação do som em diferentes meios materiais e em diferentes temperaturas.

Tabela 2 – Módulo da velocidade do som em vários meios. (Halliday, vol.2, pág. 155, 10ª edição).

Meios	Velocidade (m/s)
Gases	
Ar (0 °C)	331
Ar (20 °C)	343
Hélio	965
Hidrogênio	1284
Líquidos	
Água (0 °C)	1402
Água (20 °C)	1482

Água salgada ^b	1522
Sólidos	
Alumínio	6420
Aço	5941
Granito	6000

^aA 0°C e 1 atm, a menos que haja uma indicação em contrário.

^bA 20°C e com 3,5% de salinidade.

Uma onda sonora pode sofrer:

- **Reflexão:** onda incide em um obstáculo e volta para o mesmo meio, mantendo as características.
- **Refração:** onda muda de meio e a velocidade de propagação muda de direção.
- **Difração:** onda desvia de alguns obstáculos (depende diretamente do comprimento de onda).

2.3.7. Formato das ondas sonoras em determinados instrumentos musicais

Se um piano e um violão tocam uma mesma nota musical, o som nunca sai o mesmo. Isso se dá pelo fato de o timbre das ondas geradas pelos instrumentos ser diferente. Ou seja, o formato da onda é diferente (ver Fig. 15).

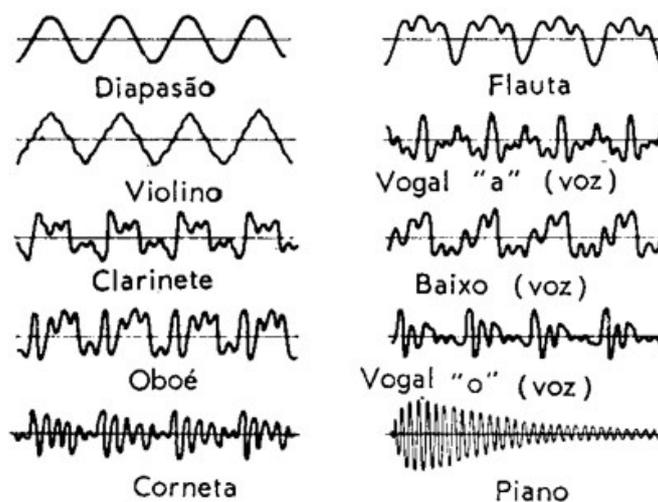


Figura 15 - Ondas com o mesmo comprimento de onda, porém com diferentes timbres.

http://s3-sa-east-1.amazonaws.com/descomplica-blog/wp-content/uploads/2015/10/img_som_timbre_PQ.jpg

A frequência da onda sonora irá influenciar na nota: quanto maior a frequência, mais agudo será o som; quanto menor a frequência, mais grave será o som. Já com relação à amplitude da onda, ela irá influenciar no volume: quanto maior a amplitude, maior o volume do som (maior o nível sonoro em decibéis – dB ou maior a intensidade da onda); quanto menor a amplitude, menor o volume do som (menor o nível sonoro e menor a intensidade da onda). Por fim, o comprimento de onda influencia na difração: quanto maior o comprimento de onda, maior o efeito da difração da onda sobre obstáculos com dimensões da ordem de λ (NUSSENZVEIG, 2014).

Tomando como referencial a fonte pontual S , uma onda sonora pode se propagar em um meio tridimensional, conforme mostra a Fig. 16. As frentes de onda resultantes descrevem trajetórias circulares (frentes de ondas esféricas), com a fonte pontual S no centro. A propagação é radial, orientada para fora e perpendicular à frente de onda; enquanto que as setas mostram os elementos do meio material oscilando com a passagem da onda. Sem, no entanto, saírem do lugar. Diz-se comumente então que uma onda mecânica transporta energia, sem que haja necessariamente transporte de matéria.

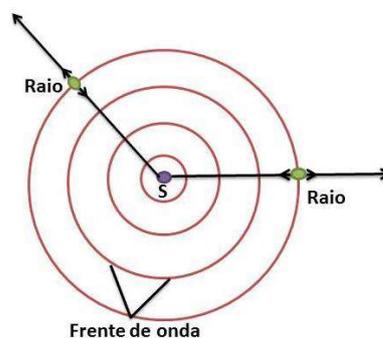


Figura 16 – Propagação de uma frente de onda esférica com uma fonte pontual localizada na origem. Fonte: Halliday, volume 2, pág. 154, 10ª edição.

2.3.8. Equação de onda para membranas vibrantes

2.3.8.1 Membrana Retangular

Considere uma membrana retangular com lados a e b , respectivamente nas direções x e y . A membrana está uniformemente esticada nestas direções por uma força de tração T (módulo da força de tração), podendo vibrar unicamente no plano xy . A densidade linear de massa da membrana vale μ . A equação de onda para este problema

pode ser escrita como uma equação diferencial parcial para a amplitude $z(x,y,t)$ em função das variáveis espaciais (x,y) e em função do tempo t (Butkov, 1988):

$$\frac{\partial^2 z(x,y,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z(x,y,t)}{\partial y^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 z(x,y,t)}{\partial t^2} \quad , \quad (1)$$

onde $v = \sqrt{T/\mu}$ é a velocidade de propagação das ondas na superfície da membrana.

As condições de contorno de *Dirichlet* obrigam, de forma geral, que a membrana esteja fixa nas suas extremidades: $x = 0$ e $x = a$; $y = 0$ e $x = b$; bem como, especifica para simplificar a análise do problema, que a membrana esteja inicialmente em repouso no instante inicial. Assim, devemos buscar soluções para a equação de onda acima que satisfaçam as seguintes condições:

$$\left\{ \begin{array}{l} z(0, y, t) = 0; \\ z(a, y, t) = 0; \\ z(x, 0, t) = 0; \\ z(x, b, t) = 0; \\ z(x, y, 0) = z_0(x, y) \\ \frac{\partial}{\partial t} z(x, y, 0) = 0 \end{array} \right. \quad . \quad (2)$$

As duas últimas condições nas Equações (2) são as condições iniciais do problema no tempo inicial ($t = 0$).

Os modos normais de vibração $z(x,y,t)$ da membrana que satisfazem ao conjunto de Equações (1) e (2) acima, são equações gerais na forma:

$$z_{mn}(x,y,t) = \text{sen}(m\pi x/a) \cdot \text{sen}(n\pi y/b) \cdot \cos(\omega_{mn} \cdot t) \quad , \quad (3)$$

onde a frequência angular ω_{mn} de vibração destes modos normais (rad/seg.) é dada por:

$$\omega_{mn} = \pi \cdot c \cdot \sqrt{m^2/a^2 + n^2/b^2} \quad . \quad (4)$$

As soluções dadas pelas Eq.(3) e Eq.(4) não são ondas viajantes, sendo então ondas estacionárias que podem vibrar na superfície da membrana e satisfazem às condições de contorno dadas pelo conjunto de Equações (2). Os índices m e n só podem assumir valores inteiros ($m, n = 1, 2, 3, 4, \dots$).

A Fig. 17 mostra, para um período T de oscilação, o primeiro modo de vibração da membrana retangular em função do tempo. Neste caso, temos o modo fundamental com $m = 1$ e $n = 1$.

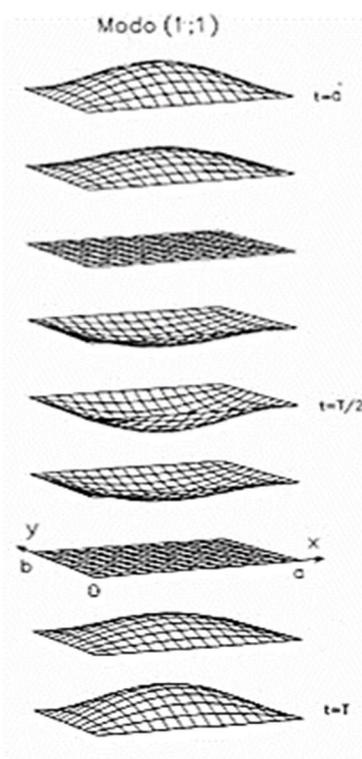


Figura 17 – Evolução do modo fundamental de vibração da membrana retangular com $m = n = 1$.

Fonte: (Massmann e Ferrer).

Na Fig. 18 temos em (a) o modo de vibração da membrana retangular com $m = 2$ e $n = 1$. Já em (b) temos o modo de vibração com $m = 3$ e $n = 2$.

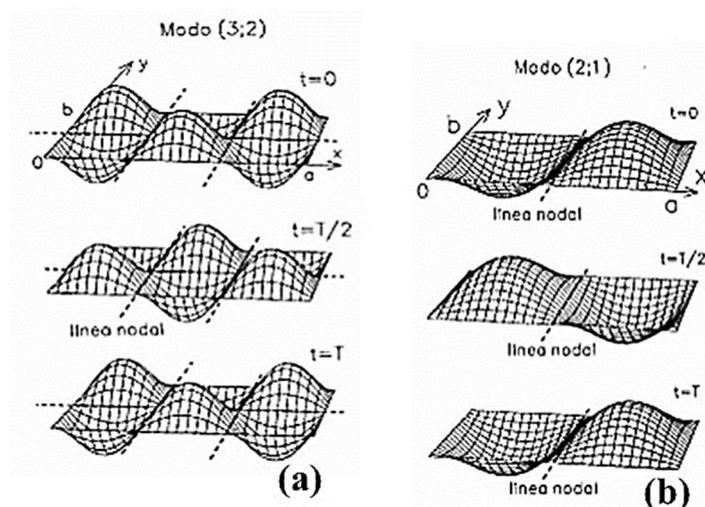


Figura 18 – Modos normais de vibração de uma membrana retangular. (a) Modo de vibração com $m = 2$ e $n = 1$. (b) Modo de vibração com $m = 3$ e $n = 2$. **Fonte:** (Massmann e Ferrer).

2.3.8.2 Membrana Circular

Considere agora uma membrana circular de raio R podendo vibrar no plano xy . A membrana tem um módulo de elasticidade B (módulo de Young) e uma densidade volumétrica de massa ρ . O módulo da velocidade de propagação das ondas nesta membrana é dado por (Halliday, 2016): $v = \sqrt{B/\rho}$.

A equação de onda para este problema é uma equação diferencial parcial para a amplitude $u(r, \theta, t)$ nas coordenadas polares espaciais (r, θ) e em função do tempo t (Butkov, 1988):

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad . \quad (5)$$

A condição de contorno de *Dirichlet* e as condições iniciais agora exigem que:

$$\begin{cases} u(R, \theta, t) = 0; \\ u(r, \theta, 0) = u_0(r, \theta); \\ \frac{\partial}{\partial t} u(r, \theta, 0) = 0 . \end{cases} \quad (6)$$

sendo que a última condição diz que a membrana está parada no instante inicial ($t = 0$).

Os modos normais de vibração $u(r, \theta, t)$ da membrana circular, satisfazendo simultaneamente as Eq. (5) e (6), são equações gerais na forma (Arfken e Weber, 2007):

$$u_{mn}(r, \theta, t) = J_m(k_{mn}r) \cdot (a_{mn} \cdot e^{im\theta} + b_{mn} \cdot e^{-im\theta}) \cdot (c_{mn} \cdot e^{i\omega t} + d_{mn} \cdot e^{-i\omega t}) \quad , \quad (7)$$

onde J_m é a função de Bessel de ordem m ($m = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$), k_{mn} são os autovalores da parte radial do problema, representando fisicamente o vetor de onda ($k = 2\pi/\lambda$). As frequências angulares de vibração: $\omega = \omega_{mn}$, especificam as frequências dos possíveis modos normais que podem ser excitados na superfície da membrana.

O modo fundamental de vibração da membrana corresponde a $m = 0$ e $n = 1$ e tem frequência: $\omega_{01} \approx 2,40 \cdot (v/R)$. Os demais modos normais possuem frequências de vibração que dependem dos zeros α_{mn} das funções de Bessel correspondentes. Os respectivos

autovalores deste problema podem ser escritos como: $k_{mn} = \alpha_{mn}/R$ (em unidades de rad/m). De forma geral, temos que: $\omega_{mn} = k_{mn} \cdot v = \alpha_{mn} \cdot (v/R)$. A Tabela 3 mostra os quatro primeiros zeros α_{mn} para as cinco primeiras funções de Bessel (Butkov, 1988).

Tabela 3 – Primeiros zeros α_{mn} ($n = 1,2,3,4$) das cinco primeiras funções de Bessel ($m = 0,1,2,3,4$).

m	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4
0	2,404	5,520	8,654	11,792
1	3,832	7,016	10,173	13,323
2	5,135	8,417	11,620	14,796
3	6,379	9,760	13,017	16,224
4	7,586	11,064	14,373	17,616

A Fig. 19 mostra alguns dos modos normais de vibração de uma membrana circular de raio a , com suas respectivas frequências angulares ω_{mn} especificadas em função da frequência do modo fundamental ω_{01} (Butkov, 1988). As frequências angulares ω_{mn} correspondentes aos diferentes modos normais de vibração da membrana estão de acordo com a Tabela 3.

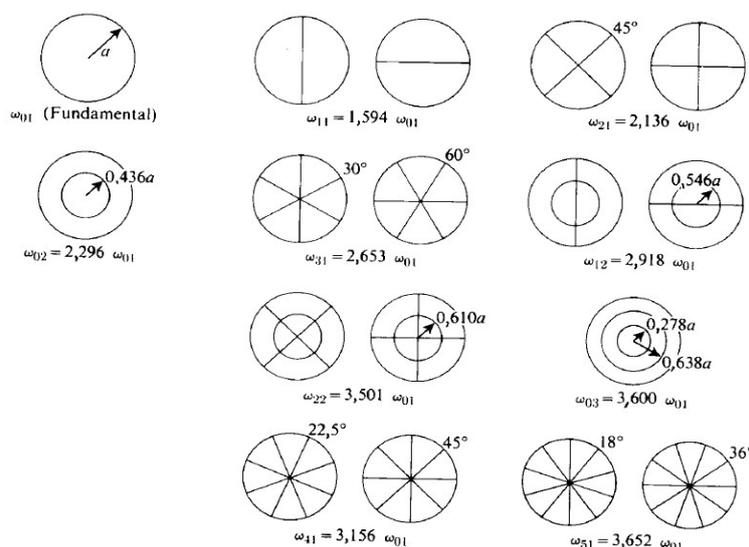


Figura 19 – Modos normais de uma membrana circular com suas respectivas frequências angulares de vibração ω_{mn} , definidas em função da frequência do modo fundamental ω_{01} . **Fonte:** (Butkov, 1988).

A Fig. 19 acima mostra claramente as linhas nodais, que na verdade podem ser linhas ou círculos. Essas linhas nodais correspondem aos pontos sobre a membrana onde não há deslocamento. No caso do experimento da placa de Chladni, a ser discutido no

próximo Capítulo, nestes pontos nodais haverá acúmulo de partículas (areia) sobre a superfície da placa, formando assim as diferentes **Figuras de Chladni** conhecidas. Essas figuras são o objeto principal de estudo deste trabalho. No item 2.4, apresentamos alguns resultados sobre o problema da vibração de alguns tipos de placas (retangular, circular e triangular) com o uso do software de simulação computacional COMSOL, para permitir comparação entre teoria e experimento.

2.4. Uso do COMSOL - Multiphysics

Utilizamos a versão 5.4 do software computacional COMSOL – *Multiphysics* (licença temporária de teste), para estudar numericamente o problema da vibração de placas nos formatos retangular, circular e triangular; feitas de materiais diferentes.

O COMSOL é um pacote computacional especialmente desenvolvido para a solução de problemas de Física e de Engenharia em geral, que necessitem da resolução numérica de equações diferenciais parciais, lineares ou não lineares; ou ainda para resolver sistemas de equações diferenciais parciais, pelo método dos elementos finitos. Problemas reais e práticos de diferentes áreas utilizam com frequência este *software*, como: problemas de transferência de calor, análise de fadiga e estresse em materiais, estudos de estabilidade e vibrações, dentre outros. (Namdari e Dehghan, 2018).

O COMSOL tem um tutorial geral sobre vibração de placas (COMSOL, 2019), o qual estuda em detalhe numericamente a vibração de uma placa circular de aço, de raio $R = 25$ cm e espessura $h = 0,2$ mm. Seguimos inicialmente o passo-a-passo descrito neste tutorial, para ganhar familiaridade com a utilização do software computacional. Na Fig. 20 vemos a solução do COMSOL mostrando os primeiros modos normais de vibração da placa. A frequência de vibração dos modos foi calculada e está especificada em Hertz: $f_{mn} = \omega_{mn}/2\pi$. Alguns modos de vibração são degenerados, ou seja, possuem a mesma energia ou a mesma frequência de vibração. Isso ocorre porque há simetria na vibração da placa ao longo dos eixos x e y . Também podemos observar na Fig. 19 anterior, alguns pares de modos normais de vibração degenerados.

Para realizar os cálculos, precisamos definir o módulo de elasticidade do aço: $B = 200$ GPa; bem como especificar a densidade da placa: $\rho = 7850$ kg/m³. Também é

necessário especificar outro parâmetro, conhecido como coeficiente de *Poisson*, o qual vale $\nu = 0,33$, em geral para vários tipos de placas. Este parâmetro é necessário para definir de forma mais rigorosa, o módulo da velocidade de propagação do som na placa:

$v_L = \sqrt{B/[\rho(1-\nu^2)]}$ (Leissa, 1969). Com os parâmetros especificados, calculamos o módulo da velocidade de propagação do som no aço como sendo: $v_L = 5347$ m/s.

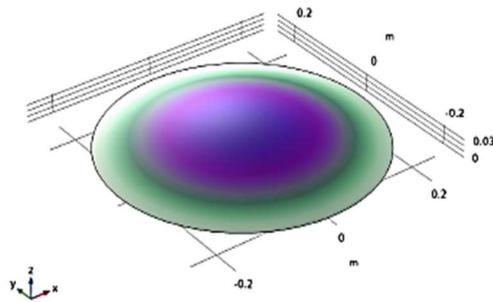


Figure 1: First eigenmode. Eigenfrequency=172.8 Hz Surface: Displacement field, Z component (m)

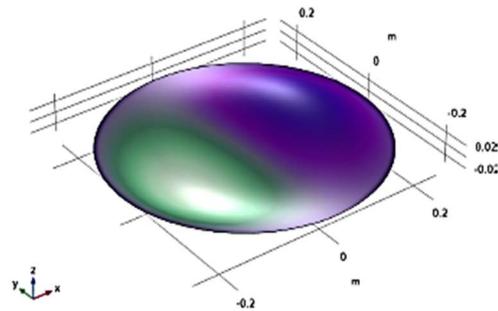


Figure 2: Second eigenmode. Eigenfrequency=275.33 (1) Hz Surface: Displacement field, Z component (m)

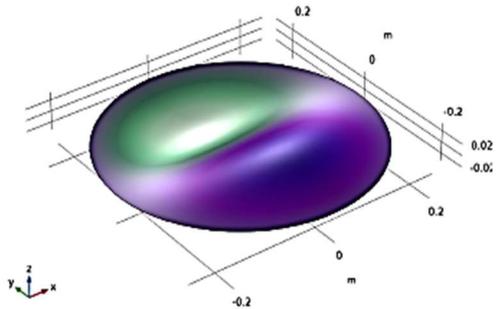


Figure 3: Third eigenmode. Eigenfrequency=275.33 (2) Hz Surface: Displacement field, Z component (m)
Eigenfrequency=369.06 (1) Hz Surface: Displacement field, Z component (m)

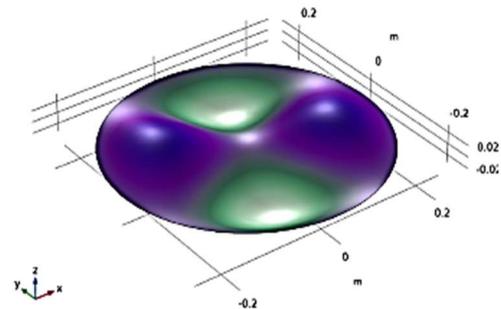


Figure 4: Fourth eigenmode. Eigenfrequency=369.06 (1) Hz Surface: Displacement field, Z component (m)

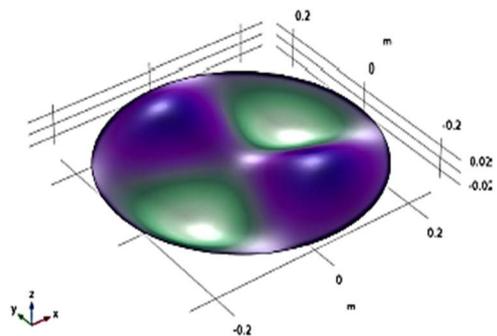


Figure 5: Fifth eigenmode. Eigenfrequency=369.06 (2) Hz Surface: Displacement field, Z component (m)

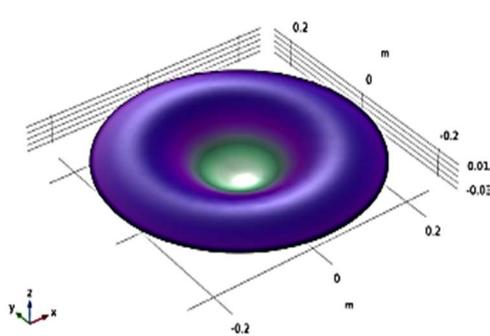


Figure 6: Sixth eigenmode. Eigenfrequency=396.72 Hz Surface: Displacement field, Z component (m)

Figura 20 – Simulação no COMSOL dos primeiros modos normais de vibração de uma membrana circular de aço com raio $R = 0.25$ m e suas respectivas frequências de vibração em Hertz.

Nos gráficos da Fig.20 os eixos x e y estão na unidade SI (metro). A amplitude de vibração da membrana z também está especificada no SI (em metro). Podemos observar claramente as linhas nodais, em acordo com o observado na Fig.19 A frequência do modo fundamental de vibração foi $f_{01} = 172.8\text{Hz}$. Dividindo os valores das frequências obtidas nos gráficos, temos: $f_{11}/f_{01} = 275.33\text{Hz}/172.8\text{Hz} = 1.593$; $f_{21}/f_{01} = 369.06\text{Hz}/172.8\text{Hz} = 2.136$; $f_{02}/f_{01} = 369.72\text{Hz}/172.8\text{Hz} = 2.14$, valores esses muito próximos dos valores exatos especificados na Fig. 19 anterior.

O COMSOL possui um aplicativo específico que estuda o problema das Figuras de Chladni, simulando numericamente as vibrações em diferentes materiais, como por exemplo: alumínio, ferro e aço, dentre outros. Neste aplicativo existe uma biblioteca onde você pode escolher entre vários formatos das placas predefinidas: placa quadrada, circular, triangular e no formato do corpo de um violino. Podemos simular as diferentes geometrias possíveis das placas e os diferentes tipos de materiais disponíveis; encontrando os modos normais e as frequências de vibração destes modos, os quais quando combinados, produzem as diferentes Figuras de Chladni conhecidas.

Estudamos com o COMSOL as três principais geometrias disponíveis: placa quadrada, circular e triangular. Com a finalidade de analisar o problema da Lei de Chladni já discutida no item 2.2, vamos apresentar aqui somente os resultados do uso do COMSOL para a placa circular; apenas para um tipo de material (para simplificar a análise). Relembrando a lei de Chladni, ela diz que a frequência de vibração de uma placa circular varia como uma lei de potência: $f_{mn} = C(m + 2n)^2$, onde C é uma constante, m é o número de nós lineares e n é o número de nós circulares, vistos sobre a superfície da placa vibrando. Na segunda simulação realizada no COMSOL, definimos uma membrana circular de aço, com diâmetro 24 cm e espessura 1 mm. A Fig. 21 mostra o ambiente do COMSOL e a definição de alguns parâmetros relevantes para a realização da simulação.

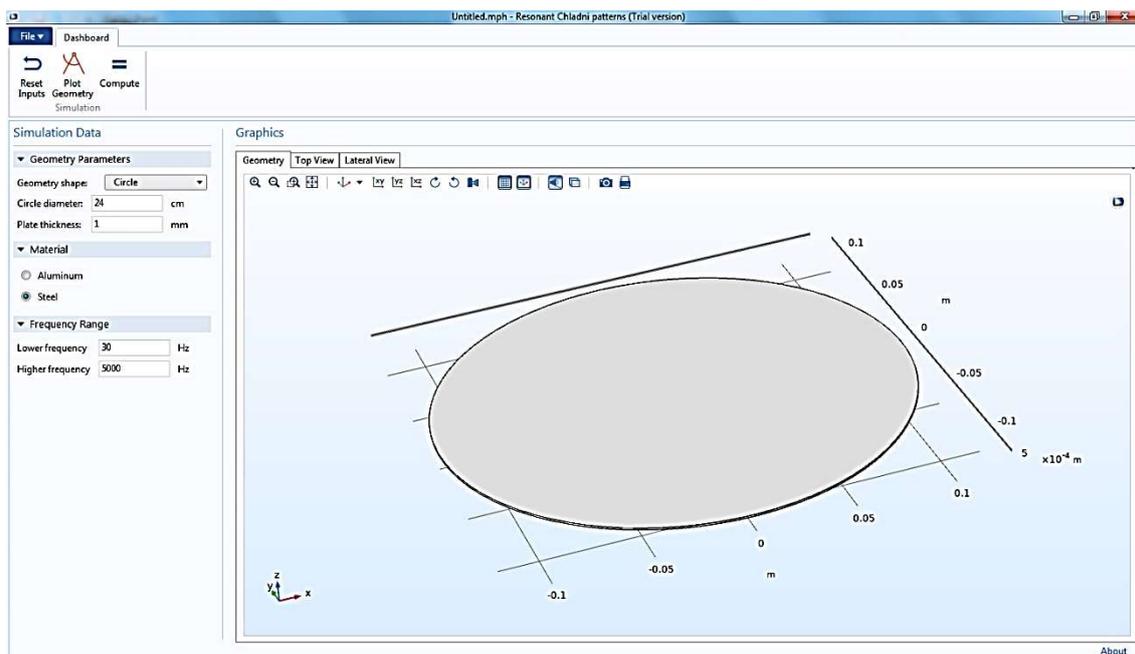


Figura 21 – Simulação no COMSOL da geração dos padrões de Chladni em uma membrana circular.

A Fig. 22 mostra somente alguns padrões de Chladni gerados com o COMSOL para a placa circular, mostrando as diferentes linhas nodais que são formadas nas figuras geradas na ressonância. Com a finalidade de comprovar numericamente a lei de Chladni, apresentamos nas Tabelas 4 - 9 as frequências de vibração para a placa circular, obtidas com o COMSOL em função do n e do m , respectivamente o número de nós circulares e lineares que aparecem na superfície da placa vibrante.

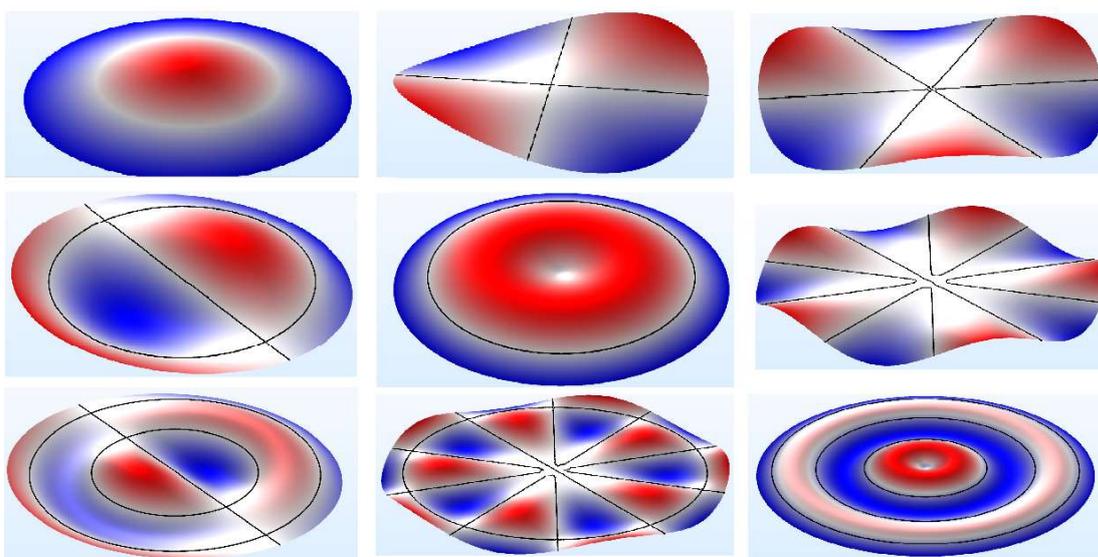


Figura 22 – Algumas Figuras de Chladni geradas no COMSOL para uma membrana circular.

Tabela 4 - Frequências calculadas no COMSOL das Figuras de Chladni para $n = 0$ e $m \neq 0$.

f (Hz)	n	m	$(m + 2n)$	$(m + 2n)^2$
92,031	0	2	2	4
213,22	0	3	3	9
373,7	0	4	4	16
572,43	0	5	5	25
808,59	0	6	6	36
1081,5	0	7	7	49
1390,5	0	8	8	64
1735,1	0	9	9	81
2115	0	10	10	100
2529,5	0	11	11	121
2978,4	0	12	12	144
3461,2	0	13	13	169
3977,6	0	14	14	196
4527,2	0	15	15	225

Tabela 5 - Frequências calculadas no COMSOL das Figuras de Chladni para $n = 1$ e $m \neq 0$.

f (Hz)	n	m	$(m + 2n)$	$(m + 2n)^2$
346,83	1	1	3	9
597,6	1	2	4	16
897,99	1	3	5	25
1244,8	1	4	6	36
1635,7	1	5	7	49
2069,3	1	6	8	64
2544,5	1	7	9	81
3059,8	1	8	10	100
3614,8	1	9	11	121
4208,4	1	10	12	144
4839,7	1	11	13	169

Tabela 6 - Frequências calculadas no COMSOL das Figuras de Chladni para $n = 2$ e $m \neq 0$.

f (Hz)	n	m	$(m + 2n)$	$(m + 2n)^2$
1010,09	2	1	5	25
1424,3	2	2	6	36
1887	2	3	7	49
2397	2	4	8	64
2952,2	2	5	9	81
3550,7	2	6	10	100
4192,6	2	7	11	121
4874,3	2	8	12	144

Tabela 7 - Frequências calculadas no COMSOL das Figuras de Chladni para $n = 3$ e $m \neq 0$.

f (Hz)	n	m	$(m + 2n)$	$(m + 2n)^2$
2003	3	1	7	49
2576,4	3	2	8	64
3197,5	3	3	9	81
3865,3	3	4	10	100
4577,7	3	5	11	121

Tabela 8 - Frequências calculadas no COMSOL das Figuras de Chladni para $n = 4$ e m variando.

f (Hz)	n	m	$(m + 2n)$	$(m + 2n)^2$
3312,6	4	0	8	64
3315,2	4	1	9	81
4045,3	4	2	10	100
4821	4	3	11	121

Tabela 9 - Frequências calculadas no COMSOL das Figuras de Chladni para $n = 5$ e m variando.

f (Hz)	n	m	$(m + 2n)$	$(m + 2n)^2$
4931,4	5	0	10	100
4940,1	5	1	11	121

De posse dos dados das Tabelas 04 – 09, podemos analisar como as frequências f_{mn} das Figuras de Chladni para a placa circular mudam em função da variável determinada por: $l = m + 2n$. O gráfico apresentado na Figura 24 mostra essa dependência. Esse gráfico está na escala log-log e os pontos isolados são os valores teóricos das frequências de vibração da placa circular, calculadas numericamente com o COMSOL para $n = 0$ e $m \neq 0$. A curva sólida representa um ajuste linear: $y = a + bx$, feito no software *Origin* utilizando o método dos mínimos quadrados. Vemos claramente uma inclinação próxima de 2 (dois) ($b \approx 1.92$), o que confirma a lei de Chladni.

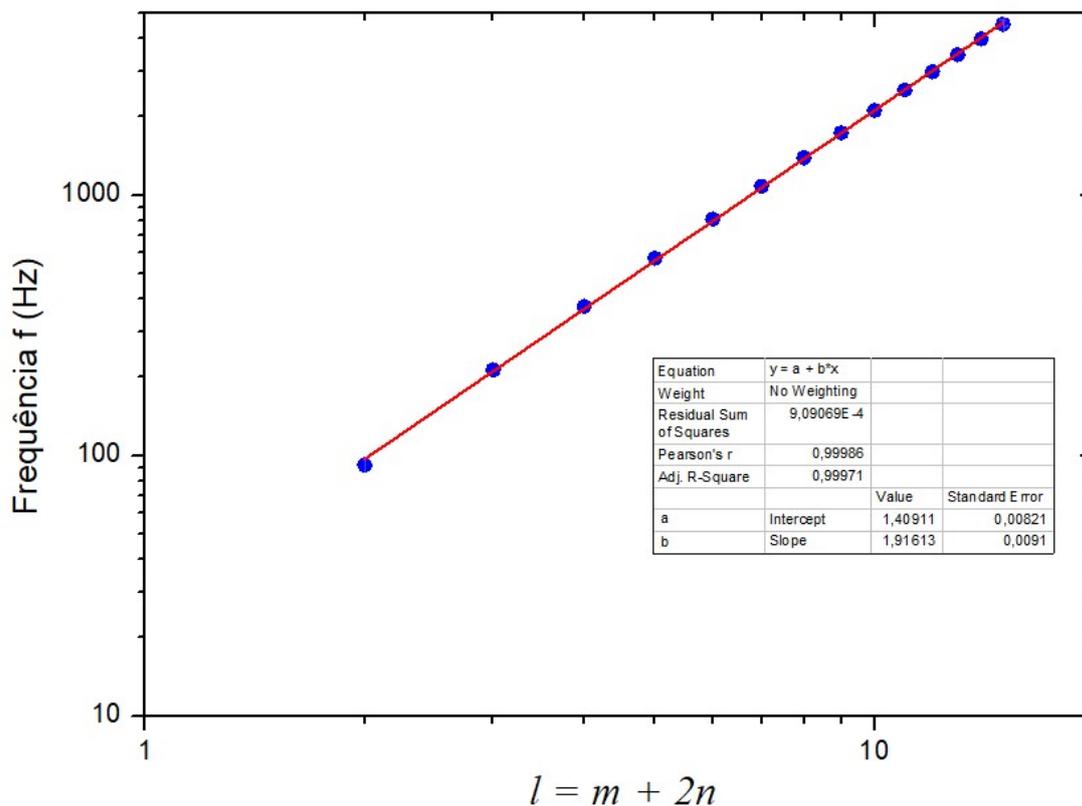


Figura 23 – Frequências de vibração para a placa circular, em função de $l = m + 2n$, com $n = 0$ e $m \neq 0$.

O gráfico apresentado na Figura 24 também está em log-log e mostra as frequências de vibração da placa circular, calculadas numericamente com o COMSOL para $n = 1$ e $m \neq 0$. A curva sólida é o ajuste linear do *Origin*. Encontramos novamente uma inclinação próxima de dois ($b \approx 1.79$), o que também confirma a lei de Chladni.

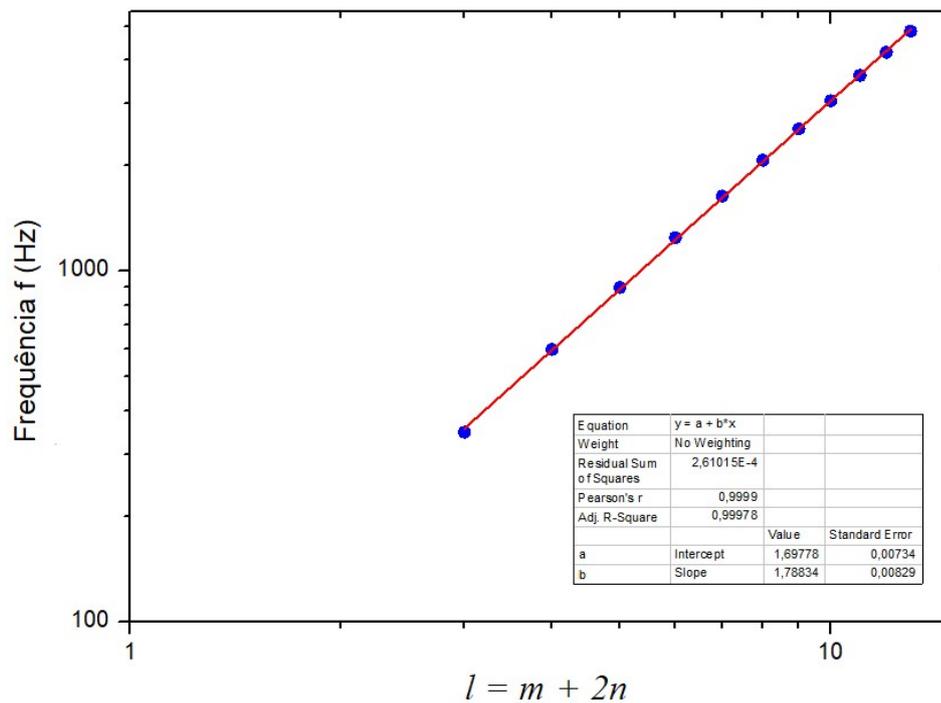


Figura 24 – Frequências de vibração para a placa circular, em função de $l = m + 2n$, com $n = 1$ e $m \neq 0$.

O gráfico log-log da Figura 25 mostra as frequências de vibração calculadas no COMSOL para a placa circular, com $n = 2$ e $m \neq 0$. A inclinação deu novamente próxima de dois ($b \approx 1.79$), de acordo com a lei de Chladni.

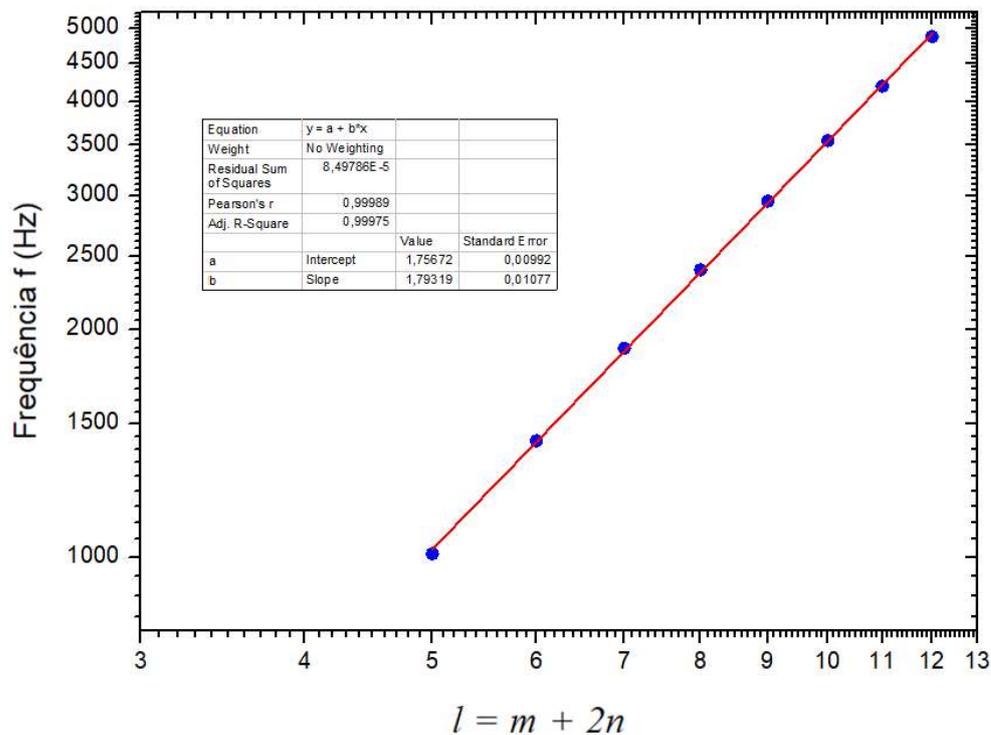


Figura 25 – Frequências de vibração da placa circular, em função de $l = m + 2n$, com $n = 2$ e $m \neq 0$.

O gráfico em escala log-log da Figura 26 mostra as frequências de vibração para a placa circular, calculadas no COMSOL para $n = 3$ e $m \neq 0$. A inclinação dá bem próxima de dois ($b \approx 1.83$), concordando com a lei de Chladni.

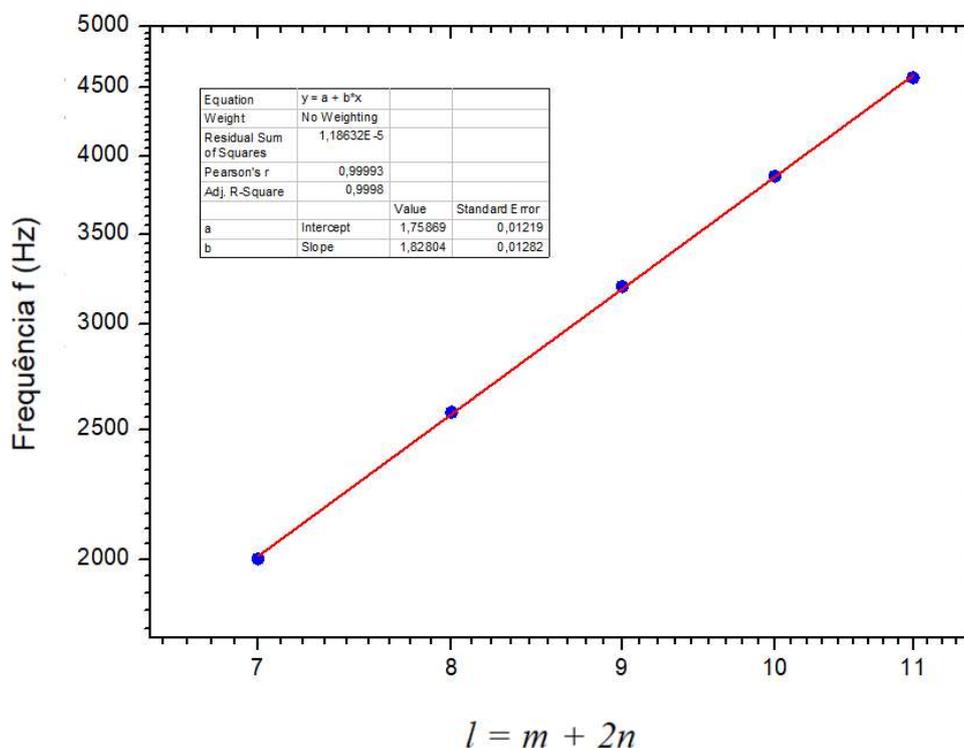


Figura 26 – Frequências de vibração para a placa circular, em função de $l = m + 2n$, com $n = 3$ e $m \neq 0$.

Fizemos os gráficos com as frequências de vibração para a placa circular, calculadas no COMSOL para $n = 4$ e 5 , com m variando (Tabelas 08 e 09) e novamente a inclinação da reta deu próxima a dois, em ambos os casos, como previsto pela lei de Chladni. Como temos poucos pontos nas tabelas, preferimos omitir esses gráficos.

Podemos observar na tabela 10 abaixo que a média da inclinação do expoente na lei de Chladni: $f_{mn} = C \cdot (m+2n)^b$, obtido a partir das regressões não lineares por lei de potência, foi da ordem de $b = 1,83 \pm 0,01$, muito próximo do valor esperado $b = 2$.

Tabela 10 – Comprovação da Lei de Chladni.

n	b
0	1,92 ± 0,01
1	1,79 ± 0,01
2	1,79 ± 0,01
3	1,83 ± 0,01
Média	1,83 ± 0,01

Podemos concluir que a lei de Chladni foi satisfeita em todos os casos analisados para a placa circular, sendo uma prova numérica ou computacional desta lei da acústica.

No item 2.5, apresentaremos a parte experimental deste trabalho, onde faremos agora uma comprovação experimental desta lei.

2.5. Parte Experimental

No primeiro momento, o observador ao olhar as figuras formadas na placa vibrante, irá levantar os seguintes questionamentos acerca da sua observação:

- Por qual motivo essas placas produzem figuras diferentes ao vibrarem?
- Como posso utilizar esse experimento em sala de aula?
- De que maneira esse experimento pode auxiliar a aprendizagem dos meus alunos?

O produto didático desenvolvido neste trabalho tem por finalidade demonstrar a formação das Figuras de Chladni em placas de acrílico com diferentes formatos geométricos: placa quadrada, placa circular e placa triangular. Os experimentos foram realizados em uma turma de alunos do 9º ano do ensino fundamental. Esses experimentos foram realizados durante uma sequência didática, a ser melhor descrita mais adiante. Como as atividades práticas foram realizadas com alunos do 9º ano do ensino fundamental, o experimento visou apenas demonstrar alguns conceitos básicos de acústica para os alunos, não se detendo em detalhe nos cálculos ou nas previsões teóricas, uma vez que os alunos envolvidos estavam estudando Física pela primeira vez na escola.

Nas Figuras 27, 28 e 29 mostramos alguns padrões de Chladni observados respectivamente com uma placa quadrada, uma placa circular e uma placa triangular, todas feitas de acrílico, vibrando em diferentes frequências por um sistema de vibração “caseiro”, construído com materiais de baixo custo e fácil acesso, os quais podem ser encontrados facilmente pelo professor de Física, não exigindo muitos conhecimentos de eletrônica para sua montagem. Usamos areia fina e colorida depositada na superfície das placas, a qual irá se acumular nos pontos nodais das placas. Na sequência descreveremos detalhes sobre os materiais e os métodos utilizados para a montagem dos experimentos

para obtenção das Figuras de Chladni e posterior comprovação experimental da lei de Chladni, que é um dos objetivos deste trabalho.



Figura 27 – Placa quadrada com lados $a = b = 20$ cm, vibrando na frequência 1.422 Hz.



Figura 28 – Placa circular com raio igual a 20 cm, vibrando na frequência 1.500 Hz.



Figura 29 – Placa triangular com lados iguais a $l = 20$ cm, vibrando na frequência 2.100 Hz.

Os padrões de Chladni observados dependem da geometria e do tipo de material do qual é feita a placa, bem como da sua espessura, elasticidade e densidade de massa. A transição entre uma figura e outra é obtida variando-se a frequência de vibração da placa pelo sistema de vibração construído. A oscilação das placas ocorre de forma transversal produzindo pontos nodais, como podemos observar nas Figuras 27, 28 e 29, em que a oscilação acontece tanto no centro como nas extremidades da placa, produzindo imagens distintas de acordo com a frequência de vibração a ela submetida. As vibrações sonoras irão produzir diferentes modos normais de vibração, os quais dependem do formato geométrico das placas e de outros fatores, já comentados.

Na Figura 30 vemos um esquema detalhado para explicar a formação das Figuras de Chladni na superfície das placas. Nesta figura, os pontos **X** e **Y** são pontos nodais da placa, os quais permanecem estáticos, se comportando como eixos para o movimento do das partículas de areia; enquanto as extremidades e o centro sobreelevam e descendem inversamente. Com o passar do tempo, as partículas submetidas a essas oscilações irão se acomodar nesses dois pontos, os quais possuem menor (ou nenhuma) amplitude de vibração por serem ou estarem próximos dos pontos nodais.

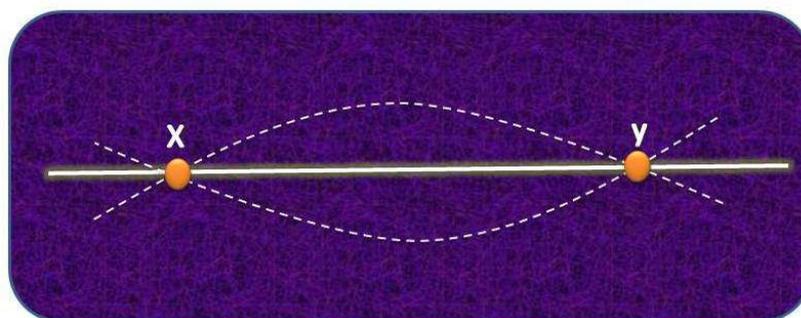


Figura 30 – Explicação da formação das Figuras de Chladni nos pontos nodais de uma placa vibrante.

Nos experimentos realizados com a turma do 9º ano percebemos situações concretas, relacionadas às leis da Física. Por exemplo, observamos que sons muito agudos (frequências mais altas) produziram Figuras de Chladni mais abstratas e mais complexas, com número de linhas nodais bem maiores do que os sons mais graves (frequências mais baixas), os quais por sua vez formaram figuras mais simples (menos complexas), com número de linhas nodais bem menores.

CAPÍTULO III

3. PRODUTO EDUCACIONAL: SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA A APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA DA ACÚSTICA UTILIZANDO AS FIGURAS DE CHLADNI

3.1. Materiais utilizados na confecção do experimento

- Cano de pvc de 20 mm de diâmetro e 6 cm de comprimento;
- Pistola e bastão para cola quente;
- Fita adesiva crepe;
- Placa em acrílico no formato triangular equilátero com 20 cm de lado, espessura de 2,50 mm e massa aproximadamente $m = 30,7\text{g}$;
- Placa circular com 20 cm diâmetro, espessura de 2,50 mm e massa $m = 36,8\text{ g}$;
- Placa quadrada com 20 cm x 20 cm de comprimento, espessura de 2,50 mm e massa $m = 66,8\text{ g}$;
- Alto-falante, potência típica de 40 W (RMS) e diâmetro de 8 polegadas ($\approx 20\text{ cm}$);
- Amplificador de som portátil (Bluetooth BT 118);
- Parafuso 8 cm de comprimento e 4 mm de espessura;
- Duas arruelas de 4,2 mm de diâmetro interno e 8 mm de diâmetro externo;
- Duas porcas com rosca de 6 mm;
- Um celular smartphone para a instalação de um aplicativo para controle da frequência de vibração do alto-falante;
- Estilete;
- Cabo/Fio para alto-falante;
- Régua;
- Corantes (vermelho, amarelo, verde e azul);
- Areia fina;

3.2. Detalhamento dos itens principais do experimento

Alto-falante de 40 W (RMS) e diâmetro de 8 polegadas

O alto-falante é um item de grande importância para que o experimento seja bem sucedido. É ele quem faz o movimento vibratório necessário para as placas entrarem

em ressonância. O tipo e a potência do alto-falante escolhido são de fundamental importância para o bom desempenho do experimento. Porém outros modelos também podem ser usados. Nesse caso se fez necessário retirar a calota do alto-falante para acoplar o cano PVC de 6 cm, como mostra a Figura 31 abaixo.



Figura 31 – Alto-falante usado no experimento.

Amplificador de som Bluetooth BT 118

Existem vários modelos de amplificadores de áudio que podem ser usados. Na questão custo x benefício o modelo BT 118 (Fig. 32) foi o melhor encontrado como fonte de vibração para o experimento. É importante destacar que o amplificador de som tenha o recurso de Bluetooth disponível, necessário para emparelhar ou se conectar com o *smartphone*, o qual será o elemento de controle da frequência de vibração das placas.



Figura 32 – Amplificador de som utilizado no experimento.

Placas de acrílico

Na Fig. 33 mostramos as placas que foram utilizadas nesse experimento: três placas de acrílico nos formatos quadrado, circular e triangular; todas com um furo no centro, as quais foram submetidas a várias frequências de oscilação pelo sistema de vibração montado para o experimento.

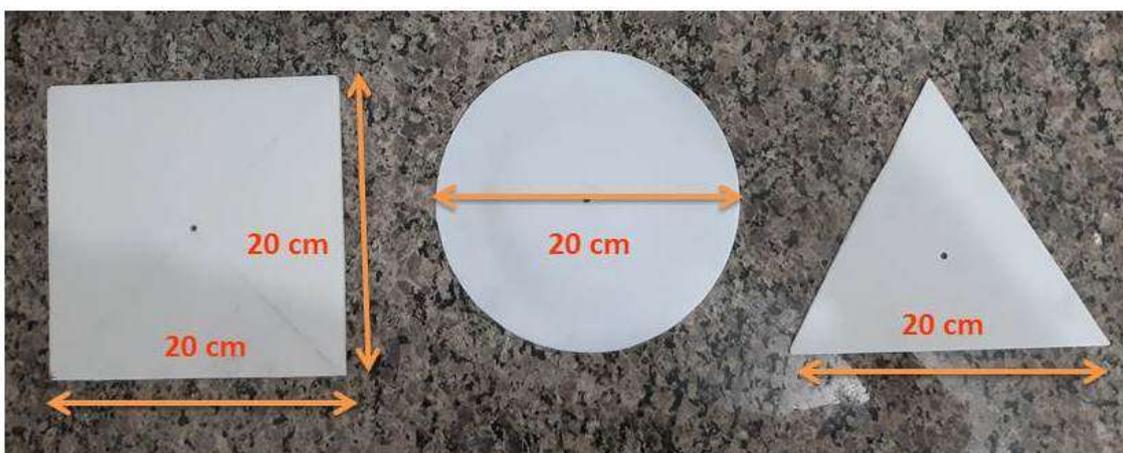


Figura 33 – Placas vibrantes, construídas em acrílico, para observação das Figuras de Chladni.

Cano de pvc e parafuso

O parafuso é fundamental para dá estabilidade e altura as placas vibrantes. Ele fica inserido no interior do cano PVC e acoplado a ele com cola de silicone quente, conforme mostra a Fig. 34 abaixo. Na outra extremidade do cano PVC foi enrolada uma fita crepe adesiva com a finalidade de acoplar essa estrutura de forma estável no centro do alto-falante.



Figura 34 - Cano de PVC com parafuso centrado para acoplamento das placas ao alto-falante.

Gerador de Frequência

Foi baixado na loja virtual de aplicativos do *smartphone* um gerador de frequências de áudio: *FrequencyGenerator*, disponível gratuitamente na Internet. A Fig. 35 mostra a tela do celular com o aplicativo em funcionamento. Outros geradores de frequência podem ser usados, caso o professor tenha preferência por algum em particular. Esse gerador tem como finalidade produzir diferentes frequências que façam as placas vibrarem e entrarem em ressonância com seus modos normais de vibração.

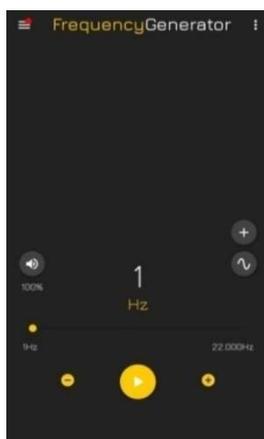


Figura 35 – Aplicativo usado em um *smartphone* para controle da frequência de vibração das placas.

Areia fina colorida

A areia fina colorida artificialmente serve para polvilhar a superfície das placas para melhor observar a formação das Figuras de Chladni. O tamanho do grão e a densidade específica da areia devem ser levados em conta, para se obter figuras bem definidas, para diferentes frequências de vibração. As frequências mais baixas (graves) produzem em geral maior amplitude de vibração nas placas e, conseqüentemente, as Figuras de Chladni se formam com maior facilidade. Já as frequências mais altas (agudos) produzem menor amplitude de vibração e maior dificuldade de se formar figuras visíveis ou nítidas. A massa ou a inércia da partícula em suspensão joga um papel importante na formação de um grande número de harmônicos de altas ordens. Na Fig. 36 mostramos alguns estratos de areia colorida que foram usados nos experimentos.



Figura 36 – Areias coloridas usadas sobre as superfícies das placas vibrantes.

Mostramos na Fig. 37 o resultado obtido nos experimentos quando somente Figuras de Chladni circulares foram observadas, implicando em círculos nodais ($n \neq 0$) sem nenhuma linha nodal presente ($m = 0$). O gráfico nesta figura está na escala log-log, mostrando que a frequência de vibração da placa circular varia em função da variável $l = m + 2n$ como uma lei de potência, com inclinação próxima à dois ($b \approx 1,86$), o que está de acordo com a lei de Chladni. Assim, provamos com nosso experimento simples essa importante lei da acústica. Novamente os pontos (círculos em vermelho) representam as medidas obtidas nos experimentos; enquanto que a curva sólida (em preto) é um ajuste obtido no *Origin* por uma regressão linear baseada no Método dos Mínimos Quadrados.

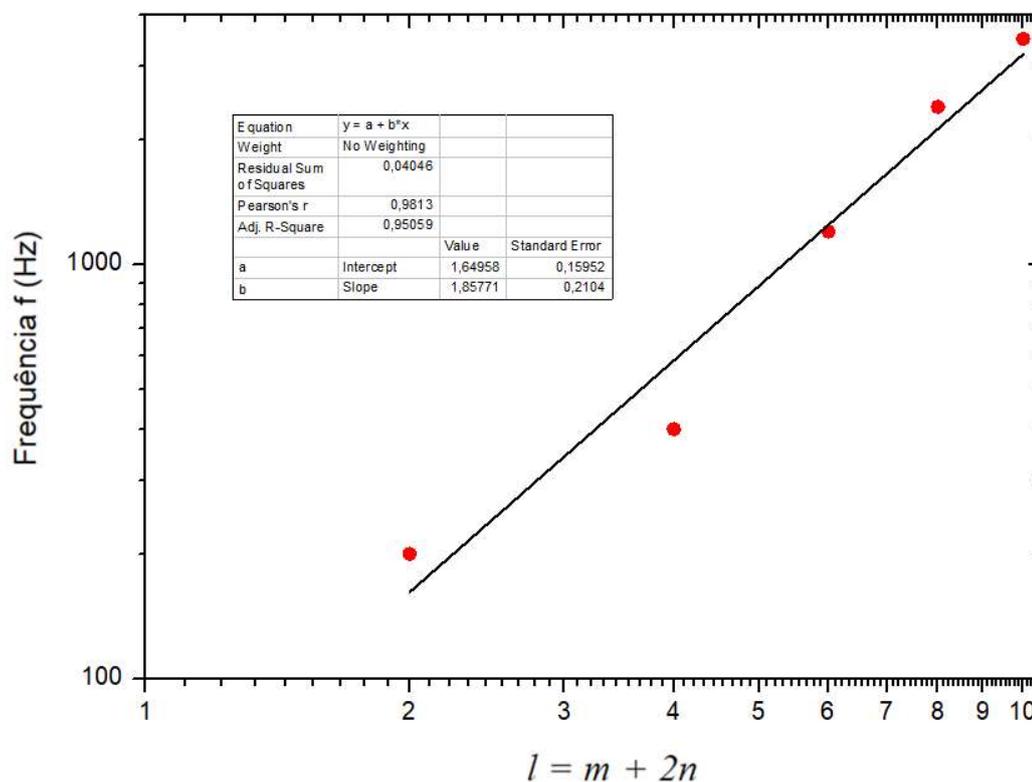


Figura 37 – Confirmação experimental da lei de Chladni para uma placa vibrante de acrílico.

De forma geral podemos observar que a mesma lei de potência deve ser observada em qualquer tipo de placa circular a ser usada, independente das suas dimensões ou do tipo de material da placa. Os valores absolutos das frequências de vibração obtidas devem mudar em função destes parâmetros: dimensões e tipo de material. No entanto, um mesmo expoente para a lei de potência deve ser obtido sempre, independente da placa utilizada. Na prática, devemos sempre ter a mesma inclinação \underline{b} próxima a dois ($b \approx 2$) nos ajustes lineares no gráfico log-log, mas com o coeficiente linear \underline{a} podendo variar em cada caso, a depender da placa utilizada.

Essa demonstração foi feita apenas na placa circular, pois mais fácil de ser observado os modos circulares, as linhas nodais. as condições de contorno e a geometria. Essa observação também pode ser vista nas placas quadrada e triangular, porém, à análise é mais complexa em razão da dificuldade de analisar os dados.

No item 3.3, apresentamos detalhe sobre uma sequência didática que foi realizada com uma turma de alunos do 9º ano do Ensino Fundamental na Escola Municipal Professora Janise dos Santos Oliveira, localizada no povoado de Natuba, Município de Vitória de Santo Antão, interior do Estado de Pernambuco.

3.3. Sequência didática pautada na teoria de Ausubel

A proposta desse produto educacional se baseia no estudo da Acústica, voltada para alunos do 9º ano do Ensino Fundamental, sistematizado a partir da Teoria da Aprendizagem de David Ausubel, conforme foi discutido anteriormente no item 2.1 deste trabalho. A Tabela 10 descreve a sequência didática que foi planejada e aplicada, com a montagem um equipamento que demonstrou concretamente a existência das ondas sonoras para os alunos, através da observação das Figuras de Chladni em diferentes tipos de placas vibrantes.

Tabela 11 – Sequência didática sobre Acústica, aplicada a uma turma do 9º ano do Ensino Fundamental.

Aulas	Percursos	Período
<p>Aula 1 Apresentação do Produto e aplicação do questionário diagnóstico sobre o conhecimento prévio dos alunos</p>	- No primeiro momento iremos apresentar a ideia do produto, mostrando o caminho que será percorrido, desde a introdução até o resultado final esperado.	30 minutos
	- Na segunda parte, os alunos serão sabatinados com perguntas relacionados à ondulatória (Acústica), em seguida, eles irão responder um questionário que abordarão questões do seu cotidiano, com o intuito de saber até onde vão seus conhecimentos prévios sobre o assunto abordado.	2hs
<p>Aula 2 Apresentar de forma clara e objetiva os principais fenômenos ondulatórios, desde fatos que acontece na natureza bem como através de experimentos que ocorrem em nosso cotidiano.</p>	- Nessa fase, abordaremos a diferença entre amplitude e comprimento de onda, frequência, período e velocidade de uma onda, ondas transversais e longitudinais.	2h30min.
<p>Aula 3 Estudo do Som</p>	- Comportamento do som; - Propagação do som; - Altura/tom, intensidade e timbre; - Fenômenos sonoros e; - Ressonância.	2h30min
<p>Aula 4 Segundo questionário</p>	Aplicação do segundo questionário.	1h
<p>Aula 5 Aplicação do produto</p>	- Neste momento, os alunos deverão observar a formação de imagens através de uma membrana vibrando, realizando o experimento das “ <u>Figuras de Chladni</u> ”.	1h40min.
<p>Aula 6 Reaplicação do primeiro questionário.</p>	Alunos refazendo o primeiro questionário	1h40min.

3.4. Detalhamento das aulas da Sequência Didática

AULA 01

TÍTULO – APRESENTAÇÃO DO PRODUTO E INTRODUÇÃO A ONDULATÓRIA

JUSTIFICATIVA:

Sabendo que os alunos dos anos finais do Ensino Fundamental, dentre eles o 9º ano, sabem pouco ou quase nada sobre ondulatória, por essa razão, foi preciso fazer um levantamento prévio com o objetivo de conhecer os subsunçores da estrutura cognitiva dos mesmos, com a finalidade de entender até onde vão os seus conhecimentos e assim contribuir para adquiri-los ou aperfeiçoá-los.

OBJETIVO GERAL

Apresentar de forma clara e objetiva os principais fenômenos ondulatórios, desde fatos que acontece na natureza bem como através de experimentos que ocorrem em nosso cotidiano.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Compreender o conceito de onda;
- Identificar o som como um tipo de onda mecânica;
- Aprender o conceito e as características do som.

RECURSOS METODOLÓGICOS

- Data show;
- Marcadores para quadro branco.

DESENVOLVIMENTO DAS ATIVIDADES

No primeiro momento, iremos apresentar a ideia do Produto, mostrando o caminho que será percorrido, desde a introdução até o resultado final esperado. Na segunda parte, os alunos serão sabatinados com perguntas relacionados à ondulatória (Acústica), em seguida, eles irão responder um questionário que abordarão questões do

seu cotidiano, com o intuito de saber até onde vão seus conhecimentos prévios sobre o assunto abordado.

Obs: Esse questionário consta no anexo deste trabalho.

AVALIAÇÃO

Nessa primeira avaliação, os alunos serão avaliados a partir de sua participação e de seus questionamentos sobre o assunto abordado da disciplina e responderão a um diagnóstico sobre o mesmo em sala de aula.

AULA 02

TÍTULO – ANALISANDO OS PRINCIPAIS FENÔMENOS ONDULATÓRIO.

JUSTIFICATIVA:

Sabendo que os alunos dos anos finais do Ensino Fundamental, dentre eles o 9º ano, sabem pouco ou quase nada sobre ondulatória, por essa razão, foi preciso fazer um levantamento prévio com o objetivo de conhecer os subsunçores da estrutura cognitivas dos mesmos, com a finalidade de entender até onde vão os seus conhecimentos e assim contribuir para adquiri-los ou aperfeiçoá-los.

OBJETIVO GERAL

Discutir os principais processos de produção das ondas mecânicas

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar as principais características de uma onda;
- Relacionar as características de uma onda com as características do som;
- Compreender basicamente como os instrumentos musicais funcionam;
- Entender a reflexão do som e o significado do eco.

RECURSOS METODOLÓGICOS

- Data show;
- Marcadores para quadro branco;
- Mola de metal;
- Corda;
- Fita;
- Haste e base de metal.

DESENVOLVIMENTO DAS ATIVIDADES

Nessa atividade, os alunos irão conhecer os principais elementos que compõe uma onda, dentre eles podemos destacar; o pulso, comprimento de onda, velocidade, amplitude, período, frequência, dentre outros. Além de diferenciar uma onda longitudinal e transversal, bem como observar como uma onda se propaga em várias direções, tudo isso através de experimentos com corda e mola de metal. Sendo o objetivo final é que o aluno compreenda que ondas são perturbações que se propagam por um meio qualquer transportando energia sem transportar matéria.

Obs: Esse questionário consta no anexo deste trabalho.

AVALIAÇÃO

Os alunos serão avaliados através da participação das aulas teóricas, no engajamento dos experimentos e na resolução do questionário.

AULA 03

TÍTULO – ESTUDO DO SOM

JUSTIFICATIVA:

Sabendo que os alunos dos anos finais do Ensino Fundamental, dentre eles o 9º ano, sabem pouco ou quase nada sobre acústica, por essa razão, foi preciso fazer um levantamento prévio com o objetivo de conhecer os subsunçores da estrutura cognitivas dos mesmos, com a finalidade de entender até onde vão os seus conhecimentos e assim contribuir para adquiri-los ou aperfeiçoá-los.

OBJETIVO GERAL

Diferenciar os principais tipos de sons e suas causas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aprender o conceito e as características do som;
- Diferenciar sons agudos e sons graves;
- Diferenciar timbre, altura e volume (intensidade) do som.

RECURSOS METODOLÓGICOS

- Data show;
- Marcadores para quadro branco;
- PHET simuladores.

DESENVOLVIMENTO DAS ATIVIDADES

Nessa etapa, os alunos irão observar os principais tipo de som e suas consequências, com demonstração através do software do PHET simuladores. (https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/sound)

AValiação

Nessa primeira avaliação, os alunos serão avaliados a partir de sua participação e de seus questionamentos sobre o assunto abordado da disciplina e responderão a um diagnóstico sobre o mesmo em sala de aula.

AULA 04

TÍTULO – APLICAÇÃO DO SEGUNDO QUESTIONÁRIO

JUSTIFICATIVA:

Sabendo que os alunos dos anos finais do Ensino Fundamental, dentre eles o 9º ano, sabem pouco ou quase nada sobre ondulatória, por essa razão, foi preciso fazer um levantamento prévio com o objetivo de conhecer os subsunçores da estrutura cognitivas dos mesmos, com a finalidade de entender até onde vão os seus conhecimentos e assim contribuir para adquiri-los ou aperfeiçoá-los.

OBJETIVO GERAL

Analisar os conhecimentos dos alunos sobre Acústica através de um questionário.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Compreender o conceito de Acústica;
- Aprender o conceito e as características do som.

RECURSOS METODOLÓGICOS

- Ficha de exercício

DESENVOLVIMENTO DAS ATIVIDADES

Nessa atividade, os alunos serão submetidos a mais um questionário, onde eles irão responder sobre o comportamento do som e suas características. Nesse questionário serão abordadas 10 questões subjetivas relacionada à acústica.

Obs: Esse questionário consta no apêndice deste trabalho.

AValiação

Nessa segunda avaliação, os alunos serão avaliados a partir de sua participação e de seus questionamentos sobre o assunto abordado no questionário realizado em sala de aula.

AULA 05

TÍTULO – DEMONSTRAÇÃO DO PRODUTO - AS FIGURAS DE CHLADNI.

JUSTIFICATIVA:

Em virtude dos alunos do 9º ano do Ensino fundamental ainda não ter afinidade com a Física, a aplicação do Produto consta apenas da parte prática e não se deteve aos cálculos matemáticos.

OBJETIVO GERAL

Discutir os principais processos de formações das Figuras de Chladni através do experimento de ressonância.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Visualizar as principais Figuras de Chladni através da ressonância em placas vibrantes com diferentes geometrias;
- Analisar as principais características das Figuras de Chladni observadas nas placas vibrantes.

AULA 06

TÍTULO – REAPLICAÇÃO DO PRIMEIRO QUESTIONÁRIO

JUSTIFICATIVA:

Com a ampliação do Produto e realizada de todas as etapas, observamos que os resultados obtidos neste trabalho evidenciam a importância de uma metodologia de

ensino que leve em conta os conhecimentos dos alunos, e nesse contexto foi realizado uma reaplicação do primeiro questionário o “questionário de sondagem”, onde tentamos associar os conhecimentos estudados com a prática, despertando neles o senso crítico, tornando o Ensino de Física mais significativo e menos abstrato.

OBJETIVO GERAL

Analisar de forma clara, os conhecimentos adquiridos durante as aulas ministradas sobre Ondulatória e Acústica.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Observar com clareza os conhecimentos adquiridos durante as aulas;
- Verificar até que ponto os conhecimentos foram absorvidos.

RECURSOS METODOLÓGICOS

- Ficha de exercício

DESENVOLVIMENTO DAS ATIVIDADES

Nessa atividade, os alunos foram submetidos a refazerem o questionário de sondagem, onde o objetivo é verificar até que ponto eles conseguiram absorver os novos conhecimentos adquiridos sobre Ondulatória e Acústica.

AVALIAÇÃO

Os alunos serão avaliados através da reaplicação do primeiro questionário.

CAPÍTULO IV

4. APLICAÇÃO DO PRODUTO

Neste Capítulo iremos abordar o passo a passo da aplicação do produto, realizado na Escola Municipal Professora Janise dos Santos Oliveira, município de Vitória de Santo Antão - PE, com alunos do 9º ano do ensino fundamental.

A escola possui 07 (sete) salas de aulas, além das repartições administrativas; porém não dispõe de biblioteca nem tão pouco de laboratório de ciências. Nessa última questão, as atividades voltadas para aulas práticas devem ser realizadas em salas de aula ou no pátio da escola. A escola funciona de segunda a sexta-feira, das 07hs às 17:20hs, sendo no período matutino as turmas do infantil até o 5º ano do ensino fundamental e no horário vespertino, as turmas do 6º ano ao 9º ano do fundamental. As fotos 01, 02 e 03 mostram detalhes da escola.



Foto 01 – Fachada da Escola.



Foto 02 – Pátio da Escola.



Foto 03 - Sala de aula do 9º ano do Ensino Fundamental.

A proposta didática utilizada com os alunos foi dividida em seis etapas, sendo a primeira, a apresentação do produto e aplicação de um questionário de sondagem, com o objetivo de conhecer os conhecimentos prévios dos alunos, ou seja, seus subsunçores, de acordo com a Teoria de Aprendizagem de David Ausubel, a qual serviu de base para a elaboração desta dissertação. O segundo e terceiro encontros ocorreram com a apresentação dos conteúdos e conceitos básicos sobre ondulatória e acústica para a turma de alunos. No quarto encontro, aplicamos um segundo questionário de avaliação e sondagem da aprendizagem; já no quinto encontro, realizamos a aplicação propriamente dita do produto confeccionado neste trabalho, sendo aplicado novamente o primeiro questionário de sondagem e avaliação como atividade de fechamento no sexto encontro.

O primeiro encontro aconteceu na sala aula, das 13:00hs às 14:30 hs, tendo como primeira discussão a apresentação e o objetivo do produto. Em seguida foi aplicado o primeiro questionário de sondagem com os alunos, sendo este questionário composto por 10 questões que exploram os conceitos prévios dos alunos sobre ondulatória e acústica. A turma era composta por 18 alunos, sendo esses residentes na própria comunidade e em sítios circunvizinhos. A foto 04 mostra a aplicação do questionário de sondagem neste primeiro dia.



Foto 04 – Aplicação do primeiro questionário de “sondagem”.

O primeiro questionário trouxe algumas questões com certo grau de dificuldade em algumas perguntas, pois os alunos tinham noção das possíveis respostas, porém não sabiam exatamente como determinado fenômeno acontecia. Diante dessas informações levantadas e sondadas pelo questionário, foi traçado o gráfico e o plano de ensino mais adequado para eles receberem noções sobre os conceitos básicos sobre ondulatória e acústica.

As seguintes perguntas fizeram parte do 1º questionário:

1. O que os fatos de jogar uma pedra no lago e apertar o botão de um controle remoto têm em comum?
2. O que a pedra lançada e o controle remoto transferem para o meio de propagação?
3. O que um simples balanço e a ponte de Tacoma têm em comum? Será que existe ressonância ou não tem nada haver? Justifique sua resposta.
4. Trovão x relâmpago (velocidade do som x velocidade da luz), qual é a diferença entre eles?
5. Por que o violão tem que ter uma caixa acústica?
6. O que acontece quando passamos o dedo molhado numa Taça de cristal
7. Quando se fala “rompeu a barreira do som”, o que isso quer dizer?
8. Qual é o nome do aparelho que medi o som? E por que ele recebe esse nome?
9. Por que não escutamos som no espaço?
10. O que significa ultrassom e infrassom?

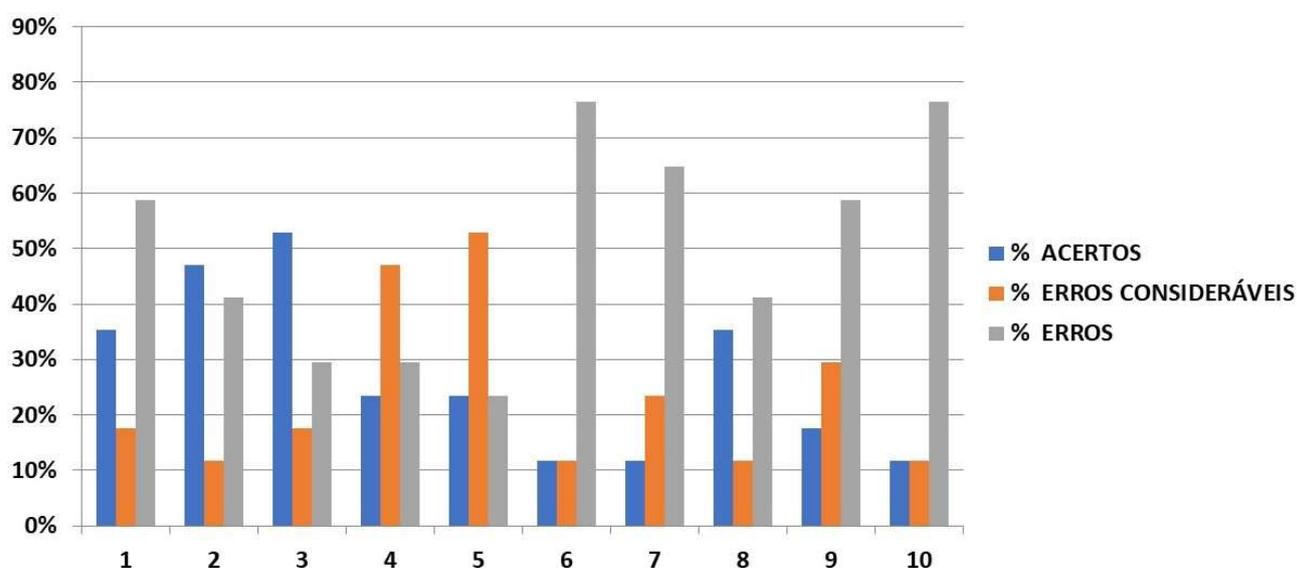


Gráfico I - Resultado da aplicação do questionário de sondagem em porcentagem.

O gráfico I anterior mostra os resultados em porcentagem dos resultados obtidos pelos alunos no teste de sondagem realizado no primeiro encontro. Ele mostra os percentuais de acertos, erros consideráveis (acertos parciais) e erros totais.

Já o gráfico II mostra o número de alunos que realizaram o teste de sondagem no primeiro momento, com um total de 17 alunos, sendo os resultados classificados novamente como acertos, erros consideráveis (acertos parciais) e erros totais mostrados em cada coluna de acordo com a respectiva questão.

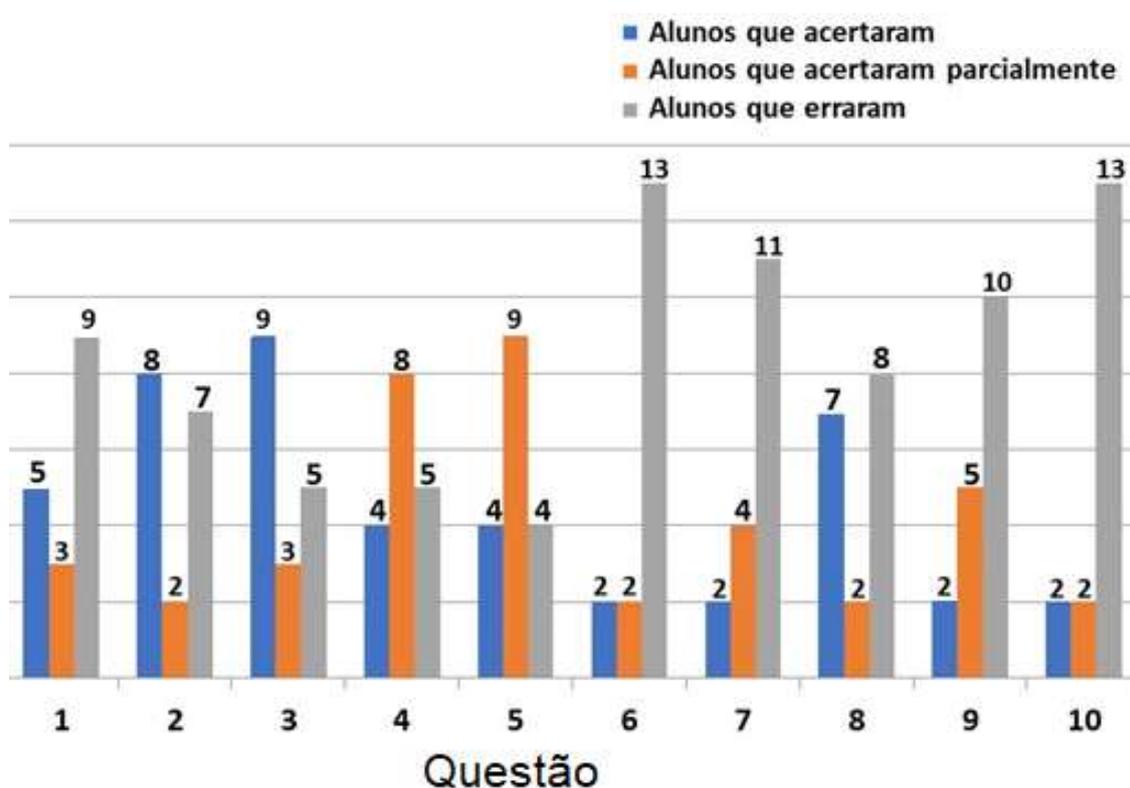


Gráfico II - Resultado questionário de sondagem com o total de alunos participantes.

No segundo momento com esses alunos, tivemos aula teórica e prática sobre ondulatória, com início às 13:00hs e término às 15:15hs. Durante esse tempo foi ministrada uma aula sobre ondulatória na qual abordamos conceitos como: amplitude e comprimento de onda, frequência, período e velocidade de propagação de uma onda; definições de ondas transversais e longitudinais. A foto 05 mostra um experimento que foi realizado com a turma, com uma mola de aço, para explorar conceitos sobre a propagação das ondas longitudinais e transversais.



Foto 05 – Mola de aço usada para trabalhar conceitos de mecânica ondulatória.

As fotos 06, 07 e 08 mostram detalhes da aula prática realizada com experimentos sobre mecânica ondulatória. As aulas práticas foram realizadas em sala de aula e tiveram um caráter mais demonstrativo.



Foto 06 – Analisando o período, o comprimento de onda e a frequência de uma onda mecânica.

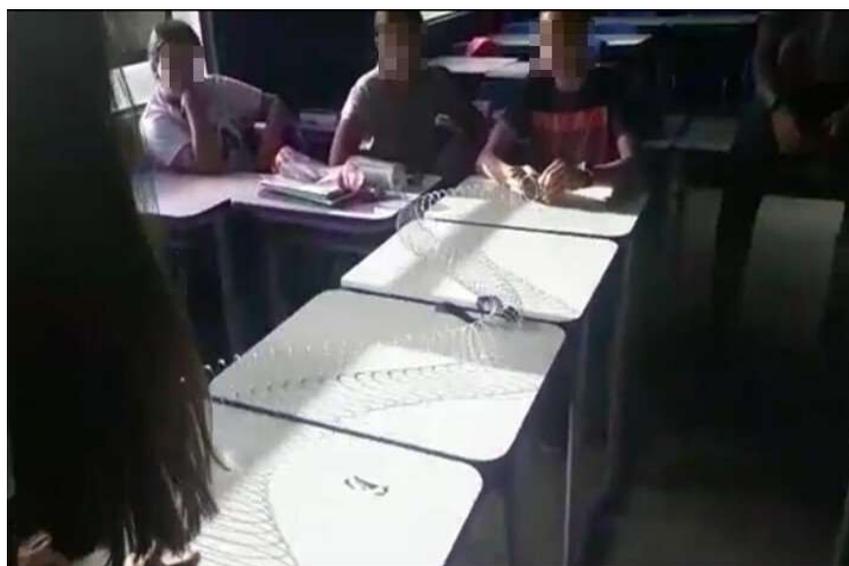


Foto 07 – Demonstração da propagação de ondas transversal.



Foto 08 – Demonstração de ondas longitudinais.

No terceiro encontro, os alunos tiveram aula sobre acústica, com ênfase em comportamento do som, propagação do som, altura/tom, intensidade e timbre; além do fenômeno sonoro de ressonância. Na Foto 09 vemos uma aula prática demonstrativa realizada em sala de aula, sobre o fenômeno da ressonância em uma taça de vidro.



Foto 09



Foto 10

Aula prática demonstrativa da ressonância do som em uma taça de vidro.

No quarto momento, os alunos foram submetidos a mais um teste de conhecimento, onde eles responderam um segundo questionário com dez questões que abordavam a temática de Acústica. Na foto 10 vemos o momento de aplicação do segundo questionário de avaliação e sondagem do conhecimento.

No segundo questionário, os assuntos abordados foram relacionados à Acústica:

1. *O que você entende por onda mecânica?*
2. *Como você define ondas transversais e longitudinais?*
3. *O que é acústica?*

4. Como você define reflexão do som como significado do eco?
5. O que difere a voz feminina da masculina?
6. O que uma onda pode transportar?
7. Quando uma pedra é arremessada sobre um lago, forma-se um pulso que se propaga por sua superfície. Esse pulso é transversal ou longitudinal?
8. Qual a diferença entre amplitude e comprimento de onda?
9. Como os morcegos se orientam?
10. Agora, diferencie timbre, intensidade e frequência.



Foto 11 – Aplicação do segundo questionário de avaliação e sondagem.

O gráfico III mostra os resultados dos alunos após à aplicação do segundo questionário, evidenciando a porcentagem dos acertos, acertos parciais e erros.

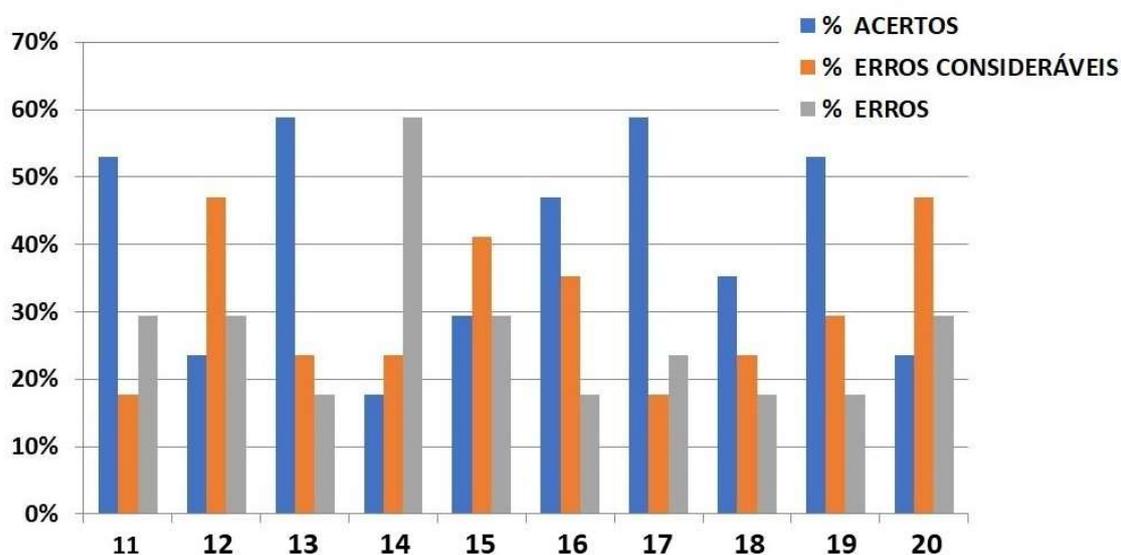


Gráfico III - Resultado da aplicação do II questionário

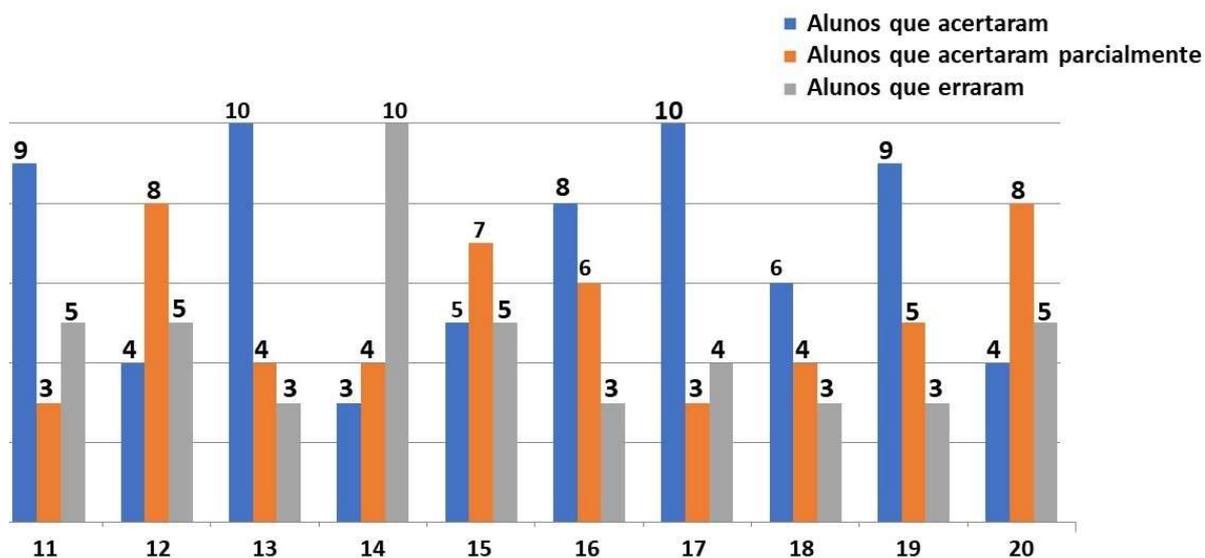


Gráfico IV - Resultado do segundo questionário analisado por número de acertos, acertos parciais e erros.

Nos gráficos III e IV vemos como foi providencial utilizarmos a teoria juntamente com a prática, no contexto de uma aprendizagem mais significativa na qual podemos verificar uma maior fixação dos conteúdos estudados.

Já no quinto encontro, os alunos tiveram acesso à aplicação do produto, os quais puderam manusear e observar a formação das figuras geométricas através do experimento idealizado por Chladni. Montamos e aplicamos o produto com a turma de alunos, utilizando os três modelos de placas de acrílico confeccionadas; as quais vibram e entram em ressonância exatamente nas frequências dos modos normais de vibração de cada placa. As fotos 12-16, mostram as atividades práticas realizadas em sala de aula com a turma de alunos, sobre a observação das Figuras de Chladni.



Foto 12 – Alunos preparando a montagem do experimento de observação das Figuras de Chladni.



Foto 13.



Foto 14.

Alunos polvilhando areia numa placa circular e observando as Figuras de Chladni.



Foto 15 - Polvilhando areia colorida numa placa triangular e observando uma Figura de Chladni.



Foto 16 - Polvilhando areia colorida numa placa quadrada e observando uma Figura de Chladni formada.

Neste último encontro, os alunos foram submetidos a mais um questionário avaliativo, sendo este igual ao primeiro questionário aplicado, com a finalidade de analisar se os alunos foram capazes de assimilar os conteúdos ministrados sobre ondulatória e acústica. Na foto 17 vemos a turma de alunos realizando este último questionário avaliativo; servindo este momento como uma atividade de fechamento ou de conclusão da aplicação prática do produto desta Dissertação de mestrado.



Foto 17 – Aplicação do último questionário avaliativo como atividade de fechamento.

Os gráficos V e VI mostram os resultados do último questionário aplicado com a turma de alunos, mostrando em V o percentual de acertos, acertos parciais e erros; já no gráfico VI mostramos o resultado do questionário em termos do número de alunos participantes.

Através das análises dos gráficos V e VII, foi possível verificar os avanços dos alunos quando se utiliza o lúdico em conjunto com a aprendizagem significativa, e isso podemos verificar por exemplo, quando comparamos os resultados das respostas do primeiro questionário com as respostas do segundo, onde podemos notar o antes e depois de ancorarmos novos conhecimentos. Quando analisamos o primeiro gráfico I, notamos que no 1º, 6º, 7º, 8º, 9º e 10º quesitos, o número de erros foi maior que os de acertos, fato esse superado quando foram introduzidos novos conhecimentos. Esse resultado reforça a importância de valer-se dos conhecimentos prévios dos alunos, fazendo assim, a ancoragem desses fundamentos no intuito de demonstrar que a Física não é tão difícil quando parece, uma vez que essa ciência pode ser apresentada ao aluno de uma forma mais prática e contextualizada, conectada com a realidade concreta dos estudantes.

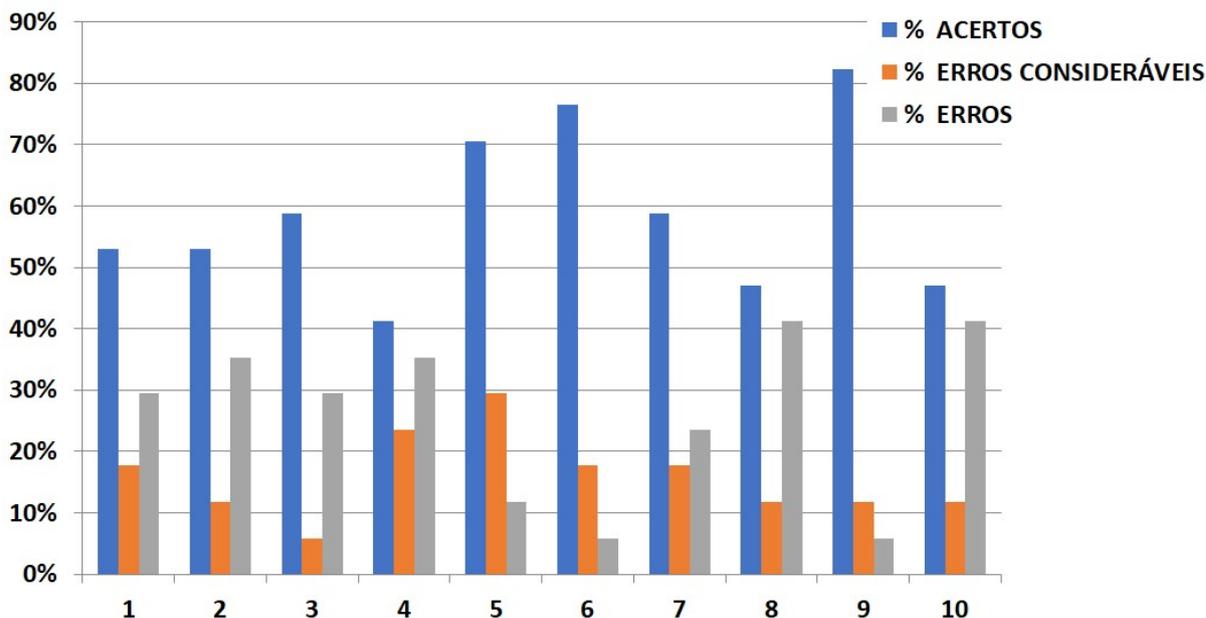


Gráfico V - Resultado da reaplicação do primeiro questionário em porcentagem.

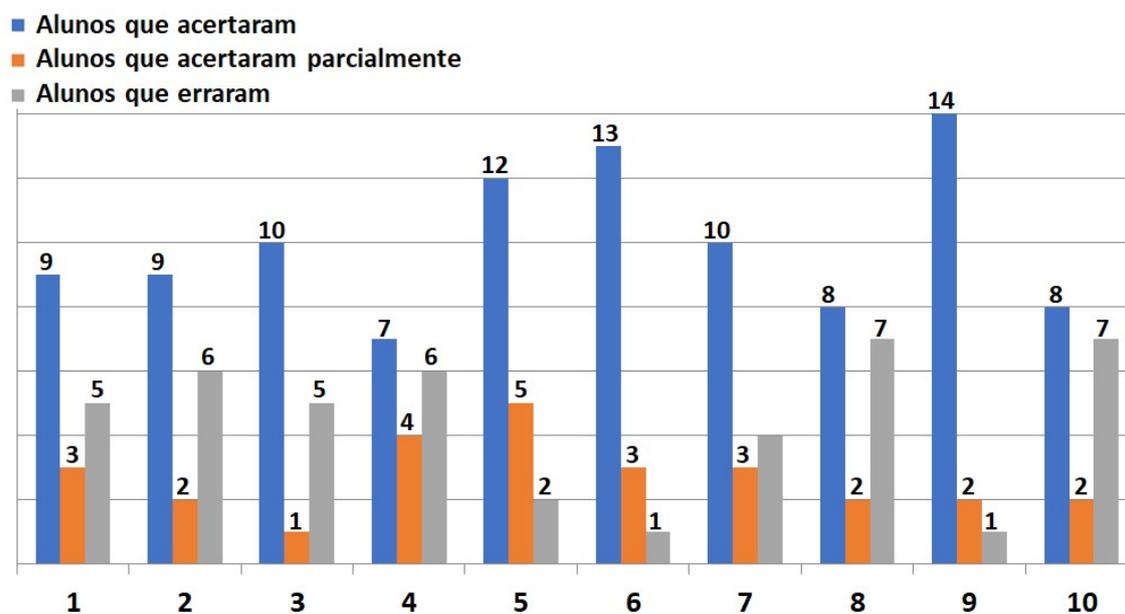


Gráfico VI - Resultado de uma nova aplicação do primeiro questionário, para a mesma turma de alunos.

5. CONCLUSÕES

Esta Dissertação de mestrado estudou a aplicação das Figuras de Chladni no ensino de conceitos introdutórios de ondulatória e acústica para uma turma de alunos do 9º ano do Ensino Fundamental de uma escola pública localizada no interior do Estado de Pernambuco.

Este trabalho foi embasado teoricamente pela Teoria de Aprendizagem Significativa de David Ausubel, a qual prevê que a aprendizagem prévia e a estrutura cognitiva dos alunos devem ser consideradas pelo professor no planejamento e na aplicação da sua aula didática no dia a dia.

Realizamos um estudo teórico inicial sobre acústica e vibração de membranas em meios materiais, para melhor entender o problema dos modos normais de vibração de uma membrana material e posterior observação da formação das Figuras de Chladni em placas vibrantes. Fizemos um cálculo numérico no *software* COMSOL multiphysics para confirmar a validade da lei de Chladni em placas vibrantes e tivemos êxito nesta etapa. Em seguida construímos um produto para realizar um experimento didático, objetivando observar a formação das Figuras de Chladni em diferentes geometrias de placas vibrantes e também tivemos êxito nesta etapa.

O trabalho apresentado aqui e a aplicação prática do produto desenvolvido nesta Dissertação teve uma grande importância na construção do conhecimento na turma de 18 alunos ao todo e tivemos apenas uma desistência no final do trabalho, onde foi possível demonstrar para eles os conceitos básicos de ondulatória e acústica. Com as atividades realizadas em sala de aula, os alunos puderam acompanhar de maneira clara e objetiva os eventos apresentados aqui, de forma que eles possam associar os conhecimentos físicos adquiridos com sua realidade e aplicá-los ao seu cotidiano.

Foi notório e plausível que os alunos do 9º ano aceitaram bem a aplicação deste projeto, cada um dando o melhor de si para que a experiência fosse um sucesso e isso foi observado nas falas dos alunos o quanto o ensino de Física pode ficar mais fácil e divertido quando conduzido dessa forma. Podemos destacar a importância das aulas práticas para motivar e despertar o interesse dos alunos pela aprendizagem da Física no Ensino Fundamental. A possibilidade de trabalhar de forma prática e contextualizada pode motivar e estimular os alunos, despertando neles o senso crítico, tornando o Ensino de Física mais significativo e menos abstrato

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARFKEN, G. B.; WEBER, H. J. Física Matemática: Métodos Matemáticos para Física e Engenharia. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

AUSUBEL, D. P. Aquisição e Retenção de Conhecimentos: Uma Perspectiva Cognitiva. 1ª. ed. [S.l.]: Paralelo Editora, 2000.

BRASIL. Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional, Lei nº. 9.394, de 20 de dezembro de 1996.

BUTKOV, E. Física Matemática. Rio de Janeiro: LTC, 1988.

COMSOL, Tutorial: Vibrating Membranes, 2019. Disponível em: <https://br.comsol.com/model/vibrating-membrane-12587>. Acesso em 05/12/2019.

GEWANDSZNAJDER, Fernando – Projeto Teláris: Ciências Ensino fundamental 9º ano. 2ª edição. Editora Ática. São Paulo, 2015.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. - Fundamentos de Física, volume 2 : gravitação, ondas e termodinâmica, 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

JEWETT, J.; SERWAY, R. Física para cientistas e engenheiros. Oscilações, ondas e termodinâmica. Vol. 2, São Paulo, 2011.

LEISSA, A.W. Vibration of Plates. NASA SP-160, NASA, Washington D.C., 1969.

LOPES, J. B. Aprender e Ensinar Física. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2004.

MASSMANN, H.; FERRER, R. Instrumentos Musicales. Artesania y Ciencia. Editora Dolmen. Chile, 1993.

MOREIRA, M.A; Aprendizagem Significativa – A Teoria de David Ausubel, 2ª edição. São Paulo: Centauro Editora, página 61, 2016.

MOREIRA, M.A; Aprendizagem Significativa – A teoria e texto complementares, 1ª Edição. São Paulo: LF Editorial, páginas 38-39, 2012.

NAMDARI, N.; DEGHAN, A. Natural Frequencies and Mode Shapes for Vibrations of Rectangular and Circular Membranes: A Numerical Study. *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*, Vol. 3, Issue 2, pp. 30-34, 2018.

NUSSENZVEIG, H. M. Curso de física básica. 5ª. Edição, Editora Edgard Blücher, volume 2, São Paulo, 2014.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. A Física na Formação de Professores do Ensino Fundamental. Editora da UFRGS, 1999.

PCN, 1997. Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio.

Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/ciencian.pdf> . Acesso em 05/12/2019.

PETRAGLIA, M. S. Figuras Sonoras de Chladni. Instituto OuvirAtivo. Música e Desenvolvimento Humano, 2014. Disponível em:

<https://www.yumpu.com/pt/document/read/25091594/figuras-sonoras-de-chladni-ouvirativo>

Acesso em 05/12/2019.

ROSSING, T. D. Chladni's Law for Vibrating Plates. American Journal of Physics. Volume 50, no. 3, 1982.

ROSSING, T. D. The Science of String Instruments. Stanford, Editora Spring, pp. 23-24, 2010.

SILVA, Waldecy de Oliveira. Uma sequência de aulas para o estudo de ondas, com auxílio de Figuras de Chladni – Boa Vista, 2018. Disponível em:

<http://www1.fisica.org.br/mnpef/uma-sequ%C3%Aancia-de-aulas-para-o-estudo-de-ondas-com-aux%C3%ADlio-das-figuras-de-chladni>

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. Física II: Termodinâmica e Ondas. 14ª edição. Editora Pearson, São Paulo, 2015.

APÊNDICE - A

Questionário - 01

Prefeitura Municipal da Vitória de Santo Antão - PE

Escola Municipal Professora Janise dos Santos Oliveira

Professor: Márcio Lima

Aluno(a): _____

Turma: 9º ano



Questionário 1 (Sondagem inicial)

1. O que os fatos de jogar uma pedra no lago e apertar o botão de um controle remoto têm em comum?

2. O que a pedra lançada e o controle remoto transferem para o meio de propagação?

3. O que um simples balanço e a ponte de Tacoma têm em comum? Será há ressonância ou não tem nada haver? Justifique sua resposta.

4. Trovão x relâmpago (velocidade do som x velocidade da luz), qual é a diferença entre eles?

5. Por que o violão tem que ter uma caixa acústica?

6. O que acontece quando passamos o dedo molhado numa Taça de cristal

7. Quando se fala “*ele rompeu a barreira do som*”, o que isso quer dizer?

8. Qual é o nome do aparelho que medi o som? E por que ele recebe esse nome?

9. Por que não escutamos som no espaço?

10. O que significa ultrassom e infrassom?

Prefeitura Municipal da Vitória de Santo Antão - PE

Escola Municipal Professora Janise dos Santos Oliveira

Professor: Márcio Lima

Aluno(a): _____

Turma: 9º ano



Questionário 2

1. O que você entende por onda mecânica?

2. Como você define ondas transversais e longitudinais?

3. O que é acústica?

4. Como você define reflexão do som como significado do eco?

5. O que difere a voz feminina da masculina?

6. O que uma onda pode transportar?

7. Quando uma pedra é arremessada sobre um lago, forma-se um pulso que se propaga por sua superfície. Esse pulso é transversal ou longitudinal?

8. Qual a diferença entre amplitude e comprimento de onda?

9. Como os morcegos se orientam?

10. Agora, diferencie timbre, intensidade e frequência.

APÊNDICE - B

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DIVULGAÇÃO DE IMAGENS DOS ALUNOS

_____ brasileiro(a), menor de idade, neste ato devidamente representado por, _____, brasileiro(a), portador(a) da Cédula de identidade RG nº _____ SDS/_____, inscrito no CPF _____ sob _____ nº _____ - _____, residente na(o) _____, nº _____ Bairro _____, Cidade _____ - PE,

AUTORIZO o uso da imagem de meu(minha) filho(a) para fins educacionais na Dissertação do Prof. MÁRCIO ANTONIO DE LIMA, Mestrando no Ensino Profissional de Física pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), cujo título de pesquisa é *USO DAS FIGURAS DE CHLADNI NO ENSINO DE FÍSICA*, orientado pelo Prof. Dr. Wictor Carlos Magno. A presente autorização é concedida a título gratuito, abrangendo o uso da imagem acima mencionada em todo território nacional, exterior, inclusive em qualquer tipo de mídia. Fica ainda autorizada, de livre e espontânea vontade, para os mesmos fins, a cessão de direitos da veiculação das imagens não recebendo para tanto qualquer tipo de remuneração.

Por esta ser a expressão da minha vontade declaro que autorizo o uso acima descrito sem que nada haja a ser reclamado a título de direitos conexos à imagem ou a qualquer outro, e assino a presente autorização em 02 vias de igual teor e forma.

Vitória de Santo Antão – PE, ____ de outubro de 2019

Assinatura do pai/mãe/responsável

APÊNDICE - C

REQUERIMENTO PARA APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL EM SALA DE AULA

Senhor pai/mãe/responsável, meu nome é MÁRCIO ANTONIO DE LIMA, residente na Rua Sigisberto Bartolomeu Correia Freires, nº 09, Bairro Vila Nova, Município de Sirinhaém-PE, Fone: (81) 9 8765-3344. Atualmente, sou Professor de Ciências no Município da Vitória de Santo Antão, onde atuo na Escola Municipal Professora Janise dos Santos Oliveira, no Povoado de Natuba. Estou cursando o Mestrado Nacional Profissional no Ensino de Física (MNPEF) pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), e em fase de conclusão do curso. Para a obtenção do diploma, a universidade exige que façamos uma Dissertação que tem como objetivo oferecer estratégias pedagógicas para a melhoria do processo de ensino aprendizagem em Física, a minha Dissertação propõe a utilização do USO DAS FIGURAS DE CHLADNI NO ENSINO DE FÍSICA, para o estudo das Ondas com os alunos do 9º ano do ensino Fundamental. Para tanto, gostaria de ministrar algumas aulas sobre o conteúdo com aplicação do experimento e fazer algumas atividades, ao seu (a) filho (a), por meio de questionários, debates, resolução de exercícios etc. Aproveitando o ensejo, informo que as respostas obtidas através das atividades, servirão único e exclusivamente para a concretização da pesquisa, pois para a conclusão da dissertação, faz-se necessário a tabulação e exposição das respostas para posterior defesa da dissertação. No entanto, para resguardar a identidade os alunos pesquisados não serão identificados. Informo ainda que durante a pesquisa seu (a) filho (a) estará sob os meus cuidados e, para elaborar a pesquisa necessito de seu consentimento.

Gostaria que assinalassem o campo abaixo e devolvessem este termo para escola.

Nome do aluno(a): _____

Responsável: _____ Fone:() _____ - _____

() Autorizo meu (a) filho (a) a participar da pesquisa.

() Não autorizo meu (a) filho (a) a participar da pesquisa.

Cidade, Vitória de Santo Antão - PE, 14 de maio de 2019.

MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



PRODUTO EDUCACIONAL

USO DAS FIGURAS DE CHLADNI NO ENSINO DE FÍSICA

Márcio Antonio de Lima

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal Rural de Pernambuco 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. Wictor Carlos Magno

Recife – agosto 2020

SUMÁRIO

<u>1. Breve histórico sobre Ernst Chladni</u>	3
<u>2. Utilização das Figuras de Chladni para estudar as ondas sonoras</u>	4
<u>3. Materiais usados no experimento</u>	7
<u>4. Detalhamento dos itens necessários para realização do experimento</u>	8
<u>5. Sequência didática de ensino pautada na teoria de David Ausubel</u>	12
<u>6. Detalhamento das aulas didáticas</u>	133
<u>6.1. Aula 1 – Apresentação do produto e introdução a mecânica ondulatória</u>	
.....	Erro! Indicador não definido.
<u>6.2. Aula 2 – Analisando os principais fenômenos ondulatório</u>	14
<u>6.3. Aula 3 – Estudo do som</u>	16
<u>6.4. Aula 4 – Aplicação do segundo questionário</u>	17
<u>6.5. Aula 5 – Demonstração do produto - as Figuras de Chladni</u>	18
<u>6.6. Aula 6 - Reaplicação do primeiro questionário</u>	18
<u>7. Aplicação do produto na escola</u>	200
<u>8. Conclusões</u>	36
<u>9. Referências Bibliográficas</u>	37

1. BREVE HISTÓRICO SOBRE ERNST CHLADNI

O físico Ernst Florens Friedrich Chladni nasceu em 30 de novembro de 1756 na cidade de Wittenberg, Alemanha. Seus pais se chamavam Ernst Martin Chladni e Johanna Sophia Chladni.

Iniciou seus estudos na universidade de Wittenberg, onde cursou direito devido à insistência do seu pai, que era reitor e professor da mesma universidade. Porém, sua maior paixão era a música, sonho esse que só foi realizado após a morte do seu pai, mesmo tendo esse desejo e indo contra a sua vontade, chegou a lecionar também nessa universidade após passar por dificuldades econômicas. Na Fig. 01 vemos uma foto do físico Ernst Chladni, já adulto.



Figura 01 – Foto do físico Ernst Chladni.

Quando Chladni concluiu seu curso de Direito, ele queria alçar novos rumos na área de acústica, o que só foi alcançado pouco tempo depois do falecimento do seu pai. Hoje Chladni é reconhecido mundialmente como o *pai da acústica*. Seus interesses de pesquisa envolviam o estudo dos diferentes tipos de materiais que produzissem sons em superfícies planas vibrantes. Ele desenvolveu um experimento com o auxílio de um arco de violino no qual era possível visualizar os modos normais de vibração de uma membrana, ou de visualizar os seus modos naturais de vibração (harmônicos).

Em meados do século XVIII, Chladni foi o pioneiro na visualização das ondas sonoras em meios materiais; sendo seu clássico experimento de vibração de uma placa metálica até hoje usado na afinação de diferentes tipos de instrumentos musicais. Muitos cientistas apoiaram-se posteriormente em suas teorias para desenvolver ou melhorar seus experimentos na área de acústica, dentre eles podemos citar: Savart, Young, Faraday, dentre outros.

O experimento realizado por ele consistia em adicionar lentamente areia em uma placa de metal ou vidro e com o auxílio de um arco do violino, fazer a placa vibrar. Com isso era possível observar a formação de diferentes imagens e formas geométricas na superfície das placas; ocorrendo ainda uma mudança nos perfis gerados quando se apoiavam os dedos da mão em diferentes regiões das placas. O experimento de Chladni foi motivado por uma descrição feita por Georg C. Lichtenberg (1742-1799). Este último pesquisador afirmava que, se uma descarga elétrica fosse aplicada em uma superfície plana com oxido vermelho de chumbo ou pó de enxofre espalhados sobre a superfície da placa, então seria possível observar diferentes padrões e figuras na superfície da placa. Essas figuras foram chamadas na época de “Figuras Sonoras”. Posteriormente outros pesquisadores passaram a chamar essas figuras de “Figuras de Chladni”, nome esse que foi adotado neste trabalho.

2. UTILIZAÇÃO DAS FIGURAS DE CHLADNI PARA ESTUDAR AS ONDAS SONORAS

No primeiro momento, um professor de Física ao observar ou olhar um padrão típico formado pelas “Figuras de Chladni” poderá levantar alguns questionamentos, tais como:

- Por qual motivo essas placas produzem figuras diferentes?
- Como posso utilizar esse experimento em sala de aula?
- De que maneira esse experimento pode facilitar o ensino/aprendizagem dos meus alunos?

O objetivo desse trabalho (produto) é demonstrar a propagação do som através de algumas placas em acrílico nas seguintes formas geométricas: triangular, circular e quadrada. Propomos realizar o experimento das Figuras de Chladni para alunos do 9º ano do ensino fundamental. Como são alunos do último ano do ensino fundamental, esse experimento visa apenas demonstrar a propagação do som de forma qualitativa, não se detendo nos cálculos matemáticos mais complexos.

Nas Figuras 02, 03 e 04 vemos o aparato construído para a realização do experimento para visualização das Figuras de Chladni. Na Figura 02 vemos o experimento sendo realizado numa placa quadrada de acrílico. Na Figura 03 o experimento foi repetido em uma placa circular de acrílico. Já na Figura 04 utilizamos uma placa triangular, também de acrílico.



Figura 02 – Experimento das Figuras de Chladni realizado numa placa quadrada.



Figura 03 – Experimento realizado numa placa circular de acrílico.



Figura 04 – Experimento realizado numa placa triangular de acrílico.

Os diferentes padrões que podem ser obtidos dependem do tipo de material do qual é feita a placa, bem como da sua espessura, elasticidade e da massa; além da frequência a qual ela é obrigada a vibrar.

As figuras podem ser formadas quando as placas são submetidas a uma determinada frequência de vibração; conhecida como condição de ressonância da placa, quando as mesmas vibram em frequências especiais bem definidas (modos normais de vibração) e formam as Figuras de Chladni.

Essa oscilação acontece longitudinalmente nas placas, produzindo pontos nodais, como podemos observar nas Figuras 02, 03 e 04, em que a oscilação acontece tanto no centro como as extremidades da placa, produzindo imagens distintas de acordo com a frequência a ela submetida.

Na Figura 05 vemos um diagrama explicativo em que os pontos X e Y são chamados de pontos nodais, ou seja, pontos fixos na superfície das placas. Esses pontos permanecem estacionários, ou podem vibrar apenas com pequena amplitude. Enquanto as extremidades e o centro da superfície podem vibrar livremente. Com o passar do tempo, qualquer substância colocada na superfície da placa e submetida a essa oscilação, poderá se acomodar nos pontos nodais, os quais possuem menor amplitude de vibração por estarem próximos da situação de repouso.

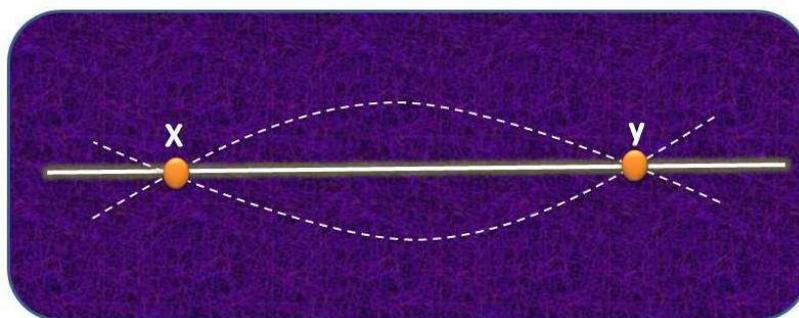


Figura 05 – Formação de pontos nodais sobre uma superfície vibrante.

Nesse experimento, iremos perceber situações concretas relacionadas às leis da acústica. Iremos perceber que os sons de maior frequência (sons mais agudos) poderão produzir figuras mais abstratas, com mais detalhes e um maior número de linhas nodais. Já os sons de menor frequência (sons mais graves) formarão figuras mais distintas, mais simples e com um menor número de linhas nodais.

3. MATERIAIS USADOS NO EXPERIMENTO

- Cano de PVC de 20 mm de diâmetro e 60 mm de comprimento;
- Pistola e bastão para cola quente;
- Fita adesiva crepe;
- Placa em acrílico no formato de um triângulo equilátero com 200 mm de lado, espessura de 2,50 mm e 30,7 g;
- Placa circular com 200 mm diâmetro, espessura de 2,50 mm e 36,8 g;
- Placa quadrada com 200 mm x 200 mm, espessura de 2,50 mm e 66,8 g;
- Alto - falante 6HTS320B 320 W PMPO 40 W RMS;
- Amplificador de som Bluetooth BT 118;
- Parafuso 80 mm de comprimento e 4 mm de espessura;
- Duas arruelas de 4,2 mm de diâmetro interno e 8 mm de diâmetro externo;
- Duas porcas com rosca de 6 mm;
- Um celular (*smartphone*) para a instalação de um aplicativo de controle de frequência (*FrequencyGenerator*);
- Estilete;
- Cabo/Fio para alto-falante;

- Régua;
- Corantes (vermelho, amarelo, verde e azul);
- Areia fina;

4. DETALHAMENTO DOS ITENS NECESSÁRIOS PARA REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

Alto - falante 6HTS320B 320 W PMPO 40 W RMS

O alto-falante é de grande importância para que o experimento seja bem sucedido. É ele quem faz o movimento oscilatório necessário para as placas entrarem em ressonância. O tipo e a potência de um alto-falante escolhido devem ser tais que permitam um bom desempenho do experimento; porém outros modelos também podem ser usados. Nesse caso se fez necessário retirar a calota do dispositivo para acoplar o cano de PVC de 60 mm, como mostra a Figura 06.



Figura 06. Alto-falante utilizado no experimento.

Amplificador de som Bluetooth BT 118

Existem vários modelos de amplificadores de som. Na questão custo x benefício o modelo BT 118 foi o que melhor se adequou como fonte de vibração para nosso

experimento. Utilizamos o recurso de *Bluetooth* interno deste dispositivo para controlar o experimento através de um aparelho de celular (*smartphone*) com conexão *Bluetooth*.



Figura 06 – Amplificador de som usado no experimento.

Placas de Acrílico

Foram utilizadas nesse experimento três placas de acrílico nos formatos: quadrada, circular e triangular, todas com um furo no centro. As placas foram submetidas a várias frequências de vibração, sendo possível observar as diversas formas e figuras geométricas geradas pela deposição da areia depositada na superfície das placas. Na Figura 07 vemos as placas de acrílico utilizadas com suas dimensões.

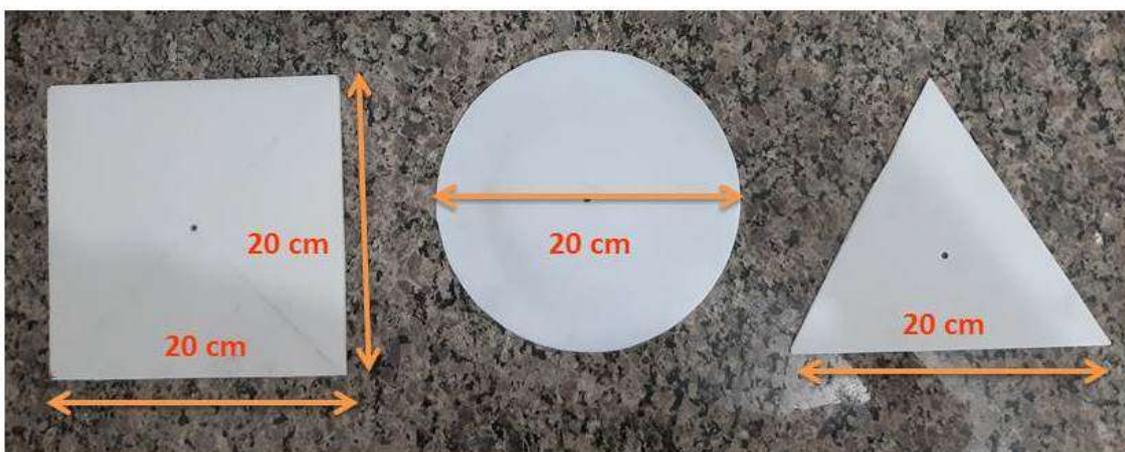


Figura 07. Dimensões das placas de acrílico utilizadas nos experimentos.

Cano de PVC e parafuso fixador

O parafuso fixador é fundamental para dá estabilidade e altura às placas vibrantes. Na Figura 08 vemos como esse parafuso foi inserido no interior do cano de PVC e foi fixado com cola quente ao mesmo. Na extremidade inferior do cano foi enrolada uma fita crepe adesiva para melhor acoplar essa estrutura, de forma estável, ao centro do alto-falante.



Figura 08 - Cano de PVC com parafuso fixador centrado.

Gerador de frequência

Utilizamos um aplicativo baixado da *Internet* para servir como controle da frequência da onda sonora a ser aplicada ao alto-falante. Baixamos o aplicativo *Hz LuxDeLux* para *smartphones* do tipo Andróide. Existem versões similares deste *software* para outros modelos de celulares *smartphones*, os quais funcionam igualmente bem. A finalidade deste gerador é produzir frequências bem definidas que façam as placas vibrarem e entrarem em ressonância. Na Figura 09 vemos a tela de operação do aplicativo instalado em um celular Andróide.

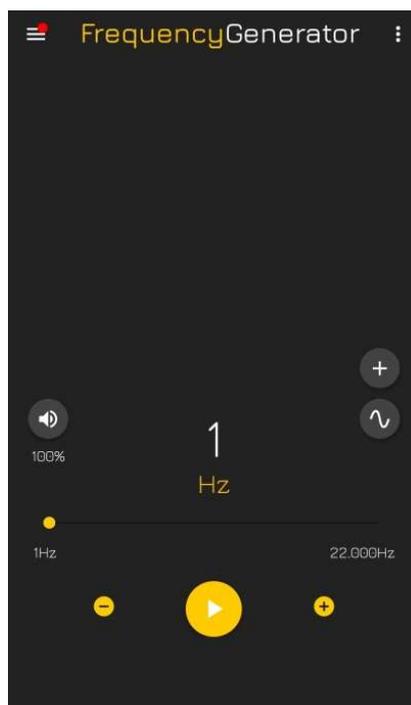


Figura 09 - Gerador de frequência de som.

Areia colorida

Sugerimos a utilização de diferentes tipos de areia para polvilhar sobre a superfície das placas vibrantes; o que permite melhor observar as Figuras de Chladni geradas. Na Figura 10 vemos algumas amostras de areia misturada com diferentes tipos de corantes (anilina).



Figura 10. Areia colorida utilizada nos experimentos.

5. SEQUÊNCIA DIDÁTICA DE ENSINO PAUTADA NA TEORIA DE DAVID AUSUBEL

A proposta desse trabalho educacional baseia-se no estudo da acústica, voltada para alunos do 9º ano do ensino fundamental. Esse produto foi sistematizado a partir da Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel, com base na qual será montado um equipamento concreto que demonstrará a existência das ondas sonoras através das Figuras de Chladni observadas.

Aulas	Percursos	Período
Aula 1 Apresentação do Produto e aplicação do questionário diagnóstico sobre o conhecimento prévio dos alunos	- No primeiro momento iremos apresentar a ideia do produto, mostrando o caminho que será percorrido, desde a introdução até o resultado final esperado.	30 minutos
	- Na segunda parte, os alunos serão sabatinados com perguntas relacionados à ondulatória (Acústica), em seguida, eles irão responder um questionário que abordarão questões do seu cotidiano, com o intuito de saber até onde vão seus conhecimentos prévios sobre o assunto abordado.	2hs
Aula 2 Apresentar de forma clara e objetiva os principais fenômenos ondulatórios, desde fatos que acontece na natureza bem como através de experimentos que ocorrem em nosso cotidiano.	- Nessa fase, abordaremos a diferença entre amplitude e comprimento de onda, frequência, período e velocidade de uma onda, ondas transversais e longitudinais.	2h30min.
Aula 3 Estudo do Som	- Comportamento do som; - Propagação do som; - Altura/tom, intensidade e timbre; - Fenômenos sonoros e; - Ressonância.	2h30min

Aula 4 Segundo questionário	Aplicação do segundo questionário.	1h
Aula 5 Aplicação do produto	- Neste momento, os alunos deverão observar a formação de imagens através de uma membrana vibrando, realizando o experimento das “ <u>Figuras de Chladni</u> ”.	1h40min.
Aula 6 Reaplicação do primeiro questionário.	Alunos refazendo o primeiro questionário	1h40min.

6. DETALHAMENTO DAS AULAS DIDÁTICAS

“Apresentação do produto e introdução à mecânica ondulatória”

6.1 - AULA 01

TÍTULO – APRESENTAÇÃO DO PRODUTO E INTRODUÇÃO A ONDULATÓRIA

JUSTIFICATIVA:

Sabendo que os alunos dos anos finais do Ensino Fundamental, dentre eles o 9º ano, sabem pouco ou quase nada sobre ondulatória, por essa razão, foi preciso fazer um levantamento prévio com o objetivo de conhecer os subsunçores da estrutura cognitiva dos mesmos, com a finalidade de entender até onde vão os seus conhecimentos e assim contribuir para adquiri-los ou aperfeiçoá-los.

OBJETIVO GERAL

Apresentar de forma clara e objetiva os principais fenômenos ondulatórios, desde fatos que acontece na natureza bem como através de experimentos que ocorrem em nosso cotidiano.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Compreender o conceito de onda;
- Identificar o som como um tipo de onda mecânica;
- Aprender o conceito e as características do som.

RECURSOS METODOLÓGICOS

- Data show;
- Marcadores para quadro branco.

DESENVOLVIMENTO DAS ATIVIDADES

No primeiro momento, iremos apresentar a ideia do Produto, mostrando o caminho que será percorrido, desde a introdução até o resultado final esperado. Na segunda parte, os alunos serão sabatinados com perguntas relacionados à ondulatória (Acústica), em seguida, eles irão responder um questionário que abordarão questões do seu cotidiano, com o intuito de saber até onde vão seus conhecimentos prévios sobre o assunto abordado.

AVALIAÇÃO

Nessa primeira avaliação, os alunos serão avaliados a partir de sua participação e de seus questionamentos sobre o assunto abordado da disciplina e responderão a um diagnóstico sobre o mesmo em sala de aula.

6.2 - AULA 02

TÍTULO – ANALISANDO OS PRINCIPAIS FENÔMENOS ONDULATÓRIO.

JUSTIFICATIVA:

Sabendo que os alunos dos anos finais do Ensino Fundamental, dentre eles o 9º ano, sabem pouco ou quase nada sobre ondulatória, por essa razão, foi preciso fazer um levantamento prévio com o objetivo de conhecer os subsunçores da estrutura cognitivas dos mesmos, com a finalidade de entender até onde vão os seus conhecimentos e assim contribuir para adquiri-los ou aperfeiçoá-los.

OBJETIVO GERAL

Discutir os principais processos de produção das ondas mecânicas

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar as principais características de uma onda;
- Relacionar as características de uma onda com as características do som;
- Compreender basicamente como os instrumentos musicais funcionam;
- Entender a reflexão do som e o significado do eco.

RECURSOS METODOLÓGICOS

- Data show;
- Marcadores para quadro branco;
- Mola de metal;
- Corda;
- Fita;
- Haste e base de metal.

DESENVOLVIMENTO DAS ATIVIDADES

Nessa atividade, os alunos irão conhecer os principais elementos que compõe uma onda, dentre eles podemos destacar; o pulso, comprimento de onda, velocidade, amplitude, período, frequência, dentre outros. Além de diferenciar uma onda longitudinal e transversal, bem como observar como uma onda se propaga em várias direções, tudo isso através de experimentos com corda e mola de metal. Sendo o objetivo final é que o aluno compreenda que ondas são perturbações que se propagam por um meio qualquer transportando energia sem transportar matéria.

AValiação

Os alunos serão avaliados através da participação das aulas teóricas, no engajamento dos experimentos e na resolução do questionário.

6.3 - AULA 03

TÍTULO – ESTUDO DO SOM

JUSTIFICATIVA:

Sabendo que os alunos dos anos finais do Ensino Fundamental, dentre eles o 9º ano, sabem pouco ou quase nada sobre acústica, por essa razão, foi preciso fazer um levantamento prévio com o objetivo de conhecer os subsunçores da estrutura cognitivas dos mesmos, com a finalidade de entender até onde vão os seus conhecimentos e assim contribuir para adquiri-los ou aperfeiçoá-los.

OBJETIVO GERAL

Diferenciar os principais tipos de sons e suas causas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aprender o conceito e as características do som;
- Diferenciar sons agudos e sons graves;
- Diferenciar timbre, altura e volume (intensidade) do som.

RECURSOS METODOLÓGICOS

- Data show;
- Marcadores para quadro branco;
- PHET simuladores.

DESENVOLVIMENTO DAS ATIVIDADES

Nessa etapa, os alunos irão observar os principais tipo de som e suas consequências, com demonstração através do software do PHET simuladores. (https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/sound)

AValiação

Nessa primeira avaliação, os alunos serão avaliados a partir de sua participação e de seus questionamentos sobre o assunto abordado da disciplina e responderão a um diagnóstico sobre o mesmo em sala de aula.

6.4 - AULA 04

TÍTULO – APLICAÇÃO DO SEGUNDO QUESTIONÁRIO

JUSTIFICATIVA:

Sabendo que os alunos dos anos finais do Ensino Fundamental, dentre eles o 9º ano, sabem pouco ou quase nada sobre ondulatória, por essa razão, foi preciso fazer um levantamento prévio com o objetivo de conhecer os subsunçores da estrutura cognitivas dos mesmos, com a finalidade de entender até onde vão os seus conhecimentos e assim contribuir para adquiri-los ou aperfeiçoá-los.

OBJETIVO GERAL

Analisar os conhecimentos dos alunos sobre Acústica através de um questionário.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Compreender o conceito de Acústica;
- Aprender o conceito e as características do som.

RECURSOS METODOLÓGICOS

- Ficha de exercício

DESENVOLVIMENTO DAS ATIVIDADES

Nessa atividade, os alunos serão submetidos a mais um questionário, onde eles irão responder sobre o comportamento do som e suas características. Nesse questionário serão abordadas 10 questões subjetivas relacionada à acústica.

AVALIAÇÃO

Nessa segunda avaliação, os alunos serão avaliados a partir de sua participação e de seus questionamentos sobre o assunto abordado no questionário realizado em sala de aula.

6.5 - AULA 05

TÍTULO – DEMONSTRAÇÃO DO PRODUTO - AS FIGURAS DE CHLADNI.

JUSTIFICATIVA:

Em virtude dos alunos do 9º ano do Ensino fundamental ainda não ter afinidade com a Física, a aplicação do Produto consta apenas da parte prática e não se deteve aos cálculos matemáticos.

OBJETIVO GERAL

Discutir os principais processos de formações das Figuras de Chladni através do experimento de ressonância.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Visualizar as principais Figuras de Chladni através da ressonância em placas vibrantes com diferentes geometrias;
- Analisar as principais características das Figuras de Chladni observadas nas placas vibrantes.

6.6 - AULA 06

TÍTULO – REAPLICAÇÃO DO PRIMEIRO QUESTIONÁRIO

JUSTIFICATIVA:

Com a ampliação do Produto e realizada de todas as etapas, observamos que os resultados obtidos neste trabalho evidenciam a importância de uma metodologia de ensino que leve em conta os conhecimentos dos alunos, e nesse contexto foi realizado

uma reaplicação do primeiro questionário o “questionário de sondagem”, onde tentamos associar os conhecimentos estudados com a prática, despertando neles o senso crítico, tornando o Ensino de Física mais significativo e menos abstrato.

OBJETIVO GERAL

Analisar de forma clara, os conhecimentos adquiridos durante as aulas ministradas sobre Ondulatória e Acústica.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Observar com clareza os conhecimentos adquiridos durante as aulas;
- Verificar até que ponto os conhecimentos foram absorvidos.

RECURSOS METODOLÓGICOS

- Ficha de exercício

DESENVOLVIMENTO DAS ATIVIDADES

Nessa atividade, os alunos foram submetidos a refazerem o questionário de sondagem, onde o objetivo é verificar até que ponto eles conseguiram absorver os novos conhecimentos adquiridos sobre Ondulatória e Acústica.

AVALIAÇÃO

Os alunos serão avaliados através da reaplicação do primeiro questionário.

7. APLICAÇÃO DO PRODUTO NA ESCOLA

Neste Capítulo apresentaremos o passo a passo da aplicação do produto na escola municipal Professora Janise dos Santos Oliveira, localizada no povoado de Natuba, município de Vitória de Santo Antão, interior de Pernambuco. A atividade foi aplicada em uma turma de alunos do 9º ano do ensino fundamental. Nas fotos 01, 02 e 03 abaixo vemos alguns espaços da escola onde a atividade foi desenvolvida.



Foto 01 – Fachada da Escola.

Foto 02 – Pátio da Escola.



Foto 03 - Sala de aula do 9º ano.

A escola possui 07 (sete) salas de aulas, além das repartições administrativas; porém não dispõe de biblioteca e nem de um laboratório de ciências. Nessa última questão, as atividades voltadas para aulas práticas são realizadas em salas de aula ou no pátio da escola. A escola funciona de segunda à sexta, das 07hs às 17:20hs, sendo o

período matutino com as turmas do infantil ao 5º ano do ensino fundamental e no horário vespertino, com as turmas do 6º ao 9º ano do ensino fundamental.

A proposta didática foi aplicada com uma turma de alunos do 9º ano e foi dividida em seis aulas, sendo a primeira dedicada à apresentação do produto e aplicação de um questionário de sondagem, com o objetivo de conhecer os conhecimentos prévios dos alunos, ou seja, seus subsunçores, de acordo com a Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel, a qual foi utilizada durante todo esse trabalho. No segundo e terceiro encontro, ocorreram com a apresentação dos conteúdos e conceitos básicos sobre ondulatória e acústica para a turma de alunos. No quarto encontro, aplicamos um segundo questionário de avaliação e sondagem da aprendizagem; já no quinto encontro, realizamos a aplicação propriamente dita do produto confeccionado neste trabalho, sendo aplicado novamente o primeiro questionário de sondagem e avaliação como atividade de fechamento no sexto encontro, sendo realizada em seguida a culminância do ciclo das atividades.

Aula 01 – Apresentação do produto e aplicação do questionário de sondagem

O primeiro encontro aconteceu em sala de aula, com a apresentação do produto e discussão dos seus objetivos. Em seguida foi aplicado um primeiro questionário de sondagem contendo dez (10) questões que abordam os conceitos e conhecimentos prévios dos alunos sobre ondulatória e acústica. A turma era composta de 18 alunos, sendo esses residentes na própria comunidade e em sítios circunvizinhos. Nas fotos 04, 05 e 06 vemos o momento de aplicação do questionário de sondagem em sala de aula.



Foto 04 – Aplicação do primeiro questionário de sondagem.



Foto 05 – Aplicação do primeiro questionário de sondagem.



Foto 06 – Aplicação do primeiro questionário de sondagem.

O questionário de sondagem traz questões com pouco grau de dificuldade. Em algumas perguntas os alunos tinham noção da resposta, porém não conseguiam responder plenamente ao questionamento apresentado. Diante dessas dificuldades apresentadas por alguns alunos, foi traçado um plano de ensino mais adequado, para eles receberem as noções sobre ondulatória e acústica.

As questões abordadas no primeiro questionário foram:

1. O que os fatos de jogar uma pedra no lago e apertar o botão de um controle remoto têm em comum?

2. O que a pedra lançada e o controle remoto transferem para o meio de propagação?

3. O que um simples balanço e a ponte de Tacoma têm em comum? Será há ressonância ou não tem nada haver? Justifique sua resposta.

4. Trovão x relâmpago (velocidade do som x velocidade da luz), qual é a diferença entre eles?

5. Por que o violão tem que ter uma caixa acústica?

6. O que acontece quando passamos o dedo molhado numa Taça de cristal

7. Quando se fala "*ele rompeu a barreira do som*", o que isso quer dizer?

8. Qual é o nome do aparelho que medi o som? E por que ele recebe esse nome?

9. Por que não escutamos som no espaço?

10. O que significa ultrassom e infrassom?

Os resultados do primeiro questionário estão no gráfico 01 abaixo.

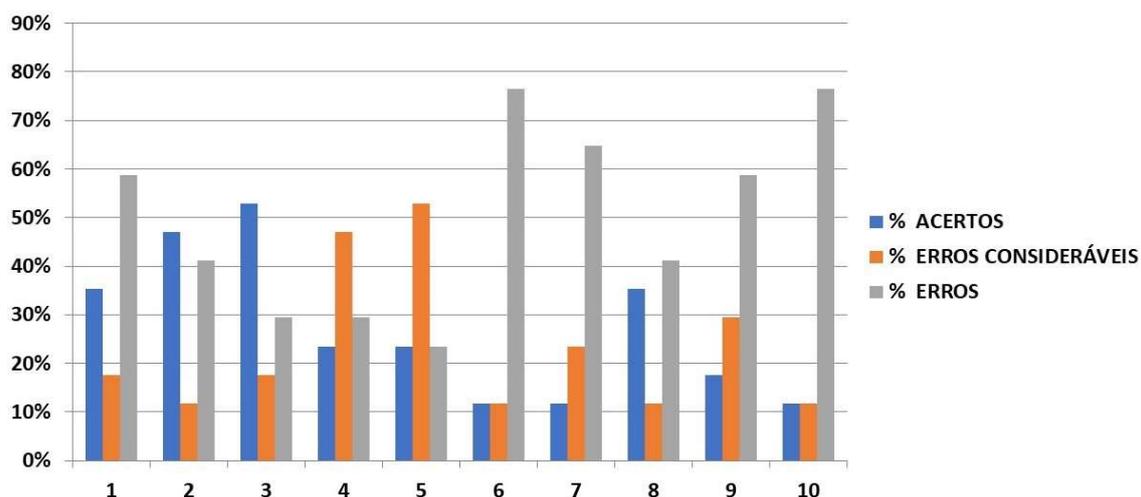


Gráfico 01 - Resultado da aplicação do questionário de sondagem em porcentagem de acertos.

O gráfico 01 mostra o resultado do questionário, através da porcentagem das respostas dos estudantes no teste de sondagem do primeiro encontro. Nele é possível comparar as porcentagens de acertos, erros consideráveis (acertos parciais) e erros.

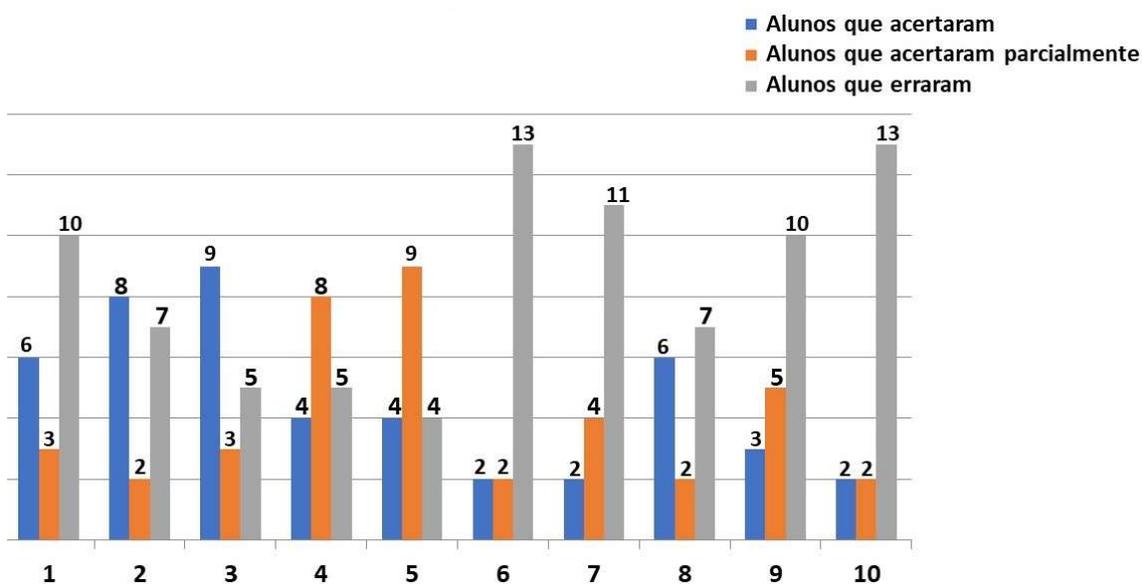


Gráfico 02 - Resultado da aplicação do questionário de sondagem analisado por número de acertos, erros considerados e erros

Já no gráfico 02 é possível verificar a quantidade de acertos, erros consideráveis (acertos parciais) e erros em cada questão, onde podemos notar nesse primeiro momento que os estudantes possuem pouco ou quase nenhum conhecimento sobre o assunto.

Aula 02: Introdução teórica sobre mecânica ondulatória e acústica

No segundo encontro com os alunos, tivemos aula teórica sobre ondulatória e acústica. Durante esse segundo momento, abordamos os seguintes conceitos: amplitude, comprimento de onda, período, frequência e velocidade de propagação das ondas. Discutimos ainda as diferenças entre as ondas transversais e longitudinais.

Aula 03: Aula prática sobre ondulatória e acústica

No terceiro encontro, os alunos tiveram aula prática sobre ondulatória e acústica, com ênfase na propagação do som, altura/tom, intensidade e timbre; além de explorar o fenômeno sonoro da ressonância; tudo isso através de demonstrações práticas com experimentos didáticos simples utilizando uma mola, uma taça de vidro e uma corda esticada, todos os materiais utilizados foram de fácil acesso e de baixo custo.

Nas fotos 07, 08, 09, 10 e 11 vemos a realização das atividades práticas em sala de aula com a turma de alunos. Já na foto 12 vemos a turma de alunos respondendo o segundo questionário avaliativo.



Foto 07 – Mola em aço para trabalhar os conceitos de período e frequência de uma onda.



Foto 08 – Analisando o período, o comprimento de onda e a frequência de uma onda mecânica.



Foto 09 – Propagação de uma onda transversal.



Foto 10 – Propagação de uma onda longitudinal.



Foto 11 - Analisando a ressonância em uma taça de vidro.



Foto 12 – Aplicação do segundo questionário avaliativo.

Aula 04: Aplicação do segundo questionário

Um segundo questionário avaliativo foi aplicado à turma (questionário 2). Nesse questionário, os assuntos abordados são direcionados à temática “Acústica”.

11. O que você entende por onda mecânica?

12. Como você define ondas transversais e longitudinais?

13. O que é acústica?

14. Como você define reflexão do som como significado do eco?

15. O que difere a voz feminina da masculina?

16. O que uma onda pode transportar?

17. Quando uma pedra é arremessada sobre um lago, forma-se um pulso que se propaga por sua superfície. Esse pulso é transversal ou longitudinal?

18. Qual a diferença entre amplitude e comprimento de onda?

19. Como os morcegos se orientam?

20. Agora, diferencie timbre, intensidade e frequência.

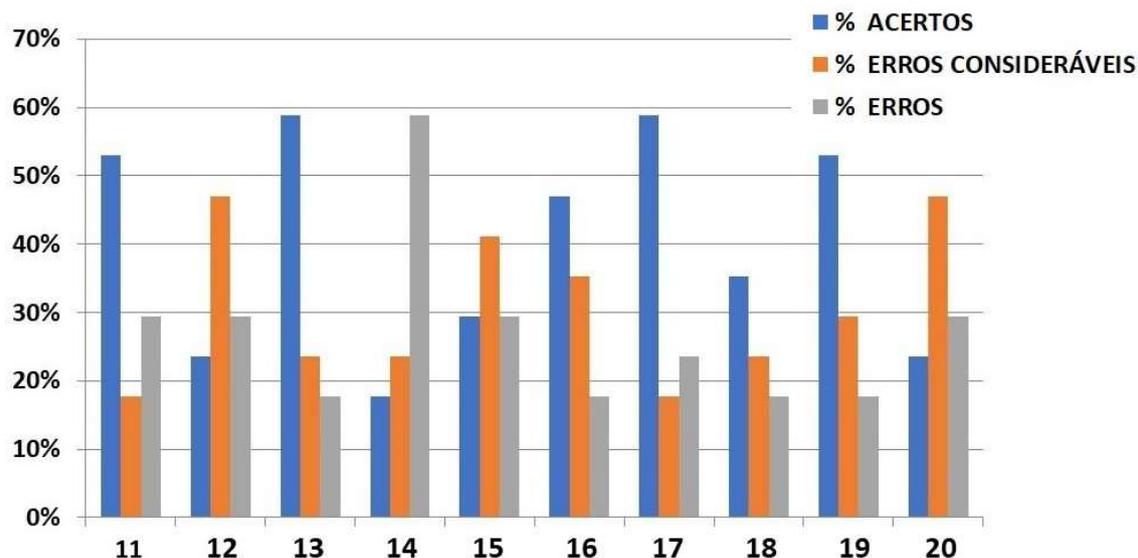


Gráfico 03 – Resultado da aplicação do II questionário.

O gráfico 03 exibe um aumento considerável no conhecimento dos estudantes em números da porcentagem de acertos, quando comparado com o gráfico 01.

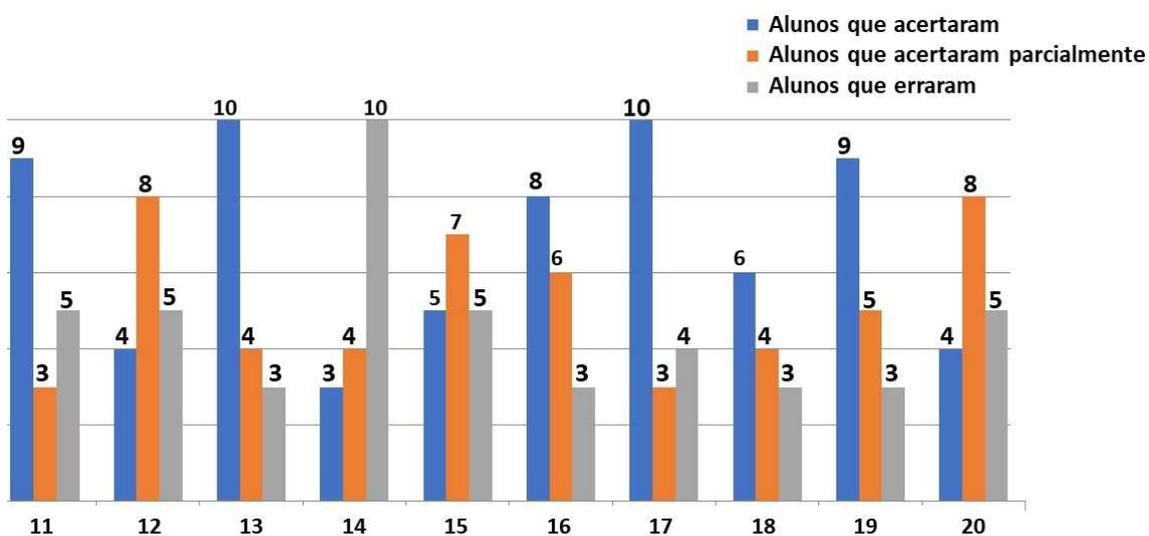


Gráfico 04 - Resultado da aplicação do segundo questionário analisado por número de acertos, erros considerados e erros.

Analisando agora o gráfico 04 e comparando com o gráfico 02, houve um aumento significativo em relação ao número de acertos nas questões abordadas no segundo questionário, isso tornou a aprendizagem dos alunos mais significativa, associando a teoria e a prática nas aulas.

Aula 05: Aplicação do Produto em sala de aula

No quinto encontro, os alunos tiveram acesso ao produto, onde eles puderam manusear e observar a formação das figuras geométricas através da realização do experimento de Chladni com os três modelos de placas disponíveis. As placas vibram através da ressonância produzida pelo modulador de frequência acoplado ao alto-falante. Nas fotos 13, 14, 15, 16 e 17 vemos a turma de alunos realizando o experimento e aplicando na prática o produto educacional desenvolvido neste trabalho.

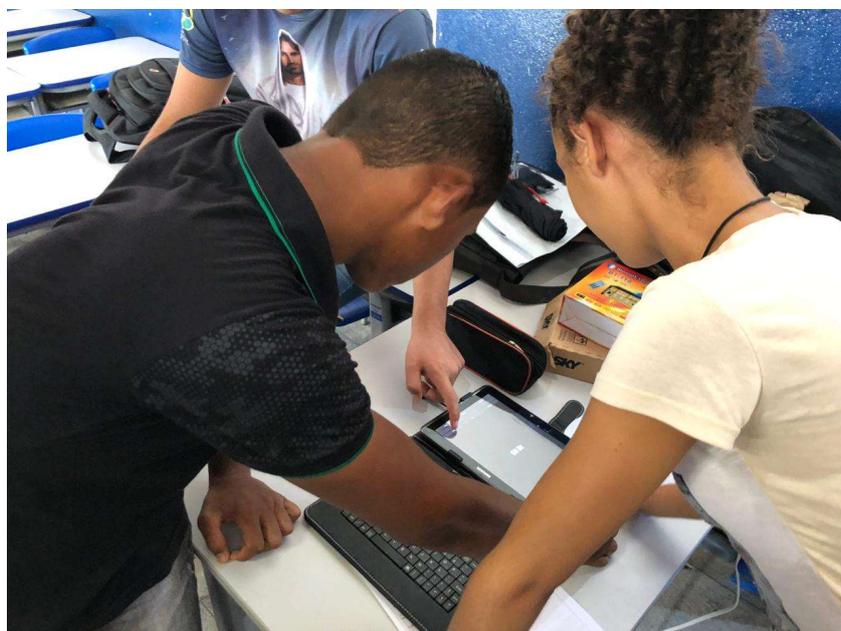


Foto 13 – Alunos definindo a frequência de operação do experimento no computador portátil.



Foto 14 – Polvilhando a placa circular com areia e observando a formação das Figuras de Chladni.



Foto 15 - Polvilhando a placa triangular com areia e observando a formação das Figuras de Chladni.



Foto 16 - Polvilhando a placa quadrada com areia e observando a formação das Figuras de Chladni.



Foto 17 – Figura de Chladni formada em placa quadrada de acrílico.

Aula 06: Reaplicação do questionário de sondagem de aprendizagem

Como último encontro, os alunos foram submetidos a mais um questionário avaliativo, sendo aplicado novamente o primeiro questionário, com a finalidade de sondar se os alunos entenderam os conteúdos abordados neste ciclo de aulas. As fotos 18, 19 e 20 mostram a turma de alunos realizando esta atividade.



Foto 18 – Atividade avaliativa de culminância.



Foto 19 – Turma de alunos realizando a atividade avaliativa de culminância.



Foto 20 – Alunos respondendo novamente o primeiro questionário avaliativo.

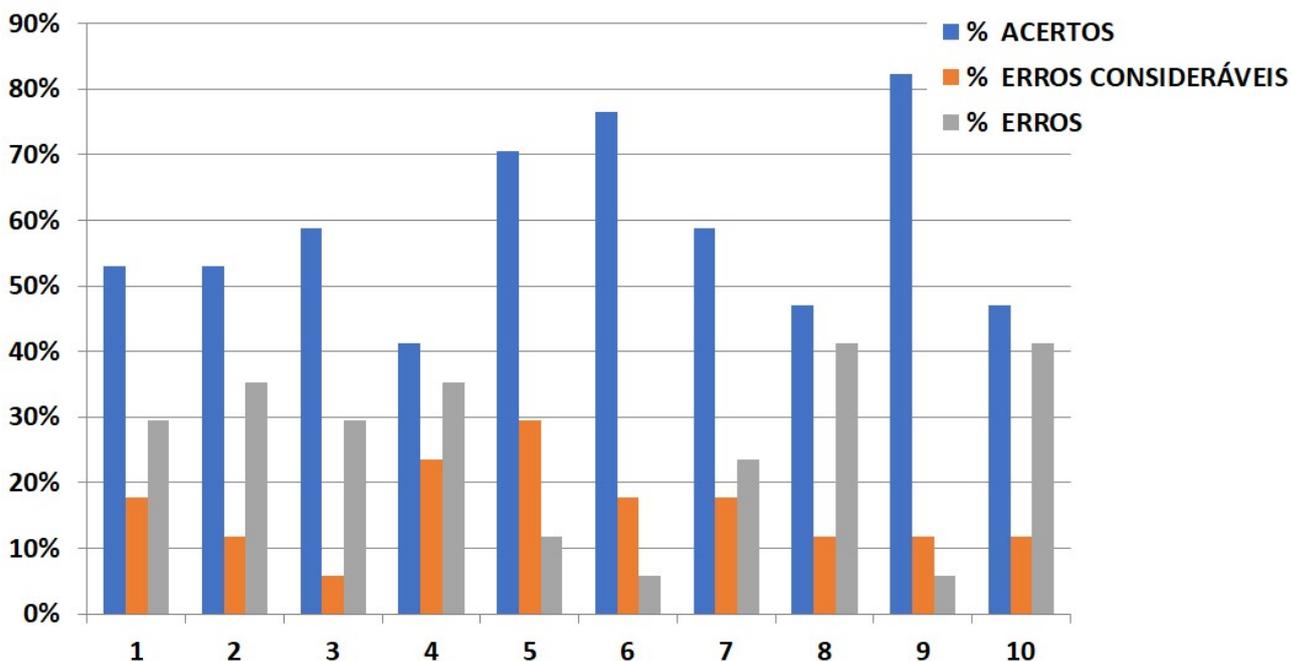


Gráfico 05 - Resultado da segunda aplicação do primeiro questionário em porcentagem de acertos.

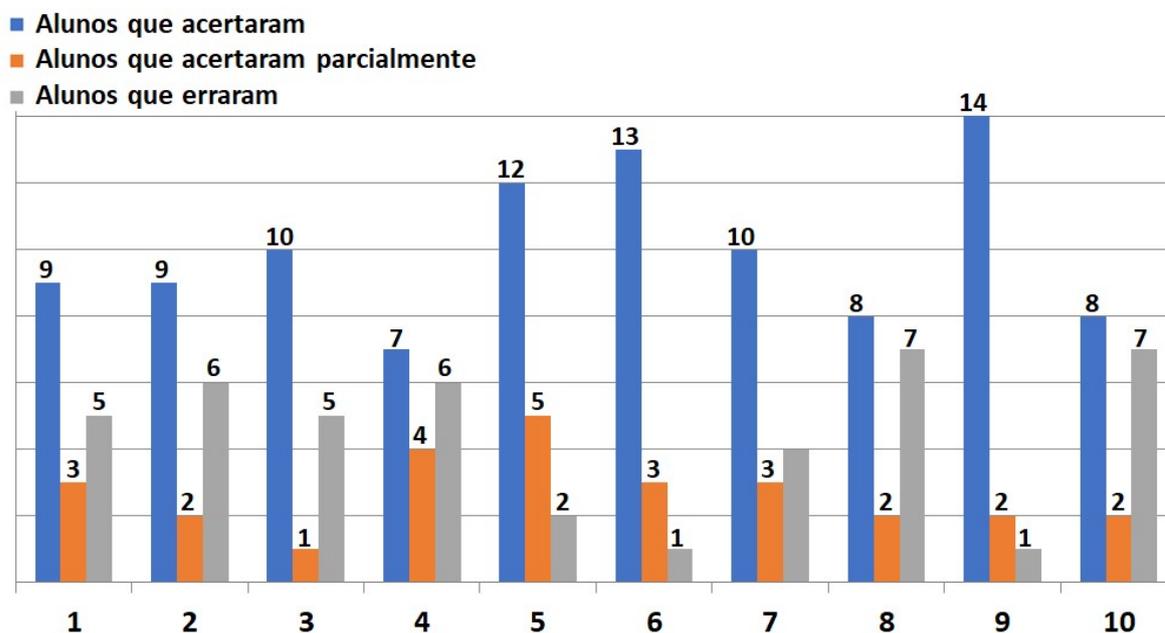


Gráfico 06 - Resultado de uma nova aplicação do primeiro questionário analisado.

Nos gráficos 05 e 06, podemos comparar os resultados com os gráficos 01 e 02, pois, foi realizado a reaplicação do 01 questionário, nesse caso e podemos certificar que quando trabalhamos a aprendizagem significativa levando em consideração as noções prévia dos alunos, resultados aparecem de uma forma mais persuasivo.

8. CONCLUSÕES

Esta dissertação de mestrado estudou a aplicação das Figuras de Chladni no ensino de conceitos introdutórios de ondulatória e acústica para uma turma de alunos do 9º ano do Ensino Fundamental de uma escola pública localizada no interior do Estado de Pernambuco.

Este trabalho foi embasado pela Teoria de Aprendizagem Significativa de David Ausubel, a qual prevê que a aprendizagem prévia e a estrutura cognitiva dos alunos devem ser consideradas pelo professor no planejamento e na aplicação da sua aula didática no dia a dia da rotina escolar.

O trabalho apresentado aqui com a aplicação prática do produto desenvolvido na Dissertação de mestrado teve uma grande importância na construção do conhecimento na turma de alunos do ensino fundamental, pois foi possível demonstrar para eles os conceitos básicos de ondulatória e acústica, de forma prática e contextualizada. Com as atividades realizadas em sala de aula, os alunos puderam acompanhar de maneira clara e objetiva os eventos apresentados aqui, de forma que eles puderam associar os conhecimentos físicos adquiridos com sua realidade e aplicá-los ao seu cotidiano.

Foi notório e plausível que os alunos do 9º ano do ensino fundamental aceitaram bem a aplicação deste projeto, cada um dando o melhor de si para que a experiência fosse um sucesso. Foi possível observar nas falas dos alunos quanto o ensino de Física pode ficar mais fácil e divertido quando conduzido dessa forma. Podemos destacar a importância das aulas práticas para motivar e despertar o interesse dos alunos pela aprendizagem da Física.

09. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARFKEN, G. B.; WEBER, H. J. Física Matemática: Métodos Matemáticos para Física e Engenharia. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

AUSUBEL, D. P. Aquisição e Retenção de Conhecimentos: Uma Perspectiva Cognitiva. 1ª. ed. [S.l.]: Paralelo Editora, 2000.

BRASIL. Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional, Lei nº. 9.394, de 20 de dezembro de 1996.

BUTKOV, E. Física Matemática. Rio de Janeiro: LTC, 1988.

COMSOL, Tutorial: Vibrating Membranes, 2019. Disponível em: <https://br.comsol.com/model/vibrating-membrane-12587>. Acesso em 05/12/2019.

GEWANDSZNAJDER, Fernando – Projeto Teláris: Ciências Ensino fundamental 9º ano. 2ª edição. Editora Ática. São Paulo, 2015.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. - Fundamentos de Física, volume 2 : gravitação, ondas e termodinâmica, 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

JEWETT, J.; SERWAY, R. Física para cientistas e engenheiros. Oscilações, ondas e termodinâmica. Vol. 2, São Paulo, 2011.

LEISSA, A.W. Vibration of Plates. NASA SP-160, NASA, Washington D.C., 1969.

LOPES, J. B. Aprender e Ensinar Física. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2004.

MASSMANN, H.; FERRER, R. Instrumentos Musicales. Artesania y Ciencia. Editora Dolmen. Chile, 1993.

MOREIRA, M.A; Aprendizagem Significativa – A Teoria de David Ausubel, 2ª edição. São Paulo: Centauro Editora, página 61, 2016.

MOREIRA, M.A; Aprendizagem Significativa – A teoria e texto complementares, 1ª Edição. São Paulo: LF Editorial, páginas 38-39, 2012.

NAMDARI, N.; DEGHAN, A. Natural Frequencies and Mode Shapes for Vibrations of Rectangular and Circular Membranes: A Numerical Study. *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*, Vol. 3, Issue 2, pp. 30-34, 2018.

NUSSENZVEIG, H. M. Curso de física básica. 5ª. Edição, Editora Edgard Blücher, volume 2, São Paulo, 2014.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. A Física na Formação de Professores do Ensino Fundamental. Editora da UFRGS, 1999.

PCN, Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio, 1997. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/ciencian.pdf> . Acesso em 05/12/2019.

PETRAGLIA, M. S. Figuras Sonoras de Chladni. Instituto OuvirAtivo. Música e Desenvolvimento Humano, 2014. Disponível em:

<https://www.yumpu.com/pt/document/read/25091594/figuras-sonoras-de-chladni-ouvirativo>

Acesso em 05/12/2019.

ROSSING, T. D. Chladni's Law for Vibrating Plates. *American Journal of Physics*. Volume 50, no. 3, 1982.

ROSSING, T. D. *The Science of String Instruments*. Stanford, Editora Spring, pp. 23-24, 2010.

SILVA, Waldecy de Oliveira, Uma sequência de aulas para o estudo de ondas com auxílio das Figuras de Chladni, Universidade Federal de Roraima Pró-reitoria de pesquisa e Pós-graduação Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física. Visitada no dia 16 de janeiro de 2019. Disponível em:

<http://www1.fisica.org.br/mnpef/uma-sequ%C3%Aancia-de-aulas-para-o-estudo-de-ondas-com-aux%C3%ADlio-das-figuras-de-chladni>

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. Física II: Termodinâmica e Ondas. 14ª edição. Editora Pearson, São Paulo, 2015.