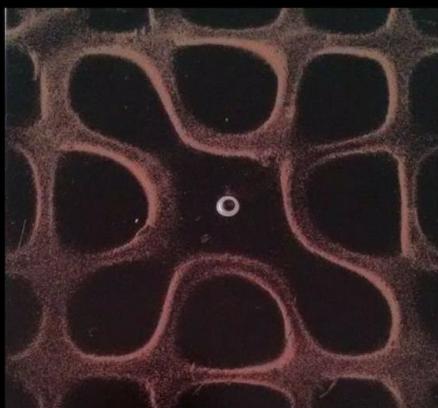
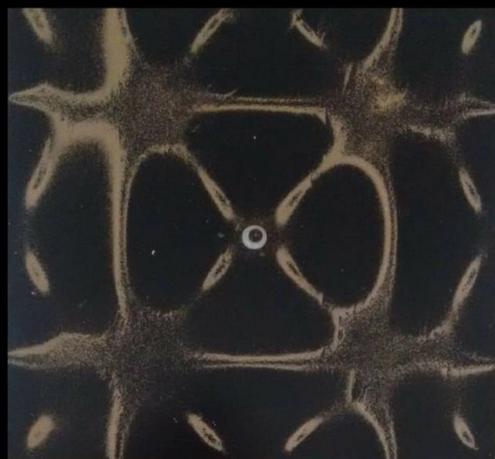


## Produto Educacional



### PRODUTO EDUCACIONAL - CIÊNCIAS PPGEN - MESTRADO PROFISSIONAL EM ENSINO DE CIÊNCIAS SOCIAIS, HUMANAS E DA NATUREZA



*Fonte: O autor (2018)*

ROBERT SIMÃO DOS SANTOS

## **PADRÕES SONOROS DE CHLADNI**

Produto educacional apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ensino de Ciências Humanas, Sociais e da Natureza, do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Humanas, Sociais e da Natureza, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Área de Concentração: Ensino de Ciências da Natureza e Novas Tecnologias.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio de Camargo Filho

**LONDRINA  
2018**

## TERMO DE LICENCIAMENTO

Este Produto Educacional estão licenciados sob uma Licença Creative Commons *atribuição uso não-comercial/compartilhamento sob a mesma licença 4.0 Brasil*. Para ver uma cópia desta licença, visite o endereço <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> ou envie uma carta para Creative Commons, 171 Second Street, Suite 300, San Francisco, Califórnia 94105, USA.



## Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>5</b>
<b>2 QUEM FOI CHLADNI?</b> .....	<b>7</b>
<b>3 MATERIAS E PROCEDIMENTOS</b> .....	<b>11</b>
3.1 MATERIAIS NECESSÁRIOS PARA O MODELO BÁSICO.....	11
3.2 MATERIAIS NECESSÁRIOS PARA O MODELO ADAPTADO COM O GERADOR DE FREQUÊNCIAS .....	12
3.3 MONTAGEM.....	12
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>17</b>
4.1 PRIMEIRO EXPERIMENTO: EM PLACA DE ALUMÍNIO.....	17
4.2 REPLICAÇÃO DO EXPERIMENTO: EM PLACA DE INOX.....	24
4.3 TESTE FINAL EM PLACA DE ALUMÍNIO.....	29
<b>5 CONSIDERAÇÕES</b> .....	<b>35</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>36</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Quando compramos algum, produto seja ele eletrônico, ou não, esperamos que venha com um folheto ou alguma instrução que nos guie corretamente sobre a forma de utilizar e dependendo do produto, como devemos consumi-lo ou conservar. Isso é comum em receitas médicas, em pipocas para micro-ondas, na maioria dos aparelhos eletrônicos do gênero. Enfim em quase tudo o que compramos ou consumimos. Norman (2002), faz referência sobre a interação entre manuais, interfaces e objetos, mostrando que muitos dos produtos que consumimos ou fazemos uso não é intuitivo. Sabe aquele clichê popular *“Tem Doutorado, mas não saber ligar o Datashow”*, pois é, Norman (2002) vai tratar sobre este assunto, a respeito da dificuldade de lidar com aparelhos eletrônicos e uma infinidade de outros exemplos que não necessariamente seja tecnológico. Norman (2002) faz uma leitura de como a tecnologia avançou, mas nossa linguagem tanto visual e perceptiva, ainda precisa de pistas para compreender o funcionamento das coisas.

Quando você tem dificuldade com uma coisa qualquer – quer seja descobrir se deve puxar ou empurrar uma porta ou os caprichos arbitrários do computador e da indústria eletrônica moderna, não é sua culpa. Não ponha a culpa em si mesmo, ponha a culpa no designer. A falha é da tecnologia ou, mais precisamente, do design (NORMAN, 2002, p.10).

O que Norman defende é que se um objeto ou aparelho eletrônico, tem um grau complexidade mais baixa, ou é quase intuitivo, um manual de instrução com muitos detalhes é desnecessário, e revelaria a falta de linguagem apropriada para o usuário. “Um bom design sempre se assegura de que as ações apropriadas sejam perceptíveis e as inapropriadas, invisíveis” (NORMAN, 2002, p. 13). Este problema é persistente em vários assuntos. Apesar das afirmações de Norman, temos exemplos da infinidade de livros didáticos, que as vezes mais nublam o entendimento do que esclarece. Cada autor publica na percepção que ele tem sobre o assunto. A questão é que cada indivíduo tem características distintas, e assim deixa muito confusos ou frustrados.

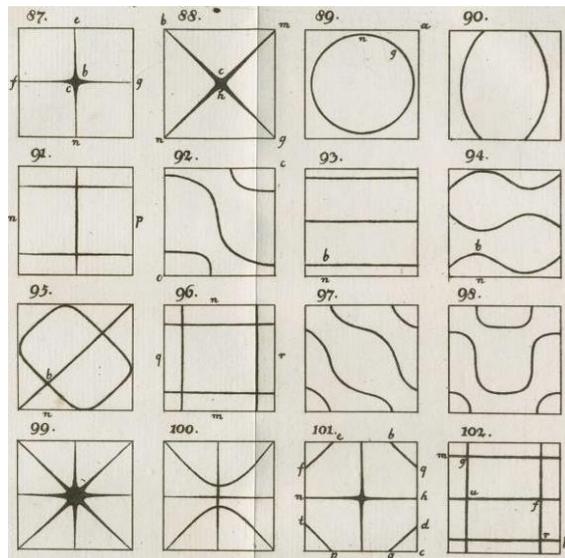
Este produto educacional: “Figuras Sonoras de Chladni”, trata-se de um manual de como construir, e fazer o experimento de Acústica inventado por Chladni

no século XVII. Além de ser uma bela demonstração de como ondas sonoras tridimensionais formam padrões bidimensionais que emergem de regiões nodais (região sem vibração) em placas ou superfícies planas. Ele buscou contribuir para as aulas experimentais de professores de ciências e interessados.

Este manual, é voltado para qualquer pessoa que queira conhecer um pouco mais sobre conceitos de ressonâncias, frequência e ondas estacionária. Não se trata de um livro, de física, mas de um roteiro experimental, que guiará o leitor desde a história do experimento proposto neste manual, bem como sua construção e resultados, perfazendo uma gama de padrões obtidos em laboratório com diferentes materiais.

## 2 QUEM FOI CHLADNI?

“Ernst Florens Friedrich Chladni, físico e músico alemão que nasceu em Wittenberg em 1756 Seu estudo acumulou um compêndio de registros das figuras, como as da (Figura 1), formadas com areia sobre uma placa de bronze. Sobre estes registros Chladni publicou o livro *Entdeckungen über die Theorie des Klanges* (Descobertas sobre a Teoria do Som), em 1787”. (SANTOS; FILHO; ROCHA, 2018, p. e2602-3).



**Figura 1 - Padrões obtidos por Chladni com areia sobre a placa vibrante.**  
**Fonte: Chladni, 1787, p.108-109.**

Chladni veio de uma família tradicional protestante, que não viam a ciência com bons olhos temendo que Chladni se afastasse dos dogmas religiosos.

Sob influência de seu pai, Chladni estudou direito e filosofia, vindo a graduar-se em Filosofia (bem como Geografia Matemática e Física, Biologia e Geometria) em 1781 na Universidade de Leipzig e em direito em 1782, na mesma universidade foi por esta época que mudou seu sobrenome de Chladenius para Chladni. Após o seu regresso a Wittenberg, seu pai arranhou uma posição de advogado para ele. (ULLMAN, 2007, p. 107. Tradução nossa).

Como a morte de seu pai em 1782, Chladni muda drasticamente seu estilo de vida, livrando-se das tradições familiares que por muitas vezes eram impostas pelo seu pai, e passou então a estudar acústica, assunto que “chamara a atenção por contas das influencias de colegas durante a academia que eram músicos” (SATRUCKER e RUMANOVSKÝ, 1961).

Para (Santos; Filho e Rocha, 2018) este foi um dos divisores de águas para que Chladni começasse a avaliar diferentes fontes de som, tentar estabelecer a relação entre vibrações (ressonâncias) e sons emitidos

por muito tempo foi a minha principal atividade de analisar tais fontes de som, que ainda não tinham sido estudados até agora, apenas as vibrações de cordas e vibrações do ar em instrumentos de sopro foram os temas de estudos, e agora eu realizara experiências com vibrações transversais de barras, que tinha sido objeto de estudos teóricos de Leonhard Euler e Daniel Bernouilli, e depois as vibrações de placas, que eram um campo desconhecido. (ULLMANN, 2007, p. 27).

É importante ressaltar que Chladni não teve sua motivação principal em analisar padrões em superfícies planas apenas pela influência de amigos músicos, mas conforme descrevem (Santos; Filho e Rocha, 2018), Chladni teria estudado as obras de Georg Christoph Lichtenberg (cientista alemão, que descobriu o processo de xerografia utilizado nas copiadoras modernas). “[...] que em 1777 havia conseguido realizar descargas elétricas em dielétricos (materiais isolantes) através de um grande eletróforo (dispositivo construído e utilizado para gerar alta tensão de eletricidade estática por indução)” (SANTOS; FILHO; ROCHA, 2018, p. e2602-4).

Chladni viajou para Paris em 1808, 21 anos depois da sua primeira publicação que apresentava suas análises em 11 pratos com um total de 166 figuras. Lá ele apresentou seu trabalho na Academia Francesa de Ciências chamado a atenção de Napoleão

“[...] a comissão de avaliação composta pelos físicos Etienne de Lapepède, Prony, Hauy e Meuhl, Gretry e Gossec. Seu estudo foi recebido com um feedback muito positivo e Pierre-Simon Laplace, juntamente com Gay-Lussac, Alexander von Humboldt e Arago, propôs-lhe para traduzi-lo para o francês. Napoleão também estava interessado em uma demonstração dos experimentos de Chladni e convidou-o para o Palácio Tuilerie através da mediação de Laplace. Enquanto artistas de teatro eram bastante frequentemente convidados para o tribunal, o convite de um cientista era uma singularidade” (SANTOS; FILHO; ROCHA, 2018, p. e2602-4).

Um ano depois Chladni apresenta seu trabalho para Napoleão, que fica intrigado, que “pagou 6.000 francos para traduzir seu trabalho para o francês” (ULLMANN, 2007 p. 40, tradução nossa). Chladni demonstrou que vários sons

poderiam coexistir em ressonância para o mesmo corpo, isso era possível devido aos diversos padrões que eram encontrados, à medida que este material fica exposto a uma diversidade de frequências. Era bem diferente da ideia de uma corda esticada, como era o modelo de Pitágoras.

Nesta afirmação Chladni descarta o Monocórdio de Pitágoras, o instrumento que foi a base da teoria acústica e do cálculo desde a antiguidade grega; Como Chladni escreve na introdução ao seu *Akustik*: "uma corda é apenas uma espécie de corpo sonoro", entre muitos outros. Essa destituição do monocórdio e cálculos pitagóricos é a revolução de Chladni, sua modernidade. Ele abre a possibilidade de experimentar com todos os corpos vibrantes, enquanto seus padrões de som nos permitem ver sua complexa estrutura vibratória. (SANTOS; FILHO; ROCHA, 2018, p. e2602-4).

Logo no início do século dezenove um seleto grupo de físicos e matemáticos contribuíram para corroborar as pesquisas de Chladni, em diferentes materiais, inclusive a luz, conhecidos como os "Acústicos" incluíam Chladni, Thomas Young, Félix Savart, Jean-Daniel Colladon, Michael Faraday, Charles Wheatstone, Jules Antonie Lissajous, R. Mayer, entre outros. (ARCHIBALD; FRASER e GUINNESS, 2004, p. 2765, tradução nossa). Conforme Santos; Filho e Rocha (2018), este primeiro grupo se concentrou em replicar o experimento de Chladni em outros materiais, e que Chladni também havia apresentado uma solução matemática para sua pesquisa, um grupo em especial foi além e trouxe uma solução mais adequada para os fenômenos que ocorriam em regiões nodais, que Chladni demonstrara. Este grupo era formado por: "Daniel Bernoulli, Jean Le Rond d'Alembert, Leonhard Euler, Joseph Louis Lagrange, Poisson, Sophie Germain, G. Ohm, Kirchhoff, Riemann, Donkin, S. Earnshaw" (ARCHIBALD; FRASER e GUINNESS, 2004, p. 2765-2766, tradução nossa).

Com a publicação do livro *Traité d'Acoustique* em 1809 segundo (Santos; Filho e Rocha, 2018) "[...] contribuiu principalmente para entender como funcionava o ouvido e a percepção sonora e tantos outros conceitos da acústica como: Harmônicos, interferências, ondas estacionárias, nodos e antinodos frequência e escalas musicais" (SANTOS; FILHO; ROCHA, 2018, p. e2602-5). Chladni sem sombra de dúvida, teve grande influência no campo da acústica, entre os notáveis cientistas da sociedade real entre grandes nomes da filosofia e da literatura, influenciado e contemporâneos do

seu tempo escreveram sobre Chladni em seus livros e muitas ideias sobre a natureza do som foram surgindo, trazendo peso e respeito, conforme as palavras de Goethe:

“Quem irá criticar o nosso Chladni, o orgulhoso da nação? O mundo lhe deve gratidão, pois ele fez o som visível. E o que é mais distante deste assunto do que o estudo dos meteoritos? Não é só, mas que um homem engenheiro sente o ímpeto para estudar dois fenômenos naturais que estão longe um do outro e investiga os dois continuamente. Agradecemos o benefício que ganhamos com isso!” (GOETHE, 2014, p.12, tradução nossa)

### 3 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS

Neste capítulo, vamos mostrar os materiais que utilizamos para confeccionar a placa de Chladni, bem como sua montagem, recriando o modelo original de Chladni. Também vamos apresentar uma adaptação que fizemos com um gerador de frequências, disponível no laboratório da UTFPR- Campus Londrina. Valores e preços dos materiais, iremos apresentar somente a título de informação, pois em cada região pode variar os preços médios dos materiais.

#### 3.1 MATERIAIS NECESSÁRIOS PARA MODELO BÁSICO

Para construir um modelo básico da placa de Chladni, são necessários os seguintes materiais:

- 1 chapa quadrada de inox 30 cm x 30 cm, com 2 mm de espessura.
- 1 chapa quadrada de alumínio, 30 cm x 30 cm, com 2 mm de espessura.
- 1 base de madeira ou ferro com dimensões de 10 cm x 10 cm.
- 1 arco de violino, com clina de cavalo ou sintético.
- Breu para arco de violino.
- 1 haste de ferro com rosca.
- 4 porcas para rosquear a haste.
- 4 arruelas.
- Areia.

**Tabela 1 – Preço Médio dos Materiais**

<b>ITEM</b>	<b>Preço em Reais (unidade)</b>
Chapa de inox 30 x 30	R\$15,00
Chapa de alumínio 30 x 30	R\$ 15,00
Base de Madeira	R\$ 5,00
Base de Ferro	R\$ 20,00

Arco de violino, Sintético	R\$ 60,00
Arco de violino, Clina de Cavallo	R\$ 200,00
Breu para arco de violino	R\$ 25,00
Haste roscada, com arruelas e porcas	R\$ 4,00

**Fonte: Os autores (2018)**

### 3.2 MATERIAIS NECESSÁRIOS PARA O MODELO ADPATADO COM GERADOR DE FREQUENCIAS

Para construir o modelo básico usando o gerador você precisará basicamente de um gerador de frequências e uma placa de inox ou alumínio e também a areia. De preferência areia fina.

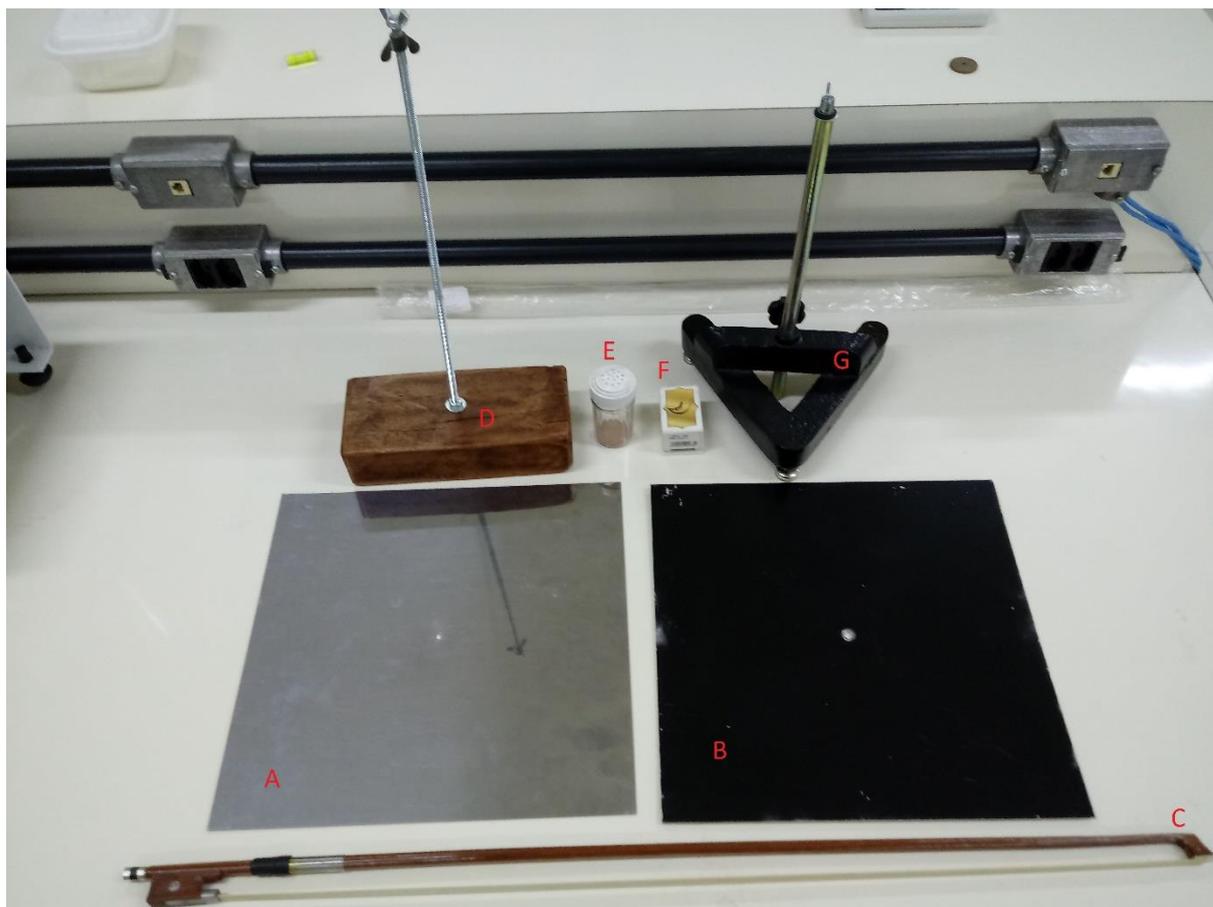
- 1 conjunto oscilador.
- 1 placa de inox ou alumínio 30 cm x 30 cm.

**Tabela 2 – Preço Médio dos materiais**

<b>ITEM</b>	<b>Preço em Reais (Unidade)</b>
Placa quadrada de inox ou alumínio	R\$ 15,00
Conjunto Oscilador	R\$ 3000,00

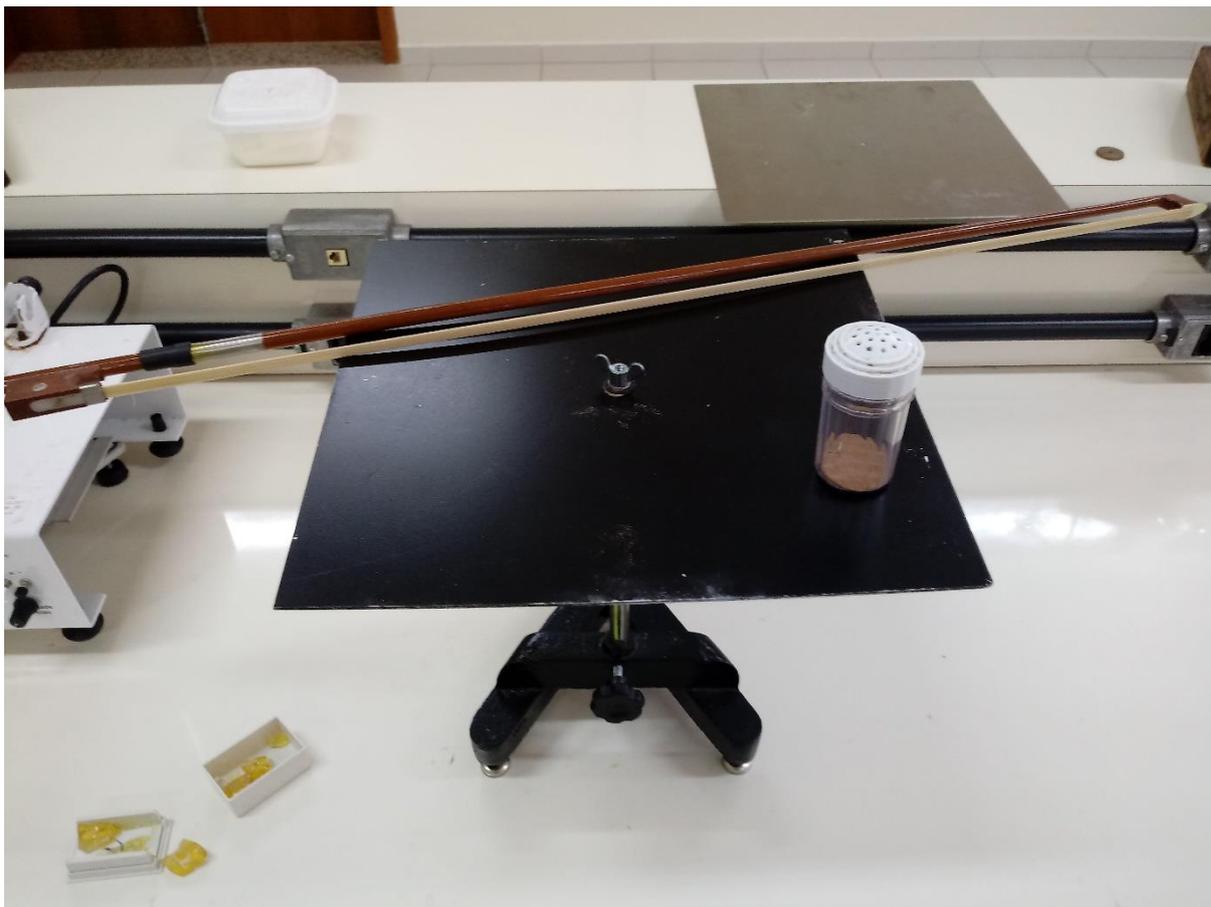
**Fonte: Os autores (2018)**

### 3.3 MONTAGEM



**Fotografia 1 – A. Placa de inox; B. Placa de Alumínio; C. Arco de violino; D. Base de madeira com haste; E. Saleiro com areia fina; F. Breu para violino; G. Base de ferro com haste.**  
**Fonte: Os autores (2018)**

Para monta você precisará dos materiais listadas que estão apresentados na fotografia 1 e forma listados na tabela 1. Deverá fixar a placa sobre a haste, espalhar areia fina. Depois deverá aplicar o breu na clina do arco de violino. E então esfregar na borda placa.



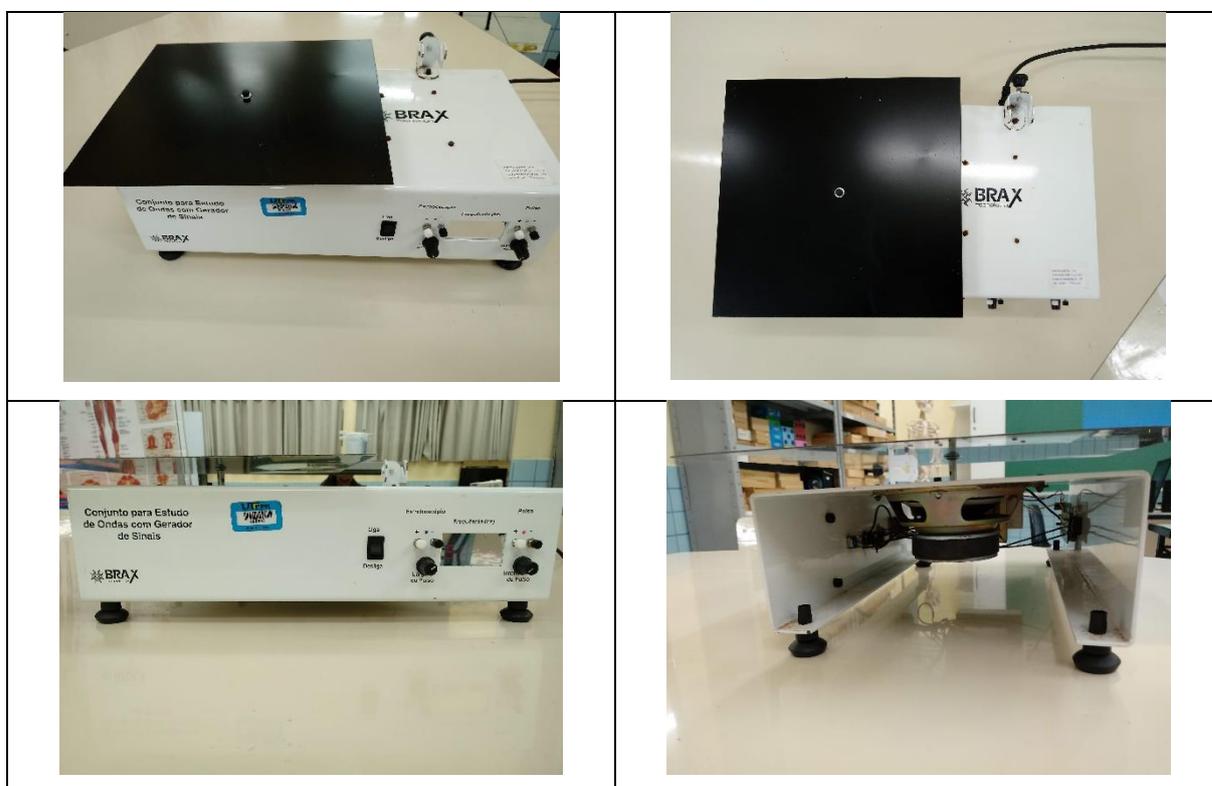
**Fotografia 1 – Montagem esquemática da placa de Chladni**  
**Fonte: Os autores (20018)**

Uma vez a placa montada, você deverá fazer uma fricção entre o arco de violino e a borda da placa de maneira que produza um som. Para isso o arco deve ter basta breu. Então não precisa economizar na quantidade breu. É importante certificar-se de que a placa esteja bem firme sobre a haste e que a base seja segura o suficiente para a placa não ficar balançando. Dependendo do ponto em que você atritar o arco, ela entrara em ressonância e começara a revelar padrões (figuras), que representam a regiões de maior e menor vibração. Para isso é muito importante, considerar num primeiro momento, praticar um pouco com o arco do violino, na placa. Está pratica só garantirá que a experiência tenha melhores resultados. Para que você compreenda nos vídeos<sup>1</sup>, que deixamos disponível no Youtube, mostra o procedimento que dizemos aqui no laboratório de física da UTFPR Campus Londrina- PR.

<sup>1</sup> [https://www.youtube.com/channel/UCyg0CCARcepW0L4fA5R2xuw?view\\_as=subscriber](https://www.youtube.com/channel/UCyg0CCARcepW0L4fA5R2xuw?view_as=subscriber)



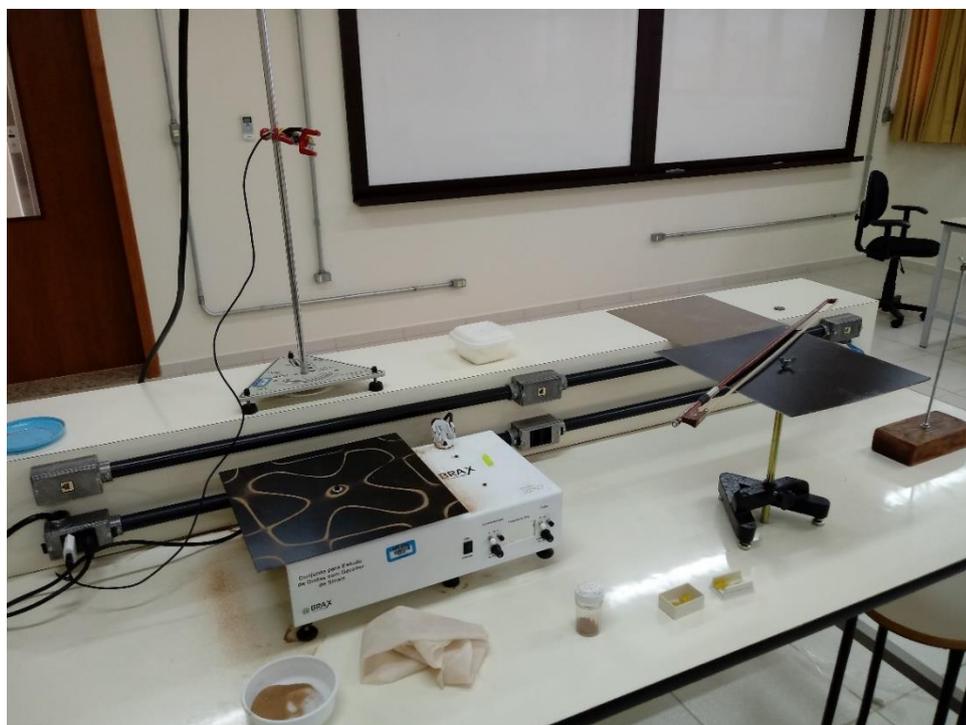
Fotografia 2 – Padrão de Chladni, formada com o uso do arco de violino.  
Fonte: Os autores (2018)



Quadro 1 – Montagem da Placa adaptada ao gerador de frequências  
Fonte: Os autores (2018)



**Fotografia 3 – Modelo Original do experimento de Chladni e Modelo adaptado ao gerador de frequências**  
Fonte: Os autores (2018)



**Fotografia 4 – Teste no gerador de frequências**  
Fonte: Os autores (2018)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo iremos apresentar os resultados, deste experimento em duas fases. A primeira se refere a resultado que feitos dentro dos laboratórios de física da UFMT Campus Sinop-MT. A segunda feita dentro dos Laboratórios de física da UTFPR Campus Londrina-PR. Aqui vamos discutir um pouco dos resultados a luz da dos conceitos de física e percepções durante os testes.

### 4.1 PRIMEIRO EXPERIMENTO: EM PLACA DE ALUMÍNIO

A fim de reproduzir as figuras de Chladni para o estudo de acústica e ondulatória, realizamos o primeiro experimento com placas de alumínio em Sinop-MT, na Universidade Federal do Estado do Mato Grosso, em 2015. Para isso, foi necessária a construção do equipamento, que, inclusive, concedemos, a seguir, como confeccioná-lo.

São necessários:

- Uma placa de alumínio de 1,5mm;
- Um alto falante de 50w ligado ao um amplificador, que será conectado ao gerador de função;
- Caso não tenha o gerador de frequências na escola, poderá utilizar o programa TrueRTA™<sup>2</sup>.

A placa deverá ser fixada sobre o alto falante, presa por uma haste rígida colada no centro dele. Feito isso, o professor deve espalhar sal de cozinha sobre a placa e aplicar sinais iniciando de 0 Hz até que a placa ressoe em seus modos naturais. É imprescindível atuar no controle de intensidade som – o volume – do alto-falante, a fim de que o sal permaneça sobre a placa. Na fotografia 6, apresentamos o material construído e em funcionamento.

---

<sup>2</sup> Programa disponível gratuitamente no endereço: [https://www.trueaudio.com/rta\\_down.htm](https://www.trueaudio.com/rta_down.htm)



**Fotografia 6 - Figura gerada com o uso do gerador de sinais.  
Fonte: Autor professor Me. Everton Botan.**

A seguir, listamos, no quadro 2, as figuras obtidas na atividade experimental. Cada figura foi repetida a fim verificar se a menor diferença no valor do sinal que foi aplicado alteraria o formato da figura. Foram utilizados um gerador de sinal – Gerador de Função ICEL GV 2002 2MHZ – do laboratório da UFMT, campus Sinop, e uma placa de alumínio quadrada de 30 cm<sup>2</sup>, de 1,5 mm de espessura, além de um amplificador e o sal de cozinha.

Inicialmente, mapeamos as frequências em que as figuras eram produzidas. Primeiro, observamos se com o gerador era possível estabelecer um padrão nas figuras, assim como ocorre com as frequências produzidas em uma corda de violão. Quando em frequências baixas, para manter o sal em cima da placa, a fim de que ele convergisse em uma figura, foi necessário reduzir a intensidade produzida pelo amplificador. O contrário foi feito com frequências altas, afinal o gerador não produzia a intensidade necessária para que a placa vibrasse a ponto de convergir o sal na figura de resposta à frequência aplicada.

Nº	Frequência	Figura Formada
----	------------	----------------

1.	78,6 Hz	 A Chladni plate experiment showing a central yellow circular object surrounded by a sparse distribution of white sand particles. Two distinct, curved lines of sand are visible, one above and one below the center, representing the first overtone mode.
2.	81 Hz	 A Chladni plate experiment showing a central yellow circular object surrounded by a sparse distribution of white sand particles. Two distinct, curved lines of sand are visible, one above and one below the center, representing the first overtone mode.
3.	83 Hz	 A Chladni plate experiment showing a central yellow circular object surrounded by a dense ring of white sand particles. The ring is roughly circular and represents the second overtone mode.
4.	98 Hz	 A Chladni plate experiment showing a central yellow circular object surrounded by a dense, irregular ring of white sand particles. The ring is roughly square-shaped and represents the third overtone mode.

5.	209 Hz	 A Chladni plate pattern at 209 Hz, showing a central yellow circular spot surrounded by a single white ring, with four white curved lines extending from the corners towards the center.
6.	370 Hz	 A Chladni plate pattern at 370 Hz, showing a central yellow circular spot surrounded by a single white ring, with four white curved lines extending from the corners towards the center, similar to the 209 Hz pattern but with slightly different curvature.
7.	565 Hz	 A Chladni plate pattern at 565 Hz, showing a central yellow circular spot surrounded by a single white ring, with four white curved lines extending from the corners towards the center, forming a more complex, star-like shape.
8.	904 Hz	 A Chladni plate pattern at 904 Hz, showing a central yellow circular spot surrounded by a single white ring, with four white curved lines extending from the corners towards the center, forming a more complex, star-like shape.

9.	1.132 Hz	
10.	1.242 Hz	
11.	1.247 Hz	
12.	1.803 Hz	

13.	2.017 Hz	
-----	----------	--

**Quadro 2 - Figuras produzidas com o gerador – placa de alumínio.**

**Fonte: Autoria própria.**

Verificadas as figuras obtidas, notamos que tons mais agudos (frequências maiores) formavam figuras mais complexas, com maior número de linhas nodais. Concluimos, assim, que há relação direta entre os padrões (número de linhas nodais) com a frequência. Portanto, a formação das figuras pode representar um comportamento para caracterizar harmônicos em altas e baixas frequências.

Percebemos, também, que as figuras são simétricas a pelo menos um eixo (diagonal ou outra linha que intercepte o centro da placa).

Além disso, considerando que algumas imagens correspondem às obtidas por Chladni, podemos afirmar que se forem mantidas as características da placa, as figuras estarão associadas sempre ao mesmo tom (frequência). Logo, o experimento é replicável.

Diferentemente do que ocorre com as cordas do violão<sup>3</sup>, não obtivemos harmônicos na mesma placa apenas dobrando a frequência. Pensávamos inicialmente que, assim como nas cordas do violão, a placa ressoaria se a mesma nota fosse gerada em alturas diferentes, o que não ocorreu. Portanto, a placa não ressoa com o dobro da frequência e, desse modo, as frequências naturais da placa

<sup>3</sup> No violão, cada corda tensionada corretamente apresentará frequências naturais correspondentes às notas musicais. Contudo, diferentes cordas podem gerar a mesma nota em alturas diferentes. É possível fazer com que uma corda vibre sem a necessidade de ser tocada pelo músico através da ressonância. Este fenômeno ocorre, por exemplo, quando o violonista toca qualquer nota no violão. Assim, se tocamos a sexta corda do violão com o dedo indicador da mão esquerda (para destros), pressionando a quinta casa (110Hz), obteremos a nota Lá. Nesse momento, a corda Lá (110Hz), que é a quinta corda do violão, também vibrará, pois está em ressonância com a sexta corda. A mesma coisa acontece quando se pressiona a 17ª casa na sexta corda (220Hz – dobro da frequência), ao invés da 5ª casa nesta mesma corda. Isso acontece, porque quando um sistema físico recebe energia por meio de excitações de frequência igual a uma de suas frequências naturais de vibração, o sistema físico, isto é, a corda do violão, passa a vibrar com amplitudes cada vez maiores. Um sistema pode ter mais de uma frequência natural.

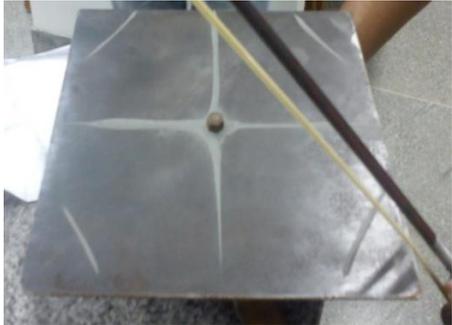
não aparecem por uma relação linear. Encontramos 13 (treze) frequências naturais para a placa de alumínio.

Conceitos como ressonância, ondas estacionárias, padrões de interferências construtivas ou destrutivas e regiões nodais são facilmente exploráveis em cada figura que se formou na placa. Por isso, o modelo de Chladni parece ser um importante modelo experimental aos estudantes de Física.

No experimento original, Chladni utilizava um arco de violino e era perceptível que certos padrões diferentes seriam possíveis devido ao atrito do arco do violino com a placa, que por sua vez produzia funções diferentes, de intensidades e origem em pontos distintos. Em certo momento, a placa tem a origem do evento em uma das bordas da placa, diferentemente do modelo usando um alto falante, que tem sua origem no centro da placa.

Didaticamente, notamos que por suas características, a placa de alumínio produziu figuras em quantidade superior, com maior facilidade, inclusive em frequências muito próximas ao limite da audição humana. Entre as escolhas dos materiais, testamos também uma placa de ferro, com o uso do arco de violino, e obtivemos as figuras apresentadas no quadro 3. Para a reprodução do experimento em sala de aula, consideramos importante a opção pela placa de ferro, já que em nossa região, era mais fácil de ser encontrada.

Nº	Ponto de aplicação do arco de violino	Ponto de apoio	Figura produzida
1.	1/2 do comprimento da placa 15 cm	Extremidades livres	
2.	3/4 do comprimento da placa 22.5 cm	Extremidades livres.	

3.	5/6 do comprimento da placa 25 cm	Extremidades livres	
----	--------------------------------------	---------------------	--

**Quadro 3 - Figuras produzidas com o arco de violino em placa de ferro quadrada de 30 cm<sup>2</sup> com 2,5mm de espessura utilizando limalha de ferro.**

**Fonte: Autoria própria.**

Considerando o experimento na placa de ferro, o número de figuras foi limitado devido a densidade da placa. Destacamos ainda que uma boa prática com o manejo do arco de violino faz-se necessária para que a frequência seja constante, produzindo as figuras. Os resultados obtidos foram iguais às figuras apresentadas pelos experimentos de Chladni e nenhuma delas se assemelharam as obtidas com o gerador de sinal.

Com a placa de ferro e limalha de ferro, além do arco do violino, uma relação de figuras permaneceu na placa devido a uma produção sonora do atrito com o arco e a borda da placa. Nesse momento, estabelecia-se a ressonância e as figuras se formavam. Por outro lado, toda vez que não conseguíamos produzir a ressonância na placa atritada ao arco do violino, as figuras não eram produzidas, espalhando-se para fora da placa a limalha de ferro.

#### 4.2 REPLICAÇÃO DO EXPERIMENTO: EM PLACA DE INOX

Em 2017, optamos por replicar o experimento, porém em outro tipo de placa. Esse segundo experimento foi realizado na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Londrina.

Para isso, construímos uma placa de inox com as dimensões 30 cm x 30 cm, sendo 1,5 mm de espessura. Utilizamos um gerador de sinais com amplificador e estroboscópio do laboratório da UTFPR (fotografias 6 e 7).



**Fotografia 6 - Placa de inox com o uso do gerador de sinais.**  
**Fonte: Autoria de Jairo Alves Junior.**

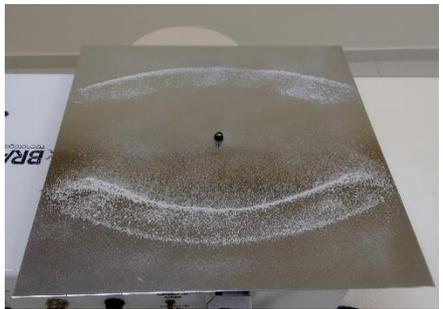
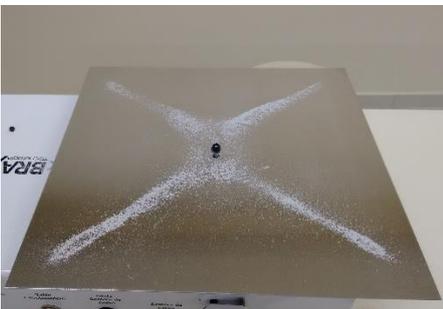
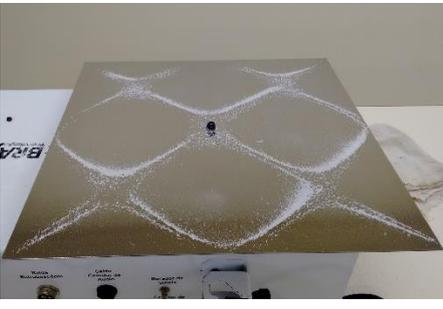


**Fotografia 7 - Placa de inox com o uso do gerador de sinais.**  
**Fonte: Autoria de Jairo Alves Junior.**

A fim de colher os dados, tivemos o auxílio do aluno de iniciação científica da UTFPR, Jairo Alves Junior, do segundo ano de licenciatura de Química, que atualmente migrou para Engenharia Química na mesma instituição. Além dele, contamos, também, com o apoio do Técnico de Laboratório de Física da UTFPR, Marcio José Alves.

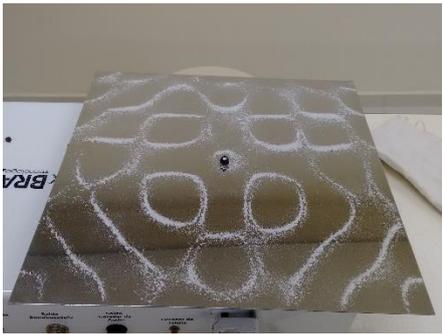
Os dados coletados a partir do segundo experimento apresentaram alguns resultados diferentes se comparados à primeira experiência na UFMT, em 2015.

Apesar de termos utilizados as mesmas frequências, com mesmo sinal do primeiro experimento, devido à mudança de superfície, por ser uma placa de inox, não foram geradas figuras semelhantes, ou seja, os resultados obtidos não foram os mesmos.

Nº	Frequência	Figura Formada
1.	52 Hz	 A square Chladni plate with a central pivot point. The sand has formed a pattern of two curved, parallel lines that are symmetric about the center, resembling a wide, shallow smile or a shallow U-shape.
2.	63 Hz	 A square Chladni plate with a central pivot point. The sand has formed a pattern of four straight lines that intersect at the center, forming an 'X' shape.
3.	275 Hz	 A square Chladni plate with a central pivot point. The sand has formed a complex pattern of multiple curved lines that create a series of interconnected, diamond-like or lattice-like shapes.
4.	350 Hz	 A square Chladni plate with a central pivot point. The sand has formed a pattern of curved lines that create a central circular region surrounded by several curved, parallel lines, resembling a stylized flower or a complex lattice.

5.	386 Hz	 A photograph of a square Chladni plate with a central black dot. The plate is covered with a fine layer of white sand. At 386 Hz, the sand has formed a pattern of four curved lines that meet at the center, creating a cross-like shape with rounded ends. The word "BRAX" is visible on the left side of the plate.
6.	690 Hz	 A photograph of a square Chladni plate with a central black dot. The plate is covered with a fine layer of white sand. At 690 Hz, the sand has formed a pattern of two vertical, teardrop-shaped curves that meet at the center. The word "BRAX" is visible on the left side of the plate.
7.	758 Hz	 A photograph of a square Chladni plate with a central black dot. The plate is covered with a fine layer of white sand. At 758 Hz, the sand has formed a pattern of several concentric, roughly circular curves. The word "BRAX" is visible on the left side of the plate.
8.	786 Hz	 A photograph of a square Chladni plate with a central black dot. The plate is covered with a fine layer of white sand. At 786 Hz, the sand has formed a complex pattern of interconnected, irregular curves that resemble a web or a lattice structure. The word "BRAX" is visible on the left side of the plate.

9.	1.000 Hz	 A photograph of a square Chladni plate with a central circular hole. The plate is covered with a layer of fine white sand. At a frequency of 1.000 Hz, the sand has formed a pattern of four large, rounded lobes arranged in a cross shape, with smaller lobes at the corners. The plate is mounted on a wooden base with various control knobs and switches visible at the bottom.
10.	1.209 Hz	 A photograph of a square Chladni plate with a central circular hole. The plate is covered with a layer of fine white sand. At a frequency of 1.209 Hz, the sand has formed a pattern of four large, rounded lobes arranged in a cross shape, with smaller lobes at the corners. The plate is mounted on a wooden base with various control knobs and switches visible at the bottom.
11.	1.213 Hz	 A photograph of a square Chladni plate with a central circular hole. The plate is covered with a layer of fine white sand. At a frequency of 1.213 Hz, the sand has formed a pattern of four large, rounded lobes arranged in a cross shape, with smaller lobes at the corners. The plate is mounted on a wooden base with various control knobs and switches visible at the bottom.
12.	1.270 Hz	 A photograph of a square Chladni plate with a central circular hole. The plate is covered with a layer of fine white sand. At a frequency of 1.270 Hz, the sand has formed a pattern of four large, rounded lobes arranged in a cross shape, with smaller lobes at the corners. The plate is mounted on a wooden base with various control knobs and switches visible at the bottom.

13.	1.519 Hz	
14.	1.684 Hz	
15.	2.455 Hz	

**Quadro 4 - Figuras produzidas na placa de inox, quadrada de 30 cm<sup>2</sup>, sendo 1,5mm de espessura.**

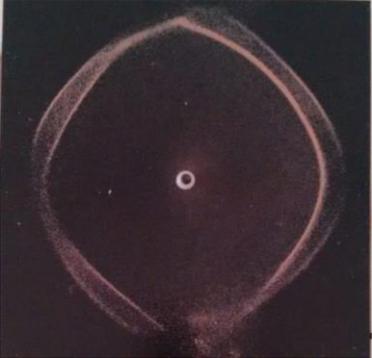
**Fonte: Os autores (2018).**

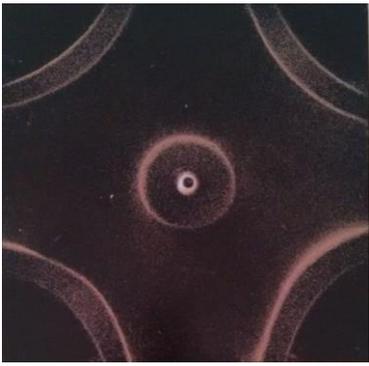
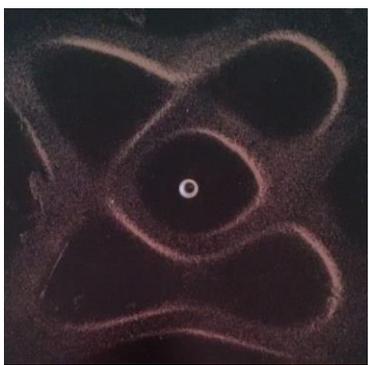
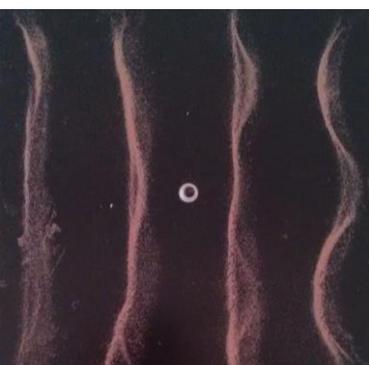
Como observado nas figuras acima, as frequências foram diferentes para a obtenção desses resultados. Portanto, foi possível perceber que é a mudança do material da placa o fator influenciador na distinção das figuras.

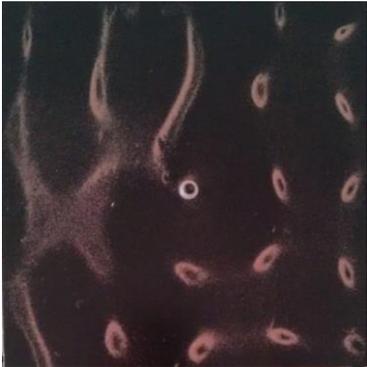
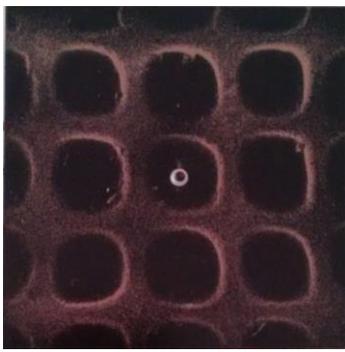
De qualquer modo, em ambas placas, figuras foram geradas, demonstrando ser um método positivo na replicação de resultados, independentemente da placa utilizada.

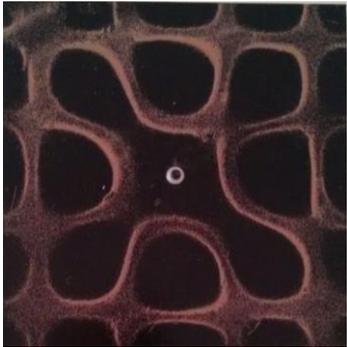
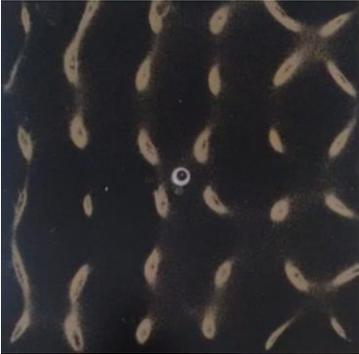
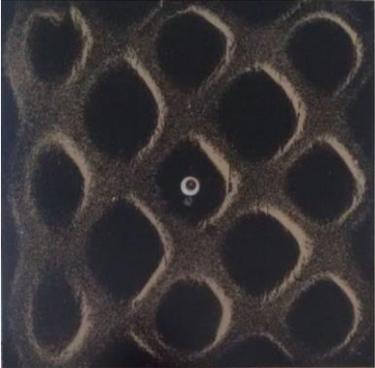
#### 4.3 TESTE FINAL EM PLACA DE ALÚMINIO

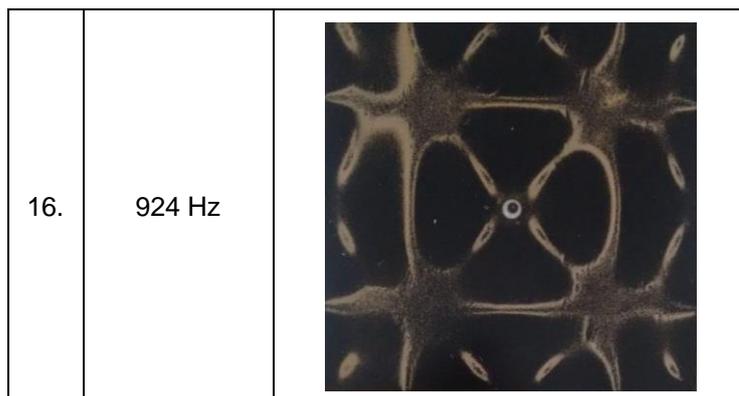
Em 2018 retornamos para o laboratório da UTFPR, afim de reproduzir o experimento com o uso de gerador de frequências adaptado, pois partimos do pressuposto de que o que influencia o padrão na placa tinha a ver com a espessura, e não com o tipo de material. Para isso testamos com uma placa de alumínio, em comparação com o primeiro experimento feito em Sinop-MT, mas com um detalhe, a placa agora está com as dimensões 30cm por 30cm e espessura de 1,0mm. Os resultados estão no quadro 5.

Nº	Frequência	Figura Formada
1.	52 Hz	
2.	60 Hz	
3.	66 Hz	

4.	128 Hz	
5.	213 Hz	
6.	312 Hz	
7.	328 Hz	

8.	396 Hz	
9.	560 Hz	
10.	710 Hz	
11.	762 Hz	

12.	777 Hz	
13	805 Hz	
14..	820 Hz	
15.	838 Hz	



Quadro 5 – Padrões gerados no alumínio.  
Fonte: Os autores (2018)

Um aspecto que percebemos ao gerar as figuras, é que de alguma forma todas elas vão se revelar na placa independentemente do tipo. Outro ponto é que placas circulares não apresentam as mesmas características, para isso recomendamos ler o livro R.T. Beyer, *Treatise on Acoustics: The First Comprehensive English Translation of E.F.F Chladni's Trait'e d'Acoustique* (Springer, Providence, 2015). Neste livro, Chladni traz explicações para placas circulares, bem como alguns padrões obtidos. Percebemos que nas placas quadradas, que o fator diferencial nas figuras tem a ver com sua espessura. O que parece ocorrer é que as figuras parecem mudar sua frequência quando muda a espessura da placa. Um exemplo está no quadro 2 a figura na placa de alumínio de 1,5 mm aparece em 86 Hz, já no quadro 5, verificamos que a mesma figura se repete, porém com a frequência de 66Hz. Uma hipótese que temos teria a ver com a espessura o que possibilita a placa entrar em ressonância mais fácil, com frequências mais baixas.

## 5 CONSIDERAÇÕES

Acreditamos que um dos desafios para qualquer amante das ciências, está diretamente ligado aos recursos, modelos e procedimentos para mostrar na prática o que se aprende em livros didáticos. Mesmo para professores experientes, um fator determinante é a ter acesso aos equipamentos uma vez que tudo custa muito caro. Outro motivo são os exemplos disponíveis ou modelos para tal prática. Na maioria das vezes o profissional se vê obrigado a fabricar um modelo, mais simples o que é sujeito resultados de imprecisão. Para isso escrevemos este manual, afim de trazer um modelo experimental para as práticas de acústica. Que esperamos enriquecer a aulas de física, ciências ou qualquer que se interesse por explicar os fenômenos sonoros. O diferencial deste manual, está na sua estrutura, que começa com uma breve história da criação deste experimento que data em meados do sec. XVII á XVIII, sua construção, e depois testes. Testes este feito por nós exaustivamente, afim de garantir sua usabilidade e apontar possíveis dificuldades que o leitor poderá encontrar ao tentar fazê-lo. Esperamos que seja de grande utilidade, este belo experimento para levantar questões sobre os fenômenos sonoros bem como suas explicações físicas.

## REFERÊNCIAS

BEYER, R.T. **Treatise on Acoustics**: The First Comprehensive English Translation of E.F.F Chladni's *Traité d'Acoustique*. Providence: Springer, 2015, v. 1, p. 28.

CHLADNI, E. F. F. **Entdeckungen über die Theorie des Klanges**, Leipzig: bey Weidmanns Erben und Reich, 1787. ETH-Bibliothek Zürich, Rar 5284. Disponível em: <<http://www.e-rara.ch/doi/10.3931/e-rara-4235>>. Acesso em: 21 maio 2018.

CHLADNI, E.F.F. **Entdeckungen über die Theorie des Klanges**. Weidmanns Erben und Reich, Leipzig, 1787, v. 1, p. 107

JEWETT, JR. J. W; SERWAY, R. A. **Física Para Cientistas e Engenheiros** – Vol. 2 (Oscilações, Ondas e Termodinâmica). Cengage Learning, 8ª edição, 2014.

NORMAN, D. A. **Signifiers, Not Affordances** Revista: Magazine interactions – Designing games, vol 15, New York, USA 2008. Doi:10.1145/1409040.1409044

NORMAN, D. A. **O design do Dia-a-Dia**, *Copyright 1988*, Rio de Janeiro: Editora Rocco LTDA, 2002.

NORMAN, D. A. **Design Emocional**, Rio de Janeiro: Editora Rocco; 1ª Ed, 2008.

SANTOS, R. S. FILHO, P. S. C. ROCHA, Z. F. D. C. **Descobertas sobre a teoria do som**: a história dos padrões de Chladni e sua contribuição para o campo da acústica. *Rev. Bras. Ens. Fís.* 40, nº2, e2602 (2018).

ULLMANN, D. **Life and Work of E. F. F Chladni**. The European Physical Journal Special Topics. Volume 145. Springer, Eur, 2007.