



**UNIVERSIDADE
ESTADUAL DO
MARANHÃO**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

FELIPE DIAS DE AZEVEDO

**ANÁLISE DO ACOPLAMENTO CORDA-BRAÇO EM UMA GUITARRA ELÉTRICA
E SUA RELAÇÃO COM O TIMBRE DO INSTRUMENTO**

**SÃO LUÍS/MA
2018**

FELIPE DIAS DE AZEVEDO

**ANÁLISE DO ACOPLAMENTO CORDA-BRAÇO EM UMA GUITARRA ELÉTRICA
E SUA RELAÇÃO COM O TIMBRE DO INSTRUMENTO**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão para o grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Jorge de Jesus
Passinho

Co-orientador: Prof. Me. José Clet Brito

SÃO LUÍS
2018

Azevedo, Felipe Dias de.

Análise do acoplamento corda-braço em uma guitarra elétrica e sua relação com o timbre do instrumento / Felipe Dias de Azevedo. – São Luís, 2018.

38 f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2018.

Orientador: Prof. Me. Jorge de Jesus Passinho.

1. Guitarra elétrica. 2. Timbre. 3. Vibração. I. Título.

CDU 621:781.22

FELIPE DIAS DE AZEVEDO

**ANÁLISE DO ACOPLAMENTO CORDA-BRAÇO EM UMA GUITARRA ELÉTRICA
E SUA RELAÇÃO COM O TIMBRE DO INSTRUMENTO**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão para o grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Felipe Dias de Azevedo

Aprovado em: São Luís/MA, _____/_____/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Jorge de Jesus Passinho (Orientador)

Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Me. Flávio Nunes Pereira

Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Me. José Clet Brito

Universidade Estadual do Maranhão

Dedico este trabalho a meu sobrinho Gabriel.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela sua infinita bondade e misericórdia.

Ao meu grande mestre, ídolo, professor, orientador e pai, que nunca tive (risos), Jorge Passinho pelos grandes momentos engraçados e repletos de ciência, engenharia, música e poesia. Sem sombra de dúvidas, uma das pessoas mais ricas que já conheci, considero-me um sortudo de ter a sua estimada amizade. Passinho, você está no meu coração.

Ao professor mais iconoclasta e um dos mais dedicados da UEMA, José Clet Brito pelo total apoio laboratorial. Sou profundamente admirado pelo seu gigantesco conhecimento de Física e, sobretudo, pela sua generosidade com as pessoas.

Ao melhor luthier de São Luís Rodrigo Assis por todo suporte dado ao meu experimento e por sempre me deixar tocar nas guitarras da sua Luthieria (risos).

A minha amada prima Dena, que me acompanha desde há muito tempo sendo minha heroína em todos os sentidos e ao seu marido Gilmar pelo total apoio dado ao longo da minha vida acadêmica.

Ao meu irmão Daniel pelos melhores momentos da minha infância.

Ao meu melhor amigo da engenharia mecânica João Tenório Brito por todo apoio neste trabalho e por todos os momentos divertidos ao seu lado.

Ao meu outro fiel amigo Filipe da Silva, também conhecido como Abdias, pela sua companhia e apoio quando mais precisei.

“Treine enquanto eles dormem, estude enquanto eles se divertem, persista enquanto eles descansam, e então, viva o que eles sonham”.

Proverbio Japonês

RESUMO

Foram escolhidos dois tipos de braços de guitarra elétrica com madeiras diferentes. Eles foram fixados, em momentos distintos, ao conjunto de uma guitarra modelo Stratocaster, em que todos os seus componentes não foram trocados ao longo dos testes. Uma vez que cada braço foi acoplado ao corpo, procedeu-se fazendo a vibração mecânica apenas da sexta corda da guitarra (E). O som capturado diretamente deste instrumento musical foi armazenado para posterior análise. Para estes sons foram dados um tratamento a fim de se obter os seus harmônicos via transformada de Fourier para analisar os timbres produzidos por cada braço. Os espectros de harmônicos produzidos pela guitarra elétrica montada em cada braço foram comparados e não foi visto diferenças significativas entre eles. Dessa maneira, as variações de timbres de guitarras elétricas estão em função de outros fatores que não a madeira do braço em si, demonstrando uma irrisória relação de acoplamento da corda com o braço.

Palavras-chave: [guitarra elétrica], [timbre], [vibração].

ABSTRACT

Two types of guitar arms with different woods were chosen. They were coupled, at different times, to the set of a guitar model Stratocaster, in which all its components were not changed during the tests. As each arm was attached to the body, the mechanical vibration was only made from the sixth guitar string (E). The sound captured directly from this musical instrument was stored for further analysis. For these sounds a treatment was given to obtain their harmonics through the Fourier transform to analyze the tones produced by each arm. The harmonic spectra produced by the electric guitar mounted on each arm were compared and there were no significant differences between them. In this way, the variations of electric guitar timbres are due to factors other than the wood of the arm itself, demonstrating an insignificant relation of coupling of the rope with the arm.

Key words: [electric guitar], [tones], [vibration].

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	ANATOMIA DA GUITARRA.....	16
FIGURA 2	DETALHES DO BRAÇO.....	18
FIGURA 3	PULSO EM UMA CORDA TENSIONADA.....	19
FIGURA 4	MODOS NORMAIS DE UMA CORDA VIBRANTE.....	21
FIGURA 5	ONDA SONORA EM ESCALA PRESSÃO X TEMPO.....	25
FIGURA 6	GUITARRA STRATOCASTER.....	27
FIGURA 7	LIGAÇÃO BRAÇO-CORPO.....	28
FIGURA 8	BRAÇOS DO EXPERIMENTO.....	28
FIGURA 9	BANCADA EXPERIMENTAL.....	29
FIGURA 10	DISPOSITIVO PALHETADOR NÃO ACIONADO.....	31
FIGURA 11	DISPOSITIVO PALHETADOR ACIONADO.....	32
FIGURA 12	ESPECTRO DE HARMÔNICOS DO BRAÇO A.....	33
FIGURA 13	ESPECTRO DE HARMÔNICOS DO BRAÇO B.....	34
FIGURA 14	COMPARAÇÃO ENTRE OS ESPECTROS MÉDIOS.....	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Justificativa	11
1.2	Objetivo	13
1.2.1	Objetivo geral.....	13
1.2.2	Objetivos específicos.....	13
1.3	Estrutura do trabalho	13
2	REVISÃO TEÓRICA	14
2.1	Sobre o funcionamento da guitarra elétrica	14
2.1.1	Sobre a afinação padrão das cordas.....	15
2.2	Partes da guitarra	16
2.2.1	Tipos Mais comuns de captadores.....	17
2.2.2	Tipos de braço.....	17
2.2.3	Tipos de encaixe braço- corpo.....	18
2.3	Algumas características das madeiras basswood, cedro e jacarandar	18
2.4	Considerações sobre a física ondulatória: ondas em uma corda	19
2.4.1	Equação da onda e ondas estacionárias.....	20
2.5	Transformada de Fourier aplicada a análise de notas musicais	22
2.5.1	Parâmetros básicos do objeto sonoro.....	22
2.5.2	Tranformada de Fourier.....	23
2.5.3	Corda fixa em ambas as extremidades.....	25
3	MATERIAIS E METODOS	27
3.1	Arranjo experimental	27
3.2	Procedimentos	30
4	RESULTADOS E DISCUSÃO	33
4.1	Espectros de Harmônicos	33
4.2	Comparação entre os espectros médios de harmônicos	34
5	CONCLUSÃO	36
	REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

Saiu em 2011 uma matéria na BBC apontando que a Gibson, uma das maiores e melhores fabricantes de guitarras elétricas do mundo, estava na mira de ambientalistas por levar em sua fabricação madeiras de árvores em extinção (BLENFORD, 2011).

Além da preocupante questão ambiental, o interessante da matéria foi o impacto e a indignação que a notícia gerou aos músicos se caso a fabricante for obrigada a substituir seu material por outro, pois a madeira usada tradicionalmente nas guitarras é crucial para o timbre do instrumento, segundo os guitarristas apaixonados pelo modelo (BLENFORD, 2011).

Mesmo apresentando certa familiaridade com o violão, é importante destacar que o funcionamento da guitarra elétrica é bem diferente dos instrumentos acústicos, pois o seu som é gerado através de um processo de indução eletromagnética (OLSON, 1967 apud PEREIRA; JUNIOR; DE FREITAS, 2010).

A grande questão levantada há muito tempo dentro da história da confecção de guitarras elétrica é o quanto a madeira tem influência no que diz respeito à sonoridade desse instrumento.

Segundo Fleischer e T. Zwicker (1998), se a madeira da guitarra elétrica influencia tanto no som, deve haver uma interação da corda com a mesma de modo a alterar sua vibração, influenciando no seu timbre, portanto. Porém, somente a vibração da corda é capturada pelo captador e depois transformada em som (FLEISCHER; T. ZWICKER, 1998).

Algumas pesquisas apontam que determinados tipos de madeira influenciam no timbre da guitarra elétrica, ou seja, interagem de forma diferente e direta com o som da mesma, porém elas levam em conta apenas a madeira isolada, e não o instrumento montado como um todo (PEREIRA; JUNIOR; DE FREITAS, 2010).

Este fato mencionado também foi observado por alguns pesquisadores da Universidade Federal do Paraná¹, que fizeram testes com diferentes madeiras em

¹ PEREIRA, R. M.; JUNIOR, A. L.; DE FREITAS, T. C. Sobre o Acoplamento Corda-Corpo em Guitarras Elétricas e sua Relação com o Timbre do Instrumento. **PHYSICAE**, CURITIBA, PARANÁ, SETEMBRO 2010.

guitarras elétricas, analisando apenas o material do corpo. Segundo a pesquisa, a madeira do corpo influencia irrisoriamente no timbre da guitarra elétrica.

Em face do que foi mencionado, este trabalho tem como objetivo analisar a influência de diferentes tipos de madeira no timbre da guitarra elétrica para possibilitar um possível entendimento das relações de acoplamento corda-braço.

Nesta pesquisa será feita outra abordagem, apenas será considerado o braço da guitarra elétrica, ou seja, será feita uma análise, uma comparação entre dois tipos de madeira. O primeiro braço, madeira basswood - *Tilia americana* - (escala jacarandar); o segundo, madeira cedro - *cedrela fissilis* - (escala jacarandar).

A análise consiste em comparar os espectros de harmônicos gerados pela vibração feita na sexta corda, Mi (E), acoplada em cada um dos braços mencionados acima, em momentos diferentes. O som gerado receberá um tratamento via transformada de Fourier para verificar os harmônicos de cada um dos sons (estes harmônicos são responsáveis pelo timbre do instrumento). Se estes espectros de harmônicos forem bem diferentes, significa que o material do braço influi no resultado final do timbre, caso contrário, não.

1.1 Justificativa

Os instrumentos musicais quase sempre possuem materiais que passam por um processo de seleção muito austero, porém, algumas vezes, sem cientificidade e, além disso, são construídos por uma mão de obra bem especializada (PEREIRA; JUNIOR; FREITAS, 2010).

Alguns materiais ficaram fixados no mercado de instrumentos sem nenhuma comprovação científica de que são os melhores e os mais eficientes, dificultando a aplicação de outros tipos de materiais mais baratos com propriedades iguais ou até mesmo melhores e menos ameaçados na natureza. “Esta resistência se origina tanto de questões técnicas reais, como de uma tradição obscura que não resistiria a uma investigação científica detalhada” (HUTCHINS et al., 1983, não p).

O ébano (*Diospyros ebenum*) usado em instrumentos como o oboé e clarinete, e o pau-brasil (*Caesalpinia echinata*) usado em arcos para instrumentos de corda, são exemplos de materiais que ficaram bem definidos nas confecções destes instrumentos (AMARO; ALVES, 2005 apud PEREIRA; JUNIOR; FREITAS, 2010).

O grande valor dado a determinados materiais pode acarretar a um possível dano ambiental, ou seja, muitas madeiras usadas em instrumentos musicais estão em processo de extinção.

Segundo Sousa (2014, não p.), “Cerca de 200 espécies de árvores são usadas na produção de instrumentos musicais no planeta; 70 delas são ameaçadas de extinção”. Se novos materiais forem estudados, novas possibilidades surgirão para tentar diminuir o impacto ambiental causado pela derrubada de árvores raras e, além disso, viabilizar outras perspectivas de uso de materiais alternativos, porém com propriedades e qualidades iguais ou próximas dos materiais tradicionais do mercado de confecção de instrumentos musicais.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo geral

Verificar a influência de diferentes tipos de madeira no timbre da guitarra elétrica para possibilitar um possível esclarecimento acerca das relações de acoplamento da corda-braço do instrumento.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Criar um sistema mecânico, sobre uma bancada, que permita trocar apenas o braço da guitarra elétrica, modelo stratocaster, e que faça ao mesmo tempo a vibração mecânica da corda, em cada braço usado, a partir de um dispositivo palhetador.
- b) Produzir três sons, gerar seus espectros de harmônicos e fazer a média destes espectros de harmônicos a partir da guitarra elétrica montada com o braço em cedro e, em seguida, montada com o braço em basswood. Ambos com escala em Jacarandá (Rosewood).
- c) Comparar os espectros de harmônicos médios para fins de análise do timbre da guitarra elétrica com o intuito de verificar a existência de um acoplamento significativo.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho é dividido em 5 tópicos, sendo descritos da seguinte forma:

Tópico 1: é realizada uma introdução a respeito do tema principal do trabalho, assim como a problemática levantada acerca da influência da madeira da guitarra elétrica no seu timbre. Em seguida, faz-se a justificativa da elaboração desta pesquisa, bem como os seus objetivos gerais e específicos.

Tópico 2: é o tópico mais extenso, onde apresenta a revisão bibliográfica, fundamentada em pesquisas relacionadas a área da acústica de instrumentos musicais, vibrações mecânicas, física e análise de sinais. A revisão bibliográfica é iniciada mostrando como a guitarra funciona, quais as pesquisas que contribuíram para elaboração deste estudo e alguns conceitos técnicos e científicos de alguns fenômenos.

Tópico 3: é onde foi mencionado os materiais e o métodos aplicados neste estudo, o passo a passo do experimento.

Tópico 4: são apresentados os resultados obtidos a partir dos métodos computacionais aplicados para determinar os valores relacionados a questão tímbrica da guitarra.

Tópico 5: Finalmente, apresenta-se as conclusões tomadas como importantes neste trabalho, a partir dos resultados obtidos da análise do acoplamento corda-braço e sua relação com o timbre da guitarra elétrica.

2 REVISÃO TEÓRICA

Para que um instrumento musical tenha um bom som são indispensáveis os conhecimentos de física e engenharia.

Começando pelas cordas, a engenharia tem que garantir os padrões exatos de espessura, tamanho e, além do mais, dar a certeza do quanto elas suportarão de tensões para que o instrumento funcione da melhor forma possível.

Na estrutura do instrumento, a engenharia aplica o conhecimento das ciências para cuidar de questões relacionadas às dimensões e a escolha dos materiais necessários para sua fabricação, bem como fazer o instrumento produzir o som exato e que o mesmo seja amplificado corretamente.

Em guitarras elétricas, além das cordas, há todo um arranjo eletrônico que envolve a engenharia e suas aplicações.

Nesta parte do trabalho, será feito um levantamento acerca da fundamentação teórica sobre o assunto estudado.

2.1 Sobre o funcionamento da guitarra elétrica

A guitarra elétrica vem passando por modificações desde seu surgimento na década de 1930 sem alterar a sua essência (CASTRO, 2007). Ela surgiu com a intenção de “ser um violão mais amplificado”, porém ao longo do tempo, adquiriu características próprias de sonoridade e execução.

Para que a guitarra elétrica funcione, é necessário que o movimento mecânico das oscilações das cordas seja transformado em um impulso elétrico (indução eletromagnética) e que este, em seguida, seja amplificado e se converta em sinais sonoros. Ou seja, quando um músico palheta ou dedilha as cordas, a vibração mecânica gera um sinal elétrico no pick-up (fonocaptador), que viaja pelos cabos até o amplificador, onde recebe este sinal e o libera em um alto-falante que produz o som (BIANCHIN, 2011).

Apesar de ter uma certa familiaridade com o violão, alguns fatores fazem com que estes instrumentos se diferencie: primeiro, a separação entre seu mecanismo de produção sonora com o seu corpo; e, segundo, o modo peculiar de captação da vibração de suas cordas (CASTRO, 2007).

Sendo um instrumento que funciona através do fenômeno da indução eletromagnética, é imprescindível para o seu funcionamento o uso cordas metálicas. Já o violão, mesmo sendo amplificado eletricamente, pode ser usado nele cordas de nylon. A razão disso, é porque existe, como foi mencionado, diferença na forma como é captado as vibrações mecânicas das cordas, os captadores de cada um são diferentes.

No violão, até mesmo um microfone externo pode servir como captação do som do instrumento, no entanto, fatores como o ambiente externo também se adicionam ao resultado do som.

Além do que foi dito, é notória a influência proeminente que a madeira tem no timbre do violão quando se coloca materiais mais refinados quando comparados com outros mais baratos e simples (EDGAR, 2015). O timbre varia até mesmo quando madeiras da mesma árvore são usadas para fabricar o mesmo tipo de violão.

O fato mencionado acima já não se aplica necessariamente as guitarras elétricas, sobretudo de corpos maciços, pois vários estudos apontam que a influência da madeira é irrisória no resultado final de seu som, ou seja, no seu timbre (ANDERSON et al., 2012). O americano Matthew Angove, da universidade de La Trobe, testou diferentes tipos de materiais e formas de guitarra para verificar se estes fatores fazem alguma diferença no som. O resultado da pesquisa apontou que não (HAGUE, 2012).

Outro fator interessante e óbvio é que sem energia elétrica a guitarra não funciona, excluindo os modelos semi-acústicos, ao passo que o violão funciona muito bem sem ela, pois nele existe uma caixa ressonante que funciona como um amplificador natural, a acústica usa a vibração das cordas e os ecos dessas vibrações para produzir seus sons. Em virtude disso, as propriedades sonoras em ambos os instrumentos se tornam peculiares.

2.1.1 Sobre a afinação padrão das cordas

A numeração das cordas é feita da mais aguda (maior frequência) para a grave (menor frequência) e a afinação padrão é feita da seguinte maneira, quando as cordas são tocadas soltas: 1ª corda - Mi, 2ª corda - Si, 3ª corda - Sol, 4ª corda - Ré, 5ª corda - Lá, 6ª corda - Mi.

É importante salientar que escala dos braços das guitarras elétricas é feita a partir do sistema temperado, ou seja, trabalha no total com doze notas, em intervalos de semitons, que é a menor distância entre duas notas neste sistema. Ou seja, se a sexta corda é afinada em Mi(E)², quando é pressionada a primeira casa da escala, a próxima nota será Fá(F) etc.

Tabela 1 – REPRESENTAÇÃO EM FORMA DE CIFRA DA ESCALÁ CROMÁTICA.

Nota	Dó	Dó# ³	Ré	Ré#	Mí	Fá	Fá#	Sol	Sol#	Lá	Lá#	Si
Cifra	C	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#	A	A#	B

FONTE: O autor (2018)

2.2 Partes da guitarra

As partes das guitarras são: corpo, braço, tensor, cordas, captadores, escala, tarraxas, pestanas ou nut, hedstock, ponte, alavanca e circuito elétrico.

Nesta secção, serão brevemente discutidas algumas partes e características importantes da guitarra para fins de compreensão deste trabalho.

FIGURA 1 – ANATOMIA DA GUITARRA



FONTE: Adaptada de Fernandes(2018).

² A nota Mí é representada pela letra E, que é uma cifra. A cifra representa as notas e acordes por letras. Na tabela 1 são mostradas as doze notas do sistema temperado com suas respectivas cifras.

³(#) quer dizer Sustenido.

2.2.1 Tipos Mais comuns de captadores

Os tipos mais comuns de captadores em guitarras elétricas são descritos abaixo:

- **Single Coil** (captadores simples) - São captadores com apenas uma bobina, possuem como característica uma sonoridade mais estalada e aguda, porém com bastante brilho. O ruído peculiar do single coil é em virtude da capacidade da bobina em captar não somente a vibração das cordas, mas também ruídos de interferência das radiações eletromagnéticas (SOUZA, 2014).
- **Humbucker** (captadores duplos) - Captadores com duas bobinas. Ambas são ligadas fora de fase ou invertidas, uma bobina cancela o ruído captado pela outra (SOUZA, 2014).

A revista Mundo Estranho (2018) dá uma explicação sobre como funciona os captadores eletromagnéticos da guitarra:

Os captadores são pequenos eletroímãs. (...). Eles captam as variações do campo magnético das cordas. ...as partes do captador que ficam embaixo das cordas são ímãs comuns, que nem os de geladeira. As cordas são de aço, certo? E o que acontece quando você coloca metal perto de um ímã? Ele fica magnetizado – vira outro ímã. As cordas geram, então, seu próprio campo magnético, que vibra quando você as toca. Em volta do centro do captador há um grande fio de metal enrolado 7 mil vezes, como uma mola bem apertada. Quando um ímã se movimenta perto dessa mola, cria-se nela uma corrente elétrica. Ao tocar, então, você está movendo ímãs (as cordas) e, por consequência, gerando uma corrente na mola do captador. E essa corrente vai, pelo fio da guitarra, até o amplificador. Se você faz uma nota, cada uma das cordas vibra de um jeito, com frequências diferentes. A corrente elétrica da mola, por sua vez, vai oscilar exatamente nessas frequências. Lá no amplificador, essa eletricidade faz os alto-falantes vibrarem na mesma toada. E esse mundo complexo das oscilações eletromagnéticas é traduzido no mais clássico som do rock'n'rol (ESTRANHO, 2018, não p).

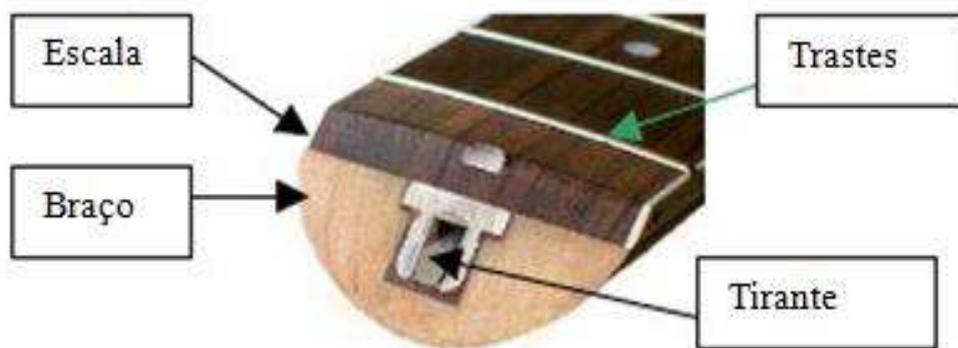
2.2.2 Tipos de braço

- **Única peça** - Quando o braço e a escala são homogêneos, ou seja, da mesma madeira.
- **Duas peças com escala colada** (veja a figura 2) - Braço e escala de madeiras diferentes, ou seja, heterogêneos.

2.2.3 Tipos de encaixe braço- corpo

- **Braço integral** - É quando o braço vai do headstock até a parte central do corpo. O restante do corpo é colado com nas laterais da peça.
- **Braço colado** - É o tipo de sistema mais antigo, inventado na China, em que o corpo da guitarra tem um encaixe onde o braço é colado. É muito usado em marcas como Gibson e PRS na confecção de suas guitarras e violões.
- **Braço parafusado** – É o sistema em que o corpo tem um encaixe em que o braço é fixado não por cola, mas por parafusos. Este tipo é bem característico em guitarras da marca Fender e Ibanez.

FIGURA 2 – DETALHES DO BRAÇO



FONTE: Adaptada de Fernandes (2018).

2.3 Algumas características das madeiras basswood, cedro e jacarandar

Abaixo será mostrado alguns dados que são muito relevantes para materiais usados em instrumentos musicais como: densidade, módulo de elasticidade na flexão estática (MOE) e módulo de ruptura na flexão estática (MOR).

Tabela 2 - CARACTERÍSTICAS

Nome comum	Nome científico	Densidade aparente 12% (g/cm ³)	MOE (×1000) (kgf/cm ³)	MOR (kgf/cm ³)	Dureza Janka transv (kgf)
Basswood	<i>Tilia americana</i>	*0,37	120	713	186
Cedro	<i>Cedrela odorata</i>	0,46	99	768	623
Jacarandar	<i>Dalbergia sp</i>	1,02	131	1192	...

*densidade = Peso seco 0% / Volume seco 12% (FOREST PRODUCTS LABORATORY,1987)

MOE – módulo de elasticidade na flexão estática

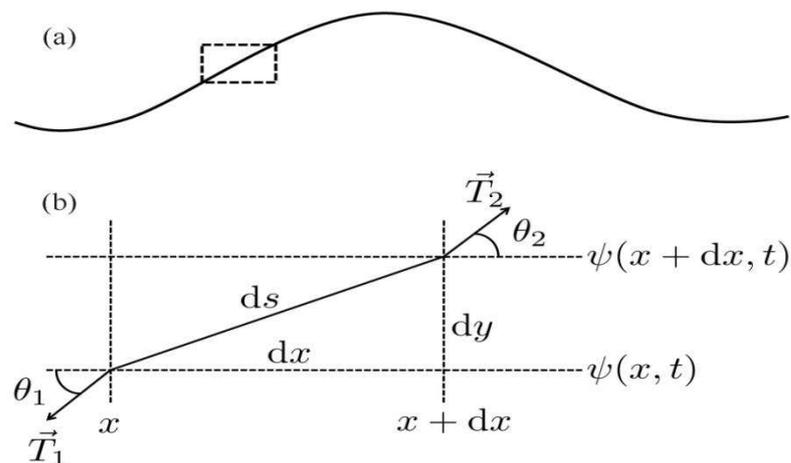
MOR – módulo de ruptura na flexão estática

FONTE: Sousa (2014).

2.4 Considerações sobre a física ondulatória: ondas em uma corda

Quando a onda é formada em uma corda tensionada, ao vibrar, ela apresenta pequenos desvios em torno de sua posição de equilíbrio (FONSECA, 2015). Levando em consideração que $\psi(x, t)$ é uma função de onda de uma corda sujeita a uma tenção T ($|T_1| = |T_2| = |T|$) e com densidade linear de massa igual a ρ .

FIGURA 3 – PULSO EM UMA CORDA TENSIONADA



FONTE: Adaptada de FONSECA (2018).

LEGENDA: a) Esquema de perturbação de uma corda tencionada.
b) Detalhe da perturbação em uma corda tensionada.

2.4.1 Equação da onda e ondas estacionárias

Deduzindo a equação da onda para a situação mencionada:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} * \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0; \quad v = \sqrt{\frac{T}{\rho}}, \quad (1)$$

onde v = a velocidade de propagação da onda na corda.

Solução em termos de ondas estacionárias, restringindo-se ao caso de ondas harmônicas se propagando em sentidos opostos na corda.

$$\begin{aligned} \psi(x, t) &= \frac{A}{2} \cos(kx - \omega t + \alpha_1) + \frac{A}{2} \cos(kx + \omega t + \alpha_2), \\ &= A \cos(kx + \beta) \cos(\omega t + \alpha_2), \end{aligned} \quad (2)$$

sendo $\beta = \frac{1}{2}(\alpha_1 - \alpha_2)$, $\delta = \frac{1}{2}(\alpha_1 + \alpha_2)$ e $\omega = kv$. A onda não se propaga porque não está em função de $kx \pm \omega t$.

A corda com dois extremos fixos e com comprimento l tem como condições iniciais: $\psi(0, t) = 0$ e $\psi(l, t) = 0$. Aplicando essas condições, obtemos o valor de β e os possíveis valores de k .

$$\beta = \frac{\pi}{2}, \quad (3)$$

$$k_n = \frac{n\pi}{l} \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (4)$$

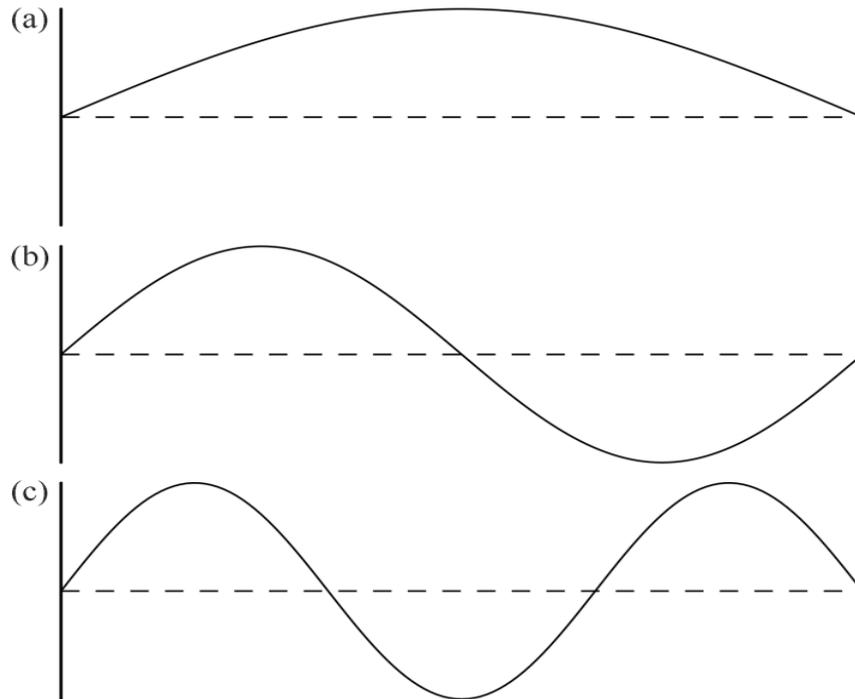
$$\omega_n = \frac{n\pi v t}{l} \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (5)$$

e as soluções dos modos normais são: $\psi_n = A_n \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) \cos\left(\frac{n\pi v t}{l} + \delta_n\right)$, (6)

onde os coeficientes A_n e β_n são determinados a partir das condições iniciais do problema.

Analisando os modos normais da figura abaixo, para o instante em que a parte temporal é máxima. Além do extremos fixos, é fácil perceber que existe $n - 1$ pontos que permanecem parados ao longo do movimento da corda, sendo n o número de harmônicos. Esses pontos são chamados nós (FONSECA, 2015).

FIGURA 4 – MODOS NORMAIS DE UMA CORDA VIBRANTE



FONTE: Adaptada de FONSECA (2018).
 LEGENDA: a) $n = 1$
 b) $n = 2$
 c) $n = 3$

É importante mencionar que toda corda vibrante possui uma frequência fundamental e as demais são múltiplos inteiros desta frequência fundamental.

$$v_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = \frac{v}{2l} = \sqrt{\frac{T/\mu}{2l}} \quad (7)$$

Onde μ é a densidade linear de massa da corda.

$$v_n = nv_1 ; (n = 1,2,3, \dots) \quad (8)$$

A solução geral é a combinação linear de todos os modos normais

$$\Psi(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n(x, t) \quad (9)$$

2.5 Transformada de Fourier aplicada a análise de notas musicais

2.5.1 Parâmetros básicos do objeto sonoro

A definição de som depende basicamente de três parâmetros: Altura, intensidade e timbre.

A altura está relacionada com a frequência dos sons, que é o número de ciclos ou período de vibrações em função do tempo, expressada matematicamente assim:

$$f = \frac{1}{P} \quad , \quad (10)$$

quando se relaciona com o período (P). Sua unidade de medida no SI (Sistema Internacional) é hertz (Hz). Através dessa grandeza, atribuímos ao som a qualidade de grave ou agudo (TEIXEIRA ; STOPPA, 2015).

A intensidade já está relacionada a o quanto o som é potente, ou seja, fraco ou forte, exemplo: o som de uma buzina de caminhão é bem mais potente que o som de um apito de brinquedo.

Já o timbre é um parâmetro que dá a característica sonora ao instrumento, ou seja, que identifica o instrumento, como se fosse a “digital” do som, permitindo aos ouvidos saber diferenciar quando o som vem de uma flauta ou de um piano, por exemplo.

Segundo Teixeira e Stopp (2015, não p.): “Quando se ouve um músico afinar um instrumento, nota-se em geral, eles tomam por base a nota Lá(A), que tem frequência múltipla de 220Hz.” Se dois instrumentos tocam essa nota Lá, de 220 ciclos por segundo, supondo que seja um violão e o outro piano, saberemos identificar qual som é proveniente do violão e qual é o proveniente do piano.

Ou seja, o som dessa nota Lá 220 Hz é diferente de um instrumento para outro, pois cada instrumento, quando produz o som, emite também, além da frequência fundamental, frequências superiores de ordem ímpar e ordem par em relação à frequência fundamental, exemplo: múltiplos ímpares em relação a 220Hz (3x220Hz, 5x220Hz, ...) e múltiplos pares de 220Hz (2x220Hz, 4x220Hz, ...). O som que ouvimos é a sobreposição do som fundamental com estas “harmonas superiores”. São estes “harmônicos” que diferenciam um instrumento de outro.

Um outro parâmetro essencial é o tempo, ou seja, a duração de cada nota ou intervalo de uma nota para outra.

2.5.2 Transformada de Fourier

O matemático francês do século XVIII Joseph Fourier (1768-1830) provou que todo tipo de onda é o somatório de ondas senoidais de diferentes frequências, amplitudes e fases (TEIXEIRA ; STOPPA, 2015) . Se em um período T a onda principal se repete, então as frequências de cada componente senoidal são múltiplas da frequência de onda fundamental.

Em suma, Fourier provou que qualquer onda complexa pode ser descrita como um somatório de sinais senoidais mais simples com frequências e amplitudes determinadas.

A série de Fourier consiste representar qualquer função periódica em uma função trigonométrica cuja expressão é:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \{a_n \sin(nx) + b_n \cos(nx)\}, \quad (11)$$

onde os coeficientes a_0 , a_n e b_n estão relacionados à função periódica $f(x)$ por integrais definidas (Unsupported source type (Misc) for source BAT16):

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx \quad (12)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos nx \, dx \quad (13)$$

$$b = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin nx \, dx, \quad (14)$$

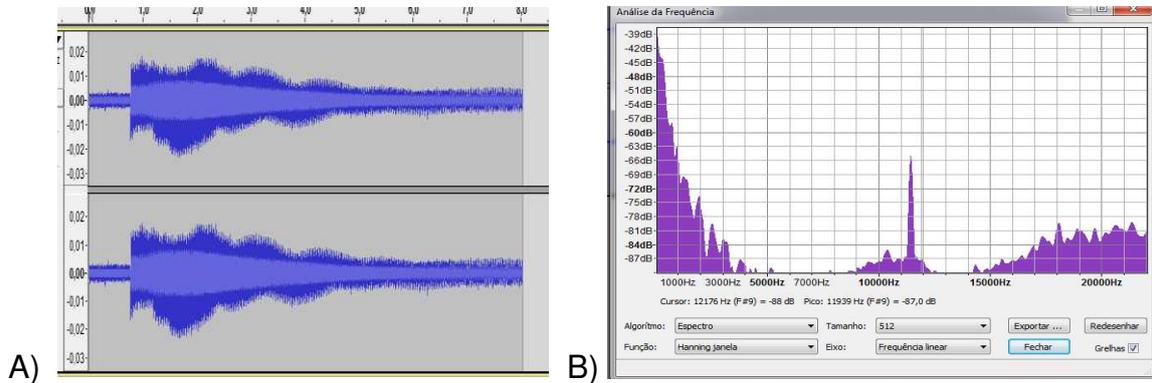
onde $n = 1, 2, 3, \dots$

Uma grande vantagem da representação por Séries de Fourier em relação às séries de potências é que, em dadas circunstâncias, aquela é uniforme e global, isto é, sua convergência, uma vez estabelecida, é válida para todo o domínio da função, enquanto que geralmente tem convergência apenas local, isto é, dentro de um intervalo chamado intervalo de convergência que depende da série, mas não da função. A discretização das funções de interesse é bastante desejável em muitas aplicações, em especial aquelas que se baseiam em técnicas digitais. Essa discretização dá origem a Transformada Discreta de Fourier (DFT) que provê uma aproximação muito boa para os coeficientes da Série de Fourier de funções periódicas e em alguns casos, essa aproximação é exata. No entanto, o cálculo da DFT costuma ser realizado por um algoritmo pouco intuitivo, mas muito mais eficiente chamado Transformada Rápida de Fourier (FFT) (PUPIN, 2011, p. 81).

A transformada de Fourier é, segundo Teixeira et al. (2015), uma ferramenta utilizada para fazer uma análise no domínio da frequência quando temos uma determinada forma de onda complexa e queremos determinar as frequências das senóides que a compõe, ou seja, a frequência natural e os possíveis harmônicos. Além disso, ela tem um grande potencial em análise de imagens e de som.

No tratamento de sinais sonoros obtemos o espectro de frequência e seus respectivos decibéis (dB), como exemplificado na figura 5, no qual foi gravado o som de uma guitarra elétrica com o programa Audacity 2. 1.0. (parte A da figura 5) e, nele mesmo, foi feita a análise do espectro de frequência.

FIGURA 5 – A) ONDA SONORA EM ESCALA PRESSÃO X TEMPO
 B) ESPECTRO DE FREQUÊNCIA PELO NÍVEL SONORO



FONTE: Autor (2018).

Quando se faz o tratamento dos sinais sonoros, as formas da expansão da série de Fourier ficam nessas características harmônicas, veja equação abaixo.

$$y = \sum_n A_n \sin(n\omega t + \phi_n) + B_n \cos(n\omega + \phi_n) \tag{15}$$

2.5.3 Corda fixa em ambas as extremidades

A corda quando é fixada em ambas as extremidades gera harmônicos simples ao longo do seu comprimento sendo expressão pela função f_1 e f_2 da solução geral de D' Alembert (CANADA, 2005 apud BATISTA, 2015).

$$y = f_1(ct - x) + f_2(ct + x) \tag{16}$$

A função $f_1(ct - x)$ representa a onda viajando com velocidade c para direita, parecida, $f_2(ct + x)$ para a esquerda com mesma velocidade. A função pode ser senoidal ou descrever um pulso de ondas. Algumas condições de contorno são

necessárias: a corda tem comprimento l fixa nos pontos $x = 0$ e $x = l$; $y(0, t) = 0$ requer $A = -C$ e $B = -D$ na equação (16) com suas respectivas funções f_1 e f_2 .

Em suma, abaixo é representada a equação geral para corda fixa em ambas as extremidades. Ela é descrita como a soma dos modos normais.

$$y = \sum_n (A_n \sin \omega_n t + B_n \cos \omega_n t) \sin K_n x \quad (17)$$

3 MATERIAIS E METODOS

3.1 Arranjo experimental

Nesta seção é demonstrado o arranjo experimental feito para analisar o timbre de uma guitarra elétrica quando são unidos nela, em momentos diferentes, dois braços fabricados com madeiras distintas. O modelo de guitarra escolhido foi uma stratocaster, ver figura 6.

FIGURA 6 - GUITARRA STRATOCASTER.



FONTE: Adaptada de Stars-Music (2018).

O motivo da escolha do modelo da guitarra da figura acima é porque há a possibilidade de permutar o braço por outro, veja o item 2.2.3 e a figura 7, pois ele é unido ao corpo através de parafusos, diferenciando de outros modelos de guitarra cujo braço é colado ao corpo.

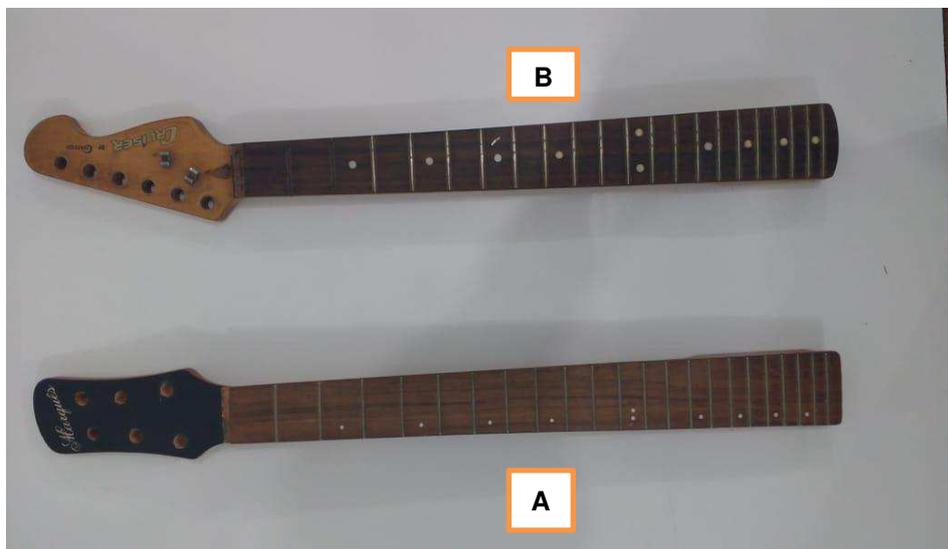
FIGURA 7 - LIGAÇÃO BRAÇO-CORPO.



FONTE: Autor (2018).

Os braços escolhidos para o experimento são mostrados na figura abaixo e suas especificações na tabela 1. Eles são do tipo heterogêneo, ou seja, dois tipos de madeiras os compõem.

FIGURA 8 - BRAÇOS DO EXPERIMENTO.



FONTE: Autor (2018).

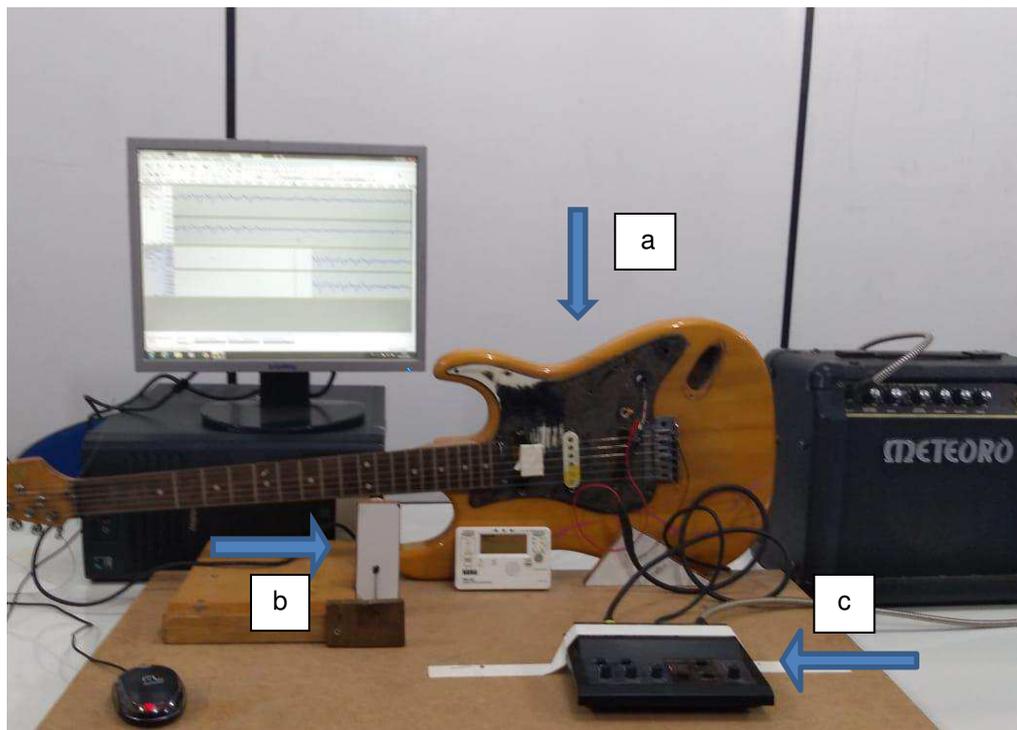
TABELA 2 – MADEIRAS QUE CONSTITUEM OS BRAÇOS⁴.

Braços	Nome <i>Nome científico</i>	Massa ⁵	Tamanho de escala
A	Cedro <i>Cedrela fissilis</i>	0,50kg	660mm
B	Basswood <i>Tilia americana</i>	0,65kg	660mm

FONTE: O autor (2018)

Para a análise dos sons com braços de madeiras diferentes foi criada uma adaptação sobre uma bancada contendo a guitarra elétrica⁶, um dispositivo mecânico disposto a fazer as vibrações das cordas a partir de uma palhetada e uma placa de áudio interface Tri-capture USB da marca Roland, ver figura 9.

FIGURA 9 - BANCADA EXPERIMENTAL



FONTE: Autor (2018).

LEGENDA: a) Guitarra elétrica montada.

b) Dispositivo palhetador.

c) Interface de Áudio.

⁴ Ambos os braços possuem a madeira Jacarandar (*dalbergia sp*) em suas escalas.

⁵ O valor da massa de cada braço é igual a soma dos dois tipos de madeiras presentes nele juntamente com o tensor, que é um material metálico que fica dentro do braço para ajustá-lo.

⁶ Note que a guitarra elétrica ficou suspensa para simular a forma como geralmente os instrumentistas tocam.

3.2 Procedimentos

Alguns procedimentos foram realizados para analisar o som da guitarra elétrica e garantir a reprodutibilidade, sendo: o corpo, os captador, a ponte e as tarraxas foram os mesmos para os diferentes tipos de braços testados, até mesmo o conjunto de cordas usado foi o da mesma marca (Orphee 0.11, tensão baixa) para cada um deles.

Um dispositivo palhetador foi construído para fazer a excitação das cordas, ver figura 10 e 11, cuja palheta, de 0,75mm, está acoplada na extremidade da mola; esta, conectada a um suporte (um*) de madeira onde nele foi feito um orifício próximo ao centro onde um fio foi perpassado, amarrado entre a conexão da palheta com a extremidade da mola, que serviu para puxar a mola para obter uma energia potencial elástica fazendo-a ficar encostada até próxima ao limite lateral do suporte de madeira¹, onde em seguida foi transferida uma força suficiente para atacar e fazer a corda vibrar, ou seja, uma palhetada mecânica.

A força aplicada na corda pela palheta foi ajustada de modo a se obter um som próximo do que seria se a corda fosse palhetada por um instrumentista.

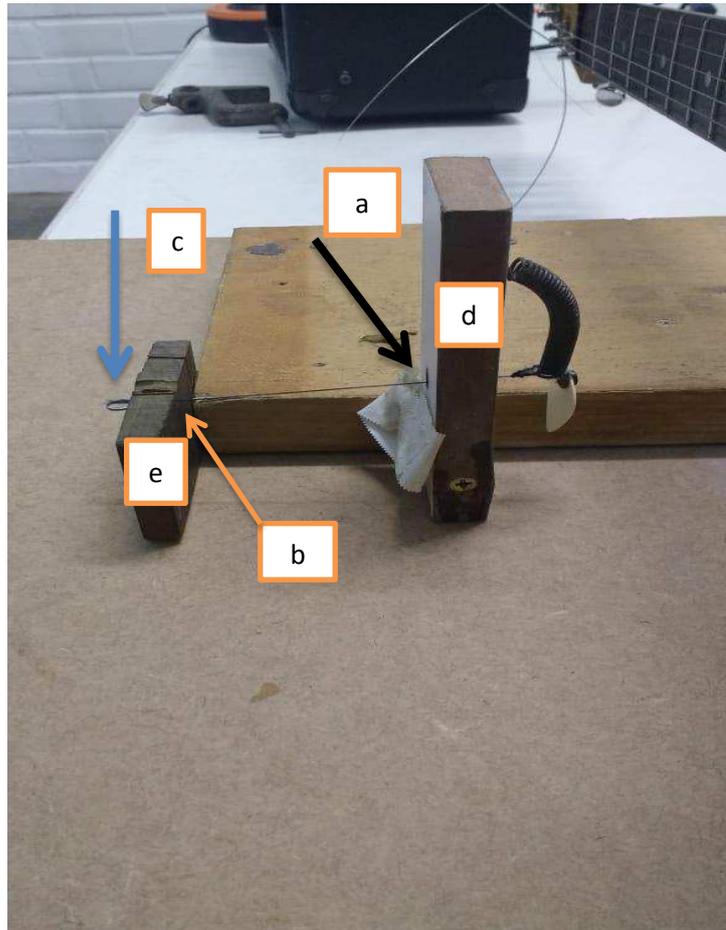
Na outra ponta do fio foi amarrada a um pequeno anel, onde este ficou preso a uma fenda feita em outro suporte (dois*) de madeira atrás do dispositivo palhetador, permitindo portando o acionamento do dispositivo palhetador quando é suspenso o pequeno anel, veja a figura 10 item c.

O dispositivo de excitação foi posicionado perpendicularmente em relação à corda, na metade da mesma, cujo comprimento possuía 66 cm.

Para obter os dados, procedeu-se primeiramente com a fixação do corpo da guitarra elétrica na bancada seguido da colocação do captador, braço, tarraxas, conjunto de cordas e, por fim, foram afinadas com um afinador da marca Korg TM-50, com precisão de ± 1 Hz. Assim foi aplicada essa ordem de montagem para os dois tipos de braços.

Só estava disponível a vibrar a corda que estava sendo excitadas, as outras foram presas. Este procedimento fez manter as tensões existentes no corpo do instrumento uma vez que todas as cordas estão presentes, simplificando assim a análise dos resultados, pois poderia ocorrer ressonância entre a corda excitada e as outras cordas gerando um espectro sonoro mais complexo.

FIGURA 10 – DISPOSITIVO PALHETADOR NÃO ACIONADO



FONTE: Autor (2018).

LEGENDA: a) Orifício onde a corda passa.
 b) Fenda que fixa o anel.
 c) Anel.
 d) Suporte (um*).
 e) Suporte (dois*).

Uma vez montado o experimento, para cada braço foram feitas excitações mecânicas apenas na sexta corda, $E(mi)=82,4\text{Hz}$, a mais grave do instrumento.

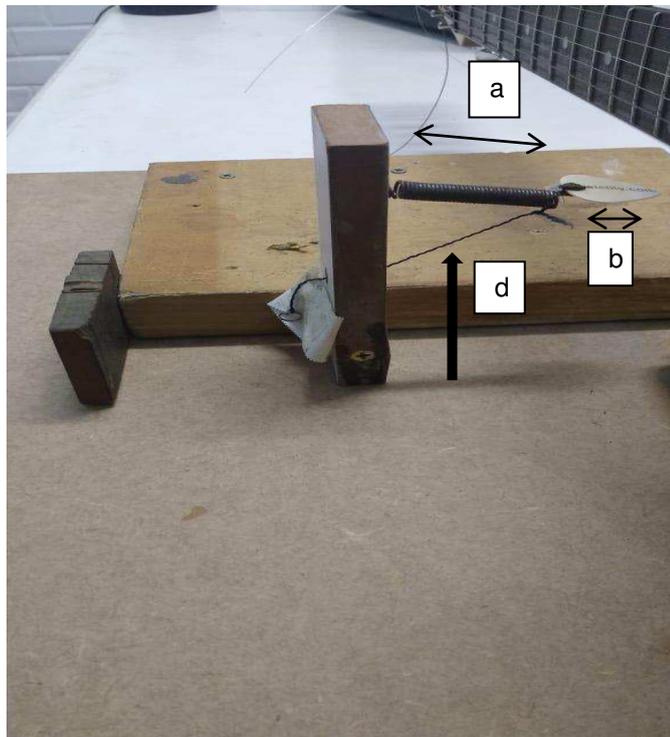
Foi usada a placa de áudio Tri-capture USB da marca Roland, ligada a um computador para gravação, para fazer a captura do som diretamente do captador da guitarra elétrica. Também foi ligada a placa uma caixa de som para monitoramento do experimento.

O software usado para analisar os arquivos de som foi o Audacity 2.1.0. E os espectros foram gerados via transformada de Fourier. Os valores dos espectros de frequência foram exportados para o Excel e plotados para gerar a média dos espectros.

Para cada braço foram gravados três sons, de cada um destes sons foi gerado o espectro de harmônicos, com estes três espectros foram feitas uma média.

Este espectro médio é o espectro que foi gerado para fins de comparação dos timbres oriundos dos braços de diferentes madeiras da guitarra elétrica (veja a figura 12).

FIGURA 11 – DISPOSITIVO PALHETADOR ACIONADO



FONTE: Autor (2018).

LEGENDA: a) Mola 6 cm de comprimento.

b) Palheta de 0,75 mm parafusada na mola.

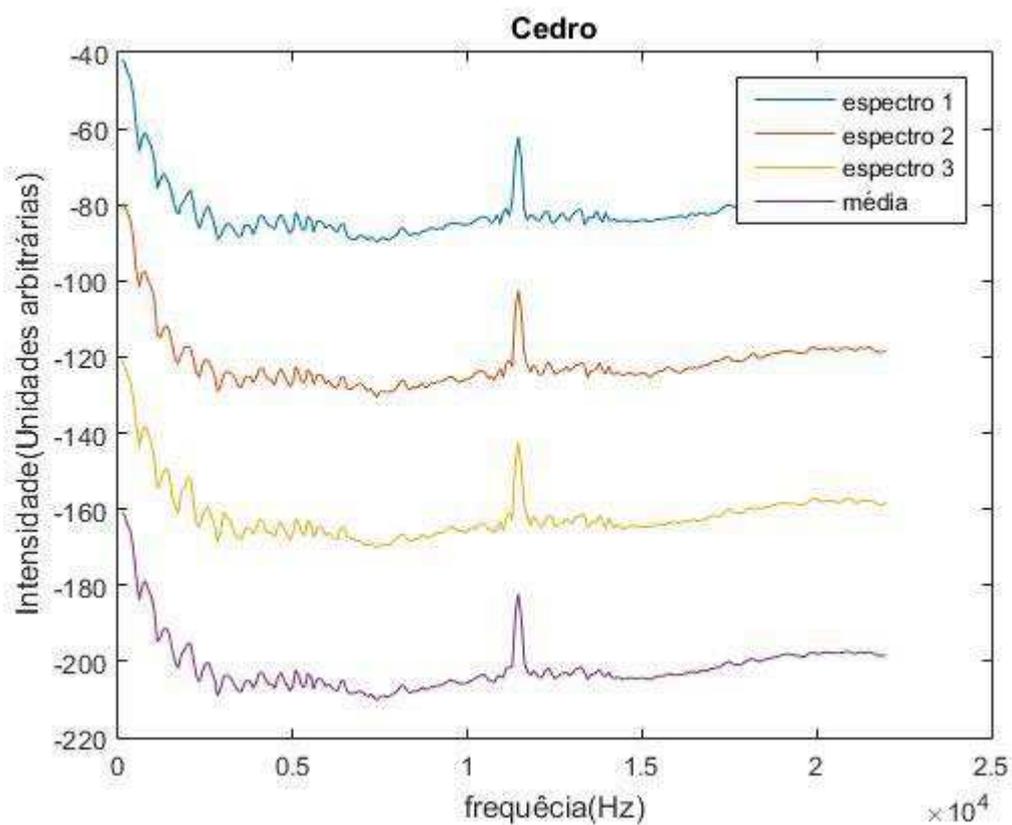
c) Fio que puxa da mola.

4 RESULTADOS E DISCUSÃO

4.1 Espectros de Harmônicos

Para definir o comportamento acústico da guitarra elétrica de braços com diferentes materiais e garantir a reprodutibilidade dos resultados é imprescindível que as excitações mecânicas realizadas nas cordas sejam as mesmas. Isto é confirmado a partir dos espectros gerados via excitação mecânica para a corda *mi*, $E(mi)=82,4\text{Hz}^7$, da guitarra montada com o braço **A** da tabela 1 mostrado nas figuras abaixo:

FIGURA 12 – ESPECTRO DE HARMÔNICOS DO BRAÇO **A**



FONTE: Autor (2018).

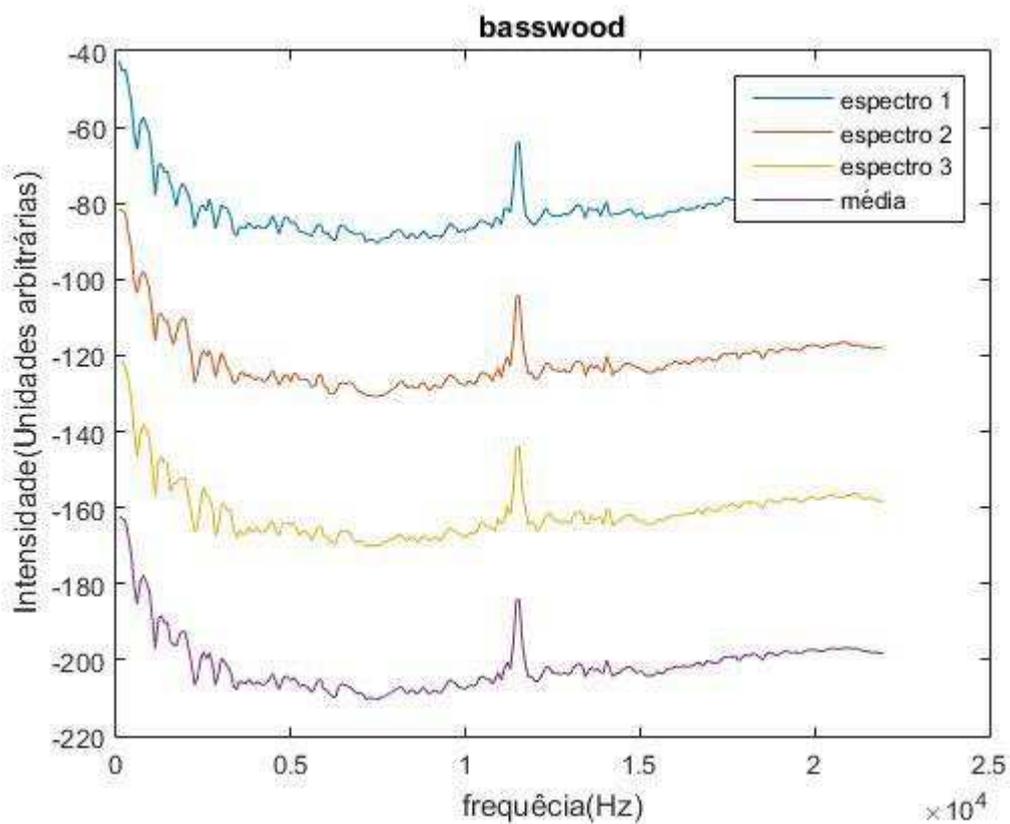
Analisando a gráfico acima, percebe-se quase nenhuma diferença entre o spectrum1, spectrum2 e spectrum3. As formas e as intensidades dos picos são quase idênticas, ou seja, a metodologia adotada garante a reprodutibilidade dos

⁷ Nota de menor frequência da guitarra elétrica.

resultados e justifica o uso das três medidas para obtenção do espectro médio de uma determinada nota musical da guitarra elétrica montada com um específico braço.

Na próxima figura, será mostrado o espectro de harmônicos gerado a partir do braço **B** da tabela 1, assim como o seu espectro de harmônicos médio:

FIGURA 13 – ESPECTRO DE HARMÔNICOS DO BRAÇO **B**

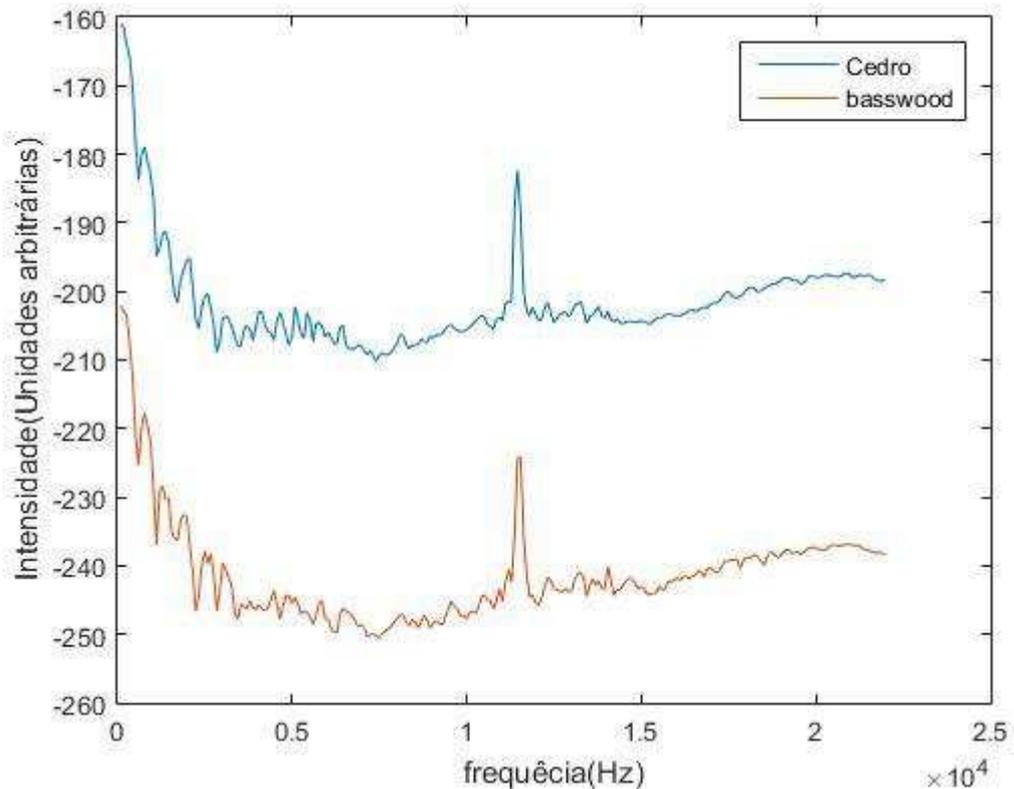


FONTE: Autor (2018).

4.2 Comparação entre os espectros médios de harmônicos

O segundo procedimento adotado para o experimento foi a comparação entre os espectros médio de harmônicos dos braços **A** e **B**, a qual é mostrada na figura 14.

FIGURA 14 – COMPARAÇÃO ENTRE OS ESPECTROS MÉDIOS DE HARMÔNICOS DO BRAÇO **A** E **B**.



FONTE: Autor (2018).

Note que não houve mudança significativamente entre os espectros médios de cada braço, o experimento demonstrou que diferentes tipos de braços não influenciam significativamente no timbre da guitarra elétrica, ou seja, essa hipótese foi corroborada pelo experimento, reafirmando o que alguns pesquisadores confirmaram.

A resposta dada ao fato mencionado está na forma como a guitarra elétrica funciona, “o som é causado pela vibração de cordas através do campo magnético que emana dos captadores de uma guitarra” (DUFFY, 2018, não p). Ou seja, o caminho do processo que vai da corda vibratória até o amplificador é bem direto, não tendo uma ligação bem direta com as madeiras. Portanto, o acoplamento entre a corda com o braço não é significativo.

5 CONCLUSÃO

Um sistema mecânico contendo uma guitarra elétrica, uma interface de áudio e um dispositivo palhetador primeiramente foi projetado e confeccionado e teve como objetivo facilitar o processo de coleta de dados para este estudo. Este processo se estendeu desde a mudança dos braços da guitarra, fazer as oscilações mecânicas das cordas, até a transferência dos sinais elétricos que saíram do captador da guitarra ao computador.

Espectros de harmônicos via excitação mecânica das cordas foram gerados a partir de dois tipos de braços de diferentes madeiras, a saber: Cedro e Basswood. Cada um deles unidos, em momentos diferentes, ao mesmo corpo de modelo de guitarra stratocaster.

Feita a comparação dos espectros de harmônicos dos braços montados no corpo da guitarra, nenhuma mudança significativa entre os dois foi apresentada, confirmando o fato de que diferentes tipos de madeira do braço de guitarras elétricas não influenciam no timbre da mesma. Evidenciando um acoplamento irrisório entre o braço e a corda.

Assim sendo, diferenças de timbres em guitarras elétricas são decorrentes e relacionados com outros fatores que não a madeira do braço em si. Talvez o timbre seja relacionado com o tipo de corda usado, geometria da guitarra, captadores, amplificadores etc. Neste estudo muito fatores não foram considerado, como o tipo de materiais que fixam a corda, nut e ponte, tipos de headstocks etc (parte anatômica), assim como as propriedades mecânicas dos materiais envolvidos, como resistência, elasticidade etc.

REFERÊNCIAS

Unsupported source type (Misc) for source BAT16.

ANDERSON, D. Does a \$10,000 guitar sound better than a \$300 one? **theage**, 2012. Disponível em: <<https://www.theage.com.au/education/does-a-10-000-guitar-sound-better-than-a-300-one-20120723-22k7b.html>>. Acesso em: 11 dezembro 2018.

ASSOCIATION, M. Anatomia da Guitarra. **Music Association**, 2018. Acesso em: 11 DEZEMBRO 2018.

BIANCHIN, V. Como funciona uma guitarra? **super.abril**, 2011. Disponível em: <<https://super.abril.com.br/mundo-estranho/como-funciona-uma-guitarra/>>. Acesso em: 11 dezembro 2018.

BLENFORD, A. Madeira usada na guitarra Gibson coloca fabricante na mira dos ambientalistas. **bbc**, 2011. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/noticias/2011/10/111013_guitarra_gibson_eua_m>. Acesso em: 4 dezembro 2018.

CASTRO, G. A. S. D. GUITARRA ELÉTRICA: ENTRE O INSTRUMENTO E A INTERFACE. **UFMG**, Minas Gerais, 2007.

DUFFY, M. Asked/Answered: Do Different Woods Affect Your Electric Guitar Tone? **Fender**, 2018. Disponível em: <<https://www.fender.com/articles/tech-talk/do-different-woods-affect-your-electric-guitar-tone>>. Acesso em: 11 dezembro 2018.

EDGAR, E. The Great Electric Guitar Tonewood Debate Solved. **instruments-gea**, 2015. Disponível em: <<https://spinditty.com/instruments-gear/The-Great-Electric-Guitar-Tonewood-Debate-Solved>>. Acesso em: 11 dezembro 2018.

ESTRANHO, R. M. Como funcionam os captadores de uma guitarra. **super.abri**, 2018. Disponível em: <<https://super.abril.com.br/mundo-estranho/como-funcionam-os-captadores-de-uma-guitarra/>>. Acesso em: 11 dezembro 2018.

FERNANDES, G. D. A. AVALIAÇÃO DE MADEIRAS BRASILEIRAS PARA. **Universidade de Brasília**, Brasília, 2004. 39.

FONSECA, C. S. D. A guitarra como um instrumento para o ensino de física ondulatória. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Rio de Janeiro, 31 março 2015. 9.

HAGUE, C. The science of sound: are electric guitars created equal? **abc**, 2012. Disponível em: <<http://www.abc.net.au/local/audio/2012/07/09/3541888.htm>>. Acesso em: 11 dezembro 2018.

HUTCHINS, C. M. **ACOUST. SOC. AM.** [S.l.]: [s.n.], 1983. 73 p.

PEREIRA, R. M.; JUNIOR, A. L.; DE FREITAS, T. C. Sobre o Acoplamento Corda-Corpo em Guitarras Elétricas e sua Relação com o Timbre do Instrumento. **PHYSICAE**, CURITIBA, PARANÁ, SETEMBRO 2010.

SOUZA, M. R. D. Madeiras da floresta Amazônica utilizadas na fabricação de instrumentos musicais. **canalciencia**, 2014. Disponível em: <<http://www.canalciencia.ibict.br/pesquisa/0270-Madeiras-floresta-Amazonica-utilizadas-na-fabricacao-instrumentos-musicais.html>>. Acesso em: 02 dezembro 2018.

STARS-MUSIC. **stars-music**, 2018. Disponível em: <https://www.stars-music.co.uk/fender-stratocaster-yngwie-malmsteen-usa-mn-vintage-white_79951.html>. Acesso em: 07 dezembro 2018.

TEIXEIRA, A. C. D. S.; STOPPA, H. TRANSFORMADA DE FOURIER APLICADA À ANÁLISE ESPECTRAL DE. **researchgate**, Goiás, 7 maio 2015. não p.

V. ANGYALOSSY, E. A. E. E. S. A. Acta Botanica Brasilica. **scielo**, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0102-33062005000400018&script=sci_abstract&tlng=pt>. Acesso em: 02 DEZEMBRO 2018.

ZWICKER, H. F. E. T. Acta Acustica united with Acustica. **researchgate**, 1998. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/282790879_Fleischer_H_und_Zwicker_T_Mechanical_vibrations_of_electric_guitars>. Acesso em: 02 DEZEMBRO 2018.