



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

Francisco De Felice Zampini

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES TIPOS DE MADEIRAS
PARA A FABRICAÇÃO DE CORPOS DE GUITARRA
ELÉTRICA.**

São Paulo
2020

Francisco De Felice Zampini

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES TIPOS DE MADEIRAS
PARA A FABRICAÇÃO DE CORPOS DE GUITARRA
ELÉTRICA.**

Dissertação apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, área de concentração: materiais.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Frajuca

Coorientador: Prof. Dr. João Mendes Filho

São Paulo

2020

Catálogo na fonte
Biblioteca Francisco Montojos - IFSP Campus São Paulo
Dados fornecidos pelo(a) autor(a)

z26a Zampini, Francisco de Felice
 Avaliação de diferentes tipos de madeiras para
 a fabricação de corpos de guitarra elétrica /
 Francisco de Felice Zampini. São Paulo: [s.n.],
 2020.
 97 f. il.

 Orientador: Prof. Dr. Carlos Frajuca
 Co-orientador: Prof. Dr. João Mendes Filho

 Dissertação (Mestrado Acadêmico em Engenharia
 Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência
 e Tecnologia de São Paulo, IFSP, 2020.

 1. Timbre. 2. Guitarra Elétrica. 3. Luteria.
 4. Produção de Instrumentos Musicais. 5. Madeiras
 Brasileiras. I. Instituto Federal de Educação,
 Ciência e Tecnologia de São Paulo II. Título.

CDD 620.1

FOLHA DE APROVAÇÃO

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA MECÂNICA

“AVALIAÇÃO DE DIFERENTES TIPOS DE MADEIRAS PARA A FABRICAÇÃO DE
CORPOS DE GUITARRA ELÉTRICA”

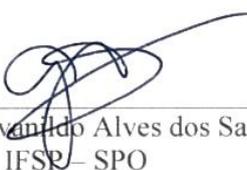
Autor: Francisco de Felice Zampini

Orientador: Prof. Dr. Carlos Frajuca

Coorientador: Prof. Dr. João Mendes Filho

A banca examinadora composta pelos membros abaixo aprovou essa dissertação:


Prof. Dr. Carlos Frajuca
IFSP - SPO


Prof. Dr. Givanildo Alves dos Santos
IFSP - SPO


Prof. Dr. Leonidas Sandoval Junior
INSPER

São Paulo, 28 de fevereiro de 2020

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Yolanda e Paschoal (in memoriam).

À minha esposa Rozana e ao meu filho Pietro.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado saúde, sabedoria e forças para superar as dificuldades nesse período de estudos e em todos os momentos da minha vida.

Aos meus pais, Paschoal e Yolanda, por terem dedicado suas vidas ao meu bem-estar e ao de meu irmão, não medindo esforços para dar-nos a melhor formação a fim de garantir-nos um futuro digno, e pelo exemplo de caráter e retidão.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Frajuca e ao meu coorientador, Prof. Dr. João Mendes Filho, pelo acolhimento e apoio, orientações, correções, sugestões e incentivo, sem o qual esse trabalho não teria sido desenvolvido.

Ao IFSP (Instituto Federal de Educação, Ciência e tecnologia de São Paulo) pela oportunidade e subsídio para a realização desse curso de mestrado.

Ao CPS (Centro Paula Souza) por disponibilizar tempo remunerado para a conclusão deste estudo.

Aos professores do IFSP, Carlos Frajuca, Givanildo Alves dos Santos, Francisco Yastami Nakamoto, Eduardo Guy Perpétuo Bock, pelos ensinamentos através dos cursos ministrados no programa de mestrado em mecânica; aos professores Alexandre Neves Ribeiro, Isac Kiyoshi Fujita, Sergio Yoshinobu Araki, José Carlos Jacintho, Pedro Fernando Poveda, Fábio Da Silva Bortoli, Ricardo Dias, Marcio Nunes Zurlo, Antônio Tadeu Rogério Franco, Garabed Kenchian, Giuliano Gozzi, Eduardo José Stefanelli, Wagner Sabor, Carlos Alberto Mitio Hirano, entre outros, pelos ensinamentos, encorajamento, companheirismo e amizade.

Ao Sr. Erico Malagoli, da empresa Malagoli Captadores, pela atenção e fornecimento de materiais, informações e sugestões para a preparação dos testes práticos.

Aos colegas das Etecs Prof. Basilides de Godoy e Prof. Horácio Augusto da Silveira, pelo companheirismo, incentivo e apoio, bem como pela troca de ideias e informações para o desenvolvimento desse estudo, em especial ao profs. Alexandre Messias, pelo incentivo, e José Augusto Trovato Junior pela troca de ideias, encorajamento, empréstimo de ferramentas e materiais para os testes práticos.

A todos os colegas do curso de mestrado pelo encorajamento, apoio, sugestões e amizade.

À minha esposa Rozana, pelo companheirismo, cuidado para comigo e para com a família, permitindo-me disponibilidade para dedicação aos estudos, e pelo incentivo e apoio incondicionais.

Ao meu filho Pietro, pelo companheirismo, amizade e motivação para que eu procure sempre me atualizar e evoluir.

Ao meu irmão Eugenio e meu cunhado Nelson pelo apoio, incentivo, e exemplos de dedicação à pesquisa.

A minha tia Maria pelo cuidado por mim, carinho e apoio.

Aos meus cunhados, Armando, Solange e Erika, pela amizade e disponibilidade para ajuda e apoio em todas as situações.

Aos meus sobrinhos Bruna, Yasmim, Gustavo e Lucas, pelo exemplo da alegria de viver.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a elaboração, desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

EPÍGRAFE

“Quando o mundo estiver unido na busca do conhecimento, e não mais lutando por dinheiro e poder, então nossa sociedade poderá enfim evoluir a um novo nível.”

Thomas Jefferson

RESUMO

O estudo tem foco no comportamento sonoro de diferentes madeiras para a fabricação de corpos de guitarra elétrica. Neste estudo foi verificado o estado da arte, através de pesquisa em artigos e dissertações a respeito do tema, e realizados testes de comportamento sonoro de corpos de madeira de diferentes espécies. Foram escolhidos quatro tipos de madeiras diferentes, dentre as espécies encontradas no Brasil, com densidades distintas, além do composto de madeira conhecido por MDF. Foram construídos corpos de provas simples, simulando corpos de guitarra elétrica, onde foi afixado um braço de guitarra. Foi realizada a montagem de cordas com a afinação de duas notas da Gama Temperada, e o som, produzido ao tanger essas cordas, analisado através de um programa específico de análise de som, o *Raven Lite*. A análise comparativa entre os espectros sonoros produzidos pela vibração de cada uma das cordas em cada um dos distintos corpos permite verificar se há diferenças relevantes na quantidade e frequência dos harmônicos e intensidades sonoras encontradas. Observou-se, nesse experimento, que a madeira do corpo tem realmente certa influência no timbre da guitarra elétrica, mas, em níveis de intensidade baixos. Não podemos afirmar, portanto, que a madeira, para o instrumento de corpo sólido, está influenciando de forma significativa a percepção do timbre do instrumento pelo ouvinte, embora algumas pessoas de audição mais sensível possam notar alguma diferença.

Palavras Chave: Timbre, guitarra elétrica, luteria, produção de instrumentos musicais, espécies de madeiras, madeiras brasileiras.

ABSTRACT

The study focuses on the sound behavior of different woods for the manufacture of electric guitar bodies. State of the art was verified through research on papers and dissertations on the subject and test of sound behavior of wood bodies of different species. Four different types of wood were chosen, from species found in Brazil, with different densities, together with the wood composite known as MDF. Simple test bodies were built, simulating electric guitar bodies where a guitar arm was affixed. The strings were assembled with the tuning of two notes from the Temperate Range, and the sound produced when these strings were touched, were analyzed through a specific sound analysis program, Raven Lite. The comparative analysis between the sound spectrum produced by the vibration of each of the strings, in each of the distinct bodies, shows if there are significant differences between the quantity and frequency of harmonics and sound intensities found. It was observed, in this experiment, that the wood of the body really has some influence on the tone of the electric guitar, but at low intensity levels. We cannot say, therefore, that wood for the solid-body instrument is significantly influencing the listener's perception of the tone of the instrument, although some people that have more sensitive hearing may notice some difference.

Keywords: Timbre, electric guitar, luthieria, production of musical instruments, species of wood, Brazilian woods

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Mapa Mundi com influências da acústica e instrumentos musicais ..	18
Figura 2: Elementos básicos de uma guitarra elétrica.....	19
Figura 3: <i>Vihuela</i> século 16.....	20
Figura 4: <i>Vihuela</i> século 17.....	21
Figura 5: Guitarra arched top, década de 40.....	21
Figura 6: Rickembacher Eletro A22 Frying Pan Guitar.....	23
Figura 7: Tipos de corpos de guitarra elétrica	24
Figura 8: Componentes de uma guitarra elétrica.	25
Figura 9: Estrutura de um Captador Magnético.....	28
Figura 10: Arranjo de vários captadores para captar diferentes modos de vibração da corda.	28
Figura 11: Arranjo de captadores no corpo da guitarra um humbucker próximo à ponte e dois single-coil	29
Figura 12: Captadores magnéticos: single-coil e humbucker.....	30
Figura 13: Cordas das notas graves, envolvidas com filamento.	31
Figura 14: Partes de uma onda estacionária.....	35
Figura 15: Corda vibrante.....	39
Figura 16: Métodos de vibração de uma onda	41
Figura 17: Corpos de guitarra testados por Pereira, Júnior e Freitas.....	44
Figura 18: Corpos de prova do trabalho de Philip Self	45
Figura 19: Corpos de madeira em Alder e Ash	46
Figura 20: Bancada de teste	55
Figura 21: Base para apoio dos corpos de prova	56
Figura 22: Gaiola de Faraday montada para o ensaio com um corpo de prova posicionado.	57
Figura 23: Captador Malagoli modelo Single Booster.	58
Figura 24: Dimensões externas do captador magnético Malagoli - Single Booster.	58
Figura 25: Junção soldada: cabos do conector soldado aos cabos do captador magnético e malhas das blindagens soldadas entre si.	59
Figura 26: Plug P2.....	59
Figura 27: Cabo blindado	60
Figura 28: Blindagem do captador magnético.	60

Figura 29: Placa de Som USB 7.1.....	61
Figura 30: Conexão para captação de sinal do captador magnético.....	61
Figura 31: Corpos simplificados de guitarra.	63
Figura 32: Corpo de prova montado.....	64
Figura 33: Gabarito para verificação da altura da corda em relação ao captador.	64
Figura 34: Tela do app Da Tuner Lite.....	65
Figura 35: Dispositivo Palhetador.....	66
Figura 36: Tela do <i>software Raven Lite</i>	67
Figura 37: Tela de programação do MATLAB.....	68
Figura 38: Gráfico das médias da nota D3 (Ré - 146,8 Hz)	70
Figura 39: Gráfico Frequência x Intensidade Sonora para o Cedro com a nota D3 (Ré - 146,8 Hz).....	71
Figura 40: Gráfico das médias da nota E4 (Mi – 329,6 Hz).....	72
Figura 41: Sobreposição dos dez espectros sonoros no corpo de Jacarandá, nota D3.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Madeiras componentes de guitarras famosas no mercado de instrumentos.....	27
Tabela 2: Madeiras utilizadas pelas principais marcas de guitarras importadas e nacionais.	33
Tabela 3: Características do encordoamento típico de uma guitarra.	43
Tabela 4: Características das madeiras tradicionalmente utilizadas para a fabricação de guitarras elétricas.....	47
Tabela 5: Características das madeiras nacionais possíveis de serem utilizadas para fabricação de guitarras elétricas.	48
Tabela 6: Propriedades das madeiras selecionadas para o teste sonoro	51
Tabela 7: Cálculo da Massa Específica Efetiva dos Corpos de Prova.	53

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	PROBLEMÁTICA.....	15
1.2	JUSTIFICATIVA.....	16
1.3	OBJETIVO GERAL.....	17
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
1.5	HISTÓRICO.....	18
1.5.1	Origem da guitarra elétrica	19
1.5.2	A evolução da guitarra elétrica	20
1.5.3	A guitarra elétrica no Brasil	23
2	O INSTRUMENTO MUSICAL	24
2.1	TIPOS DE GUITARRA ELÉTRICA	24
2.2	COMPONENTES DA GUITARRA ELÉTRICA.....	25
2.3	CORPO E BRAÇO DA GUITARRA ELÉTRICA.....	26
2.4	CAPTADORES	27
2.5	ENCORDAMENTO	31
2.6	DIFERENÇA ENTRE A GUITARRA ELÉTRICA E O VIOLÃO	32
2.7	MADEIRAS MAIS UTILIZADAS PARA A FABRICAÇÃO DO CORPO E BRAÇO DA GUITARRA ELÉTRICA	33
3	ONDULATÓRIA	33
3.1	ONDAS LONGITUDINAIS, TRANSVERSAIS E MISTAS.....	34
3.2	MOVIMENTO OSCILATÓRIO OU VIBRATÓRIO.....	34
3.3	GRANDEZAS FÍSICAS ASSOCIADAS ÀS ONDAS.....	34
3.4	VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE UMA ONDA PERIÓDICA	35
4	SOM E TIMBRE	36
4.1	O SOM.....	36
4.1.1	Qualidades do som	36
4.1.2	Altura	36
4.1.3	Intensidade	37
4.1.4	Timbre	38
4.2	FREQUÊNCIAS NATURAIS E RESSONÂNCIA	38
4.3	CORDAS VIBRANTES	38
4.3.1	Velocidade de propagação de ondas transversais	39

4.4	HARMÔNICOS	40
4.5	FREQUÊNCIAS NATURAIS DE VIBRAÇÃO DE UMA CORDA.....	42
5	ESTADO DA ARTE	44
5.1	ESTUDOS REALIZADOS POR OUTROS AUTORES.....	44
5.2	CARACTERÍSTICAS DAS MADEIRAS	47
6	O EXPERIMENTO (MATERIAIS E MÉTODOS)	50
6.1	ESCOLHA DOS MATERIAIS PARA CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	50
6.2	GEOMETRIA E DIMENSIONAMENTO DOS CORPOS DE PROVA.....	52
6.3	COMPOSIÇÃO DA BANCADA DE TESTE	54
6.3.1	Mesa (base para apoio dos corpos de prova)	56
6.3.2	O Captador Magnético	57
6.3.3	Cabos (conexão do captador ao microcomputador)	59
6.3.4	Placa de som	61
6.3.5	Microcomputador e programa de aquisição de dados	62
6.4	DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO	62
6.4.1	Preparação do corpo de prova	62
6.4.2	A coleta de dados	66
7	RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
8	CONCLUSÃO	74
9	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	76
	REFERÊNCIAS	80
	APÊNDICE A - Gráficos das médias dos espectros sonoros da nota D3 (146,8 Hz)	84
	APÊNDICE B - Gráficos das médias dos espectros sonoros da nota E4 (329,6 Hz)	88
	APÊNDICE C – Tabelas comparativas de valores obtidos dos gráficos dos espectros sonoros da nota D3 (146,8 Hz)	92
	APÊNDICE D – Tabelas comparativas de valores obtidos dos gráficos dos espectros sonoros da nota E4 (329,6 Hz)	95

1 INTRODUÇÃO

A possibilidade de diversificação no uso de tipos de madeiras para a fabricação de instrumentos musicais traz benefícios econômicos e ecológicos. O entendimento do comportamento dos diferentes tipos de madeiras e sua influência no desempenho sonoro de um instrumento musical, traduzido pelo seu timbre, é fundamental na escolha do material mais adequado para a sua confecção. A maior facilidade de obtenção de uma espécie madeireira, devido à sua natividade e facilidade de crescimento e reflorestamento é fato de grande interesse para o fabricante de instrumentos musicais pois poderá beneficiar-se da diversidade desses materiais alternativos, desde que seu uso não dificulte a produção, nem altere a qualidade sonora dos instrumentos fabricados.

A fabricação de instrumentos musicais, assim como a música, é um misto de ciência e arte. A ideia de música como ciência e arte é abordada na obra de Rogers (2012), denominada: *Physics of Music: Science and Art*. Na obra: Teoria da Música, Med (1996) também afirma que: “a música não é apenas uma arte, mas também uma ciência”. A fabricação de instrumentos musicais envolve a ciência, através dos fenômenos físicos que explicam a emissão e todas as propriedades sonoras possíveis de serem obtidas por um instrumento musical, e a arte, encontrada na estética e nas formas harmoniosas do instrumento. A escolha de materiais para a fabricação de instrumentos depende de diversos fatores: tradição, comportamento quanto à vibração e propagação sonora, estética, resistência mecânica, trabalhabilidade, estabilidade, entre outros, enfim, ciência e arte. (FERNANDES, 2004) (PEREIRA, 2010) (PEDGLEY, 2009) (MUNK, 2018)

1.1 PROBLEMÁTICA

Um número relativamente pequeno de espécies florestais madeireiras é efetivamente utilizado para a fabricação de instrumentos musicais. Isso principalmente devido ao tradicionalismo dos fabricantes e ao bom desempenho das madeiras já conhecidas e utilizadas para a fabricação dos mesmos. (TELES, LIMA, & COSTA, 2016).

Hoje em dia é efetiva a preocupação com os impactos ambientais decorrentes das atividades humanas. Em relação às madeiras, é essencial a conservação das espécies mais utilizadas para a confecção de produtos em geral. Além disso, é de especial importância conhecer e usar madeiras que apresentem velocidade de crescimento compatível com a demanda para a conservação das espécies mais raras e de menor velocidade de reposição. É interessante que sejam estudadas e utilizadas, para a fabricação de instrumentos musicais, madeiras mais abundantes, de rápido crescimento, ou de reflorestamento, e ainda, de obtenção fácil e mais econômica regionalmente (FLORES, 2015), ou até mesmo madeira de reuso ou reciclagem.

1.2 JUSTIFICATIVA

Uma das formas de educação de crianças e jovens para o desenvolvimento da sensibilidade e expressão de ideias e sentimentos é através da música e passa pelo aprendizado de um instrumento musical. Como afirma Flores (2015), “independentemente da profissão que exerce, se um trabalhador toca um instrumento musical, a criatividade e a sensibilidade dessa pessoa invariavelmente afetam de forma positiva o seu trabalho”.

A preocupação com os impactos ambientais decorrentes das atividades humanas faz parte da história recente da sociedade; é essencial que madeiras que apresentem velocidade de crescimento compatível com a demanda sejam conhecidas. Assim, foram utilizadas neste trabalho madeiras abundantes, de rápido crescimento ou de reflorestamento.

Admitindo existir em toda a hileia Amazônica cerca de 4000 espécies arbóreas regularmente distribuídas por todo o vale, Loureiro et al. (1979). Sternadt & Camargo (1988) mencionam que em levantamentos realizados pelo IBDF/IPT/INPA, 256 espécies madeireiras amazônicas têm algum significado econômico das quais, apenas 50 são comercializadas em volume significativo. Portanto, pelo número reduzido de espécies que são exploradas para atender às necessidades das indústrias da Região, poderá ocorrer o esgotamento de matéria-prima antes que outras espécies sejam estudadas visando conhecer as suas propriedades e direcioná-las para os diversos usos finais. (SILVA FILHO, ROCHA, & MOURA, 1992)

Na reportagem em O Estado de São Paulo em 27 de junho de 2018, intitulada “Fabricação de Instrumentos se destaca na Crise” lê-se o seguinte texto:

O mercado brasileiro de instrumentos musicais, principalmente os de corda e elétricos como guitarras e contrabaixos, é dominado pelas importações (cerca de 90% dos itens no mercado) e apresentou queda de 80% nos últimos cinco anos, de acordo com os dados da Associação Nacional da Indústria da Música (ANAFIMA).

O cenário, à primeira vista, sinaliza um segmento desafiado do ponto de vista econômico. Mas também é uma oportunidade para empreendedores que investem em negócios com o foco no conserto, manutenção, personalização e fabricação sob medida de instrumentos musicais - as chamadas luterias. (O Estado de São Paulo, 2018)

Além da luteria, talvez esteja na hora de retomar o mercado nacional com a fabricação de instrumentos musicais viáveis economicamente, mas sem a perda de qualidade sonora, utilizando-se de matéria prima nacional, uma vez que o país possui uma enorme quantidade de espécies a serem exploradas e adaptadas para a fabricação de instrumentos musicais.

1.3 OBJETIVO GERAL

Nosso objetivo é analisar a influência de diferentes tipos de madeiras no timbre de uma guitarra elétrica.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Desenvolver metodologia para o estudo e comparação da vibração sonora das cordas de uma guitarra elétrica quando esse instrumento é fabricado com diferentes espécies de madeira.

Comparar o timbre de guitarras elétricas com corpo construído com madeiras e/ou materiais de características diferentes.

Identificar possíveis diferenças no timbre de uma guitarra elétrica e a sua correlação com a madeira constituinte do corpo desse instrumento.

1.5 HISTÓRICO

É natural, em toda a atividade humana, uma contínua evolução na qualidade dos produtos e serviços. Conforme Flores (2015), na aplicação da acústica, na música e na luteria, houve uma evolução direcionada à busca por sons mais harmônicos e agradáveis. Nessa linha podem ser citados alguns instrumentos como os amplificadores valvulados, sintetizadores, processadores de efeitos, condensadores e outros, assim como diferentes instrumentos característicos de diferentes culturas.

A Figura 1 abaixo mostra o Mapa Mundi, onde pode-se observar os locais correspondentes e suas principais influências de criação de instrumentos musicais e acústicas.

As letras representam as regiões onde foram desenvolvidas a teoria e prática musical e acústica: A: Egito (Os primeiros instrumentos musicais), B: França (Fourier), C: Espanha (violão moderno, Antônio Torres), D: China (Primeiros estudos de acústica), E: Grécia (Escala musical, Aristóximo).

(Os números representam o habitat natural de espécies comumente utilizadas na confecção dos violões clássicos. 1: Abeto, 2: Araucária, 3: Marupá, 4: Jacarandá, 5: Andiroba, 6: Jenipapo (FLORES, 2015))

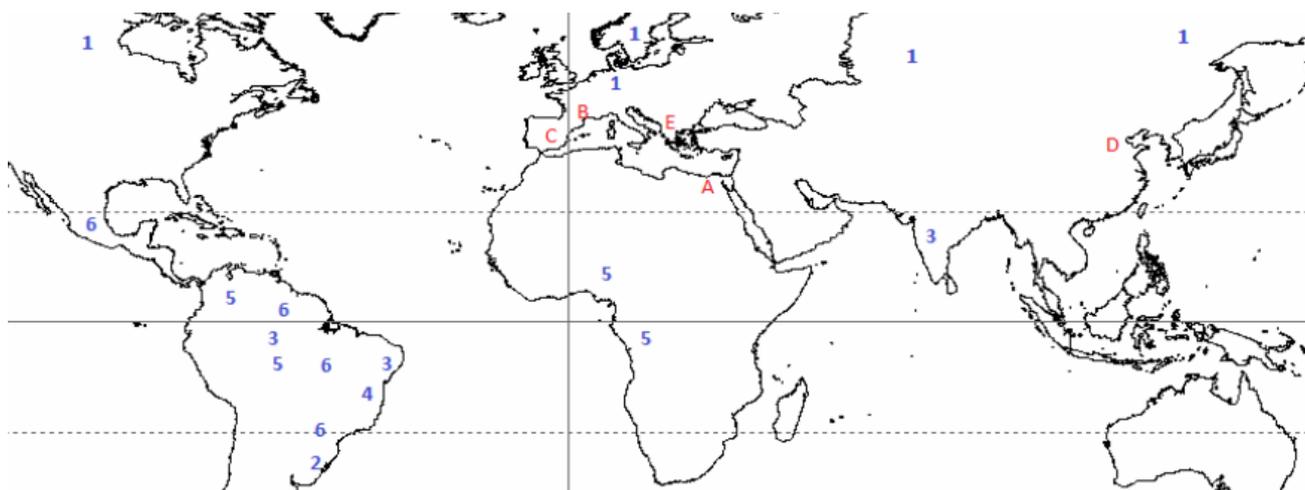


Figura 1: Mapa Mundi com influências da acústica e instrumentos musicais

Fonte: FLORES, 2015

1.5.1 Origem da guitarra elétrica

Segundo Souza (2002), o início da fabricação da guitarra elétrica maciça remonta ao final da década de 1940 até meados da década de 1950, com a contribuição de nomes como Adolph Rickenbacker, Les Paul e Leo Fender. Antes desse período, somente a guitarra acústica ou violão, como é conhecido popularmente no Brasil, estava adequada à utilização musical. (VENEZA & TROMBINI, 2013).

A necessidade de um instrumento com maior capacidade de amplificação do som levou a uma adequação do instrumento, que passou a ter corpo sólido ao invés de um corpo oco ou uma caixa de ressonância. “Deste modo apenas a madeira, as cordas e os captadores eram responsáveis pela emissão do som. Além disso, a ponte e todo o sistema elétrico também passaram a fazer parte da produção timbrística do instrumento”. (VENEZA & TROMBINI, 2013) Apesar disso, a compreensão de som é reconhecida pela utilização de apenas três elementos: a madeira, o encordoamento e os captadores.

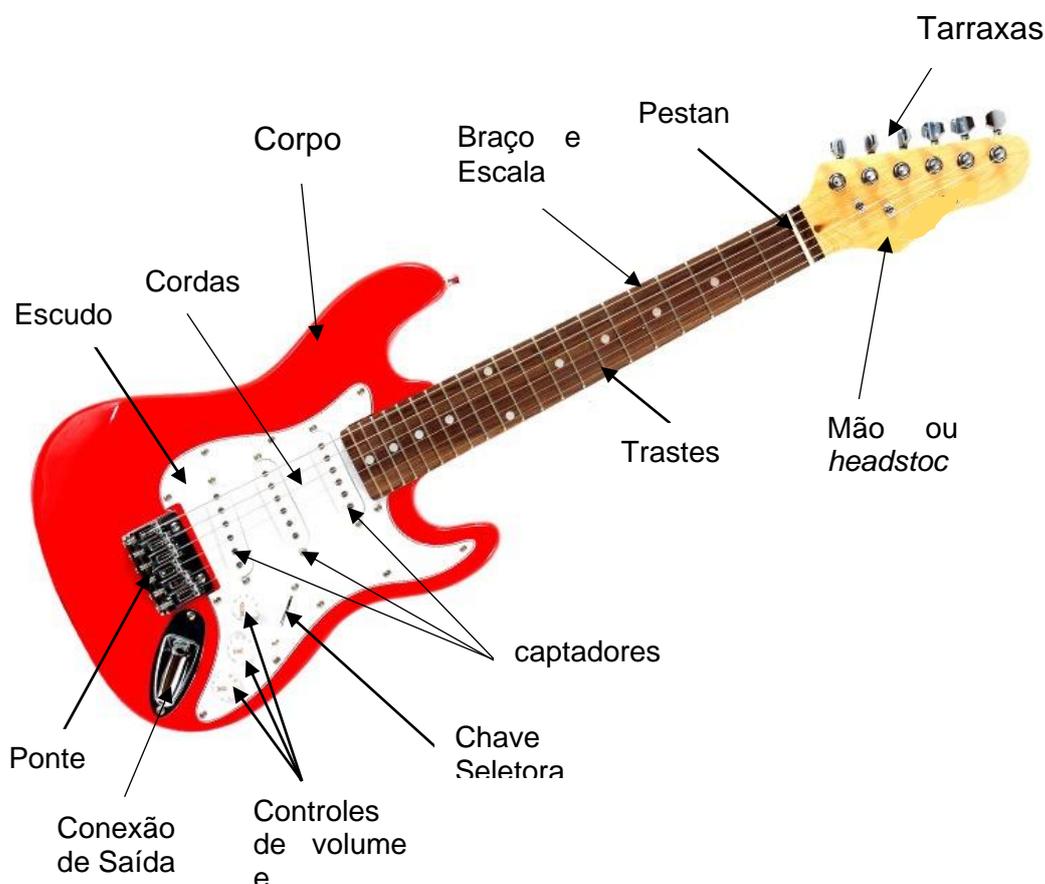


Figura 2: Elementos básicos de uma guitarra elétrica.

Fonte: O autor.

1.5.2 A evolução da guitarra elétrica

A guitarra é um instrumento versátil capaz de produzir música de formas diferentes e variadas. É um instrumento a partir do qual pode-se obter solos ou fazê-lo cumprir a função de instrumento de acompanhamento, permitindo uma extensa gama de possibilidades de manipulação sonora e meios de interpretação (ROCHA, 2005).

Apesar de ser um instrumento com trajetória histórica curta, se comparada à do piano, é importante ressaltar a complexidade de encontrar com exatidão sua origem, pois seu aspecto histórico é parte do ponto de vista de um autor, que utiliza em parte sua experiência e referência sobre o que é descrito.

Conforme nos conta Rocha (2005, p.2), o termo guitarra surgiu, em princípio, no séc. XVI, denominando um instrumento de quatro cordas, parecido com um instrumento, a *vihuela*, muito apreciado nas cortes entre os aristocratas. A guitarra, no entanto, era um instrumento menor, sem valorização, utilizado popularmente.



Figura 3: *Vihuela* século 16

Fonte: <http://earlymusicstudio.com/library/vihuela-building-part-1/>



Figura 4: *Vihuela* século 17

Fonte: <http://earlymusicstudio.com/library/vihuela-building-part-1/>

Em torno de 1536 a 1690, através de modificações ocorridas em sua construção, a guitarra foi evoluindo para o formato com seis cordas, resultando no que é chamado de violão. Já o termo guitarra, no Brasil, passou a ser relacionado apenas aos instrumentos evoluídos a partir das guitarras *archtop*, em inglês, abreviatura do termo *arched top*, ou seja, tampo arqueado, até a criação das guitarras elétricas de corpo sólido (ROCHA, 2005, p. 2-3).



Figura 5: Guitarra *arched top*, década de 40

Fonte: Site Mercado Livre – acesso 18/03/2019

Nos primórdios do séc. XX surge a utilização de um modelo acústico, mas com características que se tornariam parte essencial da construção de guitarras elétricas de corpo sólido. Nesse modelo aparecem dimensões e contornos de corpo e braço, presença do escudo (*pickguard*), bocas em forma de f (*sound-holes*), corte no corpo (*cutaway*), facilitando acesso a notas mais agudas no braço, pontes diferentes dos rastilhos de violão, próxima às pontes usadas atualmente e utilização de cordas de aço (ROCHA, 2005, p. 83). Nas guitarras *archtop*, mesmo com as diferenças em relação ao violão, a afinação e a técnica continuaram inalteradas; no entanto, os guitarristas utilizariam de preferência palhetas para percutirem as cordas ao invés dos dedos da mão direita como os violonistas. (ROCHA, 2005, p. 83)

Ainda, conforme Rocha (2005), devido à crescente necessidade de se produzir um volume sonoro cada vez maior, deu-se o início do desenvolvimento de alternativas de instrumentos objetivando, além do maior volume sonoro, eliminar ou diminuir a microfonia gerada pelas guitarras ocas, amplificadas e tocadas em volumes consideravelmente altos uma vez que seriam tocadas ao lado de diversos outros instrumentos em bandas ou quartetos jazzísticos.

Segundo ROCHA (2005), a partir dessa fase, a guitarra se afasta das suas origens ligadas ao violão devido à exigência de propriedades acústicas diferentes, que não são adequadas às situações acústicas, e fatores que dizem respeito ao uso de amplificação e tratamento eletroeletrônico do som, ligado a efeitos e saturação de sinal que esses instrumentos passaram a requerer com a utilização de captadores magnéticos (ROCHA, 2005, p. 87).

Conforme Machado (2009, p. 4), as guitarras *archtop*, de corpo acústico ou semiacústico e de topo arqueado, acabam se diferenciando das guitarras elétricas de corpo sólido sobretudo pela maneira como são utilizadas; a guitarra *archtop* é mais associada ao gênero jazzístico, enquanto a guitarra elétrica de corpo sólido, sem partes ocas ou câmaras internas, é utilizada em grande diversidade de gêneros musicais, em particular os gêneros pop e rock. A guitarra elétrica de corpo sólido, entre os tipos de guitarras, é o tipo de instrumento mais difundido entre os guitarristas iniciantes ou mesmo profissionais.

Encontra-se nos históricos de evolução da guitarra elétrica que a eletrificação de um instrumento do qual teria evoluído para a guitarra deu-se no final da década de 1920, com a montagem de captadores nas guitarras de *jazz*

e guitarras Havaianas. Já em torno de 1932, surge um modelo de guitarra elétrica, a *Frying Pan* ou *Pancake*, desenvolvida pela por George Beauchamp e Adolph Rickenbacker. Em torno de 1940 o guitarrista e inventor Les Paul monta cordas e captadores num bloco sólido de *Maple*, envolvido por um corpo de guitarra acústica, com o objetivo de minimizar as vibrações do corpo da guitarra e ressonância. Em 1947, Paul Bigsby construiu uma guitarra elétrica em conjunto com o guitarrista Merle Travis. Esse modelo de corpo sólido daria origem à guitarra *Broadcaster* da Fender que depois trocava o nome para *Nocaster* e finalmente *Telecaster*, nome consagrado e mantido até os dias atuais. Mais tarde surge a primeira guitarra de corpo sólido construída pela Gibson juntamente com Les Paul em 1952, tendo essa guitarra o mesmo nome do guitarrista desenvolvedor. Em 1954, seria lançada pela Fender a *Stratocaster*, uma das guitarras mais versáteis tocadas ainda hoje.



Figura 6: Rickembacher Eletro A22 *Frying Pan* Guitar

Fonte: http://www.edroman.com/guitars/ricken_fryingpan.htm

1.5.3 A guitarra elétrica no Brasil

No Brasil, o trabalho de luteria, arte de fabricar ou consertar instrumentos musicais, evoluiu gradativamente desde que os primeiros *luthiers* chegaram ao Brasil no início do século XX. Tranquilo Giannini e Romeu Di Giorgio deram origem às duas maiores fábricas de violões do Brasil, mas, antes de se tornarem industriais, esses *luthiers* faziam seus instrumentos artesanalmente. (PINTO, 2008)

2 O INSTRUMENTO MUSICAL

2.1 TIPOS DE GUITARRA ELÉTRICA

Conforme Fernandes (2014), os tipos dos corpos de guitarras elétricas costumam ser divididos entre:

Sólido: corpo feito de madeira sólida, sem partes ocas ou câmaras internas.

Semissólido: tendo a construção iniciada com corpo sólido que é trabalhado de forma a construir partes escavadas cobertas por camadas coladas no final do processo;

Semiacústico: sendo sua concepção parte da estrutura acústica. Nesse caso o corpo geralmente é mais fino em comparação com as guitarras acústicas. As guitarras semiacústicas podem ser feitas com tampos sólidos ou laminados.

Acústico: com o copo mais largo do que as semiacústicas. São confeccionados com tampo laminado ou sólido. A sonoridade, é mais grave e encorpada em comparação aos outros modelos de corpo.

Além disso, os corpos podem ter *shapes*, formatos, bem variados, vide Figura 7.



Sólido

Semissólido

Semiacústico

Acústico

Figura 7: Tipos de corpos de guitarra elétrica

Fonte: FERNANDES (2004).

2.2 COMPONENTES DA GUITARRA ELÉTRICA

As guitarras são divididas em corpo, braço, escala, “*headstock*”, tirante, ponte, trastes, tarraxas, captadores, parte elétrica e cordas.

A Figura 8 mostra a nomenclatura das partes de uma guitarra elétrica.

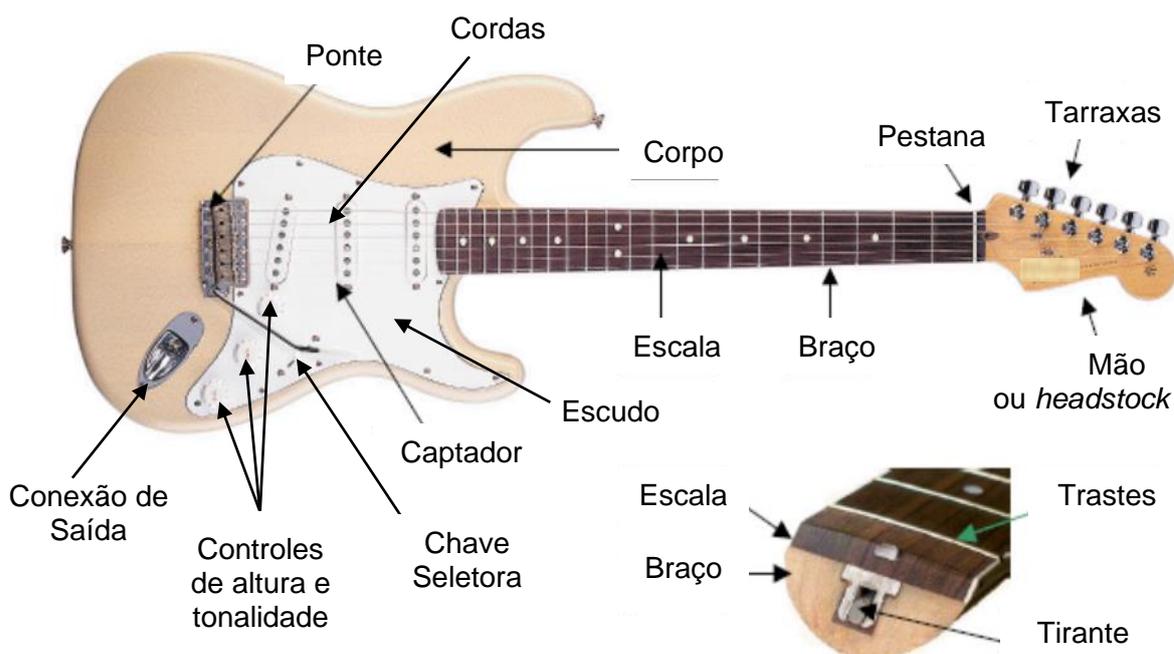


Figura 8: Componentes de uma guitarra elétrica.

Fonte: FERNANDES (2004). Adaptação do autor.

- Mão, Paleta, Headstock: componente onde estão fixadas as tarraxas. Comumente feito do mesmo tipo de madeira do braço da guitarra. Geralmente construído de forma angular para otimizar a tensão das cordas sobre a pestana.
- Pestana, Nut: ponto de apoio das cordas. Situada entre o *Headstock* e a escala. Tem a função de separar as cordas entre si e elevar as cordas em relação à escala.
- Tarraxas, Tuning Machines: mecanismo para controlar a tensão das cordas na afinação do instrumento.

- Escala, Fingerboard: é o componente onde são fixados os trastes para a formação dos acordes e execução das escalas.
- Trastes, Frets: hastes de metal que tem o propósito de dividir a escala em partes consecutivamente menores para obtenção da altura das notas.
- Braço, Neck: normalmente fabricado em madeira maciça e rígida. O braço é geralmente parafusado ou colado ao corpo da guitarra.
- Corpo, Body: dá formato ao instrumento, sustenta a ponte, conexão, escudo e circuito. Para o instrumento acústico tem a função de ressonância. Pode possuir diversos formatos que darão ao instrumento características próprias.
- Ponte, Tremolo Bridge: componente onde as cordas são presas e suas vibrações transmitidas para o corpo e cordas da guitarra. Em alguns modelos de guitarras, as pontes são do tipo *tremolo*, permitem afrouxamento e tensionamento das cordas, permitindo alterar a afinação das mesmas, proporcionando sons e efeitos sonoros distintos.
- Conexão de Saída, Output-Jack: Componente para a conexão de cabos para envio de sinal aos amplificadores, mesas de som, pedais de efeito e/ou demais processadores de som.
- Escudo, Pickguard: componente onde é instalado o circuito: captadores, controles e chave seletora da guitarra.
- Circuito, Circuit/Controls: componentes eletrônicos que amplificam eletronicamente as ondas eletromagnéticas, através dos captadores magnéticos instalados sob as cordas. Os circuitos podem ser compostos de dois ou mais captadores, chaves seletoras de 3 ou 5 posições, além de controles de volume e tonalidade. (Michael, manual do proprietário)

2.3 CORPO E BRAÇO DA GUITARRA ELÉTRICA

Seguem exemplos de algumas das mais utilizadas madeiras para a confecção de uma guitarra elétrica.

Na Tabela 1 encontram-se as principais madeiras utilizadas pelos tradicionais fabricantes de guitarras. Nota-se que são utilizadas madeiras de diferentes espécies para distintas partes do instrumento, corpo, braço e escala.

A escolha dessas madeiras deve contemplar não só as necessidades mecânicas do instrumento como resistência, estabilidade dimensional, estabilidade sonora, como também a beleza visual do instrumento.

Tabela 1: Madeiras componentes de guitarras famosas no mercado de instrumentos

Guitarra	Madeira p/ Braço	Madeira p/ corpo	Madeira p/ escala	Captador
<i>Gibson Les Paul Standard caved top</i>	<i>Mogno</i>	<i>Maple (superior) e Mogno (inferior)</i>	<i>Rosewood</i>	<i>Burstbucker Pro</i>
<i>Ibanez Semi-acústica</i>	<i>Mogno</i>	<i>Maple</i>	<i>Bound Rosewood</i>	<i>ACH1 e ACH2</i>
<i>Jackson KV1</i>	<i>Maple</i>	<i>Poplar</i>	<i>Ébano</i>	<i>Seymour Duncan SH6 e SH2</i>
<i>Ibanez Roadstar</i>	<i>Maple</i>	<i>Mogno</i>	<i>Rosewood</i>	<i>Low Z</i>

Fonte: (VENEZA & TROMBINI, 2013)

2.4 CAPTADORES

Conforme Manente (2015), diferente do instrumento acústico, onde o som depende somente da ressonância produzida no corpo oco do instrumento pelas ondas provocadas através das oscilações das cordas, os instrumentos elétricos, de corpos geralmente maciços, não possuem caixa de ressonância. As cordas metálicas desses últimos têm sua vibração transmitida através dos chamados captadores.

Os captadores de instrumentos de corda elétricos têm a finalidade de captar o som do instrumento e transmiti-lo para um amplificador como um sinal elétrico. Deste modo é possível obter o controle da intensidade e da altura do som do instrumento, independentemente da sua construção acústica.

Os captadores eletromagnéticos funcionam seguindo os princípios do eletromagnetismo e mais especificamente da Lei da Indução de Faraday.

$$\int \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \frac{d\phi_B}{dt} \quad (2.1)$$

Um campo magnético variável no tempo: $(d\phi_B)/dt$; induz um campo elétrico \vec{E} . (HALLIDAY D. R., 2016)

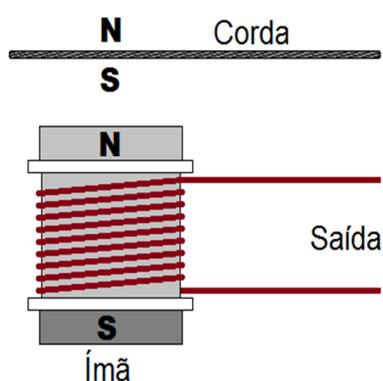


Figura 9: Estrutura de um Captador Magnético

Fonte: <http://loudluthieria.com/fisica-de-um-captador/>

Segundo Rossing (2010), o captador eletromagnético consiste em uma bobina com um núcleo magnético. A vibração de uma corda metálica causa mudanças no fluxo magnético através do núcleo, que provoca um sinal elétrico na bobina. Várias guitarras elétricas têm pelo menos dois captadores para cada corda; algumas têm três. Esses captadores são localizados em diferentes postos ao longo das cordas. O captador mais próximo ao braço gera sinal mais forte na frequência fundamental, enquanto o captador mais próximo à ponte, é mais sensível aos harmônicos mais altos. Conforme a corda vibra mais próximo ao núcleo magnético da bobina, o som é mais intenso, porém se a corda estiver muito próxima haverá distorção do som, devido à força de atração da bobina sobre a corda. Vide Figura 10.

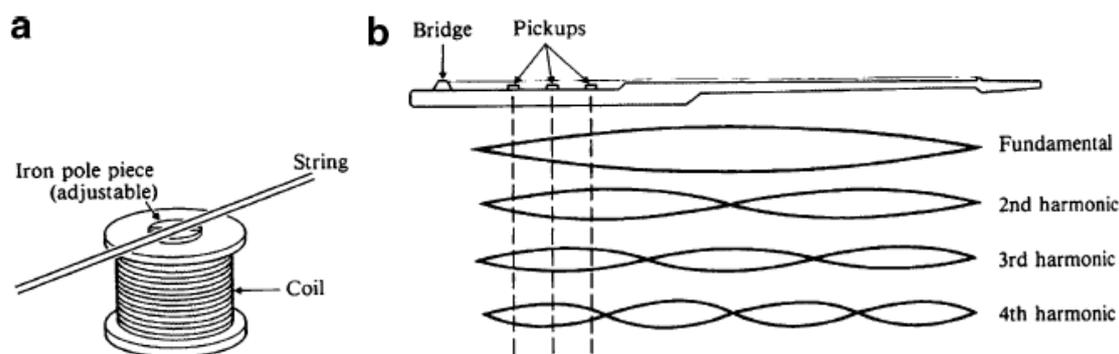


Figura 10: Arranjo de vários captadores para captar diferentes modos de vibração da corda.

Fonte: ROSSING, Thomas D., CALDERSMITH, Graham., 2010.

Ainda Rossing (2010) explica que os Captadores *Humbucking* possuem duas bobinas de forma que campos magnéticos dispersos (de cabos de alimentação, luzes etc.) induzirão sinais nas duas bobinas; assim, o zumbido que eles produzem será minimizado. Algumas guitarras elétricas associam captadores *humbucking* e captadores *single-coils* nas diferentes posições em relação à ponte e ao braço da guitarra. A

Figura 11 mostra um arranjo de captadores magnéticos, um *humbucker* próximo à ponte e dois *single-coil*, um intermediário e outro junto ao braço.

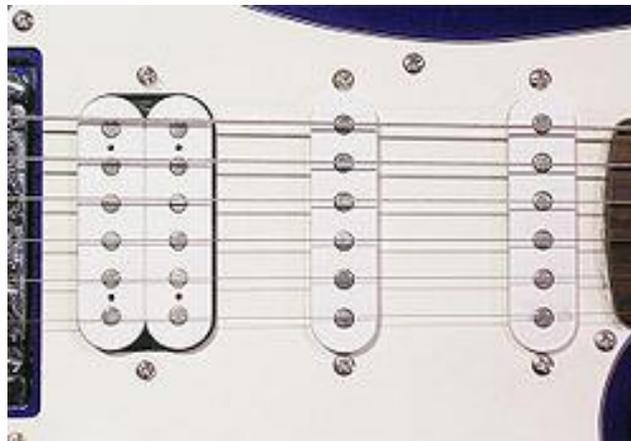


Figura 11: Arranjo de captadores no corpo da guitarra um *humbucker* próximo à ponte e dois *single-coil*.

Fonte: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6a/Schema_kytaryzt.jpg

A Figura 12 mostra o esquema de dois tipos de captadores, um *single-coil* de apenas uma bobina e um *humbucker* de duas bobinas.

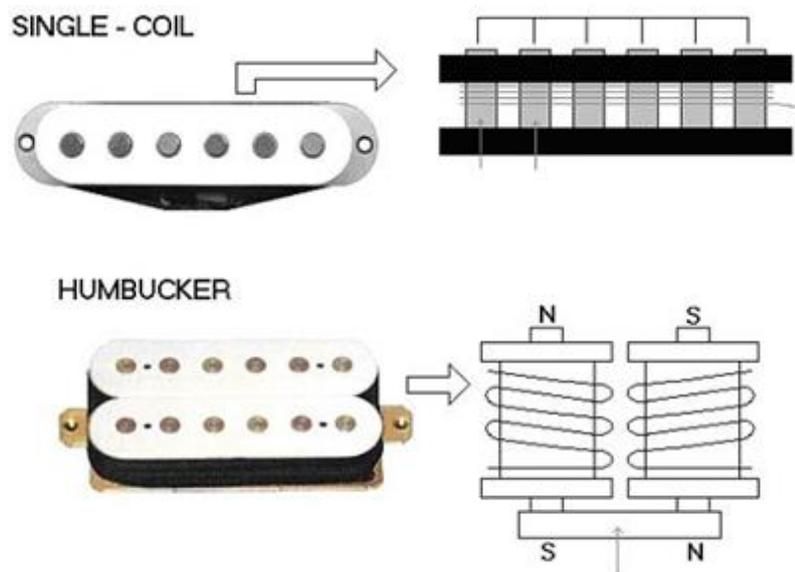


Figura 12: Captadores magnéticos: *single-coil* e *humbucker*.

Fonte: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6a/Schema_kytaryzt.jpg

Adaptação do autor.

Outros tipos de captadores são utilizados, de forma geral, em instrumentos musicais de cordas. Segundo Gomes (2012), os captadores piezoelétricos fazem uso de materiais com uma propriedade especial. Esses materiais, como, por exemplo o quartzo, quando sujeitos a uma tensão mecânica, originam um campo elétrico de intensidade proporcional à força que os comprime. Da mesma forma, ao aplicar uma tensão elétrica ao material, este vibra produzindo som. Dispositivos produzidos com esses materiais, são colocados sob a ponte, e respondem à força das cordas vibrantes sobre a ponte. Eles geram um som diferente dos magnéticos, som mais limpo, livres das interferências eletromagnéticas.

Os captadores magnéticos detectam a frequência de vibração das cordas, enquanto que os piezoelétricos detectam a pressão das cordas.

Estão entrando em cena os Captadores Ópticos, que usam *LEDs* infravermelhos e fotodetectores para detectar a movimentação da corda. Os captadores ópticos, assim como os piezoelétricos, não são magnéticos; portanto não é necessário o uso de cordas de aço.

2.5 ENCORDOAMENTO

Denomina-se encordoamento ao conjunto de cordas que equipam o instrumento. No caso da guitarra elétrica temos, normalmente, um conjunto de seis cordas. As cordas são elementos fundamentais para conferir sonoridade à guitarra elétrica.

As cordas que normalmente utilizadas na montagem da guitarra elétrica são feitas de um fio de aço trefilado constituído de um material único e homogêneo ou material revestido. As cordas destinadas a produzir os sons mais graves são formadas de um fio mais fino acrescido de um outro fio enrolado ao seu redor, aumentando assim o diâmetro do mesmo, conferindo maior resistência e estabilidade para a afinação, e aumentando a densidade linear da corda. (OLIVEIRA, 2014)

O fio no qual é aplicado o enrolamento pode também, além de uma secção circular, ter sua secção transversal no formato hexagonal, conforme vemos na Figura 13, conferindo maior estabilidade à corda.

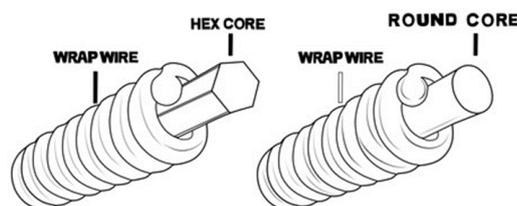


Figura 13: Cordas das notas graves, envolvidas com filamento.

Fonte: <https://blog.cavanhaweb.com.br/materiais-das-cordas-de-guitarra/>

Quanto aos materiais utilizados na produção dos filamentos das cordas das notas graves, são usualmente utilizados materiais mais duros como o níquel, aço niquelado ou aço inoxidável, sendo também utilizadas ligas de cobre, bronze e prata. (OLIVEIRA, 2014)

2.6 DIFERENÇA ENTRE A GUITARRA ELÉTRICA E O VIOLÃO

Segundo Self (2016), a principal diferença entre a guitarra elétrica e o violão é o mecanismo usado para amplificar e emitir o som produzido pelo toque das cordas. O som produzido pelo violão depende sobretudo da capacidade e forma de vibração das madeiras constituintes do corpo do instrumento, propagando as ondas sonoras através da ressonância dessas madeiras. Por esse motivo, as propriedades acústicas das madeiras usadas causarão um certo impacto na qualidade de timbre do som produzido.

Já na guitarra elétrica a vibração de cordas de aço induz uma corrente elétrica nos captadores magnéticos posicionados sob as cordas, que é transmitida para um amplificador e daí a emissão do sinal amplificado na forma de ondas sonoras através de autofalantes.

Nesse caso, não há necessidade de vibração da madeira para a indução da corrente no captador magnético. No entanto, a ideia de que o tipo de madeira afeta diretamente a qualidade do som é aplicada na construção de guitarras elétricas. (SWEETWATER 2013, apud SELF 2016).

O tom de um violão é definido por três fatores: suas cordas, a caixa de ressonância e o ar contido dentro do volume da caixa (Sundberg, 1991). Portanto, as madeiras que compõem a caixa de ressonância realmente definem a “cor” do instrumento. Em contraste, uma guitarra elétrica não possui uma correlação direta com a caixa de ressonância e o volume de ar. Seu som é definido pelas cordas, o captador magnético e o amplificador. A partir disto, parece, então, que nenhuma outra parte constituinte do sistema elétrico da guitarra contribui para o som geral do instrumento. No entanto, há muitas evidências, sem comprovação científica, quanto ao fato de que um dado tipo de madeira do corpo contribui para o timbre efetivo de uma guitarra elétrica. A maioria dos que tocam guitarra elétrica por algum tempo, reconhecem que as madeiras do corpo influenciam de fato o som do instrumento. Enquanto alguns diriam que existe um efeito baseado em diferentes materiais de construção, há aqueles que argumentam de outra forma. Por exemplo, Halliday (2001) afirma que o corpo sólido do instrumento de fato não possui ressonância. Segundo Soper (2005), não há muitas informações e estudos sobre esse tema. Tal fato

motiva a investigação sobre a potencial contribuição acústica que certas espécies de madeiras fazem neste caso.

2.7 MADEIRAS MAIS UTILIZADAS PARA A FABRICAÇÃO DO CORPO E BRAÇO DA GUITARRA ELÉTRICA

Tabela 2: Madeiras utilizadas pelas principais marcas de guitarras importadas e nacionais.

Corpo	Braço	Escala
<i>Agathis</i>	<i>Maple</i>	<i>Ébano</i>
<i>Alder</i>	<i>Mogno</i>	Jacarandá (<i>Rosewood</i>)
<i>Ash</i>	<i>Cedro</i>	<i>Maple</i>
<i>Basswood</i>	<i>Walnut</i>	
<i>Maple</i>		
<i>Mogno</i>		
<i>Poplar</i>		
<i>Spruce</i>		

Fonte: (FERNANDES, Avaliação de madeiras brasileiras para utilização em guitarras elétricas, 2004)

3 ONDULATÓRIA

Segundo Vilas Boas (2016), ondas sonoras são ondas de natureza mecânica, portanto necessitam de meio material para se propagarem. As ondas sonoras não se propagam no vácuo. Onda mecânica é a propagação de energia através de partículas de um meio material, sem que essas partículas sejam transportadas.

É importante que conheçamos a definição de ondas eletromagnéticas, pois seu conceito será utilizado também na compreensão do funcionamento do captador magnético que irá captar a vibração de uma corda vibrante, no caso da corda de uma guitarra ou um baixo elétrico. As ondas eletromagnéticas consistem em um conjunto de dois campos, um elétrico e outro magnético, que se propagam no vácuo com velocidade aproximada de 300.000 km/s ou em meios materiais a uma velocidade menor que essa.

3.1 ONDAS LONGITUDINAIS, TRANSVERSAIS E MISTAS

Conforme Vilas Boas (2016), ondas longitudinais são ondas mecânicas que produzem perturbações nas partículas do meio material, na mesma direção que se propagam. Por exemplo, o movimento de uma mola helicoidal presa em suas extremidades e posta em movimento através de sua compressão.

Ondas transversais são aquelas em que as vibrações ocorrem perpendicularmente à direção de propagação. Por exemplo, uma corda presa em uma de suas extremidades e sacudida pela outra. Neste caso, o pulso se propaga ao longo da corda, sendo o movimento que provoca vibração no sentido perpendicular à direção de propagação do movimento.

As ondas eletromagnéticas, no entanto, são compostas de dois campos, um elétrico e outro magnético, perpendiculares entre si e perpendiculares à direção de propagação das ondas. Diz-se, portanto, que elas são ondas transversais.

Ondas mistas são ondas mecânicas compostas de ondas longitudinais e transversais.

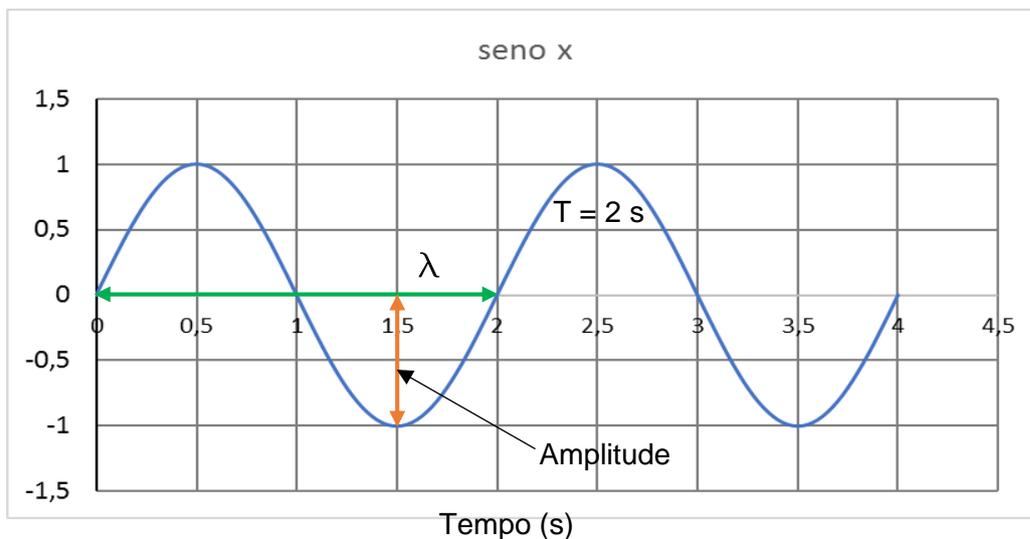
3.2 MOVIMENTO OSCILATÓRIO OU VIBRATÓRIO

Movimento oscilatório, ou vibratório, é o movimento em que uma massa realiza sucessivos vaivéns, sendo que cada vaivém representa uma oscilação ou ciclo. Alguns movimentos oscilatórios e periódicos, descritos por funções horárias harmônicas, ou seja, funções seno ou cosseno, são denominadas movimentos harmônicos simples (MHS).

3.3 GRANDEZAS FÍSICAS ASSOCIADAS ÀS ONDAS

As principais grandezas físicas associadas às ondas são: a amplitude (A), o período (T), a frequência (f) e o comprimento de onda (λ).

A Figura 14 mostra os parâmetros: amplitude, período, frequência e comprimento de onda.



Onde $T = 2 \text{ s}$ que corresponde à $f = 0,5 \text{ Hz}$

Figura 14: Partes de uma onda estacionária

Fonte: Adaptação do autor

A frequência da onda é o número de oscilações que um ponto qualquer da corda executa por unidade de tempo.

O período é definido como sendo o tempo em que um ponto da corda, partindo de um estado, passa por todos os estados acessíveis e volta ao estado inicial.

$$f = \frac{1}{T} \Rightarrow \omega = 2\pi f \quad , \quad (3.1)$$

onde ω é a velocidade angular do ponto.

3.4 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE UMA ONDA PERIÓDICA

Uma onda que se propaga através de um meio percorrendo uma distância d igual ao seu comprimento de onda λ , num intervalo de tempo igual a um período, tem velocidade dada por

$$v = \frac{d}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f \quad (3.2)$$

4 SOM E TIMBRE

4.1 O SOM

Segundo Vilas Boas (2016), o som é composto de um conjunto de ondas mecânicas que podem ser captadas pelo sistema auditivo do homem e dos outros animais. A velocidade de propagação das ondas sonoras depende das condições do meio em que se propagam. No ar a 15° C, a velocidade do som é de aproximadamente 340 m/s.

O sistema de audição humano é sensível às ondas com frequência entre 20 Hz e 20.000 Hz. Frequências acima de 20.000 Hz chamamos de ultrassom e frequências abaixo de 20 Hz são chamadas de infrassom.

4.1.1 Qualidades do som

Conforme Yamamoto (2016), podemos distinguir três qualidades nos sons: altura, intensidade e timbre, qualidades essas, chamadas fisiológicas, pois dependem da sensibilidade humana.

4.1.2 Altura

Altura é a qualidade que permite diferenciar um som grave de um som agudo. A altura do som depende exclusivamente da frequência da onda que o produz. Para uma frequência maior, o som será mais agudo, enquanto para uma frequência menor o som será mais grave.

O quociente entre a frequência de dois sons i é chamado de intervalo entre esses sons:

$$i = \frac{f_2}{f_1} \quad , \quad (4.1)$$

sendo f_1 e f_2 as frequências das ondas sonoras de dois sons distintos.

Quando $f_2 = 2f_1$, ou seja, $i = 2$, dizemos que o intervalo corresponde a uma oitava acima. Quando $f_2 = f_1 / 2$, ou seja, $i = 1/2$, dizemos que o intervalo corresponde a uma oitava abaixo.

4.1.3 Intensidade

A intensidade é a qualidade que permite diferenciar um som forte de um som fraco. A intensidade do som depende da energia que a onda transfere e divide-se em intensidade física e intensidade auditiva.

Sendo I , definida como intensidade física ou o quociente entre a quantidade de energia E que atravessa uma unidade de área A da superfície perpendicular à direção de propagação, na unidade de tempo Δt .

$$I = \frac{E}{A \cdot \Delta t} = \frac{P}{A} \quad , \quad (4.2)$$

onde P é a potência em W (watt) no sistema internacional, sendo I dado em $\text{J/m}^2 \cdot \text{s}$ ou W/m^2 .

A mínima intensidade física I_0 , limiar de audibilidade vale: $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$

A máxima intensidade física $I_{\text{máx}}$, limiar da dor, ou o maior valor de intensidade suportável vale:

$$I_{\text{máx}} = 10^0 = 1 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right) \quad . \quad (4.3)$$

A Medida que o observador se afasta da fonte sonora, a intensidade auditiva ou nível sonoro β diminui de forma logarítmica, de acordo com a expressão:

$$\beta = \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (4.4)$$

ou

$$10\beta = \frac{I}{I_0} \quad . \quad (4.5)$$

Sendo a unidade de nível sonoro, no SI o bel (B). No entanto a unidade mais usual é o decibel (dB), onde $1 \text{ dB} = 10^{-1} \text{ B}$.

4.1.4 Timbre

Conforme Yamamoto (2016), o timbre é a qualidade do som que permite diferenciar dois sons de mesma altura e mesma intensidade, emitido por fontes distintas.

Instrumentos musicais diferentes têm timbres diferentes, o que permite a identificação de uma mesma nota musical tocada em um piano ou em um violão. As vozes humanas também são caracterizadas por diferentes timbres; por esse motivo podemos identificar uma pessoa pela sua voz característica.

Segundo Vilas Boas (2016), o timbre é a sensação característica causada pela presença de harmônicos acompanhando o som fundamental e nele influem tanto a quantidade de harmônicos como suas intensidades relativas. “É o timbre que nos permite distinguir a mesma nota (mesmo som fundamental) emitida por instrumentos diferentes, ainda que essa nota tenha a mesma intensidade”. Quando a corda de um instrumento musical é tangida, ela vibra simultaneamente em diversas frequências, o que caracteriza o timbre do som emitido.

4.2 FREQUÊNCIAS NATURAIS E RESSONÂNCIA

Todo o objeto formado por um material elástico, quando sujeito a uma excitação, vibrará com seu próprio conjunto de frequências particulares, que juntas formam seu som próprio. Essa é então a frequência natural de um objeto, a qual depende de um conjunto de fatores tais como a especificidade do material, a elasticidade e a forma do objeto.

4.3 CORDAS VIBRANTES

Segundo Yamamoto (2016), uma corda, sendo um corpo elástico, apresenta várias frequências naturais de vibração. Ao atingir um modo de vibração e cessada a fonte de excitação, essa corda permanecerá vibrando até perder toda a sua energia de vibração, obtendo-se assim o que chamamos de modos de vibração. Podemos tratar então cada modo de vibração como uma configuração de onda estacionária, que resulta da superposição da onda que

emitimos quando balançamos uma corda com a onda refletida na outra extremidade.

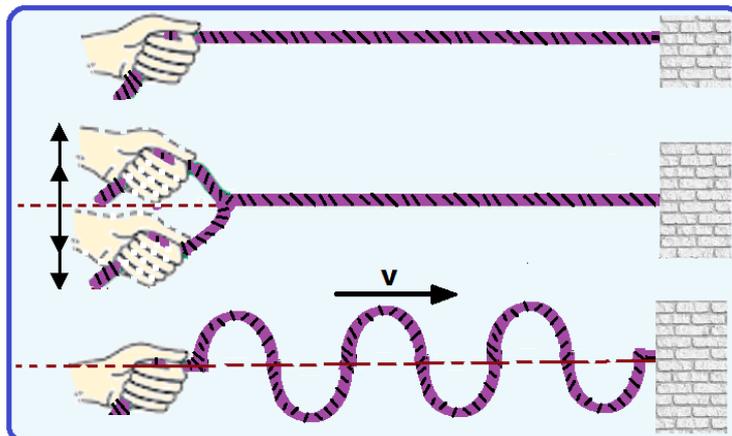


Figura 15: Corda vibrante

Fonte: <http://fisicaevestibular.com.br/novo/ondulotoria/acustica/cordas-vibrantes/>

4.3.1 Velocidade de propagação de ondas transversais

Uma onda se propaga através de um meio percorrendo uma distância d igual ao seu comprimento de onda, então temos $d = \lambda$, num intervalo de tempo igual a um período

$$\Delta t = T . \quad (4.6)$$

A velocidade de propagação da onda é uma constante

$$v = \frac{d}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T} . \quad (4.7)$$

Portanto,

$$v = \lambda f . \quad (4.8)$$

Ainda, para uma corda de massa m e comprimento L , temos a densidade linear δ dessa corda:

$$\delta = \frac{m}{L} \quad (\text{kg/m}) \quad . \quad (4.9)$$

Realizados testes em laboratório e obtendo valores numéricos chega-se à fórmula de Taylor:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\delta}} \quad (4.10)$$

ou escrevendo de outra maneira:

$$v = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{F}{\mu\pi}} \quad . \quad (4.11)$$

onde r = raio da corda considerada, μ = densidade absoluta volumétrica (m/v), F = força tensora e π a constante pi (3,141592....)

4.4 HARMÔNICOS

A Figura 16 mostra os quatro primeiros modos de vibração da corda de comprimento L , presa pelas extremidades. n é o número do harmônico, λ_n é o comprimento de onda, f_n a frequência e v a velocidade da onda.

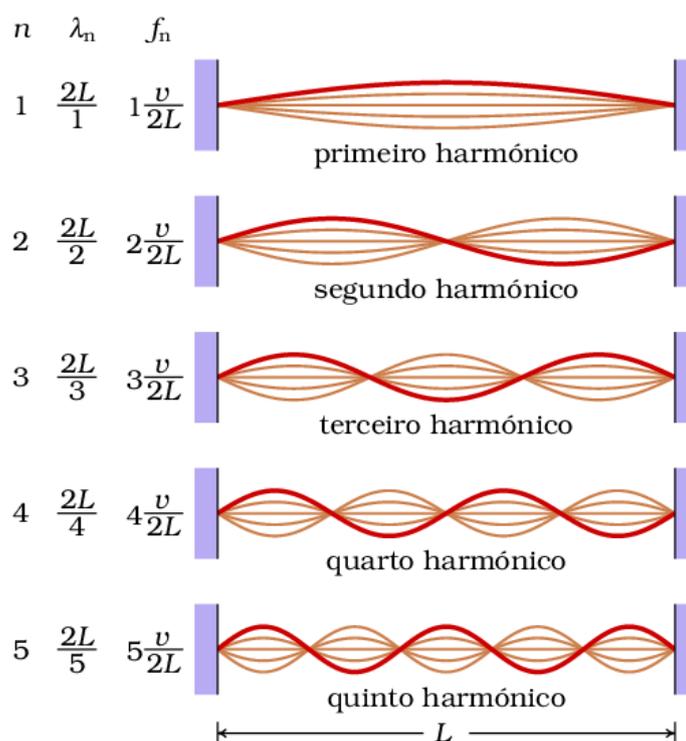


Figura 16: Métodos de vibração de uma onda

Fonte: <https://def.fe.up.pt/fisica3/ondas3/index.html>

Ainda, conforme Yamamoto (2016) e Jones (2013), observa-se que as ondas sonoras são ondas longitudinais; não são as ondas geradas ao longo da corda, que são transversais. A velocidade de transmissão do som não é a mesma velocidade de propagação da onda da corda; no entanto, a corda vibrante é a fonte das ondas sonoras que, por isso, têm a mesma frequência de vibração da corda.

No instrumento acústico, quando o músico dedilha a corda, ele fornece energia à corda, que vibra o ar ao seu redor. É o ar que vibra, adentrando a caixa do instrumento, provocando a vibração da mesma, gerando a onda sonora audível que pressiona o tímpano do ouvinte. (YAMAMOTO, 2016) (MILLER, 1916).

Já no instrumento de corpo sólido, o músico dedilha a corda e a vibração dessa corda, de aço, é captada através do captador magnético que transforma essa onda de vibração magnética em ondas elétricas, que uma vez amplificadas serão emitidas pelo alto-falante e este sim irá transmitir as ondas sonoras audíveis. Mas como no caso do instrumento acústico, a corda vibrante ainda é a

fonte de energia, que por fim, irá se transformar em onda sonora, tendo essa última a mesma frequência da corda vibrante.

Se a corda vibra no modo fundamental, o som emitido é também denominado “som fundamental”. A mesma linguagem vale para os demais harmônicos.

4.5 FREQUÊNCIAS NATURAIS DE VIBRAÇÃO DE UMA CORDA

Considerando cordas cilíndricas, temos: (I)

$$v = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{F}{\mu\pi}} \quad , \quad (4.12)$$

onde:

v = velocidade de propagação de ondas transversais na corda,

r = raio da secção transversal da corda,

F = intensidade da força tensora da corda,

μ = massa específica do material de que é feita a corda,

N = quantidade de meios comprimentos de ondas (ou ordem dos harmônicos) .

f = frequência natural de vibração da corda

$$f = \frac{Nv}{2L} \quad . \quad (4.13)$$

Então, substituindo (4.12) em (4.13),

$$f = \frac{N}{2Lr} \sqrt{\frac{F}{\mu\pi}} \quad (4.14)$$

ou

$$f = \frac{N}{DL} \sqrt{\frac{F}{\mu\pi}} \quad , \quad (4.15)$$

onde $D = 2r$, diâmetro da secção transversal da corda. Então, conclui-se que a frequência do som fundamental emitido é inversamente proporcional ao diâmetro, ao comprimento da corda e à raiz quadrada da massa específica do material de que é feita a corda. Da mesma forma, mantidos os outros parâmetros, a frequência do som fundamental é diretamente proporcional ao número de meias ondas estacionárias e à raiz quadrada da intensidade da força tensora da corda. (YAMAMOTO, 2016) (CASTELLI e MUSSATO, 2014)

A Tabela 3 indica os valores de frequência, calibre e tensão para um encordoamento típico de guitarra, marca D'Addario modelo EXL110, lembrando que há encordoamentos de diferentes calibres à disposição do músico.

Tabela 3: Características do encordoamento típico de uma guitarra.

Corda	Nota	Frequência (Hz)	Calibre (mm)	Calibre (pol)	Tensão (N)	Tensão (lb)
1	Mi (E4)	329,6	0,25	0.010	72,13	16.2
2	Si (B3)	246,9	0,33	0.013	64,40	15.4
3	Sol (G3)	196,0	0,43	0.017	73,70	16.6
4	Ré (D3)	146,8	0,66	0.026	81,73	18.4
5	Lá (A2)	110,0	0,91	0.036	84,67	19.5
6	Mi (E2)	82,4	1,17	0.046	75,17	75.5

Fonte: (LAGO, 2015), adaptação do autor.

5 ESTADO DA ARTE

5.1 ESTUDOS REALIZADOS POR OUTROS AUTORES

A partir do presente estudo, identificaram-se pesquisadores que desenvolveram estudos direcionados à comparação de madeiras na confecção de guitarras de corpo sólido com interesse, assim como neste trabalho, em verificar se a madeira tem influência significativa no timbre do instrumento.

Rodrigo Mateus Pereira, professor na área de Tecnologia em Luteria da Universidade Federal do Paraná, junto com outros autores (PEREIRA, JUNIOR, & FREITAS, 2010), realizaram experimento no qual foram construídos nove corpos de guitarra elétrica no modelo *Telecaster*. Esses corpos foram montados com a utilização de um mesmo braço e captador. Os sons obtidos diretamente dos instrumentos foram gravados e posteriormente analisados para a comparação de seus harmônicos. Segundo esses autores, não se verificaram diferenças significativas entre esses harmônicos.

A Figura 17, retirada do trabalho de Rodrigo Mateus Pereira, mostra os corpos produzidos para o teste com diferentes tipos de madeira. As madeiras utilizadas foram: A - Araucária, B – Cedro-rosa, C – Freijó, D – Imbuia, E – Jequitibá, F – Marupá, G – Mogno, H – Pinus, I – Tauari. Fonte: Ilustração retirada do artigo de Pereira, Júnior e Freitas, (2010), editado na revista *Physicae* (PEREIRA, JUNIOR, & FREITAS, 2010).



Figura 17: Corpos de guitarra testados por Pereira, Júnior e Freitas

Fonte: PEREIRA, JUNIOR & FREITAS

Phillip Self, estudante da *Texas A&M University*, em sua dissertação de bacharelado em Ciências da Computação, realizou estudo com duas guitarras, confeccionadas com corpo e braço com dois tipos de madeiras diferentes, *Mahogany* e *Maple*, madeiras estas consagradas e usualmente utilizadas na confecção de guitarras (SELF, 2016).

A Figura 18, retirada do trabalho de Philip Self, mostra os corpos de prova confeccionados nas madeiras *Mahogany* e *Maple* confeccionados para o teste sonoro.

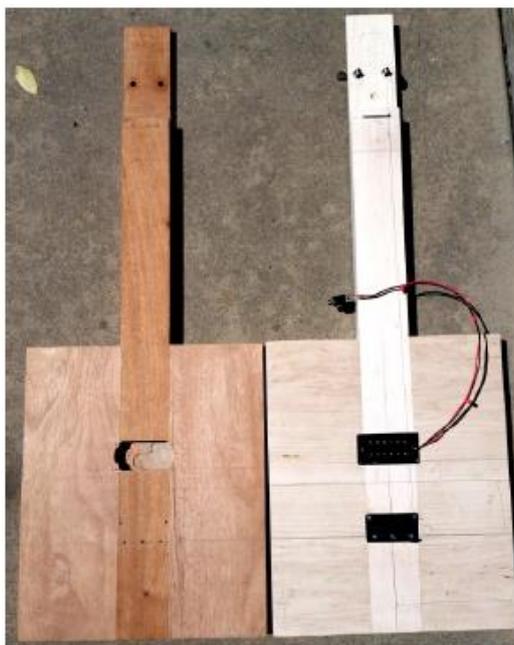


Figura 18: Corpos de prova do trabalho de Philip Self

Fonte: Ilustração obtida na dissertação de bacharelado de Phillip Self (SELF, 2016).

Após a coleta de dados procedeu-se a análise das amplitudes dos harmônicos produzidos por cada guitarra. Self concluiu que as guitarras não apresentaram diferenças entre os harmônicos obtidos de forma a classificá-los como mais “brilhante” ou mais “brandos”, e as diferenças quanto ao timbre foram discretas e variaram de instrumento para instrumento dependendo da nota musical que estivesse sendo analisada. Assim, entre as madeiras *Mahogany* e *Maple*, não houve evidência, pelo experimento realizado, que uma madeira tem um timbre especialmente mais “brilhante” que a outra.

Gustavo de Amorim Fernandes (2004) estudou madeiras brasileiras para a confecção de guitarras elétricas, baseado nas propriedades das madeiras e teste acústico analisando a sustentabilidade do som nos diversos tipos de madeiras das florestas brasileiras. Concluiu que “as madeiras brasileiras podem produzir guitarras de qualidade, podendo ter características semelhantes ou até superiores às tradicionalmente utilizadas”, mas que “existem inúmeras características que podem definir o timbre de uma madeira, até mesmo, variações dentro da mesma árvore”.

Keith J. Soper, pesquisador da Universidade de Toledo, em seu trabalho intitulado: *Body Woods and an Electric Guitar's Frequency Spectrum*, estuda dois diferentes tipos de madeiras, *Ash* e *Alder*, madeiras tradicionais utilizadas na fabricação de guitarras elétricas. Utilizando método de análise de dados, concluiu que o tipo de madeira utilizada na confecção do corpo da guitarra não contribui de forma significativa para o som do instrumento amplificado, embora as duas amostras de corpos de madeira, ressonem discretamente de formas diferentes. (SOPER, 2005)



Figura 19: Corpos de madeira em *Alder* e *Ash*

Fonte: Ilustração retirada do artigo de Keith J. Soper (SOPER, 2005).

5.2 CARACTERÍSTICAS DAS MADEIRAS

“Na natureza podemos perceber que todos os materiais biológicos são compósitos, sem exceção. Exemplos encontrados de compósitos naturais incluem madeira, em que a matriz de lignina é reforçada com fibras celulósicas”. (HIDALGO LÓPEZ, 2003)

A Tabela 4 mostra as características das madeiras tradicionalmente utilizadas para fabricação de guitarras elétricas. Nela podemos encontrar a densidade dessas madeiras para a comparação dessa característica.

Tabela 4: Características das madeiras tradicionalmente utilizadas para a fabricação de guitarras elétricas

Nome científico	Nome comum	Densidade aparente 12% (g/cm ³)	C (m/s)	Fr (Hz)	DL	MOE (X1000) (kgf/cm ²)	MOR (kgf/cm ²)	Dureza Janka transv. (kgf)
<i>Agathis borneensis</i>	Agathis	0,48	...	...	...	---	503	148
<i>Alnus rubra</i>	Alder, Red	*0,41	4836	...	...	96	533	200
<i>Fraxinus americana</i>	Ash, White	*0,60	4875	...	...	143	1230	599
<i>Tilia americana</i>	Basswood	*0,37	5687	...	...	120	713	186
<i>Cedrela odorata</i>	Cedro, Spanish	0,46	4639	148,96	0,029	99	768	623
<i>Diospyros mespiliformis</i>	Ébano	0,84	4333	...	...	158	1139	887
<i>Dalbergia sp.</i>	Jacarandá (Rosewood)	1,02	3590	183,6	0,016	131	1192	---
<i>Acer saccharinum</i>	Maple, Sugar	*0,63	4880	150,43	0,03	150	1295	658
<i>Swietenia macrophylla</i>	Mogno	0,55	3464	166,56	0,027	66	562	435
<i>Populus tremuloides</i>	Poplar, Aspen Quaking	*0,38	5052	...	...	97	689	159
<i>Picea abies</i>	Spruce	0,41	5180	185,27	0,027	110	721	---
<i>Juglans nigra</i>	Walnut, Black	*0,55	5004	...	...	138	1197	459

Fonte: (FERNANDES, Avaliação de madeiras brasileiras para utilização em guitarras elétricas, 2004) – adaptação do autor

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

Densidade aparente – massa específica para o padrão 12% de umidade;
C – velocidade de propagação sonora;

Fr – frequência natural de vibração;
 MOE – módulo de elasticidade na flexão estática;
 MOR – módulo de ruptura na flexão estática;
 DL – decaimento logarítmico.
 ... – valores não determinados por falta de amostras

No trabalho de Fernandes (2004), a velocidade de propagação sonora foi determinada pela equação:

$$C = \sqrt{\frac{MOE}{da}} \quad , \quad (5.1)$$

onde:

C = velocidade de propagação sonora;
 MOE = módulo de elasticidade na flexão estática;
 da = densidade aparente a 12% de teor de umidade.

ou:

$$C \cong \sqrt{\frac{100 \times MOE}{da}} \quad , \quad (5.2)$$

para: MOE (kgf/cm²)
 da (g/cm³)
 C (m/s)
 aceleração da gravidade = 10 m/s²

A Tabela 5 mostra as características: densidade aparente 12%, velocidade de propagação sonora, frequência de ressonância da madeira, decaimento logarítmico, módulo de elasticidade na flexão estática, módulo de ruptura na flexão estática e dureza Janka, para as principais madeiras encontradas no território nacional. No Brasil há uma infinidade de espécies de madeiras, dentre as quais certamente pode-se encontrar as propriedades físicas e mecânicas necessárias para a construção de excelentes instrumentos musicais.

Tabela 5: Características das madeiras nacionais possíveis de serem utilizadas para fabricação de guitarras elétricas.

Espécie	Densidade aparente 12% (g/cm ³)	C (m/s)	Fr (Hz)	DL	MOE (x1000) (kgf/cm ²)	MOR (kgf/cm ²)	Dureza Janka transv. (kgf)
Jacarandá	1,02	3578,51	183,6	0,016	131	1192	...
Grapiá	0,91	3762,55	173,39	0,034	129	1272	845
Faveira folha fina	0,82	4373,72	167,26	0,026	157	1498	979

Espécie	Densidade aparente 12% (g/cm ³)	C (m/s)	Fr (Hz)	DL	MOE (x1000) (kgf/cm ²)	MOR (kgf/cm ²)	Dureza Janka transv. (kgf)
Muiracatiara rajada	0,8	4362,53	174,57	0,023	153	1391	979
Copaíba	0,78	3964,97	196,37	0,026	123	1179	664
Tauari-rosa	0,76	4370,7	182,7	0,026	146	1367	710
Taxi preto folha grande	0,73	4261,8	176,25	0,026	132	1332	803
Andiroba	0,72	4087,94	174,14	0,025	120	1093	640
Amapá doce	0,7	4042,57	186,45	0,026	115	1043	567
Guariúba/ Orticica amarela	0,67	4317,61	169,14	0,018	124	1110	624
Murué	0,67	4668,67	194,32	0,024	145	1402	1377
Envira preta	0,63	4925,31	193,18	0,024	153	1252	571
Tauari-branco	0,63	4300,03	206,03	0,024	117	1061	516
Cerejeira	0,6	3827,74	177,15	0,024	88	785	399
Munguba gr terra firme	0,6	4191,16	175,11	0,026	106	895	469
Ucuúba-da-terra-firme	0,6	4472,6	184,97	0,026	121	972	472
Freijó	0,58	4232,62	156,46	0,028	104	823	343
Grumixava	0,58	5741,28	151,62	0,034	191	850	...
Macacauba	0,57	4316,14	163,55	0,021	106	1039	911
Morototó	0,56	4498,4	207,26	0,026	113	725	358
Mogno	0,55	3456,73	166,57	0,027	66	562	435
Açoita-cavalo	0,54	5053,3	159,82	0,031	138	1271	817
Freijó verdadeiro	0,53	4426,3	193,55	0,019	104	932	452
Pinho do Paraná	0,53	4533,68	195,98	0,021	109	609	...
Tauari-amarelo	0,53	4493,5	176,26	0,022	108	905	380
Cedro	0,46	4616,53	148,96	0,029	99	768	623
Marupá	0,44	4103,5	167,91	0,027	74	653	143
Pará-Pará	0,43	4568,41	198,65	0,026	89	562	192
Urucu da mata	0,36	4596,64	173,15	0,027	77	555	198

Fonte: (FERNANDES, Avaliação de madeiras brasileiras para utilização em guitarras elétricas, 2004). Banco de dados do LPF <http://www.ibama.gov.br/ipf/madeira> - adaptação do autor.

As informações sobre densidade, características acústicas e outras, contidas nessas tabelas, irão auxiliar na escolha e determinação das espécies a serem utilizadas no estudo comparativo do timbre do instrumento.

6 O EXPERIMENTO (MATERIAIS E MÉTODOS)

Com o objetivo de realizar número maior de experimentos, testando a possível diferença entre o timbre de guitarras produzidas com madeiras distintas, foi desenvolvida uma metodologia própria, pois através de pesquisa bibliográfica não foram encontradas normas para a realização de testes objetivando a qualificação sonora de uma guitarra elétrica ou definição de uma metodologia para esse fim.

6.1 ESCOLHA DOS MATERIAIS PARA CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para efeito de comparação escolhemos quatro madeiras de espécies diferentes: Angelim-Pedra (*Hymenolobium Petraeum*), Cedro Rosa (*Cedrela Odorata*), Itaúba (*Mazilaurus Itaúba*), Jacarandá (*Dalbertia sp*), além do composto de madeira MDF (*Medium Density Fiberboard*), este último composto basicamente de madeira Pinus (*Pinus Elliotti Engelm*).

Os *blanks* de madeiras: Angelim-Pedra, Cedro Rosa, e Itaúba, foram adquiridos em revendedor madeireiro local, sendo que essas madeiras são de venda e utilização comuns, normalmente para a confecção de móveis ou estruturas na construção civil. O *blank* de jacarandá foi encontrado em uma marcenaria, a mesma onde foram usinados os demais corpos de madeira, sendo que esse material fora obtido pelo marceneiro, a mais de 10 anos, originário de reaproveitamento de material de demolição.

Todas as madeiras utilizadas estavam secas, com umidade estabilizadas com o clima da região. Nenhum tratamento foi realizado em especial nos *blanks* de madeiras para a confecção dos corpos de prova.

A Tabela 6 mostra as propriedades físicas e mecânicas das espécies selecionadas para o teste acústico, exceto o MDF. Valores retirados do trabalho de Teles (2005), Fernandes (2004), Silva, (2007) e Torquato, (2008). Os valores

tabelados foram obtidos através de pesquisa em literatura específica, sendo utilizados como referência, para as espécies escolhidas, não sendo realizados maiores testes para confirmação das propriedades próprias e particulares de cada corpo de prova confeccionado, pois esse detalhamento foge ao escopo deste trabalho, e requer equipamentos específicos e desenvolvimento de testes normalizados.

Nesta pesquisa não foram encontradas normas específicas para caracterização de madeiras para a fabricação instrumentos musicais. A definição de testes a serem realizados para determinação de propriedades físicas e mecânicas das madeiras utilizadas para este fim é encontrada na norma ABNT – NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas de Madeira.

Tabela 6: Propriedades das madeiras selecionadas para o teste sonoro

Espécie	Densidade aparente 12% (g/cm ³)	C (m/s)	Fr (Hz)	DL	MOE (X1000) (kgf/cm ²)	MOR (kgf/cm ²)	Dureza Janka transv. (kgf)
Angelin-Pedra	0,59*	4472*	175,8*	0,029*	118*	1115*	590*
Cedro-Rosa	0,46**	4616**	148,9**	0,029**	99**	768**	623**
Itaúba	0,68*	3986*	159,3*	0,031*	108*	1113*	554*
Jacarandá	1,02**	3578**	183,6**	0,016**	131**	1192**	---
MDF	0,76***	2009****	---	---	30,7****	346****	---

Obs:

Densidade aparente – massa específica para o padrão 12% de umidade;

C – Velocidade de propagação sonora;

Fr – frequência natural de vibração;

MOE – módulo de elasticidade na flexão estática;

MOR – módulo de ruptura na flexão estática;

DL – decaimento logarítmico.

* (TELES, Avaliação de Madeiras Amazônicas para Utilização em Instrumentos Musicais, 2005)

** (FERNANDES, Avaliação de madeiras brasileiras para utilização em guitarras elétricas, 2004)

*** (SILVA, 2007)

**** (TORQUATO, 2008)

--- - valores não indicados por falta de dados na literatura.

Fonte: Adaptação do autor

Essas madeiras foram escolhidas pela diferença de densidade e facilidade de aquisição, pois embora existam várias características que diferenciam os diversos tipos de madeiras, entendemos que a densidade seria a mais significativa delas quanto ao som que percorre esse corpo. Outras características das madeiras, que as tornem mais adequadas à fabricação dos corpos de guitarra, como a facilidade de conformação ou estabilidade dimensional da madeira crua, não fazem parte do presente trabalho. O objetivo é apenas comparar a influência das madeiras na emissão do som do instrumento.

6.2 GEOMETRIA E DIMENSIONAMENTO DOS CORPOS DE PROVA

Uma vez definidos os materiais para a confecção dos protótipos, definiu-se também a geometria dos corpos de prova, baseados em medidas gerais obtidas do esquema para confecção de guitarras elétricas desenhado por Benjamin Stouffs. Em tal esquema, as dimensões refletem o padrão das guitarras fabricadas pelos tradicionais fabricantes de guitarras.

Os corpos de prova constam de corpos simplificados, retangulares de dimensões aproximadas: 415 x 320 x 45 mm, tamanho de um *blank* que engloba as medidas gerais do corpo de uma guitarra elétrica modelo Fender *Telecaster*. Foi escolhido o modelo *Telecaster* por ser, dentre os modelos tradicionais, aquele que possui o corpo de menores dimensões, facilitando assim a confecção do corpo de prova. Foi adotada a forma retangular para a simulação do corpo da guitarra elétrica por motivo de facilidade e custo de confecção, e utilizada a mesma geometria, para todos os corpos de prova, para tornar possível a comparação dos resultados obtidos através deles. Nesta pesquisa não foi encontrada norma específica para a determinação de dimensões de corpos de prova com a finalidade de testes sonoros de guitarras elétricas. No corpo, é montado um braço de guitarra para o posicionamento das cordas a serem tangidas para o teste sonoro. No corpo também é montada a ponte para a fixação das cordas. O mesmo braço, ponte e demais acessórios são montados nos cinco corpos de teste durante os respectivos ensaios, de forma a manter todos os parâmetros iguais entre os corpos de prova.

Na Tabela 7: Cálculo da Massa Específica Efetiva dos Corpos de Prova. foram transcritos os dados obtidos através de medição direta dos corpos de prova para melhor caracterização dos mesmos.

Tabela 7: Cálculo da Massa Específica Efetiva dos Corpos de Prova.

Espécie	Comprimento (cm)	Largura (cm)	Altura (cm)	Volume do <i>Blank</i> (cm ³)	Volume das cavidades (cm ³)	Volume do Corpo de Prova (cm ³)	Massa do Corpo de Prova (g)	Massa Específica do Corpo de Prova* (g/cm ³)
Cedro-Rosa	41,4	32,0	4,3	5696,6	315,8	5380,9	3000	0,558
Angelim-Pedra	41,5	32,0	4,3	5710,4	277,4	5433,0	4900	0,902
Jacarandá	41,5	31,8	4,6	6004,6	357,8	5743,1	4900	0,868
Itaúba	41,0	32,0	4,4	5772,8	266,3	5506,5	4300	0,781
MDF	41,2	32,3	4,7	6254,6	302,8	5952,8	3600	0,605

* Massa específica obtida com os corpos de prova na condição ambiente, madeira seca – equilíbrio de umidade entre 12% e 15%. (ABNT NBR 7190:1997)

Fonte: O autor

Nota-se que as massas específicas dos corpos testados diferem parcialmente dos dados bibliográficos das respectivas densidades aparentes. O Angelim Pedra apresentou-se com valor de massa específica bem maior que o valor de 0,59 g/cm³ encontrado no trabalho de TELES (2005). A massa específica do Jacarandá apresentou menor valor em relação ao encontrado no trabalho de FERNANDES (2004), onde encontramos 1,02 g/cm³. Já no estudo de FLORES (2015) a massa específica do Jacarandá apresenta-se, em duas amostras distintas, com os valores de 0,911 g/cm³ e 0,773 g/cm³. As condições de umidade em que se encontra o corpo de prova e os detalhes estruturais e de corte da madeira utilizada para a confecção desse corpo, mesmo para uma única espécie de madeira, podem alterar de forma significativa as propriedades da mesma.

6.3 COMPOSIÇÃO DA BANCADA DE TESTE

A bancada de teste é constituída de cinco corpos de prova, sendo quatro deles confeccionados em madeira sólida de diferentes espécies: Cedro Rosa, Angelin, Jacarandá, Itaúba, e um corpo de prova confeccionado em MDF (*Médium Density Fiberboard*). Os corpos têm dimensões aproximadas de 415 x 320 x 45 mm, onde são montadas as cordas com dimensões específicas para a afinação das notas D3(Ré – 146,8 Hz) e E4(Mi – 329,6 Hz). Para suportar as cordas, foram montados uma ponte fixa e um braço de guitarra. Para a captação do som, foi montado, junto ao corpo, um captador magnético com respectivo cabeamento e conector. Um cabo de som foi utilizado para a conexão ao computador. Para a captura do sinal foi utilizada uma placa de som externa, conectada à entrada usb de um notebook. Para o armazenamento do arquivo de som, e instalação do software adequado, foi utilizado um *notebook Dell* modelo *Inspiron 14z 5423*, com sistema operacional *Windows 8.1*. O *software* utilizado para a análise dos dados foi o *Raven Lite*, programa gratuito que permite aos usuários gravar, salvar e visualizar sons na forma de espectrogramas e formas de onda (CHARIF, 2010). Cada corpo de prova foi testado, por sua vez, sendo montadas as cordas a serem tangidas, com a afinação das notas D3 (Ré) e E4 (Mi).

As cordas utilizadas no teste são: quarta corda D (ré), de diâmetro 0.026 polegadas e a primeira corda E (mi), de diâmetro 0.010 polegadas da marca *Sound Generations Strings*, códigos: 5066 e 5093 respectivamente. Marca do fabricante nacional IZZO Instrumentos Musicais LTDA.

A Figura 20 mostra o esquema básico da bancada de teste para realização do teste sonoro dos corpos de prova.

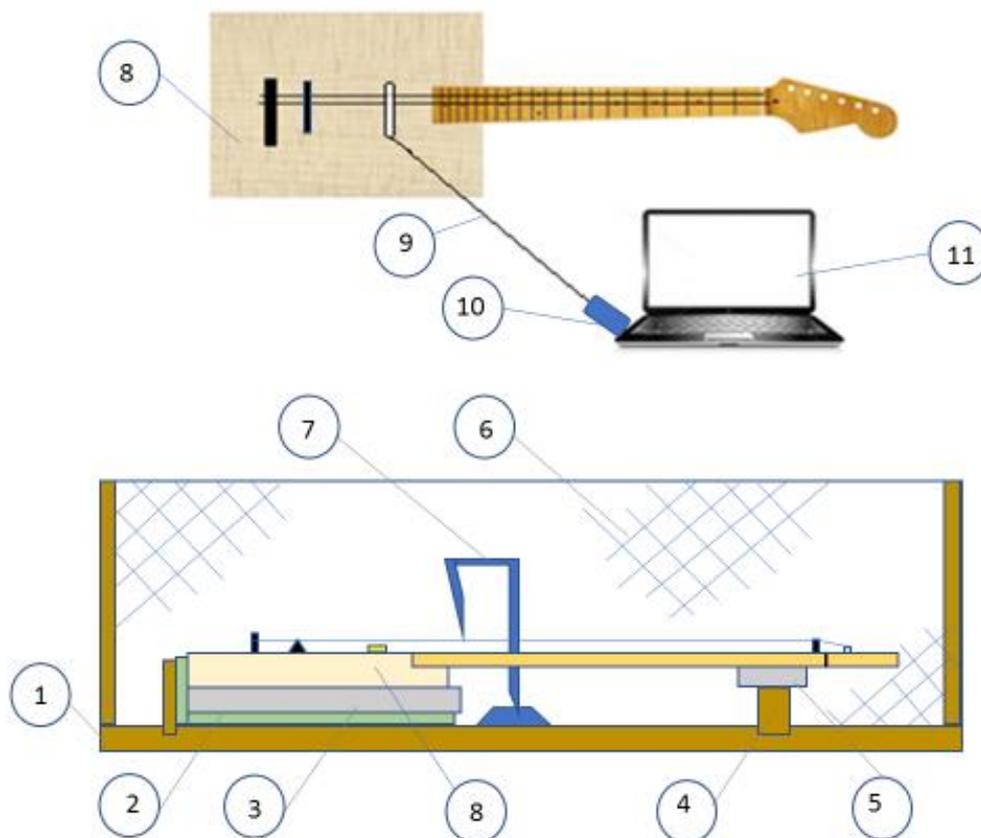


Figura 20: Bancada de teste

1 - Mesa de apoio e sustentação da estrutura, 2- placa de EVA, 3 - placa de espuma acústica, 4 – apoio para o braço, 5 – placa de espuma acústica, 6 – gaiola de Faraday, 7 – dispositivo “palhetador”, 8 – corpo de prova, 9 – cabo blindado, 10 – placa de som externa, 11 – computador.

Fonte: O autor.

Alguns cuidados foram tomados para que as condições de ensaio fossem repetidas para todos os corpos de prova de forma a garantir que a única variável testada fosse o corpo da guitarra.

A afinação das cordas foi realizada com o auxílio do *software Da Tuner Lite*, aplicativo para celular *Android*. A afinação garantiu as notas afinadas numa mesma frequência.

Para tanger a corda foi utilizado um dispositivo mecânico disparado manualmente, impulsionado pela tensão de elásticos, que garantiu a repetibilidade da percussão com a mesma força e velocidade.

6.3.1 Mesa (base para apoio dos corpos de prova)

A mesa para apoio dos corpos de prova é constituída de uma placa de aglomerado, onde são fixados batentes, para o posicionamento dos corpos. Manter o corpo de prova sempre na mesma posição foi necessário para o ajuste dos demais equipamentos do teste.

Na mesa também foi fixado um apoio para o braço da guitarra.

Sobre a mesa, sob o corpo e o braço da guitarra, foi colocada uma placa de EVA e outra de espuma acústica para minimizar a influência da vibração da própria mesa sobre os corpos de prova. A Figura 21 mostra a mesa com o amortecedor de EVA e espuma acústica



Figura 21: Base para apoio dos corpos de prova

Fonte: O autor

Ainda, utilizando-se a mesa como base, foi montada uma *Gaiola de Faraday*, para prevenir e minimizar a influência de sinais eletromagnéticos externos que possam interferir nos testes.

A Gaiola de Faraday foi construída com uma tela de arame envolvendo toda a mesa. Notou-se, porém, durante os testes, que o aterramento dessa tela não estava tendo influência nos sinais captados pelo captador magnético. No entanto, a ligação da blindagem do cabo do captador, ligada à gaiola, auxiliava significativamente na redução de ruído elétrico do sinal captado.

6.3.1.1 Gaiola de Faraday

Gaiola de Faraday é uma blindagem elétrica, uma superfície condutora que envolve e delimita uma região de espaço impedindo, em certas situações, a entrada de perturbações produzidas por campos elétricos ou eletromagnéticos externos. A blindagem é feita com um material condutor, que funciona impedindo a entrada de campos eletrostáticos ou eletromagnéticos de onda que sejam superiores ao tamanho da malha. (WAGNER, 2019)

A Figura 22 mostra o dispositivo preparado para o ensaio.



Figura 22: Gaiola de Faraday montada para o ensaio com um corpo de prova posicionado.

Fonte: O autor.

6.3.2 O Captador Magnético.

O Captador Magnético utilizado nos testes de som é o captador denominado *Single Booster* fabricado pela Malagoli. Trata-se de um captador duplo, *humbucker*, desenvolvido para ser uma opção em substituição a um captador modelo *single*, pico de ressonância da ordem de 6,00 KHz e saída de 140 mV. Esse captador magnético é específico para a posição Ponte ou Braço, embora seja um captador de duas bobinas, *humbucker*, possui as dimensões externas semelhantes às dimensões de um captador de simples bobina, *single*.

O formato dos ímãs, em lâminas, favorece o posicionamento da corda sobre o mesmo, uma vez que não é necessário posicioná-la sobre o diâmetro do ímã cilíndrico típico dos captadores convencionais.

A vantagem da utilização de um *humbucker* ao invés de um *single* é que o *humbucker* apresenta menor nível de ruído e, então, é possível a obtenção de sinais mais “limpos” para a produção dos gráficos dos espectros sonoros a serem analisados.

A Figura 23 mostra a imagem do captador Malagoli utilizado nos testes, e a Figura 24 o desenho com as dimensões externas.



Figura 23: Captador Malagoli modelo *Single Booster*.

Fonte: O autor

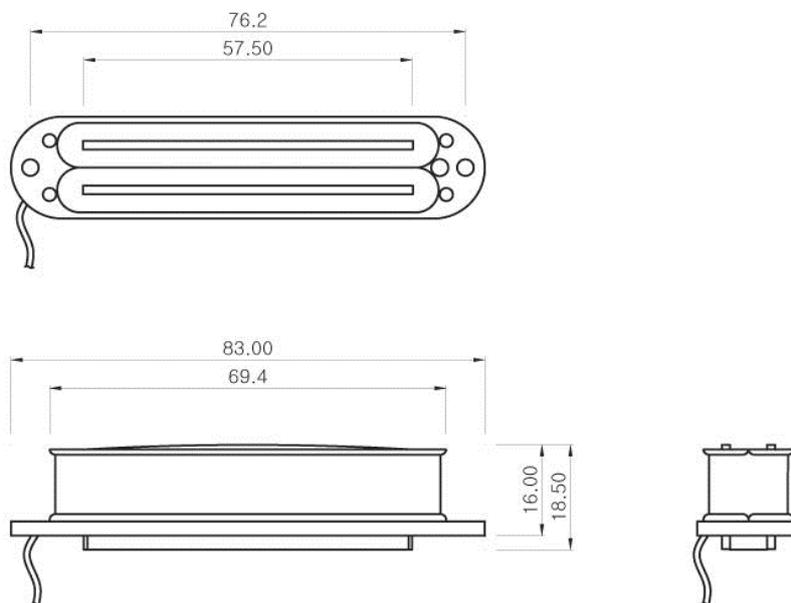


Figura 24: Dimensões externas do captador magnético Malagoli - *Single Booster*.

Fonte: https://www.captadores.com.br/loja/produto-34302-1956-single_booster

6.3.3 Cabos (conexão do captador ao microcomputador)

Para a montagem do cabo de transferência de sinal, entre o captador magnético e o microcomputador, foi utilizado um cabo duplo, com blindagem individual, soldados aos cabos do captador. O cabo foi conectado à placa de som através de um plug P2.



Figura 25: Junção soldada: cabos do conector soldado aos cabos do captador magnético e malhas das blindagens soldadas entre si.

Fonte: O autor.



Figura 26: Plug P2.

Fonte: O autor.

Para melhorar o sinal e minimizar os possíveis ruídos gerados por interferências externas, foi feita uma segunda blindagem, externa, envolvendo todo o cabo de ligação entre o captador e o microcomputador. Essa blindagem envolve toda a extensão do cabo e a parte inferior do captador magnético. A blindagem foi confeccionada com folha de alumínio. Essa blindagem externa foi ligada à “gaiola” para evitar possíveis ruídos captados pelo captador magnético. Notou-se que a ligação dessa blindagem à gaiola, que funciona como “massa”, melhora de forma significativa o sinal captado, minimizando o ruído em baixa frequência.

A Figura 27 mostra o cabo blindado ligado à massa.



Figura 27: Cabo blindado

Fonte: O autor

A Figura 28 mostra a blindagem envolvendo toda a parte inferior do captador magnético e cabo de transmissão do sinal.



Figura 28: Blindagem do captador magnético.

Fonte: O autor.

6.3.4 Placa de som

Para a transferência do sinal elétrico do captador ao microcomputador utilizou-se uma placa de som externa, conectada à porta USB do microcomputador. Placa de Som USB 7.1 3D Externa Áudio para PC, Versão USB, Compatível: USB 2.0 / 1.1 / 1.0.

A placa de som externa evita que o cabo de transferência de sinal seja ligado diretamente na placa de som do microcomputador, que normalmente está sujeita a interferências e ruídos gerados e transmitidos pela própria placa mãe do computador.

A Figura 29 mostra a placa de som utilizada como interface entre o captador magnético e o computador para a coleta dos dados.



Figura 29: Placa de Som USB 7.1

Fonte: O autor.

A Figura 30, a seguir, mostra o cabo blindado, de ligação do captador magnético ao *notebook*, através da placa de som externa, USB 7.1.



Figura 30: Conexão para captação de sinal do captador magnético.

Fonte: O autor.

6.3.5 Microcomputador e programa de aquisição de dados.

Para aquisição e processamento dos dados utilizou-se um *notebook DELL*, modelo *Inspiron 14z 5423*, equipado com sistema operacional *Windows 8.1* e programa *Raven Lite*.

O programa *Raven Lite* é um programa gratuito, desenvolvido pelo Laboratório de Ornitologia e pesquisa bioacústica da *Universidade Cornell*. Esse programa permite que os usuários gravem e visualizem sons nas formas de ondas e espectrogramas. Conforme informações do próprio desenvolvedor, este é um programa desenvolvido e destinado a estudantes, educadores e interessados, auxiliando no reconhecimento do canto dos pássaros e na instrução musical. (CHARIF, 2010).

Além do *Software Raven*, foi utilizado o *software MATLAB* da empresa MathWorks, *software*, utilizado pela comunidade científica para tratamento de dados matemáticos e estatísticos de pesquisas. Neste trabalho o *software Matlab* foi utilizado para o tratamento dos dados coletados através do *software Raven*. Os dados coletados pelo *Raven* mostram o espectrograma dos sinais sonoros captados nos testes. Esses dados são apresentados na forma de gráficos, frequência x intensidade sonora. Através do *software Matlab* os gráficos obtidos pelo *Raven* são importados e podem ser visualizados individualmente ou sobrepostos para serem comparados.

6.4 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

6.4.1 Preparação do corpo de prova

Os cinco corpos de guitarra, de diferentes madeiras, são preparados e testados individualmente, mantidos os demais componentes para manter como variável apenas o corpo de madeira. Portanto o braço, o captador, a ponte, a corda e demais componentes utilizados são sempre os mesmos.

A Figura 31 mostra os diversos corpos de guitarra, de geometria retangular utilizados nos testes.



Figura 31: Corpos simplificados de guitarra.

Fonte: O autor.

A preparação para a coleta de dados começa com a montagem do corpo de prova.

No corpo de madeira é montado o braço do instrumento, fixado através de parafusos e placa, na parte de traz do corpo. Na sequência, é montada a ponte, que, para este modelo é constituída de duas peças: o cavalete, que auxilia no ajuste da altura da corda, e a peça onde são presas as pontas das cordas. Os componentes da ponte são fixados ao corpo de madeira também através de parafusos.

Após a montagem do braço e ponte, é montado o captador magnético, fixo ao corpo de madeira através de uma moldura de material plástico.

A Figura 32 mostra um dos corpos montados, pronto para o teste.



Figura 32: Corpo de prova montado.

Fonte: O autor

A corda, a ser afinada com a nota escolhida, é montada no corpo. A altura, do captador magnético, fixo ao corpo da guitarra, pode ser ajustado através de dois parafusos do próprio captador. Controlando-se a altura do captador magnético ajusta-se a distância do núcleo magnético do captador à corda do instrumento, sendo que a altura desta pode ser ajustada também pela elevação do cavalete. É necessário um ajuste dessa medida, pois uma distância muito grande irá enfraquecer muito o sinal captado. Por outro lado, um distanciamento muito pequeno irá provocar a distorção desse sinal devido à atração magnética da corda pelo imã do captador.

Neste experimento, entre a corda e o imã do captador magnético, foi utilizada uma distância ajustada entre 5 e 6 mm.

A altura da corda, em relação ao imã do captador magnético é ajustada e verificada através de um gabarito, vide Figura 33.



Figura 33: Gabarito para verificação da altura da corda em relação ao captador.

Fonte: O autor.

A distância entre o cavalete da ponte e o centro do captador é de aproximadamente 160 mm, e a distância entre o ponto de toque da palheta ao centro do captador é aproximadamente 55 mm, em todos os corpos de prova com variação máxima de 5 mm.

O cabo do captador é ligado à placa de som externa através de um *plug* p2. A placa externa é conectada ao computador pela porta *USB*.

A corda é afinada para vibrar com determinada frequência fundamental da nota escolhida. Para a afinação é utilizado o afinador *Da Tuner Lite*.

Da Tuner Lite é o *app*, aplicativo para celular, de um afinador para instrumentos musicais. Esse aplicativo converte a frequência fundamental captada, para a nota mais próxima, considerado o erro. A nota captada é exibida na tela do aparelho celular. (Applaud Apps, 2019)

Após captar o som, o programa exibe a nota na forma da sua frequência, em hertz, indicando também o desvio da frequência da nota com precisão de centésimos. Quando a nota desejada é atingida, ou esteja bem próxima, o visor do aparelho se torna verde, indicando que a corda do instrumento está afinada. (<https://www.baixaki.com.br/android/download/tuner-datuner-lite-.htm>)

A Figura 34 mostra a tela do *app Da Tuner Lite*, onde podemos ver a captação do sinal de uma nota Dó (C4), 261,63 Hz. A pressão sonora em dB e a frequência em Hz. Na imagem, a frequência instantânea captada pelo aparelho é 257,9 Hz e, quando esta se aproximar do valor 261,63 Hz, a tela ficará verde.

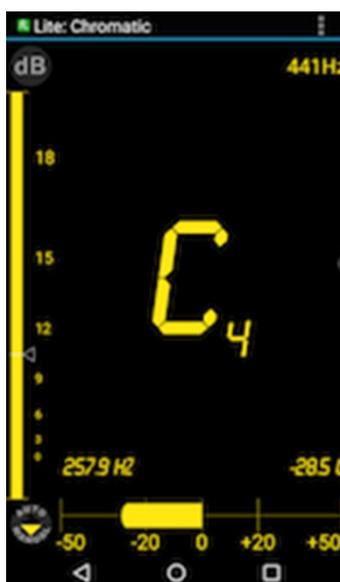


Figura 34: Tela do *app Da Tuner Lite*.

Fonte: O autor.

6.4.2 A coleta de dados

A corda é tangida pelo dispositivo “palhetador”. O dispositivo “palhetador”, Figura 35, tem como objetivo padronizar a energia despendida para tanger a corda. Com a utilização desse dispositivo pretende-se minimizar a diferença da velocidade e força aplicadas no toque da corda.



Figura 35: Dispositivo Palhetador.

Fonte: O autor.



guitarra elementar é captado pelo captador magnético. O captador magnético transmite o sinal de som ao computador através da placa de som externa ligada à porta *USB*. O programa *Raven Lite* decodifica o sinal transformando-o em dados, e salva o arquivo de som no formato *.aif*. O programa *Raven Lite* permite a obtenção de dados e apresenta os resultados na forma de gráficos.

A análise das ondas e espectros sonoros foi feita posteriormente, bem como a comparação com os outros sons armazenados, obtidos dos demais corpos de prova.

A Figura 36 mostra uma tela do *software Raven Lite* na qual é possível verificar o formato da onda e o espectro de onda sonora, produzidos por sons captados e gravados no formato *.aif*, para posterior análise e estudo da frequência, número de harmônicos, intensidade sonora, etc.

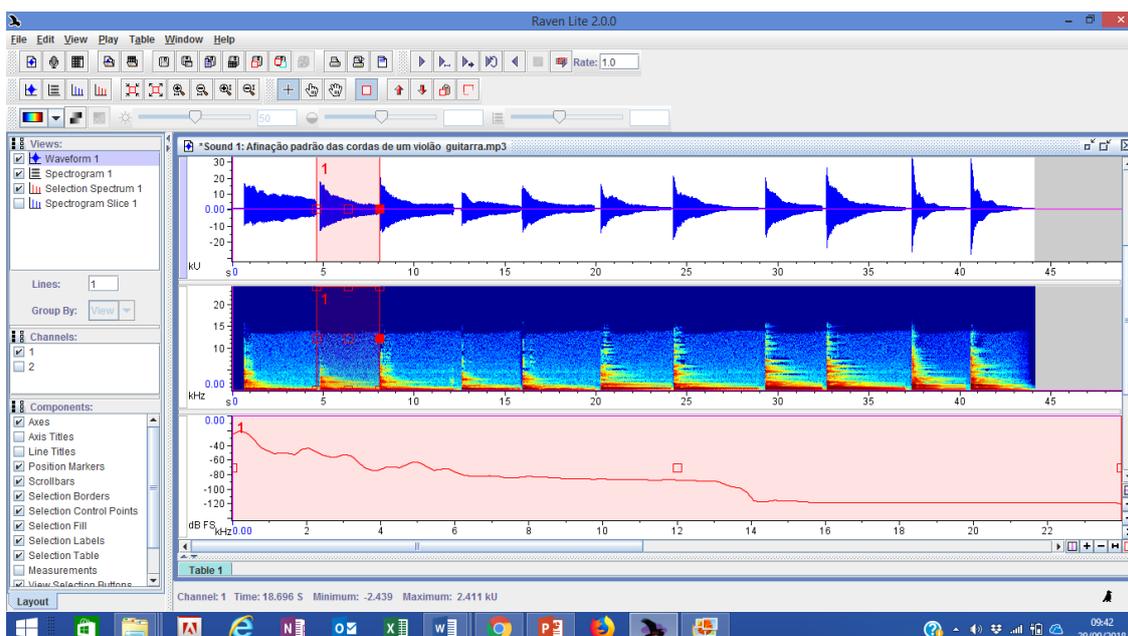


Figura 36: Tela do *software Raven Lite*

Fonte: O autor

Para cada uma das notas relacionadas a cada um dos corpos, foram coletadas dez amostras do som produzido. Cada amostra foi salva em um arquivo .aif para posterior comparação.

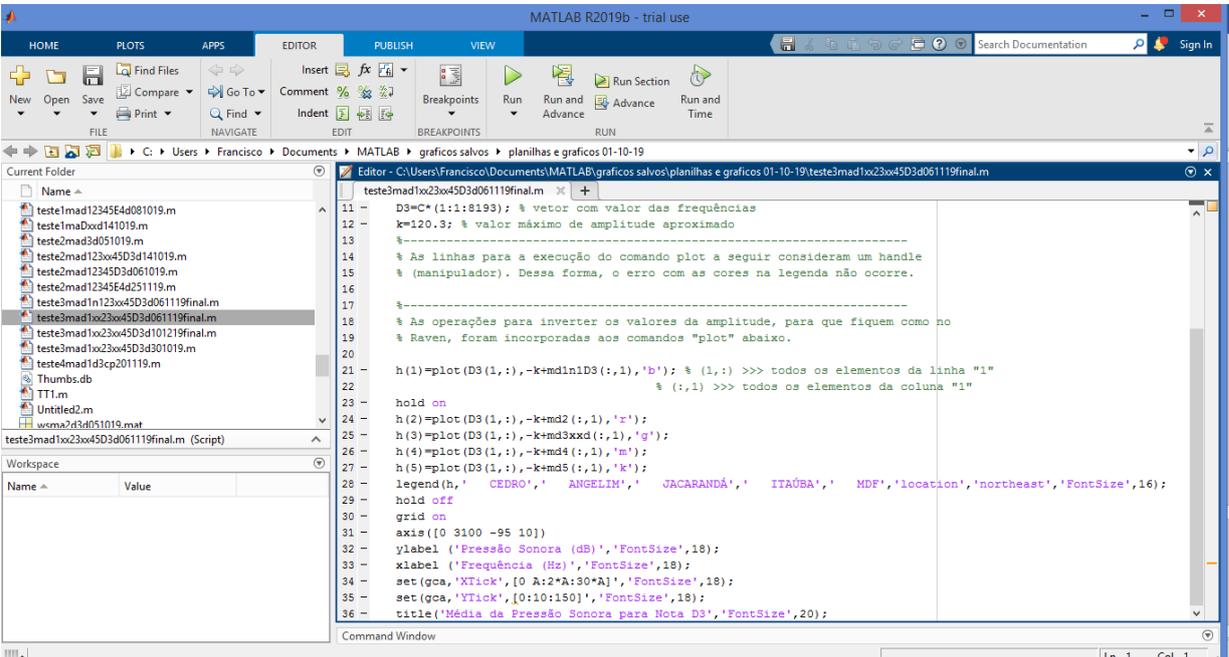
Para o início da coleta de dados o programa *Raven* foi pré-ajustado como:

- *new recorder*
- *input* :
 - dispositivo de áudio *USB java sound*
 - *sample rate*: 44.100 Hz
 - *channel*: left
 - *sample format*: 16 – bit signed PCM
- *display*:
 - *buffer size*: 10 seconds
 - *update rate*: 10 Hz
 - *latenci*: 0,0 seconds
 - *Windows preset*: default 1.3 power

Esse ajuste foi mantido em todos os ensaios. Os demais parâmetros foram mantidos conforme padrão do próprio *software*.

Após selecionado o gráfico, *spectrogram*, e definido um intervalo de tempo, que para esse teste é de 3 segundos, esse intervalo é apresentado no gráfico *selection spectrum*. Para apresentação do gráfico *selection spectrum* foi determinado o *Focus Size*, tamanho do foco, de 14.705. Esse valor está relacionado ao número de pontos que o *software* irá utilizar para a apresentação do gráfico, frequência x intensidade sonora.

Após obtidos os espectrogramas de todos os dados, esses dados salvos no formato .aif, foram tratados e exportados no formato .csv. Os dados dos arquivos .csv foram importados para o programa *Matlab* para que pudessem ser transformados em gráficos adequados onde os dados dos diversos experimentos pudessem ser comparados e analisados. Através do programa *Matlab* os dados foram transformados em gráficos representando a frequência x intensidade sonora das notas tocadas em cada corpo de prova. A Figura 37 mostra, como exemplo, a tela de programação do *Matlab* para a exibição de um dos gráficos. Trata-se do gráfico de sobreposição das cinco curvas médias dos espectros da nota D3 tocada nos diversos corpos de madeira.



```

11 - D3=C*(1:1:8193); % vetor com valor das frequências
12 - k=120.3; % valor máximo de amplitude aproximado
13 -
14 - % As linhas para a execução do comando plot a seguir consideram um handle
15 - % (manipulador). Dessa forma, o erro com as cores na legenda não ocorre.
16 -
17 - % -----
18 - % As operações para inverter os valores da amplitude, para que fiquem como no
19 - % Raven, foram incorporadas aos comandos "plot" abaixo.
20 -
21 - h(1)=plot(D3(1,:),-k*md1n1D3(:,1),'b'); % (1,:) >>> todos os elementos da linha "1"
22 - % (:,1) >>> todos os elementos da coluna "1"
23 -
24 - hold on
25 - h(2)=plot(D3(1,:),-k*md2(:,1),'r');
26 - h(3)=plot(D3(1,:),-k*md3xxd(:,1),'g');
27 - h(4)=plot(D3(1,:),-k*md4(:,1),'m');
28 - h(5)=plot(D3(1,:),-k*md5(:,1),'k');
29 - legend(h,' CEDRO',' ANJELIM',' JACARANDÁ',' ITAÚBA',' MDF','location','northeast','FontSize',16);
30 - hold off
31 - grid on
32 - axis([0 3100 -95 10])
33 - ylabel ('Pressão Sonora (dB)','FontSize',18);
34 - xlabel ('Frequência (Hz)','FontSize',18);
35 - set(gca,'XTick',[0 A:2*A:30*A],'FontSize',18);
36 - set(gca,'YTick',[0:10:150],'FontSize',18);
37 - title('Média da Pressão Sonora para Nota D3','FontSize',20);

```

Figura 37: Tela de programação do *MATLAB*

Fonte: O autor.

Os dados dos espectros sonoros foram separados para cada nota e corpo de prova e, através desses dados, obtidos os gráficos de suas médias. Foram traçados dez gráficos onde são apresentadas as médias de dez toques para cada uma das notas D3 e E4 associadas a cada uma das cinco madeiras. Os gráficos das médias de cada uma das notas, tocadas em cada corpo de madeira, foram plotados em um novo gráfico e comparados entre si. Essa análise permite a obtenção de algumas conclusões.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a análise comparativa entre as curvas médias dos espectros obtidos nos cinco corpos de prova, foi determinado o intervalo de aproximadamente 20 picos de frequência. Esses picos são obtidos em um tempo aproximado de três segundos. Entende-se que, na prática, normalmente, entre a execução de um toque e outro, o tempo não seja superior a três segundos. Aliás, o tempo é bem inferior a este, já que os acordes são executados em sequência quase que imediata.

Os picos de frequência observados nos gráficos indicam regularidade em seus valores, variando um pouco em sua intensidade sonora.

Para a nota D3 (Ré – 146,8 Hz) tocada nas diversas madeiras, Itaúba, Jacarandá, Angelim e MDF, o harmônico fundamental, ou seja, o primeiro harmônico, aparece no gráfico das médias com valores muito próximos entre si, tanto os valores das frequências em Hz quanto os valores das intensidades sonoras em dB. Cabe lembrar que a escala em dB, obtida pelo *software Raven Lite* e reproduzida pelo *MATLAB*, não é a escala absoluta em dB mas uma escala relativa, proporcional à absoluta, ajustada pelo próprio *software* para melhor representação e visualização gráfica. Na madeira cedro, nota-se uma pequena variação, onde a intensidade do primeiro harmônico mostra-se ligeiramente inferior ao segundo harmônico, o que não ocorre para as outras madeiras, onde a intensidade do primeiro harmônico é maior que a do segundo. É de se esperar que a intensidade do primeiro harmônico seja superior à do segundo harmônico, pois o primeiro harmônico é a frequência de afinação da nota. Esse fenômeno pode ser explicado pela possível absorção da energia do primeiro pico devido à ressonância com o corpo de cedro, pois o cedro tem como frequência natural a

frequência de 148,96 Hz, muito próxima à frequência da nota D3 tocada: 146,8 Hz. Outra explicação seria o posicionamento do captador em relação ao comprimento da corda, mas no experimento este posicionamento está bem ajustado mantendo-se constante para todos os corpos de provas.

Analisando os primeiros dez harmônicos, nota-se que as frequências são bem demarcadas e se repetem na medida de todas as madeiras. Algumas variações nos valores das frequências são notadas apenas a partir do décimo segundo harmônico. Nota-se, observando-se as diversas frequências, variações nas intensidades sonoras, para os diferentes corpos de madeira. Essa variação é maior em alguns harmônicos, diferindo de madeira para madeira. Não é possível, no entanto, para as madeiras testadas, classificá-las segundo um timbre mais grave ou mais agudo, pois a intensidade sonora das frequências varia de forma irregular, ora reforçando uma sequência de frequências, ora outra.

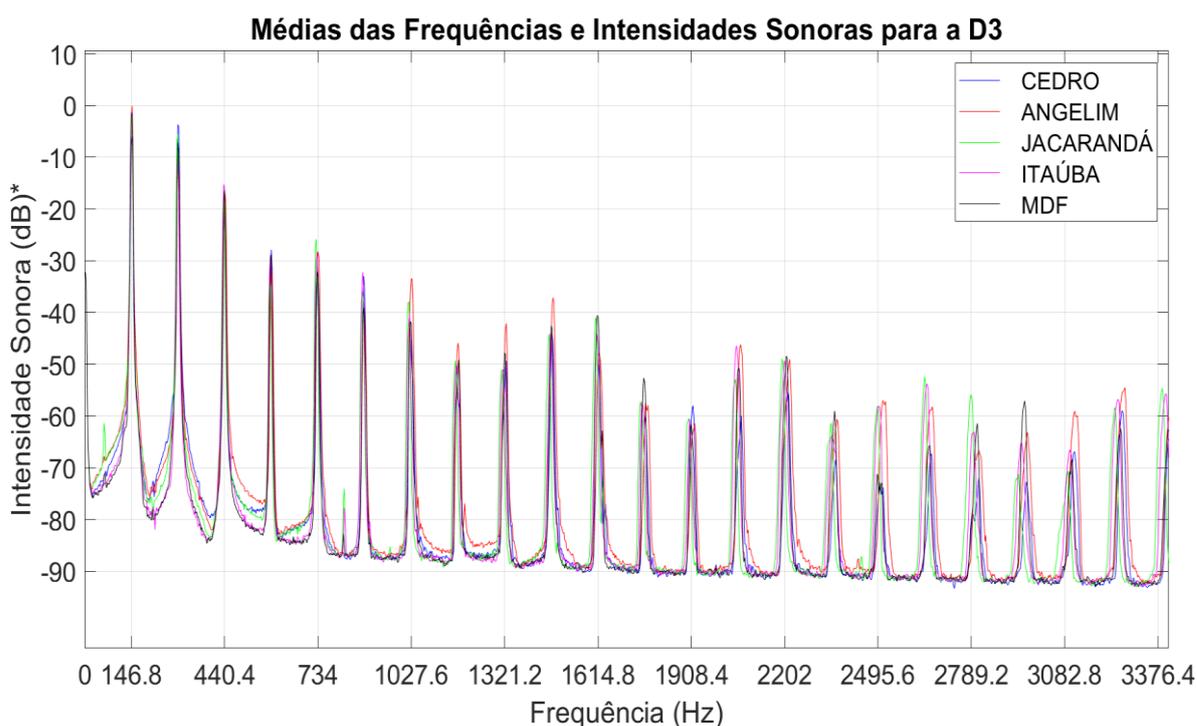


Figura 38: Gráfico das médias da nota D3 (Ré - 146,8 Hz)

Fonte: O autor

Um fato curioso observado na madeira cedro é que o segundo harmônico, 293,6 Hz, aparece com maior intensidade sonora que o primeiro harmônico, 146,8 Hz. Esse fato pode indicar uma diferença de timbre em relação às outras madeiras. A nota D3 tocada nesse corpo de prova emitiria um som mais agudo,

pois o segundo harmônico irá superar o primeiro na sua intensidade sonora, ou seja, a nota tocada soaria uma oitava acima, que significa o dobro da frequência da nota tocada. A Figura 39 mostra o gráfico das médias obtidas para a madeira Cedro, com a nota D3 (146,8 Hz), onde podemos notar uma variação da densidade sonora, de aproximadamente 3 dB, entre o primeiro e segundo harmônicos, conforme descrito.

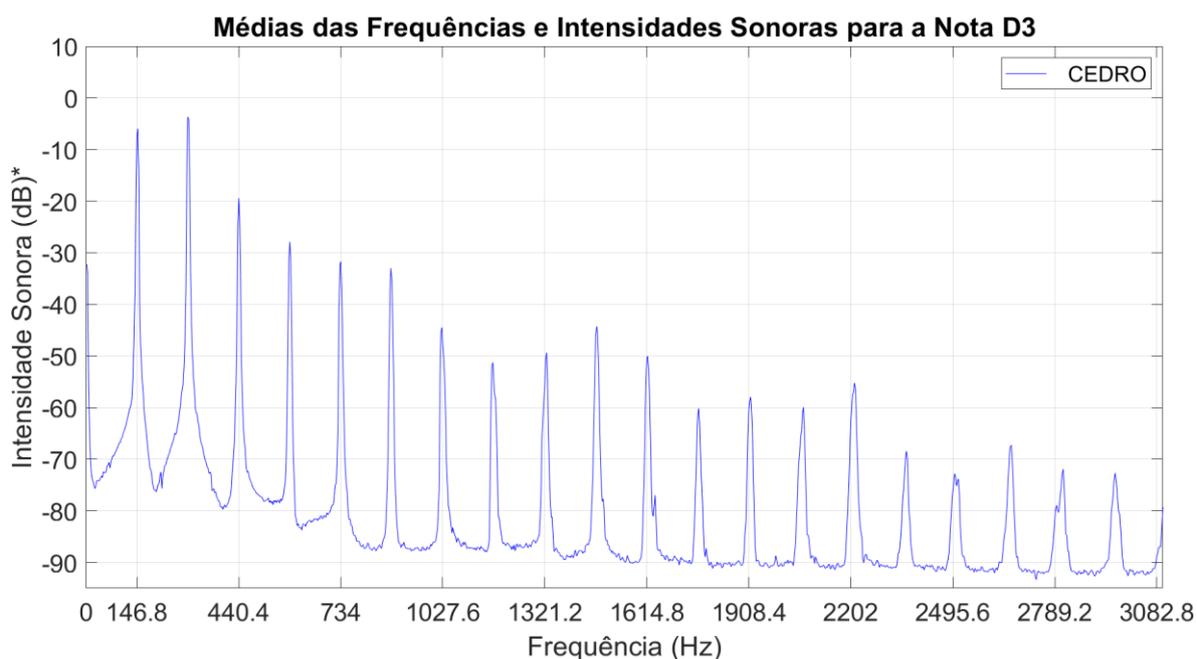


Figura 39: Gráfico Frequência x Intensidade Sonora para o Cedro com a nota D3 (Ré - 146,8 Hz).

Fonte: O autor.

Para a nota E4 (Mi – 329,6 Hz) tocada nas diversas madeiras, Cedro, Itaúba, Jacarandá, Angelim e MDF, os harmônicos fundamentais aparecem no gráfico também com valores muito próximos entre si, tanto os valores das frequências em Hz, quanto os valores das intensidades sonoras em dB.

Na análise do gráfico da sobreposição dos espectros sonoros para as cinco madeiras, diferentemente dos espectros obtidos com a nota D3, nota-se maior regularidade, similaridade, entre as curvas. Esse comportamento demonstra que, para as cordas sob maior tensão, as vibrações são mais regulares para os diversos corpos de prova. Nota-se também que a variação da intensidade do som entre o primeiro e segundo harmônicos, para todos os corpos

de prova, é praticamente a mesma, o que difere um pouco do resultado para a nota D3.

No teste dos corpos com a nota E4, assim como no teste da nota D3, observam-se algumas variações nas intensidades sonoras, e menores variações nos valores das frequências, mas, da mesma forma, não é possível correlacionar as madeiras testadas com um timbre mais grave ou mais agudo.

Na madeira cedro para a nota E4, notamos uma proximidade muito grande na intensidade sonora do primeiro e segundo harmônicos, que diverge do observado no espectro sonoro obtidos com as outras madeiras. Isso reforça a ideia, como no caso da nota D3, de que o timbre dessa madeira pode ser um pouco mais “brilhante”, agudo, em relação às demais madeiras, visto que a intensidade sonora do segundo harmônico é quase a mesma do harmônico fundamental.

É importante reforçar, que estas observações são válidas apenas para o set de montagem utilizado neste experimento. A correlação da madeira do corpo com outros materiais utilizados na confecção dos modelos não foi analisada, pois não faz parte do escopo deste experimento. Outros experimentos podem ser feitos, como, por exemplo, correlacionar a madeira do corpo com a madeira do braço, que neste caso é o Pau Marfim, ou analisar a correlação entre a forma de fixação do braço no corpo do instrumento com o seu timbre.

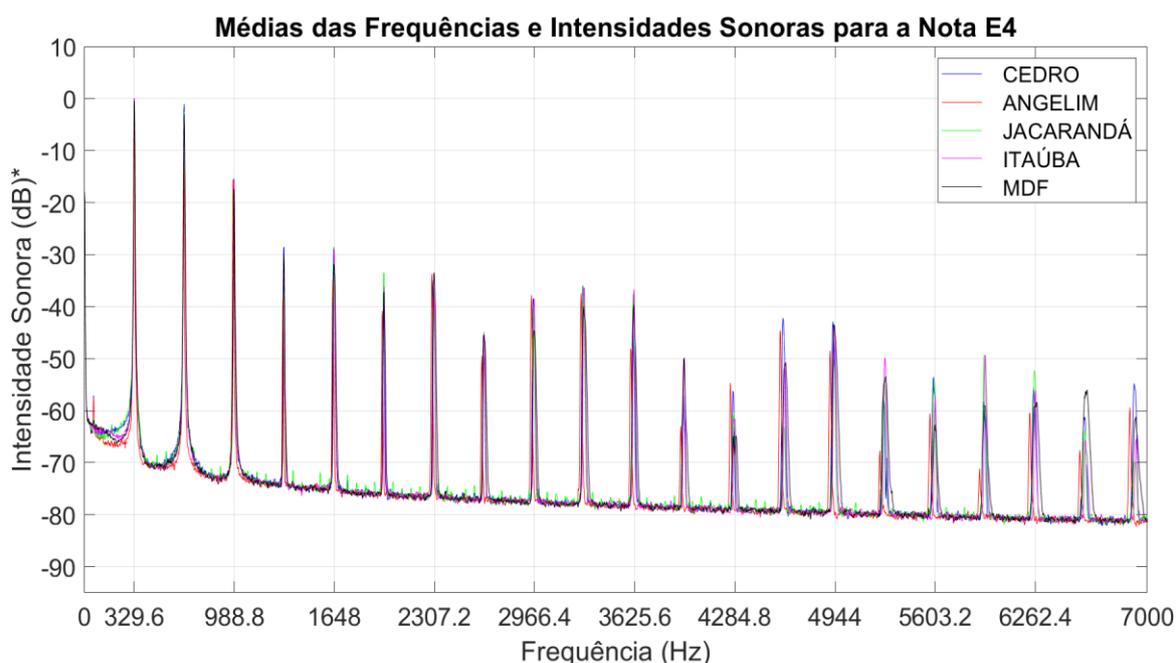


Figura 40: Gráfico das médias da nota E4 (Mi – 329,6 Hz)

Fonte: O autor

Pequenas variações nas intensidades sonoras, notadas nos gráficos de comparação das médias das notas tocadas nos cinco corpos de provas, também aparecem na sobreposição das curvas de obtenção das próprias médias das notas tocadas individualmente em cada corpo de prova. A

Figura 41 mostra o gráfico da sobreposição de curvas das dez notas D3 tocadas num único corpo de madeira, o Jacarandá, onde podemos notar discretas variações nas intensidades sonoras para as diversas frequências.

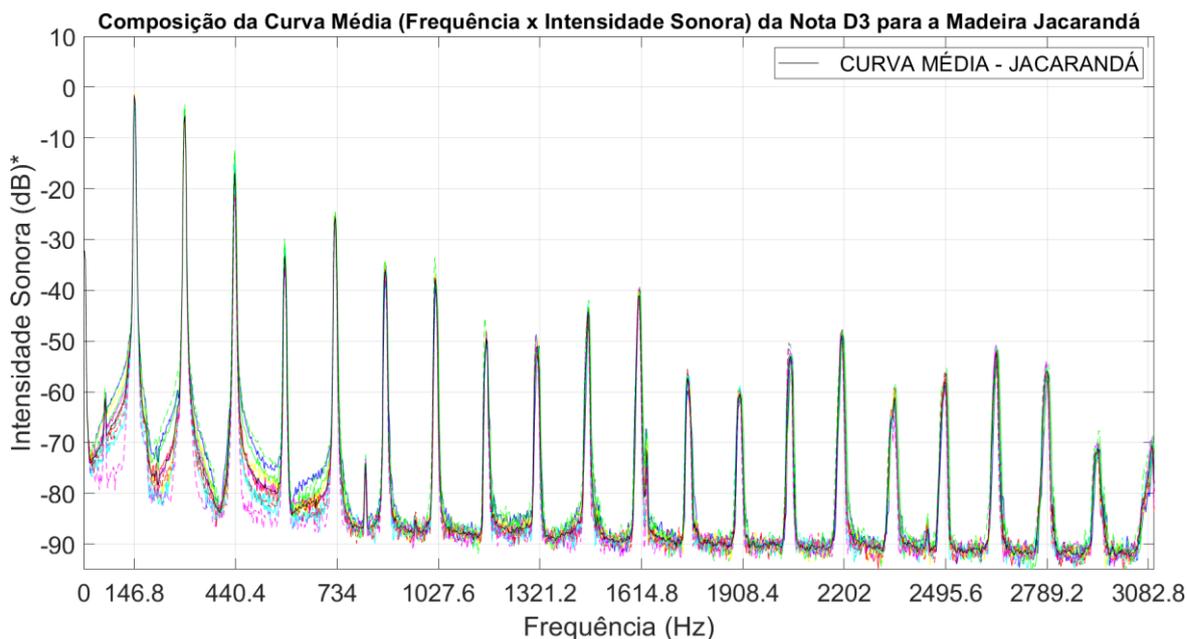


Figura 41: Sobreposição dos dez espectros sonoros no corpo de Jacarandá, nota D3.

Fonte: O autor.

A importância da pesquisa acadêmica é a busca de respostas esclarecedoras para fenômenos observados, por vezes, apenas na prática, mas sem a certeza e a confirmação científica. O rigor científico deve ser objeto de atenção em todos os detalhes dos experimentos e testes práticos.

A comparação e a compreensão do comportamento dos materiais, para a fabricação de todo o tipo de produto, deve ser uma busca constante dos pesquisadores no caminho da evolução tecnológica. Diferentes materiais e métodos influenciam tanto a tecnologia do produto quanto a tecnologia de fabricação dos mesmos. O objetivo final desses estudos é a fabricação de produtos melhores e mais acessíveis ao usuário, com materiais cuja obtenção

confere o menor impacto possível à natureza. A procura de metodologias que caminham nessa direção poderá nortear novos estudos.

Outros autores e obras, ainda não citadas neste estudo, mas cuja leitura foi importante para a compreensão dos fenômenos acústicos e desenvolvimento dos testes são: Fellow (2017), Fletcher (1998), Hillenbrand (2018), Zureick (2010), cujos temas de suas obras versam sobre a física do som e dos instrumentos musicais.

Nos apêndices A e B deste trabalho estão plotados os gráficos correspondentes às médias individuais para cada nota, D3 e E4, tocada em cada um dos corpos de madeira testados. Esses gráficos representam os espectros médios obtidos do levantamento de dez medidas para cada nota versos corpo.

Nos apêndices C e D encontram-se tabelas com dados numéricos obtidos nos gráficos dos espectros:

- Fr - valores dos picos de frequência em Hz;
- P - Intensidade sonora em dB relativo
- I - Intervalo de frequência: $Fr(n)/Fr(n-1)$;
- ΔFr – Diferença entre frequências consecutivas: $Fr(n) - Fr(n-1)$;
- n – Relação entre a frequência “n” e a frequência do primeiro harmônico: $Fr(n) / Fr(0)$;
- ΔP – Diferença entre intensidades sonoras consecutivas: $P(n) - P(n-1)$.

8 CONCLUSÃO

Algumas alterações ou diferenças nos espectros são notadas, normalmente nas frequências mais altas, mas em níveis de intensidade sonora baixos, onde tais diferenças praticamente não são audíveis. Observa-se, então, que a madeira do corpo tem realmente uma certa influência no timbre do instrumento, mas em níveis de intensidade baixos. Não podemos afirmar, portanto, que a madeira, para o instrumento de corpo sólido, está influenciando significativamente a percepção do timbre do instrumento pelo ouvinte.

O teste realizado com a madeira Cedro, em relação às demais madeiras utilizadas para a confecção dos corpos de prova, mostrou uma diferença curiosa entre os valores dos picos de intensidade sonora do primeiro e do segundo

harmônicos obtidos com a nota Ré (D3). Espera-se que o harmônico fundamental, que é o primeiro, pois indica a frequência de afinação da corda, seja o de maior intensidade sonora, como, inclusive, foi verificado no teste com as demais madeiras; no entanto a maior intensidade sonora recaiu sobre o segundo harmônico, cuja frequência corresponde ao dobro da frequência fundamental, na teoria musical, a uma oitava acima da afinação executada. O experimento realizado não possui dados suficientes para indicar o motivo dessa variação, que difere do padrão encontrado nas outras madeiras testadas, apenas evidencia uma diferença real. Esse fato sugere um aprofundamento no estudo do corpo confeccionado em Cedro para maiores esclarecimentos e conclusões.

Os gráficos dos espectros sonoros associados ao MDF, tanto os obtidos com a nota Ré (D3) quanto os obtidos com a nota Mi (E4), demonstraram muita semelhança com os gráficos das demais madeiras estudadas, o que indica que o MDF pode substituir a madeira maciça na construção de guitarras elétricas sem prejuízo do som emitido pelo instrumento, vide gráficos nos apêndices A e B. É importante observar, no entanto, que as propriedades mecânicas do MDF são bem distintas em relação às madeiras maciças avaliadas neste estudo podendo portanto prejudicar a estabilidade e propriedades mecânicas do instrumento. Maiores estudos se fazem necessários para que seja verificada a sua eficácia na fabricação das guitarras elétricas.

Os resultados, obtidos através desta metodologia, indicam que a alteração das madeiras constituintes do corpo da guitarra elétrica afeta sim o timbre da guitarra, mas não de forma significativa, exceto algumas possíveis exceções como no caso do cedro.

Como a percepção sonora varia de pessoa para pessoa, algumas pessoas poderão notar alguma diferença no timbre das guitarras confeccionadas com corpos de diferentes madeiras, principalmente quando comparados instrumentos confeccionados com madeiras de densidades muito distintas. No entanto, se considerarmos os resultados obtidos neste experimento, aliado às alterações sonoras provocadas pelos outros dispositivos, externos à guitarra elétrica, que objetivam o aumento da intensidade sonora, a distorção e outros efeitos sonoros obtidos pela alteração dos sinais elétricos captados e posteriormente tratados pelo amplificador de som, como é o caso dos pedais de efeito, levam a crer que o tipo de madeira do corpo da guitarra elétrica, para a

grande maioria de espécies madeireiras, praticamente não tem efeito sobre a percepção do som da guitarra.

Outra observação importante é que as diferenças encontradas nos espectros sonoros dos corpos de provas analisados não indicam qual material é bom ou ruim quanto ao timbre obtido, apenas nota-se que o timbre é ligeiramente diferente.

Pode-se, portanto, pesquisar e analisar outros tipos de madeiras, menos raras e de fácil reflorestamento e obtenção, que tenham características de fácil manufatura e estabilidade mecânica, sem a preocupação de que essas madeiras possam afetar de maneira negativa a sonoridade da guitarra elétrica, lembrando que essas conclusões não são válidas para os instrumentos de corda acústicos. Dessa forma, para a fabricação de guitarras elétricas, sugere-se o estudo para a utilização de madeiras nativas e de reflorestamento, obtidas no mercado nacional, e até mesmo madeiras de reutilização, para a obtenção de excelentes instrumentos quanto à sonoridade.

Testes como os realizados neste trabalho poderão ser utilizados para a comparação do timbre de instrumentos confeccionados não só de madeiras, mas também de outros materiais, como por exemplo, materiais sintéticos, polímeros, obtendo-se parâmetros consistentes para essa comparação.

O experimento realizado não traz a conclusão final para a questão da influência da madeira do corpo no timbre de uma guitarra elétrica, mas acrescenta mais informações relevantes, através de uma metodologia diferente das já utilizadas. Essas informações poderão ser utilizadas no auxílio de futuros estudos e experimentos quanto ao timbre de guitarras e baixos elétricos, bem como no auxílio à escolha de madeiras por construtores de instrumentos musicais.

9 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Como sugestão para futuras pesquisas, ligadas ao estudo de sonoridade e timbre de guitarras elétricas, podemos indicar os seguintes pontos.

- Análise com maior detalhamento da utilização do MDF na fabricação de guitarras elétricas.

Como foi verificado através do experimento o teste sonoro do material MDF sugere que o material possa ser utilizado na fabricação de guitarras elétricas sem prejuízo sonoro. É interessante que sejam realizados maiores estudos a esse respeito, analisando a viabilidade técnica e econômica e a relação custo benefício dessa utilização.

- Estudo comparativo de espectros sonoros obtidos com corpos de guitarras tradicionais e corpos fabricados com materiais sintéticos:

Assim como é importante o comparativo de diferentes madeiras para a compreensão do seu comportamento sonoro na confecção da guitarra elétrica, outros materiais podem e devem ser avaliados com a ótica do timbre sonoro para a substituição das madeiras tradicionais escassas na natureza.

- Estudo comparativo de espectros sonoros obtidos com corpos de guitarra tradicionais e corpos de guitarra com dimensões diminuídas.

Encontramos testes sonoros comparativos de corpos de guitarra com dimensões diminuídas, e até teste com a execução de cortes realizados no próprio corpo da guitarra, no entanto esses testes são avaliados apenas pela percepção sonora do ouvido humano. A metodologia desenvolvida neste estudo poderá ser utilizada dando ao estudo um maior carácter científico, sendo a avaliação dos resultados demonstrados e medidos por aparelhos, e não apenas pela sensibilidade do ouvinte.

- Estudo comparativo de timbres de guitarras com alteração exclusivamente do material do braço, inclusive utilizando-se materiais sintéticos.

O mesmo estudo realizado para o corpo da guitarra elétrica pode ser realizado variando-se o material do braço do instrumento, verificando-se desta forma a influência dessa variação para maior compreensão do material desse componente no timbre do instrumento.

- Influência, no timbre da guitarra, de diferentes formas de fixação do captador magnético no corpo do instrumento, através do escudo ou máscara ou fixado diretamente na madeira.

O captador magnético pode ser fixado ao corpo da guitarra de diferentes formas, através do escudo ou espelho, ou diretamente na madeira do corpo da guitarra. A transmissão da vibração do corpo da guitarra para o captador magnético irá variar conforme o tipo de fixação. A análise dessas diferentes formas de fixação poderá levar à maior compreensão da interação entre essas partes e o timbre do instrumento.

- Correlação da frequência natural da madeira do corpo e do braço da guitarra com o timbre do instrumento.

A frequência natural do material de confecção do corpo e do braço do instrumento, sendo que essas peças representam o maior volume de massa do instrumento, e no caso do braço, maior influência também na definição do comprimento útil e tensionamento das cordas geradoras do som. A frequência natural desses componentes poderá estar relacionada também com a atenuação ou ampliação de determinadas frequências no espectro sonoro gerado pelas notas tocadas na guitarra.

- A influência de diferentes madeiras na confecção do corpo da guitarra elétrica associada às possíveis correções, das diferenças da intensidade sonora ou do timbre, através de ajustes na configuração dos captadores magnéticos, ou através de ajustes nos circuitos amplificadores do som.

- Repetição deste experimento para todas as seis notas padrão de afinação da guitarra elétrica. Ou seja: avaliação de alteração do timbre para as notas: Mi (E4), Si(B3), Sol(G3), Ré(D3), Lá(A2), Mi(E2), com o mesmo *set* realizado neste experimento.

- Análise da correlação do timbre da guitarra com a variação do posicionamento do captador magnético ao longo do comprimento da corda a ser tocada.

Com a variação do posicionamento do captador magnético ao longo do comprimento da corda tocada, este irá captar amplitudes diferentes de excitação da corda, mais próximo a um pico, um vale ou um nó, devendo apresentar um espectro característico, que deve variar de posição para posição.

- Estudo mais detalhado da influência do Cedro na confecção do corpo da guitarra elétrica.

Conforme foi verificado neste experimento, entre as madeiras testadas na confecção do corpo da guitarra, o Cedro foi a única madeira onde ocorreu uma inversão de intensidade entre o primeiro e o segundo harmônicos observados nos espectros, da nota D3, isto é, o segundo harmônico teve uma intensidade sonora maior que o primeiro. Um estudo mais aprofundado poderá esclarecer a causa dessa inversão.

REFERÊNCIAS

Applaud Apps. **android/download/tuner-datuner-lite**. Disponível em: <https://www.baixaki.com.br/android/download/tuner-datuner-lite-.htm>. Acesso em 26 outubro 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: ABNT, 1997.

CATELLI, F.; MUSSATO, G. A. As frequências naturais de uma corda de instrumento musical a partir de seus parâmetros geométricos e físicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 2014. vol. 36, p.1-6. Disponível em: www.sbfisica.org.br. Acesso em: dezembro 2019.

CHARIF, R. A. **Raven Pro 14 User's Manual**. NY, Ithaca, USA: Cornell Lab of Ornithology, 2010.

FELLOW, D. R. L. **The Physics os Music and Musical Instruments**. 1. ed. Medford, Massachusetts, USA: Wright Center For Innovative Sceince Education: Tufts University., Disponível em <http://kellerphysics.com/acoustics/Lapp.pdf>. Acesso em 14 abril 2017.

FERNANDES, G. d. A. **Avaliação de madeiras brasileiras para utilização em guitarras elétricas**. Brasília, 2004.

FLETCHER, N. H. **The Physics os Musical Instruments**. 2nd. ed. DeKalb, Illinois, USA: Springer, 1998.

FLORES, A. L. **Análise de diferentes madeiras brasileiras em substituição às espécies tradicionais no violão clássico**. Curitiba, 2015.

GOMES, R.; LAGE, R.; MOURÃO, A. **Manual de Lutheria: curso básico**. 1 ed. Manaus: UNICEF, 2004.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos da Física – Eletromagnetismo**. Tradução de Ronaldo Sergio de Biasi. 10 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. vol. 3, 1332 p.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J.; **Fundamentals of Physics**. 6^a ed. New York: Wiley, 2001.

HIDALGO LÓPEZ, O. (2003). **Bamboo : The Gift of the Gods**. Bogotá, Colombia: D´vinni Ltda. 2003.

HILLENBRAND, James M. (s.d.). **The Physics of Sound**. Kalamazoo, Michigan, USA. Acesso em 2018. Disponível em: <https://homepages.wmich.edu/~hillenbr/206.html>

JONES, C. S. **Sound, Physics and Music**. Houston, CONNEXIONS, 2013. Disponível em: <http://cnx.org/content/col10261/1.1/>. Acesso em 14 abril 2017.

LAFELICE, B. **Pickups and Wood in Solid Body Electric Guitar**. Disponível em: http://theguitar-blog.com/wp-content/uploads/2013/03/Pickups_and_Woods_in_Solid_Body_Electric_Guitars_-_Part1.pdf e **Part2.pdf**, 2011. Acesso em dez 2018.

LAGO, B. A Guitarra como Instrumento para o Ensino de Física Ondulatória. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Nova Friburgo, R.J., v. 37, 2015. Disponível em: www.sbfisica.org.br. Acesso em: 05 julho 2016.

MACHADO, R. T. **Guitarra, Tecnologia e Educação Musical, A construção de uma Audição Crítica**. São Paulo, 2009.

MANENTE, M. **Física de um captador**. Loud Custom Shop Guitar, 25 de novembro de 2015. Disponível em: <http://loudluthieria.com/fisica-de-um-captador/>. Acesso em: março 2019.

MED, B. **Teoria da Música**. 4^o ed. Brasília, DF: Musimed, 1996.

MILLER, D. C. **The Science of Musical Sounds**. 1 ed. New York, USA: The Macmillan Compani, 1916. Disponível em: <http://archive.org/details/cu31924022230654>. Acesso em 19 maio 2017.

MUNK, C.; CLAUDER, L.; PFRIEM, A. Acoustical comparison of two different guitars, made of untreated tropical. **Northern European Network For Wood Science & Enginnering (WSE) - 14th Annual Meeting 2018**. Disponível em: https://researchgate/publication/3307977293_Acustical_comparison_of_two_different_guitars_made_of_untreated_tropical_wood_and_thermally_modified_wood_using_a_frequency_response_analysis. Acesso em: 04 maio 2019. Banner.

OLIVEIRA, D. S. **Caracterização de cordas de guitarras elétricas: comportamento mecânico, corrosivo e acústico relacionados às características microestruturais e químicas**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2014.

PEDGLEY, O; NORMAN, E; ARMSTRONG, R. **Materials - Inspired Innovation for Acoustic Guitar Desegn..** Middle East Technical University Faculty of Architecture, Ankara – Turkey, 1 dez. 2009. p. 157-175

PEREIRA, R. M., JUNIOR, A. L., FREITAS, T. C. **Sobre o acoplamento corda-corpo em guitarras elétricas e sua relação com o timbre do instrumento**. Physicae, 2010. V.9 - p. 24-29.

PINTO, H. **O Violão no Brasil**. 2008. Disponível em: <http://www.grupos.com.br/blog/finaleforumbr/permalink/23135.html>. Acesso em: 2018.

ROCHA, M. E. **Elaboração de arranjo para guitarra solo**. São Paulo: UNICAMP, 2005.

ROGERS, W. F. **Physics of Music: Science and Art**. 1º ed. Santa Barbara: Westmont College, 2012.

ROSSING, T. D. (Ed.). **The Science Of String Instruments**. Standford: Springer, 2010.

SELF, P. **The Effect of Wood on Electric Guitar Timbre**. Dallas, 2016.

SILVA FILHO, D. F.; ROCHA, J. d.; MOURA, J. B. **Influência da densidade na dureza Janka em oito espécies madeireiras da Amazônia Central**. *Acta Amazônica*, 1992. p. 275-283.

SILVA, S. A. M. D.; GONÇALVES, R. Avaliação da distribuição da densidade em MDF a partir da técnica da onda de ultra-som. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, p.19-26, junho 2007. Acesso em 11 novembro 2019.

SLOOTEN, V. D. **Avaliação das Espécies Madeireiras da Amazônia Selecionadas para a Manufatura de Instrumentos Musicais**, 1 ed. Manaus: IMPA, 1993. Acesso em 25 outubro 2017.

SOPER, K. J. **Body Woods and an Electric Guitar's Frequency Spectrum**. 2005. Disponível em:
http://www.stormriders.com/guitar/telecaster/guitar_wood.pdf. Acesso em: 5 junho 2017.

SOUZA, N. Guitarra elétrica um ícone na cultura pop do século XX. **Revista Vernáculo**. Paraná: 2002. v. nº 5, p. 33-45.

SUNDBERG, J. **The Science of Musical Sound**. San Diego: CA: Academic, 1991.

TELES, R. F. **Avaliação de Madeiras Amazônicas para Utilização em Instrumentos Musicais**. I. B. IBAMA, Ed., Brasília, 2005.

TELES, R. F., LIMA, L. B., & COSTA, A. F. Aplicação de produtos de acabamento e as propriedades acústicas. **XV EBRAMEM - Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira**, 09 de março de 2016.

TORQUATO, L. P. **Caracterização dos painéis MDF comerciais produzidos no Brasil**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba: 2008.

VENEZA, A.; TROMBINI, L. M. Características timbrísticas entre guitarras elétricas de corpos sólidos e semi-sólidos. **Revista da Universidade do Rio Verde**, Três Corações, 1, 407-419. ago/dez de 2013.

VILAS BOAS, N.; DOCA, R. H.; BISCUOLA, G. J. (2016). **Física, vol 2: Termologia, ondulatória, óptica**. 3ª ed. São Paulo: Saraiva, 2016. 400 p.

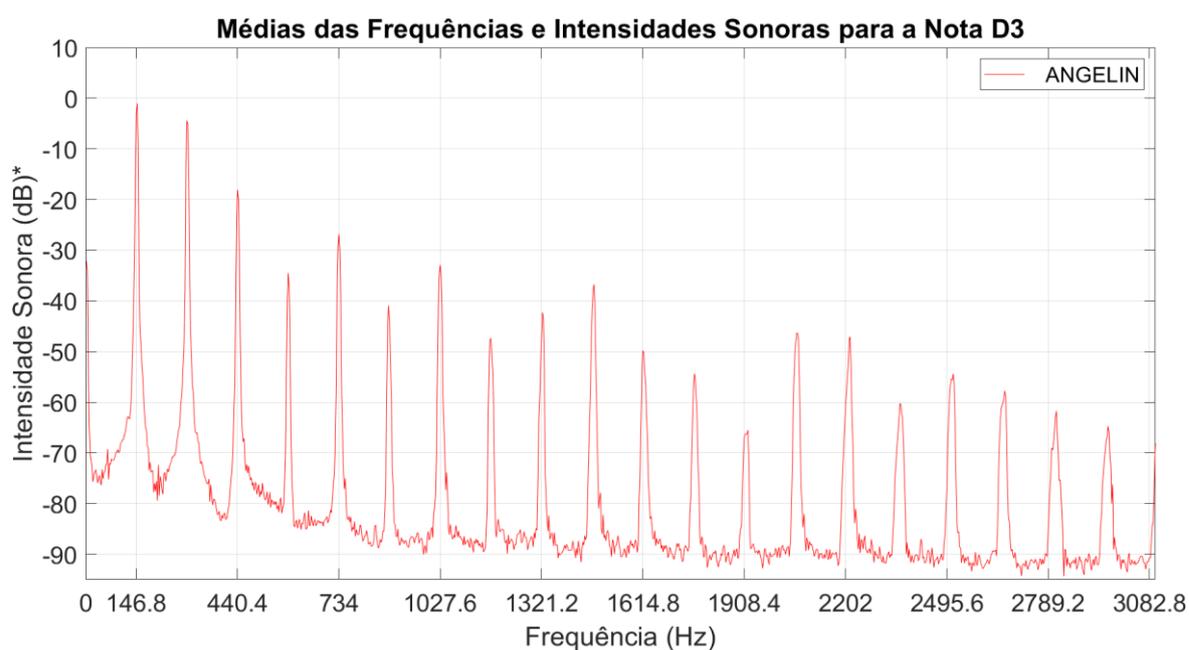
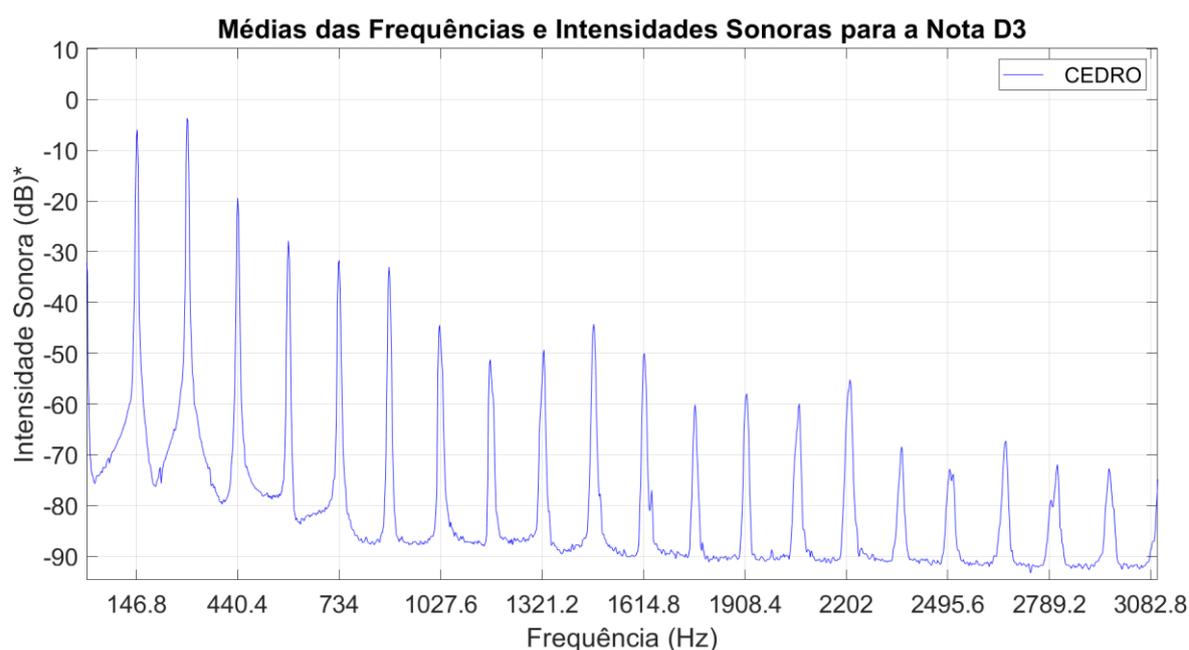
WAGNER, R. O que é uma Gaiola de Faraday? **R. W. Engenharia**. Disponível em: <https://www.rwengenharia.eng.br/o-que-e-uma-gaiola-de-faraday/>. Acesso em: 26 outubro 2019.

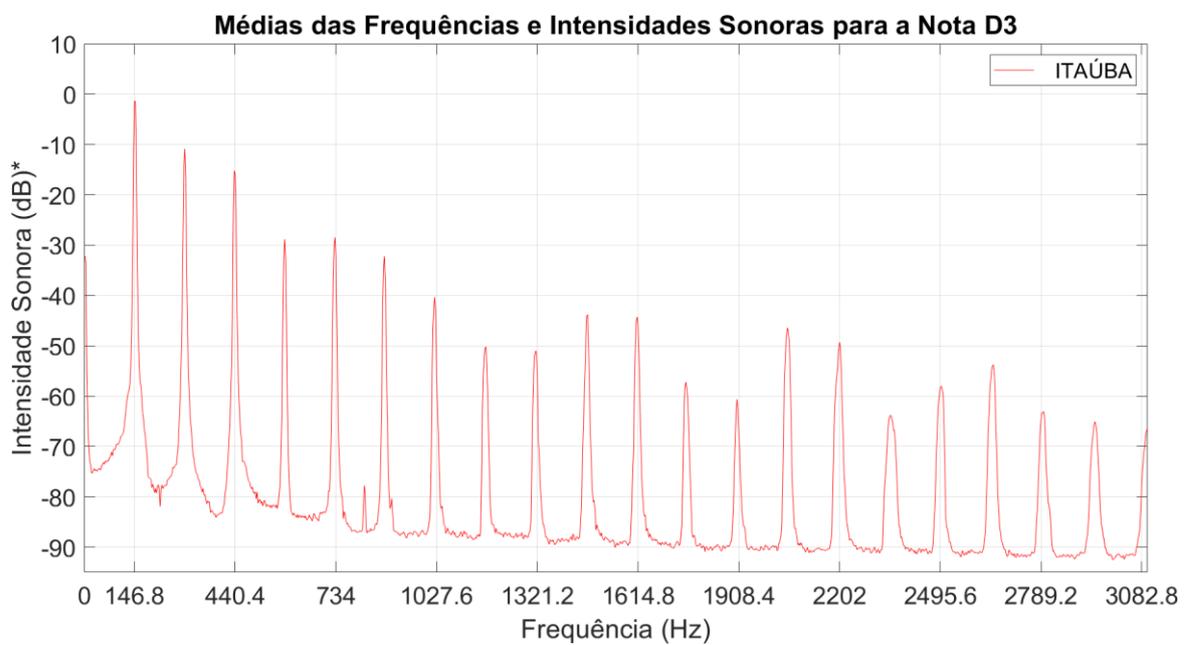
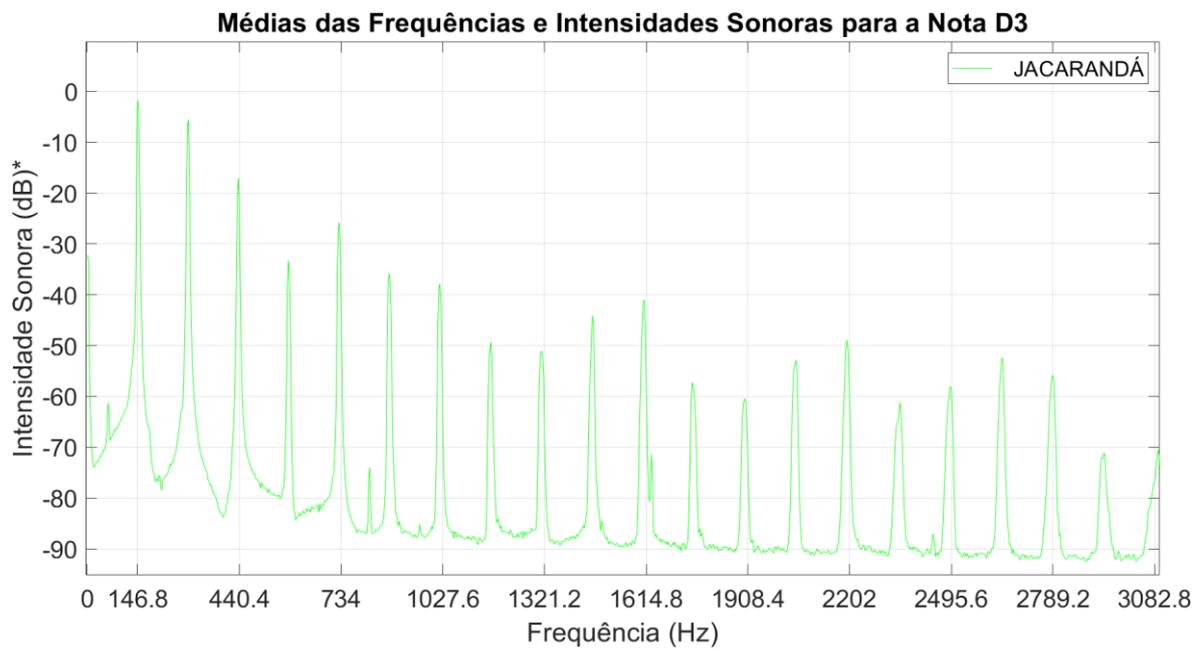
YAMAMOTO, K.; FUKU, L. F. (2016). **Física para o ensino médio**. 4ª ed. São Paulo: Saraiva, 2016. 400 p.

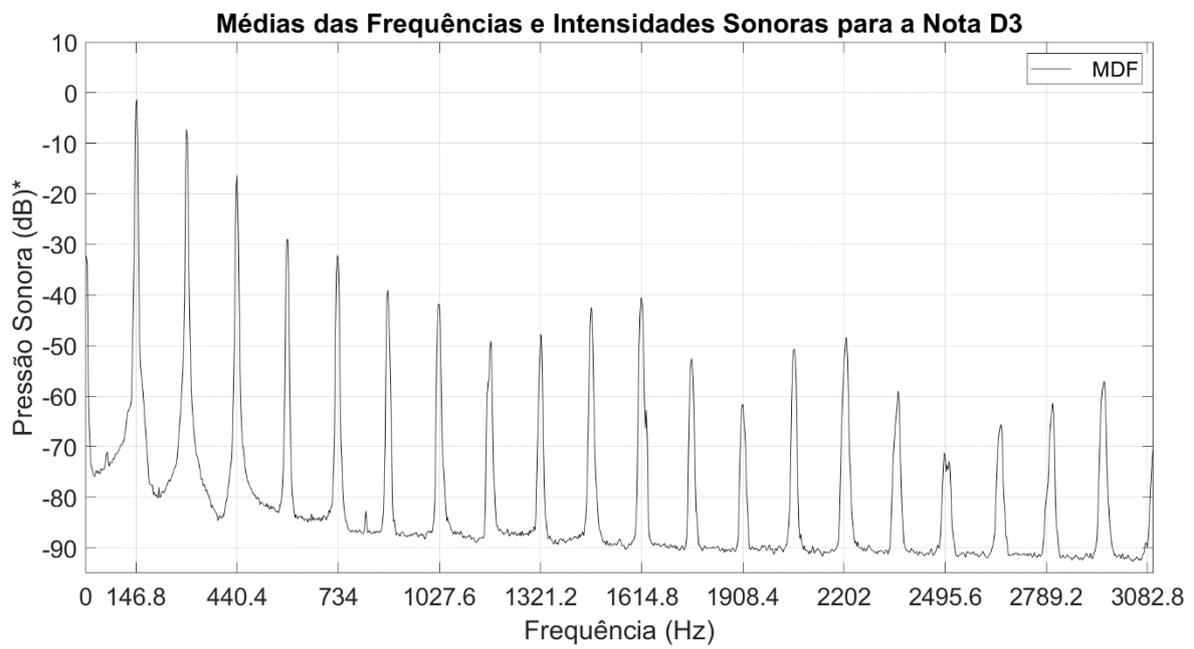
ZUREICK, A. Vibrations Surround Us: The Science of Music. **Dartmouth Undergraduate Journal of Science**, Hanover, 2010. p. 32-35. Disponível em: <http://dujs.dartmouth.edu/wp-content/uploads/DUJS-10F-Article-PDF-Vibrations-Surround-Us1.pdf>. Acesso: outubro 2018.

**APÊNDICE A - Gráficos das médias dos espectros sonoros da
nota D3 (146,8 Hz)**

Neste Apêndice A estão contidos os gráficos das médias dos espectros sonoros (Frequência x Intensidade Sonora) da nota D3 (146,8 Hz), tocada nos corpos de prova confeccionados nas diferentes madeiras testadas. Cada espectro corresponde à média dos valores de dez espectros obtidos para cada nota tocada em cada corpo de madeira.

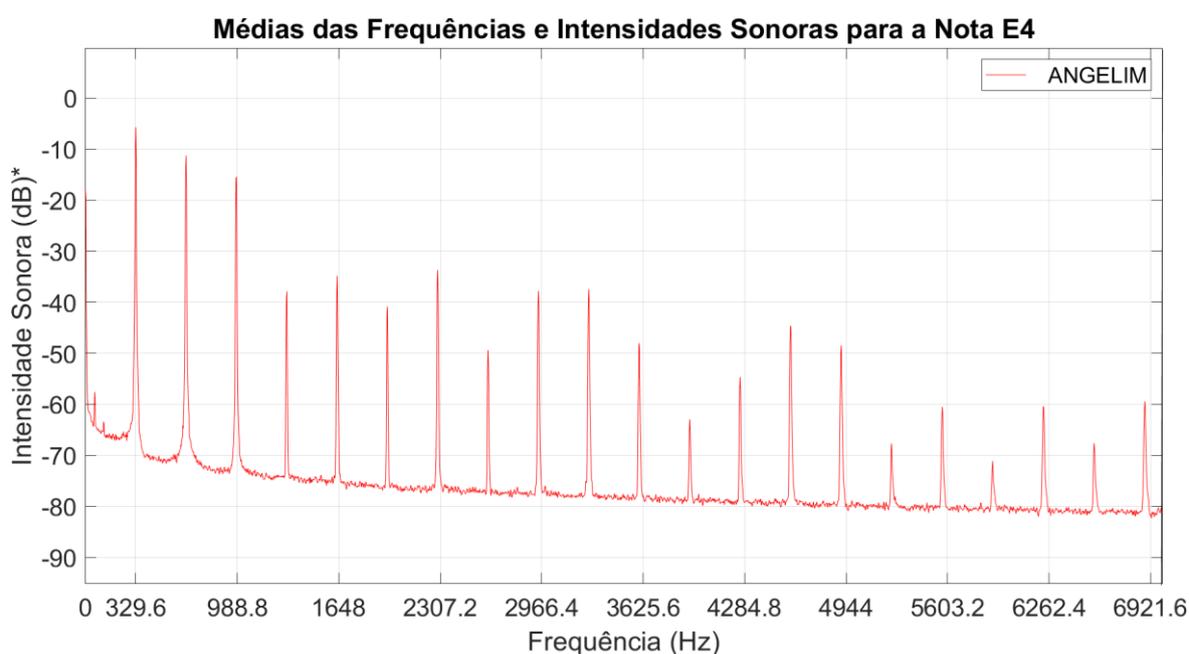
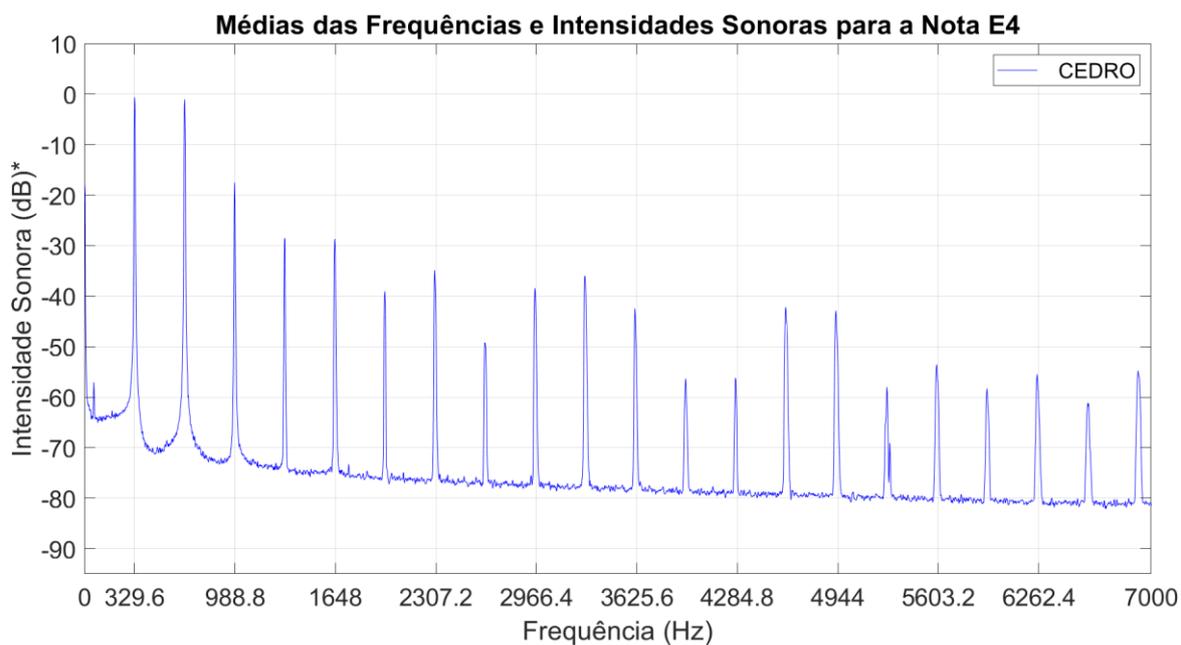


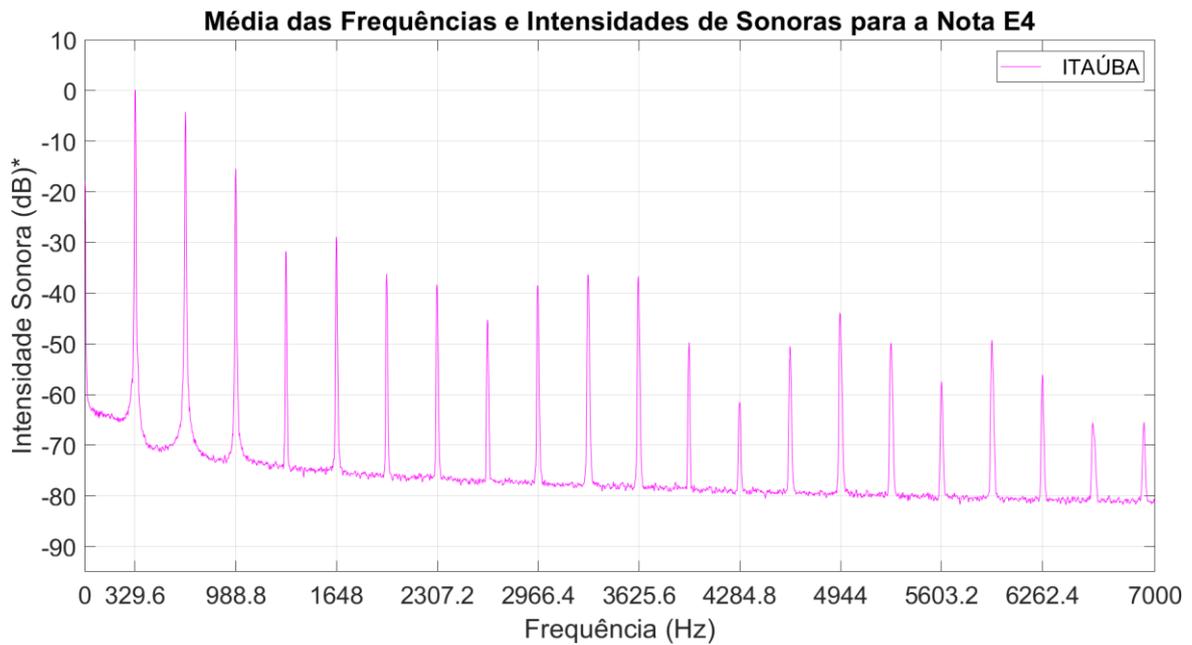
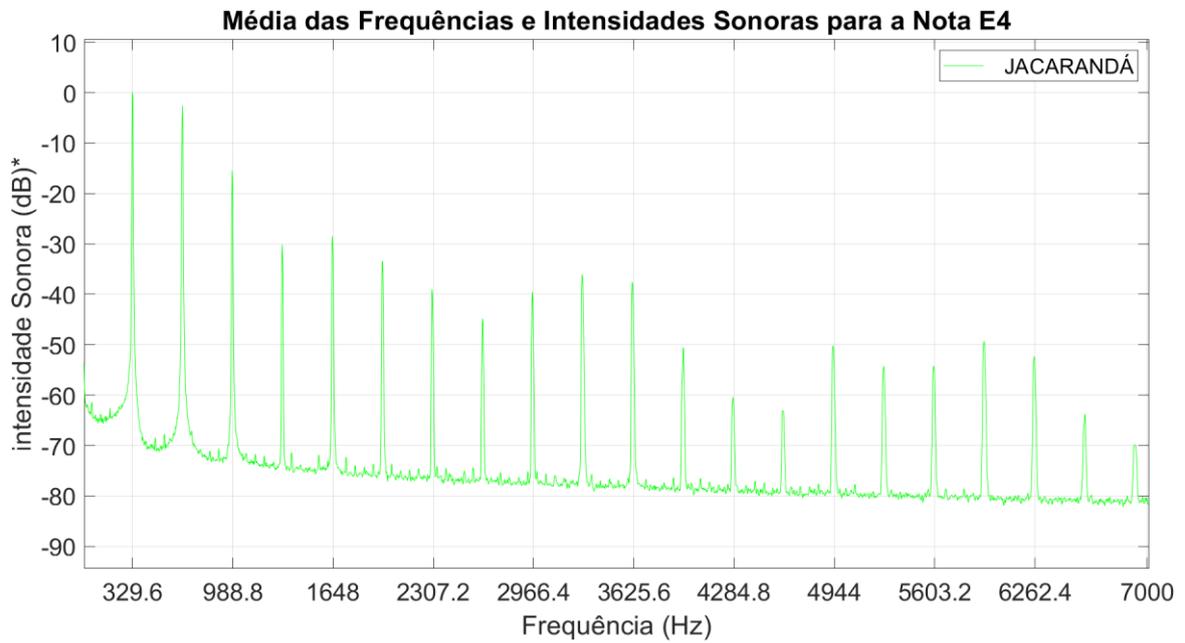


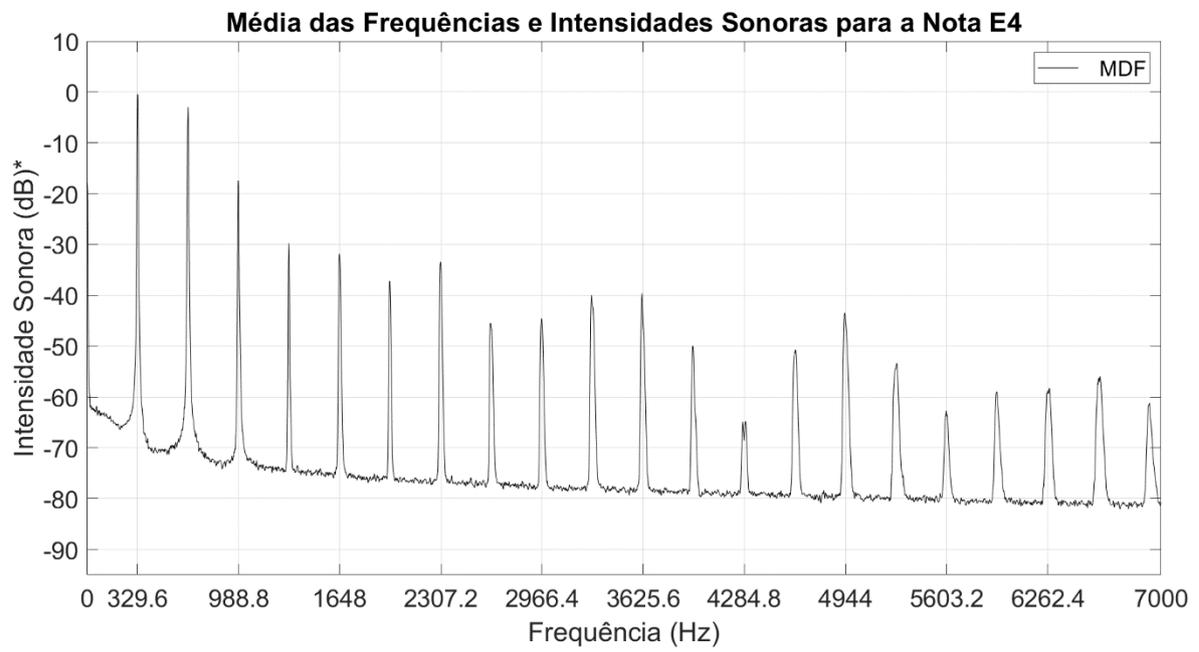


**APÊNDICE B - Gráficos das médias dos espectros sonoros
da nota E4 (329,6 Hz)**

Neste apêndice B estão contidos os gráficos das médias dos espectros sonoros (Frequência x Intensidade Sonora) da nota E4 (329,6 Hz), tocada nos corpos de prova confeccionados nas diferentes madeiras testadas. Cada espectro corresponde à média dos valores de dez espectros obtidos para cada nota tocada em cada corpo de madeira.







**APÊNDICE C – Tabelas comparativas de valores obtidos
dos gráficos dos espectros sonoros da nota D3 (146,8 Hz)**

Neste Apêndice C estão contidas tabelas com relação entre as medidas dos valores dos picos de frequências e intensidades sonoras das diversas madeiras estudadas, para os sons obtidos com as notas D3.

HARMÔNICOS	CEDRO D3						ANGELIM D3					
	Fr (Hz)	P(dB relat.)	I	Δ Fr (Hz)	n	Δ P (dB relat.)	Fr (Hz)	P(dB relat.)	I	Δ Fr (Hz)	n	Δ P (dB relat.)
1º	149,5	-5,968					149,5	-1,023				
2º	293,6	-3,68	1,9639	144,1	2,0	2	293,6	-4,42	1,9639	144,1	2,0	-3
3º	440,4	-19,43	1,5000	146,8	2,9	-16	440,4	-18,09	1,5000	146,8	2,9	-14
4º	587,2	-27,88	1,3333	146,8	3,9	-8	587,2	-34,55	1,3333	146,8	3,9	-16
5º	734	-31,7	1,2500	146,8	4,9	-4	734	-26,85	1,2500	146,8	4,9	8
6º	878,1	-33,01	1,1963	144,1	5,9	-1	878,1	-40,94	1,1963	144,1	5,9	-14
7º	1025	-44,48	1,1673	146,9	6,9	-11	1028	-32,92	1,1707	149,9	6,9	8
8º	1172	-51,26	1,1434	147	7,8	-7	1172	-47,58	1,1401	144	7,8	-15
9º	1327	-49,34	1,1323	155	8,9	2	1324	-42,3	1,1297	152	8,9	5
10º	1471	-44,26	1,1085	144	9,8	5	1473	-36,77	1,1125	149	9,9	6
11º	1617	-50,06	1,0993	146	10,8	-6	1617	-50,32	1,0978	144	10,8	-14
12º	1764	-60,16	1,0909	147	11,8	-10	1764	-54,37	1,0909	147	11,8	-4
13º	1914	-57,98	1,0850	150	12,8	2	1919	-65,54	1,0879	155	12,8	-11
14º	2066	-59,94	1,0794	152	13,8	-2	2061	-46,35	1,0740	142	13,8	19
15º	2219	-55,29	1,0741	153	14,8	5	2215	-47,07	1,0747	154	14,8	-1
16º	2362	-68,43	1,0644	143	15,8	-13	2359	-60,32	1,0650	144	15,8	-13
17º	2501	-72,81	1,0588	139	16,7	-4	2514	-54,41	1,0657	155	16,8	6
18º	2664	-67,28	1,0652	163	17,8	6	2664	-57,78	1,0597	150	17,8	-3
19º	2813	-71,94	1,0559	149	18,8	-5	2813	-61,75	1,0559	149	18,8	-4
20º	2963	-72,72	1,0533	150	19,8	-1	2963	-64,76	1,0533	150	19,8	-3

Fr Frequência do pico em Hz

P Intensidade sonora em dB relativo

I Intervalo de frequência $Fr(n)/Fr(n-1)$

Δ Fr Diferença entre frequências consecutivas $Fr(n) - Fr(n-1)$

n Relação entre a frequência "n" e a frequência do primeiro harmônico $Fr(n) / Fr(o)$

Δ P Diferença entre intensidades sonoras consecutivas $P(n) - P(n-1)$

HARMÔNICOS	JACARANDÁ D3						ITAÚBA D3					
	Fr (Hz)	P(dB relat.)	I	Δ Fr (Hz)	n	Δ P (dB relat.)	Fr (Hz)	P(dB relat.)	I	Δ Fr (Hz)	n	Δ P (dB relat.)
1º	146,8	-1,684					146,8	-1,366				
2º	293,6	-5,607	2,0000	146,8	2,0	-4	293,6	-10,89	2,0000	146,8	2,0	-10
3º	437,7	-17,03	1,4908	144,1	3,0	-11	437,7	-15,24	1,4908	144,1	3,0	-4
4º	581,9	-33,28	1,3294	144,2	4,0	-16	584,5	-28,86	1,3354	146,8	4,0	-14
5º	728,7	-25,84	1,2523	146,8	5,0	7	731,3	-28,49	1,2512	146,8	5,0	0
6º	872,8	-35,88	1,1977	144,1	5,9	-10	875,5	-32,21	1,1972	144,2	6,0	-4
7º	1020	-37,92	1,1687	147,2	6,9	-2	1022	-40,36	1,1673	146,5	7,0	-8
8º	1166	-49,35	1,1431	146	7,9	-11	1172	-50,24	1,1468	150	8,0	-10
9º	1311	-51,21	1,1244	145	8,9	-2	1316	-51,03	1,1229	144	9,0	-1
10º	1460	-44,19	1,1137	149	9,9	7	1468	-43,81	1,1155	152	10,0	7
11º	1609	-41,11	1,1021	149	11,0	3	1612	-44,28	1,0981	144	11,0	0
12º	1748	-57,29	1,0864	139	11,9	-16	1754	-57,23	1,0881	142	11,9	-13
13º	1900	-60,43	1,0870	152	12,9	-3	1903	-60,62	1,0849	149	13,0	-3
14º	2047	-52,93	1,0774	147	13,9	8	2053	-47,15	1,0788	150	14,0	13
15º	2194	-48,94	1,0718	147	14,9	4	2202	-49,28	1,0726	149	15,0	-2
16º	2349	-61,33	1,0706	155	16,0	-12	2354	-64,4	1,0690	152	16,0	-15
17º	2493	-58,09	1,0613	144	17,0	3	2498	-58,03	1,0612	144	17,0	6
18º	2642	-52,34	1,0598	149	18,0	6	2648	-54,05	1,0600	150	18,0	4
19º	2789	-55,88	1,0556	147	19,0	-4	2797	-63,04	1,0563	149	19,1	-9
20º	2936	-71,19	1,0527	147	20,0	-15	2947	-65,09	1,0536	150	20,1	-2

MDF D3						
HARMÔNICOS	Fr (Hz)	P(dB relat.)	I	Δ Fr (Hz)	n	Δ P (dB relat.)
1°	149,5	-1,336				
2°	293,6	-7,215	1,9639	144,1	2,0	-6
3°	440,4	-16,3	1,5000	146,8	2,9	-9
4°	587,2	-28,94	1,3333	146,8	3,9	-13
5°	731,3	-32,16	1,2454	144,1	4,9	-3
6°	878,1	-39,1	1,2007	146,8	5,9	-7
7°	1025	-41,74	1,1673	146,9	6,9	-3
8°	1177	-49,14	1,1483	152	7,9	-7
9°	1321	-47,81	1,1223	144	8,8	1
10°	1468	-42,45	1,1113	147	9,8	5
11°	1612	-40,57	1,0981	144	10,8	2
12°	1759	-52,67	1,0912	147	11,8	-12
13°	1908	-61,57	1,0847	149	12,8	-9
14°	2058	-50,7	1,0786	150	13,8	11
15°	2210	-48,71	1,0739	152	14,8	2
16°	2359	-59	1,0674	149	15,8	-10
17°	2496	-71,71	1,0581	137	16,7	-13
18°	2658	-65,63	1,0649	162	17,8	6
19°	2808	-61,41	1,0564	150	18,8	4
20°	2957	-57,09	1,0531	149	19,8	4

**APÊNDICE D – Tabelas comparativas de valores obtidos
dos gráficos dos espectros sonoros da nota E4 (329,6 Hz)**

Neste Apêndice D estão contidas tabelas com relação entre as medidas dos valores dos picos de frequências e intensidades sonoras das diversas madeiras estudadas, para os sons obtidos com as notas E4.

HARMÔNICOS	CEDRO E4						ANGELIM E4					
	Fr (Hz)	P(dB relat.)	I	Δ Fr (Hz)	n	Δ P (dB relat.)	Fr (Hz)	P(dB relat.)	I	Δ Fr (Hz)	n	Δ P (dB relat.)
1º	329,6	-0,6504					329,6	-5,698				
2º	659,2	-1,052	2,0000	329,6	2,0	0	656,2	-11,27	1,9909	326,6	2,0	-6
3º	986,1	-17,53	1,4959	326,9	3,0	-16	983,4	-15,46	1,4986	327,2	3,0	-4
4º	1316	-28,53	1,3346	329,9	4,0	-11	1310	-37,89	1,3321	326,6	4,0	-22
5º	1643	-28,7	1,2485	327	5,0	0	1637	-34,83	1,2496	327	5,0	3
6º	1972	-39,07	1,2002	329	6,0	-10	1964	-40,86	1,1998	327	6,0	-6
7º	2299	-34,89	1,1658	327	7,0	4	2291	-33,71	1,1665	327	7,0	7
8º	2626	-49,24	1,1422	327	8,0	-14	2618	-49,4	1,1427	327	7,9	-16
9º	2956	-38,43	1,1257	330	9,0	11	2942	-40,37	1,1238	324	8,9	9
10º	3285	-36,01	1,1113	329	10,0	2	3272	-37,45	1,1122	330	9,9	3
11º	3612	-42,46	1,0995	327	11,0	-6	3599	-48,04	1,0999	327	10,9	-11
12º	3944	-56,38	1,0919	332	12,0	-14	3928	-63	1,0914	329	11,9	-15
13º	4271	-56,24	1,0829	327	13,0	0	4255	-54,68	1,0832	327	12,9	8
14º	4601	-42,2	1,0773	330	14,0	14	4582	-44,59	1,0769	327	13,9	10
15º	4931	-42,9	1,0717	330	15,0	-1	4912	-48,47	1,0720	330	14,9	-4
16º	5266	-58,04	1,0679	335	16,0	-15	5239	-67,69	1,0666	327	15,9	-19
17º	5590	-54,07	1,0615	324	17,0	4	5568	-60,52	1,0628	329	16,9	7
18º	5922	-58,32	1,0594	332	18,0	-4	5895	-71,14	1,0587	327	17,9	-11
19º	6252	-55,5	1,0557	330	19,0	3	6228	-60,45	1,0565	333	18,9	11
20º	6581	-61,89	1,0526	329	20,0	-6	6554	-67,63	1,0523	326	19,9	-7

Fr Frequência do pico em Hz

P Intensidade sonora em dB relativo

I Intervalo de frequência $Fr(n)/Fr(n-1)$

Δ Fr Diferença entre frequências consecutivas $Fr(n) - Fr(n-1)$

n Relação entre a frequência "n" e a frequência do primeiro harmônico $Fr(n) / Fr(o)$

Δ P Diferença entre intensidades sonoras consecutivas $P(n) - P(n-1)$

HARMÔNICOS	JACARANDÁ E4						ITAÚBA E4					
	Fr (Hz)	P(dB relat.)	I	Δ Fr (Hz)	n	Δ P (dB relat.)	Fr (Hz)	P(dB relat.)	I	Δ Fr (Hz)	n	Δ P (dB relat.)
1º	329,6	0,0138					329,6	-0,4706				
2º	659,2	-2,568	2,0000	329,6	2,0	-3	659,2	-4,218	2,0000	329,6	2,0	-4
3º	986,1	-15,54	1,4959	326,9	3,0	-13	988,8	-15,45	1,5000	329,6	3,0	-11
4º	1316	-30,16	1,3346	329,9	4,0	-15	1318	-32,16	1,3329	329,2	4,0	-17
5º	1645	-28,46	1,2500	329	5,0	2	1645	-28,89	1,2481	327	5,0	3
6º	1972	-33,45	1,1988	327	6,0	-5	1975	-36,17	1,2006	330	6,0	-7
7º	2299	-39,06	1,1658	327	7,0	-6	2305	-38,32	1,1671	330	7,0	-2
8º	2631	-44,84	1,1444	332	8,0	-6	2634	-45,26	1,1427	329	8,0	-7
9º	2958	-39,51	1,1243	327	9,0	5	2964	-38,68	1,1253	330	9,0	7
10º	3288	-36,5	1,1116	330	10,0	3	3293	-36,48	1,1110	329	10,0	2
11º	3615	-37,58	1,0995	327	11,0	-1	3620	-36,71	1,0993	327	11,0	0
12º	3953	-50,71	1,0935	338	12,0	-13	3953	-49,75	1,0920	333	12,0	-13
13º	4277	-60,4	1,0820	324	13,0	-10	4285	-61,62	1,0840	332	13,0	-12
14º	4604	-62,98	1,0765	327	14,0	-3	4612	-50,48	1,0763	327	14,0	11
15º	4933	-50,36	1,0715	329	15,0	13	4939	-43,88	1,0709	327	15,0	7
16º	5266	-54,66	1,0675	333	16,0	-4	5274	-49,85	1,0678	335	16,0	-6
17º	5595	-54,23	1,0625	329	17,0	0	5603	-57,46	1,0624	329	17,0	-8
18º	5927	-49,32	1,0593	332	18,0	5	5933	-49,28	1,0589	330	18,0	8
19º	6257	-52,29	1,0557	330	19,0	-3	6262	-56,1	1,0555	329	19,0	-7
20º	6589	-63,75	1,0531	332	20,0	-11	6592	-65,56	1,0527	330	20,0	-9

HARMÔNICOS	MDF E4					
	Fr (Hz)	P(dB relat.)	I	Δ Fr (Hz)	n	Δ P (dB relat.)
1°	332,3	-0,6788				
2°	659,2	-2,975	1,9837	326,9	2,0	-2
3°	986,1	-17,4	1,4959	326,9	3,0	-14
4°	1316	-29,76	1,3346	329,9	4,0	-12
5°	1645	-31,8	1,2500	329	5,0	-2
6°	1972	-37,28	1,1988	327	5,9	-5
7°	2305	-33,44	1,1689	333	6,9	4
8°	2629	-45,49	1,1406	324	7,9	-12
9°	2961	-44,78	1,1263	332	8,9	1
10°	3288	-39,95	1,1104	327	9,9	5
11°	3618	-39,63	1,1004	330	10,9	0
12°	3947	-49,98	1,0909	329	11,9	-10
13°	4274	-64,89	1,0828	327	12,9	-15
14°	4612	-51,19	1,0791	338	13,9	14
15°	4936	-43,65	1,0703	324	14,9	8
16°	5276	-53,39	1,0689	340	15,9	-10
17°	5601	-62,74	1,0616	325	16,9	-9
18°	5930	-58,99	1,0587	329	17,8	4
19°	6270	-58,33	1,0573	340	18,9	1
20°	6605	-56,59	1,0534	335	19,9	2