

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LUCAS ANDRÉ DE CARVALHO

RAFAEL DA SILVA INACIO

**ANÁLISE DINÂMICA DE UMA GUITARRA ELÉTRICA DE CORPO SÓLIDO POR
MEIO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA**

CURITIBA

2022

**LUCAS ANDRÉ DE CARVALHO
RAFAEL DA SILVA INACIO**

**ANÁLISE DINÂMICA DE UMA GUITARRA ELÉTRICA DE CORPO SÓLIDO POR
MEIO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA**

**DYNAMIC ANALYSIS OF A SOLID BODY ELECTRIC GUITAR BY A NUMERIC
SIMULATION**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Marcio Henrique de Avelar Gomes.

Coorientador: Prof. Dr. Ivan Moura Belo.

CURITIBA

2022



Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**LUCAS ANDRÉ DE CARVALHO
RAFAEL DA SILVA INACIO**

**ANÁLISE DINÂMICA DE UMA GUITARRA ELÉTRICA DE CORPO SÓLIDO POR
MEIO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Marcio Henrique de Avelar Gomes.

Coorientador: Prof. Dr. Ivan Moura Belo

Data de aprovação: 22/Junho/2022

João Moraes da Silva Neto
Doutorado
Universidade Federal do Pará

Marcelo de Oliveira Rosa
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcio Henrique de Avelar Gomes
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA

2022

RESUMO

A guitarra elétrica, instrumento criado no início do século XX, tornou-se influente na cultura pop mundial com a ascensão do rock'n'roll e persiste como grande marca cultural na música. Na confecção do instrumento, a escolha do material é baseado na experiência e histórico do fabricante, há um paradigma em que a melhor forma de construir uma guitarra é utilizando os materiais que sempre foram usados, sem grande embasamento científico que sustente a escolha de material. A equipe viu a oportunidade de atuar comparando os materiais geralmente utilizados para a confecção de uma guitarra elétrica de corpo sólido por meio de uma análise dinâmica. Foi desenvolvido um modelo computacional simplificado de uma guitarra elétrica e foram feitas análises modal, harmônica e transiente usando o método de elementos finitos no software Ansys. Os resultados mostraram que há diferenças no comportamento dinâmico da guitarra para as madeiras Acer, Mogno, Tília Americana e Populus.

Palavras-chave: análise dinâmica; guitarra elétrica; MEF; madeira.

ABSTRACT

The electric guitar, musical instrument which was developed in the XX century, became influential in the world's pop culture with the rise of rock'n'roll and persists as a big impression of the culture in the music. In the instrument production, the material choice is based on the experience and the manufacturer's history, there is a paradigm that the best way to manufacture a guitar is using the materials that have always been used, without any solid scientific method that supports the material chosen. The project team saw the opportunity to act by comparing the materials that have been used in a solid-body guitar confection by dynamic analysis. It was developed a simplified electric guitar computational model and it was done modal, harmonic and transient analysis using finite elements method in the Ansys software. The results showed differences in the guitar dynamic behavior among the wood species Maple, Mahogany, Basswood, Cottonwood.

Keywords: dynamic analysis; electric guitar; FEM; wood.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Áreas da engenharia mecânica aplicadas.....	15
Figura 2 - Alaúde.....	17
Figura 3 - Lira, pluriarco e harpo-lira.....	18
Figura 4 - Bandolim.....	19
Figura 5 - Principais componentes de uma guitarra elétrica.....	20
Figura 6 - Diferentes formatos para a mão de uma guitarra elétrica.....	21
Figura 7 - Detalhe da pestana apoiando e mantendo as cordas elevadas.....	22
Figura 8 - Desenho do mecanismo das tarroxas.....	23
Figura 9 - Detalhe das cordas enroladas de uma guitarra e mecanismo das tarroxas de um baixo.....	23
Figura 10 - Trastes não instalados no braço da guitarra e especificações de dois modelos.....	24
Figura 11 - Os três diferentes meios de ligação entre o braço e o corpo.....	26
Figura 12 - Diferentes formatos para o braço da guitarra.....	27
Figura 13 - Os quatro tipos básicos de corpo de uma guitarra.....	28
Figura 14 - Diferentes modelos de corpo de guitarra.....	29
Figura 15 - Captador magnético em vista explodida.....	30
Figura 16 - Ponte simples de uma guitarra elétrica.....	31
Figura 17 - Ponte Floyd Rose.....	32
Figura 18 - Patente da Fender do dispositivo mecânico tremolo.....	33
Figura 19 - Tipos de enrolamentos de cordas metálicas.....	35
Figura 20 - Sistema massa-mola de uma grau de liberdade.....	39
Figura 21 - Aparato experimental para análise física.....	45
Figura 22 - 60 STRATOCASTER® NOS.....	49
Figura 23 - Template da guitarra Stratocaster em escada 1:1.....	54
Figura 24 - Modelo simplificado da guitarra SolidWorks.....	55
Figura 25 - Modelo step com marcações FreeCAD.....	56
Figura 26 - Comunicação entre ferramentas de análise Ansys.....	57
Figura 27 - Modelo step importado para o software de análise.....	58
Figura 28 - Elemento tetraédrico.....	59
Figura 29 - Malha de 2,5 mm.....	60
Figura 30 - Malha de 5 mm.....	60
Figura 31 - Malha de 10 mm.....	61
Figura 32 - Malha de 20 mm.....	61
Figura 33 - Malha de 15 mm.....	63
Figura 34 - Relação dos eixos longitudinal, radial e tangencial com as fibras da madeira.....	64
Figura 35 - Sistema de coordenadas e posicionamento do modelo da guitarra.....	65
Figura 36 - Direção das fibras em uma guitarra.....	66

Figura 37 - Condições de contorno para análise modal.....	68
Figura 38 - Configurações de análise modal.....	69
Figura 39 - Diagrama de Corpo livre.....	70
Figura 40 - Configurações de análise harmônica.....	71
Figura 41 - Condições de contorno para a análise harmônica.....	72
Figura 42 - Condições de contorno no t = 0 s.....	74
Figura 43 - Configurações de análise transiente.....	75
Figura 44 - Ponto de extração de dados.....	78
Figura 45 - Resposta em frequência do Acer.....	79
Figura 46 - Resposta em frequência do Mogno.....	79
Figura 47 - Resposta em frequência da Tília americana.....	80
Figura 48 - Resposta em frequência do Populus.....	80
Figura 49 - Resposta em frequência das quatro madeiras sobrepostas.....	81
Figura 50 - Resposta ao impulso do Acer.....	82
Figura 51 - Resposta ao impulso do Mogno.....	82
Figura 52 - Resposta ao impulso da Tília americana.....	83
Figura 53 - Resposta ao impulso do Populus.....	83
Figura 54 - Resposta ao Impulso das quatro madeiras.....	84
Figura 55 - Curvas de decaimento das quatro madeiras estudadas.....	84
Figura 56 - Curvas de decaimento das quatro madeiras e Mogno com coeficiente de amortecimento de 0,0095.....	85
Figura 57 - Resposta em frequência do Mogno para dois coeficientes de amortecimento diferentes.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades dos materiais pesquisados.....	37
Tabela 2 - Resultados modais para diferentes resoluções de malha.....	62
Tabela 3 - Resultados modais para malha de 15 mm.....	63
Tabela 4 - Propriedades inseridas no modelo matemático.....	66
Tabela 5 - Modos de vibrar e frequência associada das madeiras estudadas...	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Materiais usados na construção de guitarras comerciais nacionais e internacionais.....	35
Quadro 2 - Materiais usados na construção de guitarras comerciais nacionais e internacionais.....	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Contextualização do tema.....	11
1.2	Caracterização da oportunidade.....	13
1.3	Objetivos.....	14
1.3.1	Objetivo Geral.....	14
1.3.2	Objetivos Específicos.....	14
1.4	Justificativa.....	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1	A Guitarra elétrica.....	16
2.1.1	Classificação da guitarra elétrica.....	16
2.1.2	Componentes da guitarra elétrica.....	19
2.1.2.1	Mão ou cabeça (<i>Headstock</i>).....	20
2.1.2.2	Pestana (<i>Nut</i>).....	21
2.1.2.3	Tarraxas ou cravelhas (<i>Machine heads</i>).....	22
2.1.2.4	Trastes (<i>Frets</i>).....	23
2.1.2.5	Tirante ou tensor (<i>Truss rod</i>).....	25
2.1.2.6	Braço (<i>Neck</i>).....	25
2.1.2.7	Corpo (<i>Body</i>).....	28
2.1.2.8	Captadores (<i>Pickups</i>).....	29
2.1.2.9	Potenciômetros (<i>Knobs</i>).....	30
2.1.2.10	Ponte (<i>Bridge</i>).....	31
2.1.2.11	Cordas (<i>Strings</i>).....	34
2.2	Madeiras para construção de uma guitarra.....	35
2.3	Análise Modal.....	37
2.3.1	Análise modal.....	37
2.3.2	Sistemas com um grau de liberdade.....	38
2.3.3	Sistemas com dois graus de liberdade.....	39
2.3.4	Sistemas contínuos.....	41
2.4	Simulação de guitarra ou violão usando elementos finitos.....	43
2.4.1	Nós e estrutura dos elementos.....	44
2.4.2	Tipos de elementos para análise.....	44
2.4.3	Malha.....	46

2.4.4	Condições de contorno e restrições do modelo.....	46
2.4.5	Análise computacional.....	48
3	METODOLOGIA.....	49
3.1	Modelo realizado.....	49
3.2	Condições de Contorno.....	50
3.3	Criação de malha.....	51
3.4	Análise modal auxiliada por computador.....	51
4	DESENVOLVIMENTO.....	53
4.1	Confecção do modelo computacional.....	53
4.2	Software de análise e criação de malha.....	56
4.3	Realização da malha.....	57
4.4	Material de análise.....	63
4.5	Condições de contorno na análise modal.....	67
4.6	Condições de contorno para análise harmônica.....	70
4.7	Condições de contorno na análise transiente.....	72
4.8	Tempo de reverberação.....	75
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	77
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	87
	REFERÊNCIAS.....	89

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do tema

Com o surgimento da guitarra elétrica no início do século XX, o seu uso na cultura pop se tornou cada vez mais presente ganhando progressivamente mais adeptos. Cantores como Elvis Presley e outros guitarristas da época, tiveram grande influência sob a juventude do século XX, aumentando ainda mais a popularidade do instrumento. Com guitarras de cada vez mais qualidade, a fabricante Gibson e a Fender também tiveram papel para esse crescimento do mercado de guitarras (SOUZA, 2002).

Ao passo que os investimentos no nicho de guitarras crescia e bandas se tornavam cada vez mais famosas tal como os Beatles, a indústria do rock tornou-se milionária e consolidou a guitarra como um dos instrumentos de maior importância no cenário musical (SOUZA, 2002).

Outro marco importante para o cenário do rock, consequentemente da guitarra, foi o festival de Monterey (1967). Inspirado nos festivais de jazz e folk, o festival reuniu um total de 50 mil pessoas na Califórnia. Monterey não só consolidou The Who, Eric Burdon e Jimi Hendrix no cenário global, como é considerado por muitos como o primeiro grande festival de rock do mundo, servindo como exemplo para os próximos (SOUZA, 2002).

No contexto local, uma das influências da guitarra na cultura é observada no gênero musical nacional nomeado guitarrada, conhecido também por lambada ou lambada instrumental. Criada no Pará nos anos 1970 por Mestre Vieira, tem a guitarra elétrica como seu principal instrumento (CARAVEO, 2019).

A sua popularidade e público em massa atraiu a atenção de grandes marcas e construtores de guitarras, os luthieres, e por volta da década de 40 a Gibson já estava firmemente estabelecida no mercado (ZOLLNER, 2019, DENYER, 1992).

Quando se trata da comercialização de guitarras atualmente, pesquisas e análises mercadológicas indicam que o mercado de guitarras está em expansão, projetando uma taxa de crescimento de 3,14% ao ano entre os anos de 2021 e 2025, representando um crescimento de \$123,99 milhões (cento e vinte e três

milhões e novicentos e noventa mil dólares). Ademais, vai ao encontro dessa projeção positiva o resultado de uma situação particular dos tempos atuais, como mostra (MEYER, 2021) o confinamento devido à crise sanitária do Covid-19 teve forte influência no aumento da demanda por instrumentos como violões e guitarras. Esta maior procura evitou, inclusive, a falência de uma famosa fabricante de instrumentos musicais, a Gibson (MEYER, 2021; MORE, 2021).

Um diferencial que o cliente/músico busca é uma guitarra bem construída. Para tanto, os luthieres procuram confeccionar guitarras das melhores qualidades. Para isso, se respaldam na experiência e no que já é considerado como boa prática na construção de guitarras pelo mercado (ZOLLNER, 2019).

Uma parte da composição da guitarra é baseada, principalmente, na experiência do fabricante, isso ocorre na escolha do material utilizado para o braço e corpo da guitarra. O braço da guitarra, no caso do fabricante Fender, é feito a partir da madeira de acer (ou bordo), com as casas feitas de pau-rosa. No caso da Gibson, as guitarras mais tradicionais têm o braço feito a partir de mogno, com as casas feitas de pau-rosa ou de ébano (ZOLLNER, 2019).

No entanto, há, ainda, desconhecimento e falta de embasamento científico sustentando o processo de fabricação de uma guitarra baseado na experiência. Em sua obra Zollner (2009) aborda alguns dos diversos mitos envolvendo esse instrumento. Há mitos e controvérsias sobre os *pickups* ou captadores magnéticos, sobre a madeira de fabricação, sobre a angulação do braço da guitarra, sobre o circuito elétrico entre outros. As crenças, mitos e especulações com pouco, ou nenhum embasamento científico não têm origem clara: especulam-se que sejam fruto de publicidade de empresas ligadas ao ramo, fornecedores e/ou fabricantes, que criam esses mitos e estes acabam sendo promovidos e repassados no meio, inclusive por publicações em revistas e artigos. Esse processo faz com que alguns mitos sejam amplamente difundidos e ganhem “status de verdade”.

Traçar um método comparativo associado com simulação matemática de diferentes materiais pode ser de grande ajuda para a confecção de guitarras. Este trabalho pretende comparar uma das propriedades da guitarra: modos de vibração da guitarra em diferentes frequências de excitação. Isso foi realizado por meio de análises modais da guitarra.

1.2 Caracterização da oportunidade

Baseado no que foi exposto, percebeu-se que no processo de confecção de uma guitarra há requisitos de que partes do instrumento sejam feitos com tipos de específicos madeiras e, que bases para esses requisitos são boas as práticas e a experiência na construção, percebeu-se, também, que assim como evidenciou (ZORIC; KALJUN, 2018) há pouco entendimento do efeito e função da madeira corpo da guitarra e, como descrito anteriormente, há numerosos mitos relacionados à confecção de uma guitarra. Viu-se, portanto, a oportunidade de investigar qual a influência do material no produto final, perguntou-se se há necessidade de se usar tipos específicos de madeira e se, usando outro tipo de madeira, há diferença na qualidade sonora do produto final, se fica melhor, pior ou se não há diferença significativa.

Em algumas partes do mundo, adquirir certos tipos de madeira pode ser uma tarefa complicada ou cara. Com um estudo apontando para a propriedade necessária para adquirir a qualidade necessária para a construção de uma guitarra, pode possibilitar novas alternativas de construção, podendo baratear a confecção da mesma.

É importante lembrar que para profissionais do ramo, uma pequena mudança de material é significativa, como mostrado no vídeo de Richie Sambora and Orianthi (NORMAN'S RARE GUITARS, 2015). O guitarrista do Bon Jovi reprova guitarras e aprova guitarras do mesmo fabricante, marca e até lote. Há a discussão até se a guitarra for feita da mesma árvore, o som pode ser diferente (ZOLLNER, 2019), como é feita de partes diferentes do mesmo tronco.

O conjunto dinâmico da guitarra que foi avaliado pode ser reduzido a cinco componentes importantes dinamicamente para o seu som: braço, corpo, ponte cordas e pestana. A simulação correta desses componentes proporciona uma análise mais próxima do comportamento real da guitarra.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo obter a função de transferência de uma guitarra elétrica de corpo sólido por meio de uma análise modal com elementos finitos, criando embasamentos relacionados ao material de fabricação.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Estudar o comportamento dinâmico do conjunto corpo e braço de uma guitarra elétrica;
2. Investigar a diferença estrutural entre os materiais de possível uso na confecção do corpo e braço de uma guitarra elétrica;
3. Construir um modelo de uma guitarra elétrica para a análise modal numérica;
4. Analisar a influência dos materiais elencados no comportamento dinâmico do conjunto.

1.4 Justificativa

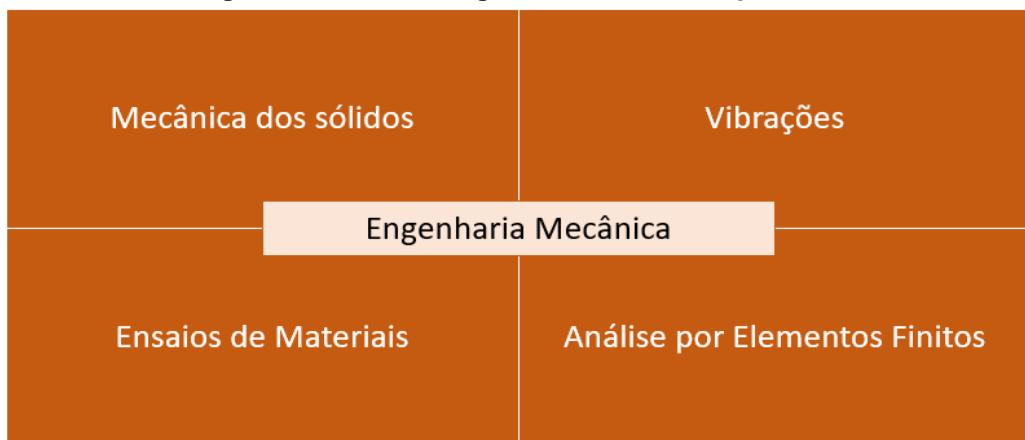
Desmistificar e dar embasamento científico, respaldado em conhecimento da engenharia mecânica, a áreas pouco abordadas durante o curso, foi o principal quesito para a escolha deste tema de trabalho. O estudo modal de uma guitarra elétrica engloba conceitos importantes na área da engenharia, tendo foco, principalmente, em vibrações e análise estrutural.

O trabalho visa ser útil auxiliando futuros projetos de guitarra, tendo importância, principalmente, na escolha do material de confecção. Com o auxílio de

uma análise científica, a escolha de material se torna mais fundamentada, podendo dar maior liberdade ao luthier e, possivelmente, dar maior espaço para novas possibilidades de construção.

Para a realização deste trabalho, várias áreas do conhecimento aprendido durante o curso de Engenharia Mecânica são aplicadas. As áreas utilizadas estão expostas conforme Figura 1:

Figura 1 - Áreas da engenharia mecânica aplicadas



Fonte: Autoria própria (2022)

Todas as áreas apresentadas na Figura 1 são expostas, com maior riqueza de detalhes, nos tópicos seguintes deste trabalho. Entretanto, para maior entendimento do leitor, de forma resumida, as áreas terão a seguinte aplicação:

- Mecânica dos sólidos: Ajudará na montagem das condições de contorno; modelagem dos diferentes componentes da guitarra; interpretação dos dados recebidos da análise computacional;
- Vibrações: Aplicação do conceito de dinâmica de corpos contínuos na análise da guitarra; análise dos dados e tratamento de gráficos gerados;
- Ensaios de Materiais: Transcrição de dados obtidos a partir de ensaios físicos de madeiras em inserção de propriedades no modelo matemático da guitarra..
- Análise por Elementos Finitos: Aplicação de conceitos de malha; modelagem; análise e retirada de dados.

Todo o trabalho foi desenvolvido sob um olhar crítico da engenharia mecânica, visando enxergar possibilidades de aplicação dos conceitos aprendidos durante o curso.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Ao longo deste capítulo serão apresentados os principais conceitos que darão as bases para o desenvolvimento deste trabalho. Será apresentada a guitarra elétrica de corpo sólido quanto a sua classificação como um instrumento musical e, também, os seus componentes com enfoque nos mais relevantes para o presente estudo. Na sequência serão apresentados os materiais de construção de uma guitarra elétrica, conceitos de análise modal e, por fim, noções de simulação aplicado o método dos elementos finitos.

2.1 A Guitarra elétrica

Nesta seção será apresentada a guitarra elétrica de corpo sólido e os componentes que são relevantes para o presente estudo como o corpo, o braço, a ponte, as cordas e a pestana. Há, além desses, diversos outros elementos que constituem uma guitarra elétrica e que são fundamentais para o seu correto funcionamento, mas para o presente trabalho estes podem ser ignorados e, portanto, não são abordados com detalhes nas posteriores subseções, como é o caso do circuito elétrico e sistema de amplificação.

2.1.1 Classificação da guitarra elétrica

Para situar o problema que se busca resolver é necessário compreender o objeto de estudo, embora Souza (2002) tenha mostrado que a guitarra se tornou um instrumento popular e bastante conhecido, deve-se evitar o senso comum e estabelecer o que está sendo estudado em bases científicas. Com isso, buscou-se um sistema que classificasse os instrumentos musicais, o qual daria o embasamento adequado para delimitar qual é o escopo da pesquisa e, principalmente, conhecer o

que não faz parte do presente trabalho.

A guitarra elétrica está classificada conforme o sistema de Hornbostel-Sachs (HORNBOSTEL; SACHS, 1961) no código 321.322, detalhando a classificação da guitarra elétrica tem-se:

- **3** - Pertencente à classe dos cordofones ou instrumentos de corda, instrumento cujo som é produzido pela vibração de uma ou mais cordas tensionadas;
- **32** - Pertencente ao grupo dos cordofones compostos, instrumentos acústicos ou eletroacústicos nos quais a caixa de ressonância é parte integral do instrumento, esse grupo engloba instrumentos como a harpa, o violino, o violão etc;
- **321** - Grupo dos *lutes* ou alaúdes, são os instrumentos que têm o plano das cordas paralelo ao plano do instrumento. A Figura 2 mostra um alaúde, instrumento que dá nome ao grupo 321.

Figura 2 - Alaúde



Fonte: Adaptado de Wikimedia (2013) e Wikimedia (2017)

- **321.3** - Grupo dos *handle lutes*, são os instrumentos nos quais o portador da corda ou das cordas é um elemento - ou braço - simples. Instrumentos com braços auxiliares ou aqueles que têm as cordas distribuídas em vários braços não são pertencentes a esse grupo como a lira, o pluriarco e , mostrado na

Figura 3.

Figura 3 - Lira, pluriarco e harpo-lira



Nota: Tradução dos autores para harpo-lyre.

Fonte: Adaptado de Africamuseum, Metmuseum e Unplash (2021).

- **321.32** - Grupo do *necked lutes* ou dos alaúdes de/com braço, é grupo dos instrumentos que tem o braço ligado à caixa de ressonância ou esculpido da mesma.
- **321.322** - Grupo do *necked box lutes* ou alaúdes com braço em formato de caixa, é o grupo dos instrumentos que tem o corpo modelado como uma caixa como o violino, o violão e a guitarra. Esses instrumentos diferem do bandolin, por exemplo, que tem o corpo em formato de pêra, mostrado na Figura 4, e está contido no grupo 321.321: *necked bowl lutes* ou alaúdes com braço em formato de tigela.

Figura 4 - Bandolim



Fonte: Flicker (2010)

A partir do que foi exposto, a troca de material do instrumento não interfere na classificação de uma guitarra. Portanto, para que um instrumento seja classificado como uma guitarra, há limitantes quanto à complexidade do braço e ao formato do corpo. Um instrumento cujo a fixação das cordas se dá em mais de um braço, ou que tenha braços auxiliares para outras funções (ou mesmo que sejam braços para fins ornamentais) terá uma classificação diferente da guitarra comumente conhecida. Quanto ao corpo, deve-se ficar atento ao seu formato: alterações que tendem a modificar a curvatura da caixa acústica, podem, em algum momento, fazer com que a classificação do instrumento mude.

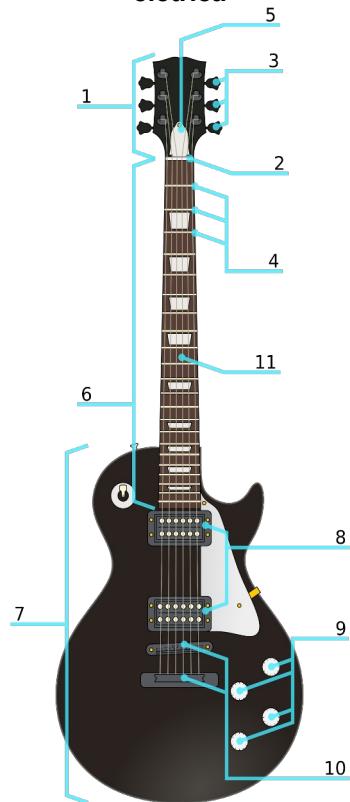
2.1.2 Componentes da guitarra elétrica

Nesta seção serão apresentados os principais componentes de uma guitarra elétrica e uma breve descrição das suas funções, os componentes mais importantes para o trabalho são abordados de maneira mais detalhada.

A Figura 5 apresenta um esquemático de uma guitarra elétrica e os principais componentes numerados. Na sequência desta seção cada componente da

guitarra indicado por números na Figura 5 será nomeado e sua função principal descrita em subseções, respectivamente.

Figura 5 - Principais componentes de uma guitarra elétrica



Fonte: Adaptado de Wikimedia (2016)

2.1.2.1 Mão ou cabeça (Headstock)

A mão da guitarra é o componente que está em uma das extremidades da guitarra e está conectada ao braço, tem como função principal ser o elemento estrutural de sustentação das tarraxas. Há variados formatos, forma de distribuição das tarraxas e o seu plano de inclinação com o braço varia conforme o modelo escolhido, essa inclinação pode variar entre 0 a 17 graus e tem a finalidade de fazer com que a corda exerça a pressão necessária na pestana para não ocorrer

escorregamento. Naquelas guitarras cujo as mãos têm ângulo zero, pode-se ter a necessidade do uso de rebaixadores de corda, que são acessórios que vão fazer essa função de pressionar a corda contra a pestana (Gibson, 2010; KOCH, 2001). A Figura 6 apresenta algumas das variações disponíveis para a mão da guitarra.

Figura 6 - Diferentes formatos para a mão de uma guitarra elétrica

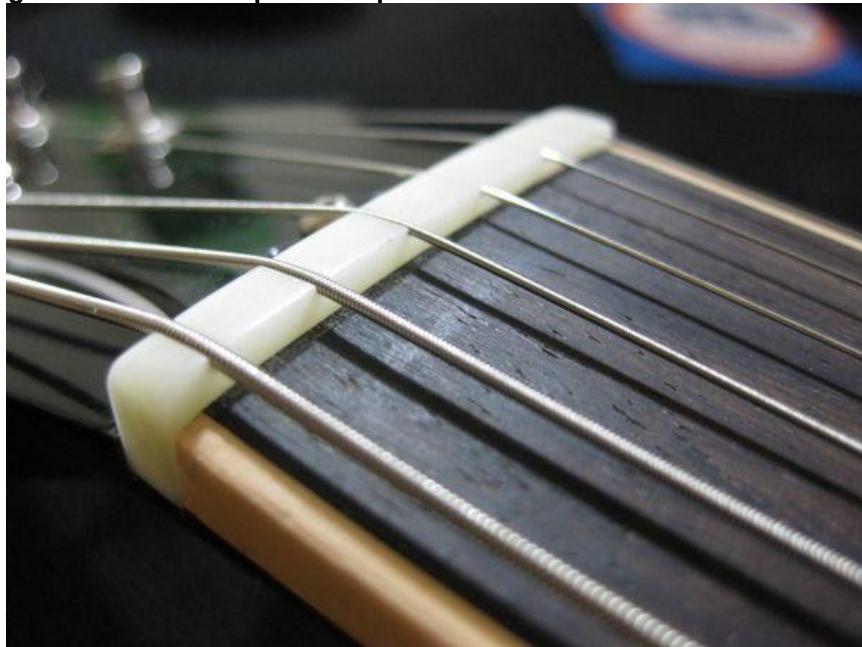


Fonte: Adapatado de Unplash (2019), Unplash (2018), Unplash (2021)

2.1.2.2 Pestana (Nut)

A pestana é um importante componente da guitarra que exerce funções essenciais para o correto funcionamento do instrumento. Primeiramente é o lugar no qual as cordas são apoiadas e, também, é uma das duas fronteiras que definem a parte vibratória da corda. Em outras palavras, em conjunto com a ponte, é o limitante do comprimento da corda e, consequentemente, é a referência para o posicionamento correto dos trastes e para a tensão na corda, uma vez que a frequência de vibração da corda é função das propriedades da corda, da tensão e do comprimento (DENYER, 1992; KOCH, 2001). A pestana também tem a função de manter as cordas em uma certa elevação em relação ao braço, como pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 - Detalhe da pestana apoiando e mantendo as cordas elevadas



Fonte: Strange Guitar Works (2013)

A Figura 7 mostra o modelo de pestana que é mais encontrado nas guitarras e nos violões: formato retangular com rasgos para o encaixe das cordas. Há uma variedade de materiais usados na pestana como madeira, polímeros, osso, marfim etc (DENYER, 1992). A 57 Les Paul Custom, por exemplo, tem a pestana feita em nylon (GIBSON, 2018), enquanto a Tagima T-900 tem pestana feita em osso (TAGIMA, 2021).

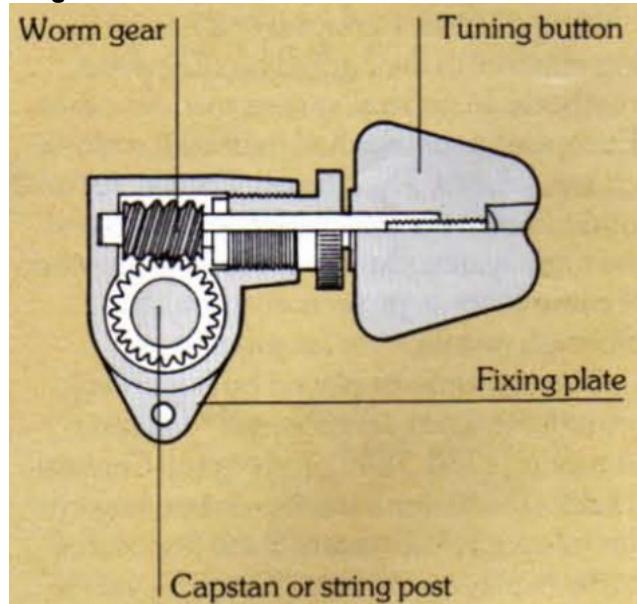
Há também, uma técnica violonística que recebe o nome desse componente, como descrevem Madeira e Scarduelli (2013): a pestana é uma técnica que utiliza um dedo para prender todas ou várias cordas ao mesmo tempo e o uso dessa técnica pode ser ampliado com a utilização de opções ou derivações que foram expostas no artigo.

2.1.2.3 Tarrazas ou cravelhas (*Machine heads*)

As tarrazas são os mecanismos nos quais as cordas são fixadas e enroladas, e tais mecanismos estão anexados na mão da guitarra. Sua função principal é regular a tensão na corda do instrumento com objetivo de ajustar a frequência de vibração de uma determinada corda quando esta é tocada, ou seja,

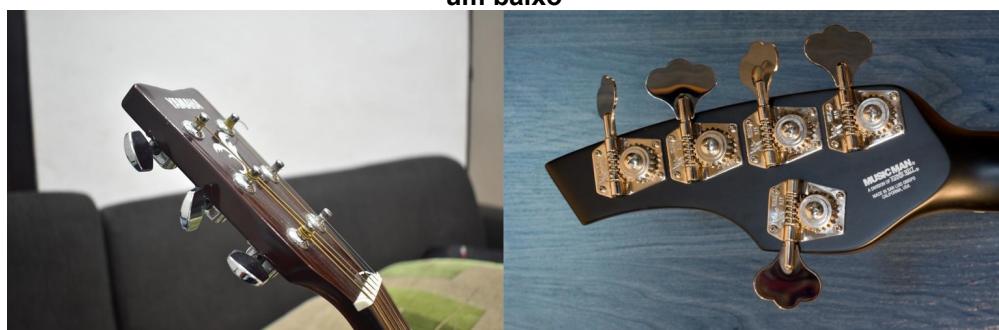
afinar o instrumento e mantê-lo afinado. Seu mecanismo de funcionamento se dá por um sistema simples de engrenagem que amplia e altera o sentido do torque aplicado pelos dedos (DENYER, 1992; LANG; LANG, 1896; KOCH, 2001). A Figura 8 mostra um desenho do mecanismo da tarraxa e a Figura 9 mostra o detalhe das cordas enroladas e o mecanismo das tarraxas.

Figura 8 - Desenho do mecanismo das tarraxas



Fonte: Denyer (1992)

Figura 9 - Detalhe das cordas enroladas de uma guitarra e mecanismo das tarraxas de um baixo



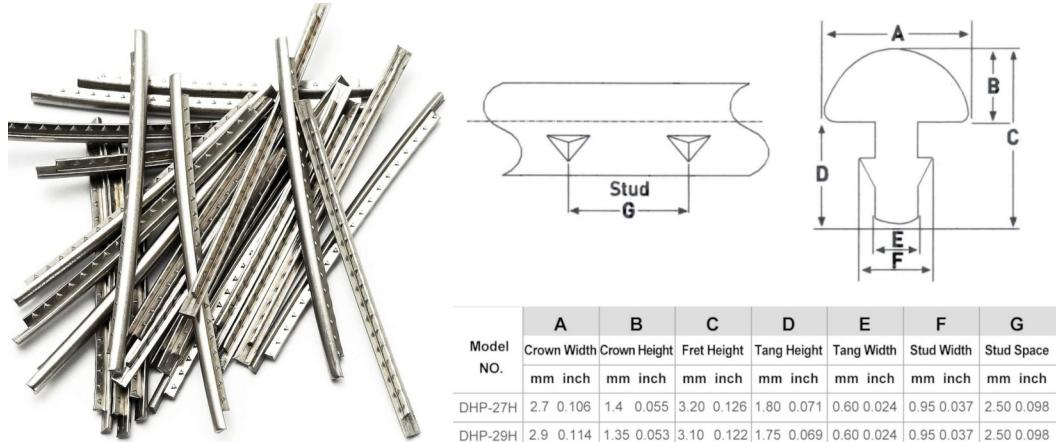
Fonte: Adaptado de Pixabay (2017) e Wikimedia (2010)

2.1.2.4 Trastes (*Frets*)

Os trastes são os componentes, geralmente metálicos, em formato de T que

ficam distribuídos ao longo do braço perpendicularmente a este e às cordas. A função do traste é, quando acionado, alterar a frequência natural da corda para uma frequência maior, isto é, alterar a nota da corda que está sendo tocada. Essa alteração na frequência acontece, pois quando o traste é acionado há uma redução no comprimento da corda e visto que a frequência de vibração da corda é função do comprimento, haverá alteração da mesma. Há, também, uma alteração na tensão da corda que juntamente com o comprimento influencia na frequência de vibração. A Figura 10 mostra o componente e suas especificações (ZOLLNER, 2019).

Figura 10 - Trastes não instalados no braço da guitarra e especificações de dois modelos



Fonte: Ubuy (2021)

As guitarras elétricas, geralmente, têm de 21 a 24 trastes que são posicionados ao longo da escala - uma tira de madeira sobre o braço - seguindo um método de cálculo da distância entre trastes. Um dos métodos mais comuns é a regra dos 18, regra na qual se tem uma constante no valor de 17,82 que deve dividir o comprimento da corda - distância da pestana até a ponte - o resultado é a distância do primeiro traste em relação à pestana, no passo seguinte deve-se dividir pela constante a distância entre o primeiro traste e a ponte, o novo valor será a distância do segundo traste para o primeiro e é menor que o primeiro valor calculado. Seguindo essa lógica pode-se expressar a regra pela Equação 1, na qual D_n é a distância do traste n até a pestana, e L é o comprimento da corda (DAGANI, 2017; ZOLLNER, 2019).

$$D_n = \frac{L - D_{n-1}}{17.817} + D_{n-1} \quad (1)$$

2.1.2.5 Tirante ou tensor (*Truss rod*)

O tensor é um dispositivo estrutural posicionado internamente ao braço do instrumento, se trata de uma haste metálica ou um conjunto que tem como função evitar a possibilidade de torção no braço da guitarra (KOCH, 2001). Há tensores de guitarras que são passíveis de regulagem, por meio de um parafuso consegue-se fazer uma contra força que irá se opor à força da corda no braço, assim, controlando a curvatura do braço da guitarra (ZOLLNER, 2019).

2.1.2.6 Braço (*Neck*)

O braço da guitarra é o elemento estrutural que está ligado à mão e ao corpo da guitarra é relativamente menos espesso que o corpo e é maciço. Apresenta um rasgo longitudinal, no qual será colocado o tensor para auxiliar na estabilidade estrutural do conjunto que deve aguentar cargas nos valores de 700N a 850N. É geralmente feito de madeira e tem como funções principais acomodar a escala do instrumento, na qual será colocada os trastes e, como dito, acomodar as tensões geradas pelas cordas (ZOLLNER, 2019).

Há três meios de ligação do braço da guitarra como o corpo: inteiriça, colada ou parafusada. A Figura 11 apresenta esses três meios de ligação.

Figura 11 - Os três diferentes meios de ligação entre o braço e o corpo



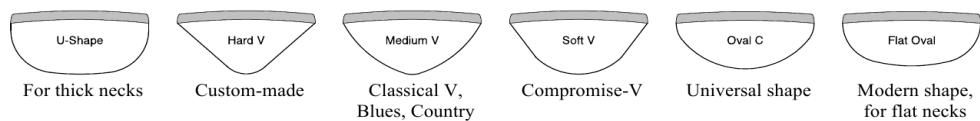
Fonte: Denyer (1992)

A ligação inteiriça - terceira representação na Figura 11 - é aquela na qual o corpo - ou grande parte dele - e o braço são uma peça só, ou seja, partindo da matéria prima bruta desbasta-se até chegar em uma peça inteira formando braço e corpo; a ligação colada, como mostrado na Figura 11, é aquela na qual um encaixe é desenhado no braço e no corpo, de modo que, quando combinados, a cola une os dois componentes de forma permanente e mantenha a rigidez estrutural; o tipo de ligação usando parafusos é aquele no qual o braço da guitarra e o corpo são conectados por meio de parafusos. As ligações mais comuns comercialmente são as

coladas e parafusadas, provavelmente por conta da perda de material que se tem na construção do braço e corpo em uma peça só. Um diferencial dos braços parafusados frente aos outros dois é que na ocorrência de fratura de um braço do instrumento: aqueles que são parafusados permitem o intercâmbio com maior facilidade. Há, também, discussões acerca da qualidade e influência de cada tipo de conexão na qualidade sonora do instrumento: existem argumentos de que os braços colados e inteiros dão mais *sustain* (o som reverbera por mais tempo) do que os braços parafusados, mas essas discussões são ainda inconclusivas. No experimento de Paté *et al.* (2012), por exemplo, guitarristas profissionais tocaram três guitarras das quais a única diferença era o tipo de ligação entre o braço e o corpo e respondiam questionários sobre a qualidade das guitarras: o resultado foi inconclusivo por não conseguir definir qual tipo de ligação era melhor. Por fim, uma coisa é certa, a conexão entre o braço e o corpo deve ser estável mecanicamente e deve receber atenção redobrada uma vez que o corpo e o braço são estimulados a vibrar pela ponte e pela pestana, respectivamente, e a interface entre eles deve dissipar o mínimo possível de energia (DENYER, 1992; ZOLLNER, 2019).

Quanto aos formatos do braço, existem diferentes variações, alguns deles estão mostrados na Figura 12. Alguns modelos por conta do formato semelhante a letras são designados por elas, como o formato U, C, V e/ou D. A escolha do formato é pessoal e subjetiva, depende de quanto bem e confortável se sinta bem a pessoa que segura um determinado braço (ZOLLNER, 2019).

Figura 12 - Diferentes formatos para o braço da guitarra



Fonte: Zollner (2019)

Por fim, quando se fala de material para o braço da guitarra, há alguns materiais bem definidos que são usados por grandes produtores de guitarras: a Fender, por exemplo, tradicionalmente constrói os braços de suas guitarras em *maple* (acer). Já a Gibson tradicionalmente usa mogno para os braços das suas

guitarras, mas além dessas duas há diversos produtores e produtos com uma grande variedade de material usado no braço, por exemplo, fibra de carbono, alumínio, madeira de nogueira e outras. Doménech-Ballester, Ibáñez-Arnal e Sánchez-López (2019), por exemplo, estudam as propriedades de um Epóxi Reforçado com Fibra de Carbono (ERFC) - *Carbon Fiber Reinforced Epoxy (CFRE)* - para aplicações em instrumentos musicais. Já Trombini e Vanzela (2014) construíram uma guitarra com madeiras nacionais utilizando Braúna para a escala e o braço foi feito com madeira de Pau-pereira (ZOLLNER, 2019).

2.1.2.7 Corpo (Body)

O corpo da guitarra pode variar de totalmente sólido a aqueles que possuem caixa acústica. A Figura 13 apresenta em um corte transversal os 4 tipos básicos dos possíveis corpos de uma guitarra: acústico, semiacústico, semissólido e sólido.

Figura 13 - Os quatro tipos básicos de corpo de uma guitarra



Fig. 7.123: The four basic types; acoustic, semi-acoustic, semi-solid, and solid-body guitar.

Fonte: Zollner (2019)

Uma vez que o escopo do trabalho está limitado às guitarras de corpos sólidos e o comportamento das guitarras de corpos não sólidos difere daquelas, os três outros tipos possíveis de corpos não são abordados nesta subseção.

O corpo da guitarra é o elemento estrutural no qual estão fixados os captadores, a ponte, os potenciômetros e o braço, e pode ser construído com uma chapa grossa e sólida de madeira ou por meio de madeiras laminadas coladas. Os tipos mais comuns de madeira usadas para o corpo da guitarra são do tipo madeira de lei (*hardwood*) que entre elas encontra-se o mogno, nogueira, *fraxinus (ash)*, *alnus (alder)* e *maple*. A madeira constituinte do corpo deve ser escolhida com atenção pois é uma variável bastante importante, vide a sua influência nas propriedades acústicas dos instrumentos, como mostrado recentemente nos experimentos feitos por Ray, Kaljun e Straže (2021), mas assim como para o braço

há a possibilidade de se usar materiais diferentes de madeira para a construção do corpo (DENYER, 1992).

Quanto ao formato do corpo, há diversos modelos consagrados e uma infinidade de *designs* construídos e como disse Denyer (1992) "... a forma do corpo da guitarra é limitada apenas pela praticidade e pela imaginação do desenhista." a Figura 14 apresenta alguns dos modelos do corpo da guitarra.

Figura 14 - Diferentes modelos de corpo de guitarra



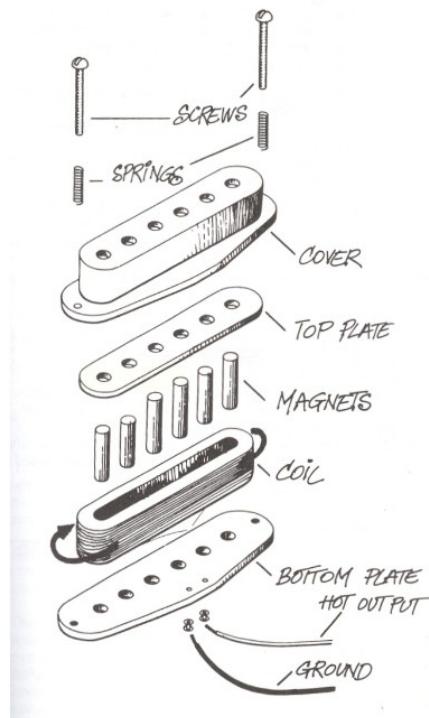
Fonte: Guitar Gear Fender (2021)

2.1.2.8 Captadores (*Pickups*)

Os captadores são dispositivos eletrônicos com a função de captar a vibração mecânica das cordas e transformá-la em um sinal elétrico que posteriormente será amplificado. Essa transformação de energia mecânica para energia elétrica se dá, nas guitarras elétricas de corpo sólido, a partir de captadores magnéticos cujo princípio de funcionamento está baseado no fenômeno de indução eletromagnética. A Figura 15 apresenta um captador magnético *single coil* em vista explodida, na qual se nota a simplicidade deste componente que, excluindo-se os componentes estruturais, é formado por um ímã permanente e uma bobina, além dos dois fios para transmitir o impulso elétrico. Uma vez que a corda é de um material apropriado para interagir com um campo magnético, o ímã do captador irá magnetizar a corda acima dele e, quando esta é tocada, em razão da vibração

mecânica da corda acima do captador, ocorrerá uma variação no campo magnético, é induzida então, em consequência, uma diferença de potencial elétrico entre os polos da bobina, isto é, um sinal elétrico é produzido que posteriormente será tratado e amplificado (ZOLLNER, 2019).

Figura 15 - Captador magnético em vista explodida



Fonte: Zollner (2019)

Uma variação do modelo mais simples do captador foi desenvolvida a fim de evitar as interferências que ocorrem neste componente: o captador Humbucker é constituído de duas bobinas conectadas em série e defasadas uma da outra com os pólos dos ímãs invertidos, de modo que, o problema de interferência que ocorre nos captadores *single coil* seja sanado (KOCH, 2001).

2.1.2.9 Potenciômetros (*Knobs*)

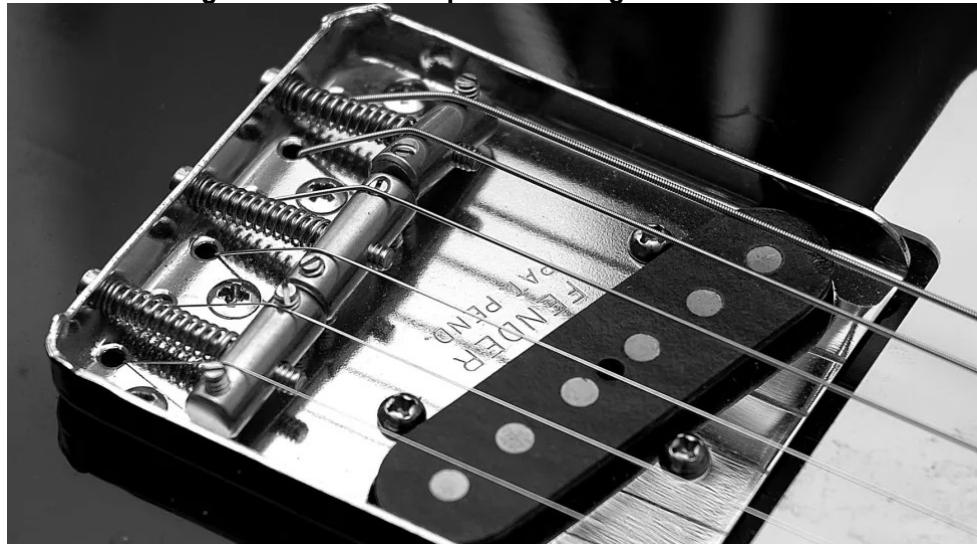
Os potenciômetros nas guitarras elétricas são componentes do circuito que permitem o controle do volume e do tom. Potenciômetros são resistores reguláveis, logo, por meio da manipulação desses componentes, se consegue mudar as

propriedades de resistência do circuito elétrico da guitarra com o objetivo de ajustar o volume e/ou o tom. Os valores de resistência de trabalho dos potenciômetros de guitarras variam, geralmente, de $250\ \Omega$ a $500\ k\Omega$ (ZOLLNER, 2019).

2.1.2.10 Ponte (*Bridge*)

A ponte é um componente da guitarra elétrica que é fixada ao corpo desta. Sua função, assim como a função pestana, é apoiar as cordas e, ademais, o comprimento da corda é dado pela distância entre a ponte e a pestana. É função da ponte, também, definir a altura das cordas, inclusive as alturas individuais de cada corda. Pontes antigas e mais simples constituíam-se de uma placa de cromo às quais possuem dois tipos de ajuste: parafusos associados com molas que controlam as tensões de cada corda; e parafusos para ajuste da altura individual de cada corda (KOCH, 2001). A Figura 16 apresenta uma ponte simples.

Figura 16 - Ponte simples de uma guitarra elétrica



Fonte: Guitar Player (2021)

Pontes modernas, e mais sofisticadas, são de material fundido e certa complexidade quando comparadas às mais simples, permitem ajustes mais finos no posicionamento da corda e podem ter um número consideravelmente maior de componentes (KOCH, 2001). A Figura 17 apresenta uma ponte da marca Floyd Rose.

Figura 17 - Ponte Floyd Rose



Fonte: Guitar Guitar (2021)

A Figura 17, apresenta, a direita da ponte, uma haste projetada para fora do componente, esse conjunto - haste e ponte - configuram um outro tipo de ponte, chamada de *tremolo* ou *vibrato*. Os *tremolos* são dispositivos mecânicos que permitem que o guitarrista modifique, momentaneamente, a tensão nas cordas manipulando a haste deste dispositivo, alterando, portanto, o tom das cordas. Esse dispositivo é montado de tal forma que movimentos na direção das cordas são permitidos, tanto no sentido de aumentar, quanto no sentido de aliviar a tensão nas cordas. Para que esse movimento seja possível, a montagem é feita de forma diferente das pontes mais simples, ao invés de ter uma placa metálica parafusada completamente no corpo esse dispositivo tem parte do corpo suspensa sobre um rasgo no corpo da guitarra que dá espaço para seu movimento típico. A Figura 18 apresenta uma patente da Fender de 1956, na qual é possível ver no segundo desenho o detalhe de montagem desse tipo de ponte. A posição da parte da ponte que fica suspensa é ajustada por meio de molas (item 28 da Figura 18), e quando o guitarrista aciona a haste, a mola é deformada, para em seguida, quando o guitarrista liberar a haste, a mola retorna para o comprimento inicial e as cordas das guitarras para a suas tensões, ou afinações, iniciais (KOCH, 2001).

Figura 18 - Patente da Fender do dispositivo mecânico tremolo

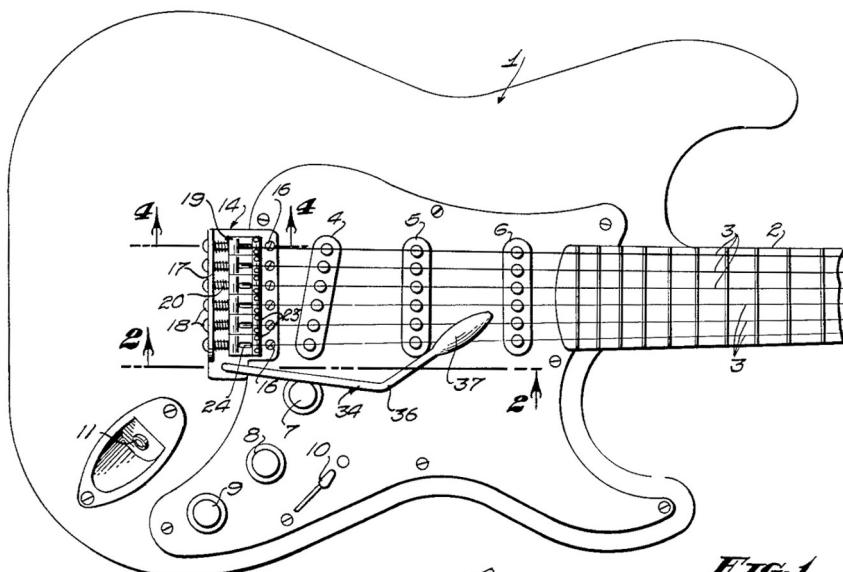
April 10, 1956

C. L. FENDER

2,741,146

TREMOLO DEVICE FOR STRINGED INSTRUMENTS

Filed Aug. 30, 1954



2.1.2.11 Cordas (Strings)

As cordas da guitarra elétrica são os componentes que estão ligados entre as tarraxas e a ponte. No entanto, seu comprimento útil, isto é, o comprimento vibratório da corda é dado pela distância entre a pestana e o ponto de apoio da corda na ponte, sendo no total 6 cordas existentes nas guitarras elétricas convencionais e cada uma dessas cordas tem o diâmetro diferente. Os diâmetros - ou espessuras - das cordas são, usualmente, medidos em polegadas e para se definir os diâmetros de um conjunto de cordas basta saber o diâmetro da corda menos espessa - diâmetros comuns são 0,008 pol, 0,009 pol, 0,010 pol, 0,011 pol etc. A função das cordas é produzir som por meio da vibração. Na guitarra elétrica esse fenômeno ocorre por meio da vibração mecânica de uma corda metálica magnetizável que interagem e altera o campo magnético do ímã permanente do captador e, consequentemente, induz sinal elétrico na bobina do captador que posteriormente é tratado e amplificado, gerando o som característico da guitarra (KOCH, 2001; ZOLLNER, 2019).

Como mencionado, as cordas das guitarras elétricas devem ser constituídas de materiais ferromagnéticos para interagir com o campo magnético do captador, mas outro ponto relevante na fabricação da corda é que esta, também, deve resistir à força de tração que será submetida. Variando em um intervalo entre 50 N a 140 N, a tensão nas cordas menos espessas pode chegar a valores de 2000 MPa. Portanto, ligas especiais para resistir tanto as tensões atuantes como resistir à corrosão devem ser utilizadas para as cordas para a guitarra (ZOLLNER, 2019).

Uma vez que as cordas têm os mesmos comprimentos e tensões de afinação próximas, a diferenciação do tom da corda é dada pela diferença na distribuição de massa nas diferentes cordas, isto é, na diferença de densidades das cordas. Observa-se que as cordas menos espessas são formadas por fios de ligas de aço de diâmetros crescentes, ao passo que as cordas mais espessas constituem-se de arranjos enrolados tendo um núcleo de liga de aço envolvido por fio ou fios de níquel, a Figura 19 apresenta as diferentes configurações para enrolamentos de cordas metálicas de instrumentos (KOCH, 2001).

Figura 19 - Tipos de enrolamentos de cordas metálicas



Fonte: Adapado de E-Home Recording Studio (2015) e Quora (2016)

2.2 Madeiras para construção de uma guitarra

Visando resumir as informações sobre os materiais utilizados em uma guitarra elétrica de corpo sólido, o Quadro 1 foi elaborado para alocar os detalhes pesquisados para esta seção e as informações já detalhadas em seções anteriores. No Quadro 1 está elencado os materiais utilizados para diversos componentes da guitarra.

Quadro 1 - Materiais usados na construção de guitarras comerciais nacionais e internacionais

Marca	Modelo	Material do corpo	Material do braço	Material da pestana
Gibson	Les Paul Supreme	Acer	Mogno	Corian
Gibson	Les Paul Standard 2019	Acer	Mogno	Tektoid
Gibson	Firebird Zero	Populus	Acer	Tektoid
Gibson	SG Dark 7	Mogno	Mogno	Tektoid
Gibson	Explorer 2016 T	Mogno	Mogno	Tektoid
Gibson	Flying V Faded 2016	Mogno	Mogno	Tektoid

	Limited			
Fender	Jimi Hendrix Stratocaster®	Alnus	Acer	Osso sintético
Fender	Road Worn® '60s Stratocaster®	Alnus	Acer	Osso sintético
Fender	Paranormal Tornado™	Populus	Acer	Osso sintético
Fender	Noventa Telecaster®	Alnus	Acer	Osso sintético
Fender	Kurt Cobain Jaguar®	Alnus	Acer	Osso sintético
Fender	Jim Root Jazznaster®	Mogno	Acer	Osso sintético
Tagima	TW-1	Populus	Acer	-
Tagima	-	Alnus	Acer	Osso
Tagima	-	Tília americana	Acer	Plástico
Tagima	-	Mogno	Acer	-

Fonte: Autoria própria (2022)

A partir do Quadro 1 pode-se elencar 5 tipos de madeiras diferentes usadas industrialmente: acer, populus, mogno, alnus e tília americana.

Fernandes (2004), buscando a diminuição no custo de produção de guitarras elétricas, avaliou e selecionou espécies nativas de madeiras que, potencialmente, podem ser utilizadas para construção de uma guitarra, diminuindo, então, os custos com importação de madeiras. O Quadro 2 apresenta as 5 primeiras espécies nativas sugeridas pelo autor para o corpo e para o braço da guitarra.

Quadro 2 - Materiais usados na construção de guitarras comerciais nacionais e internacionais

Corpo	Braço
Açoita-cavalo	Açoita-cavalo
Cedro	Cedro
Cerejeira	Cerejeira
Embira preta	Embira preta
Freijó	Freijó

Fonte: Adaptado de Fernandes (2004).

A Tabela 1 apresenta as propriedades mecânicas das espécies de madeira de possível uso na fabricação de uma guitarra.

Tabela 1 - Propriedades dos materiais pesquisados

Espécie	Nome científico	Densidade [kg/m ³]	E _x [MPa]
Acer	<i>Acer saccharinum</i>	668,5	12600
Açoita-cavalo	<i>Lueheopsis duckeana</i> Burret	710,0	14220
Alnus	<i>Alnus rubra</i>	493,0	9500
Cedro	<i>Cedrela odorata</i>	490,0	9710
Cerejeira	<i>Amburana acreana</i>	520,0	8630
Embira preta	<i>Onychopetalum amazonicum</i>	660,0	15000
Freijó	<i>Cordia sp.</i>	490,0	11870
Mogno	<i>Khaya</i>	504,0	10300
Populus	<i>Populus deltoids</i>	452,5	8100
Tília americana	<i>Tilia americana</i>	375,3	10100

Nota: Dados de FOREST PRODUCTS LABORATORY (US) (2021) e SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO (20)

Fonte: Autoria própria (2022)

2.3 Análise Modal

2.3.1 Análise modal

Análise modal é o estudo das propriedades dinâmicas sob excitação por vibrações (BAQERSAD, 2014). A análise pode ser feita de forma experimental ou numérica, e retrata os modos de vibrar de uma estrutura ou sistema oscilatório. Neste trabalho são retratados os modos de vibrar de uma guitarra elétrica de corpo sólido a partir de uma análise modal numérica, realizada com auxílio do método de elementos finitos, de forma computacional.

O modelo computacional da guitarra foi analisado para diferentes frequências, e a resposta do modelo foi convertida em um gráfico “resposta em frequência”. A análise modal é muito utilizada no mercado de trabalho devido a sua utilidade em prever possíveis ressonâncias.

Trocas de pontos rígidos, pontos de amortecimento, ligações e fixações diferentes entre componentes da guitarra, além da distribuição de massa, são variáveis que podem alterar grandemente os resultados da análise modal. Como é desejado, somente, verificar a influência do material na resposta modal, o modelo de

guitarra, assim como a maioria das condições de contorno, são iguais entre as análises, alterando somente o material do corpo e do braço da guitarra.

2.3.2 Sistemas com um grau de liberdade

Considerando um sistema livre para vibração, ou seja, aquele que oscila sob uma única excitação inicial (sem perturbações a mais), como um pêndulo simples. A amplitude do movimento se mantém constante ao longo do tempo, esse caso é chamado sistema não amortecido (RAO, 2018).

Tem-se um sistema com um único grau de liberdade, quando consegue-se expressar todos os movimentos oscilatórios com uma única coordenada. Muitos sistemas oscilatórios mecânicos reais podem ser simplificados, ou até, idealizados como sistema de um grau de liberdade. Nesse caso, é considerado idealizado porque na prática não existem pontos de massa, mas a massa é distribuída ao longo de todo o sistema, assim como a elasticidade. No entanto, tal simplificação pode ser útil para diversos sistemas oscilatórios. (RAO, 2018).

Os sistemas mais simples que podem ser representados são de um grau de liberdade, para obter a equação de movimento é necessário utilizar a segunda lei de Newton. Na Equação 2, F é força, X a coordenada que descreve o movimento, t: tempo.

$$\bar{F}(t) = \frac{d}{dt} \left(m \frac{d\bar{x}(t)}{dt} \right) \quad (2)$$

Se, na Equação 2, a massa for constante ao longo do tempo, tem-se a Equação 3:

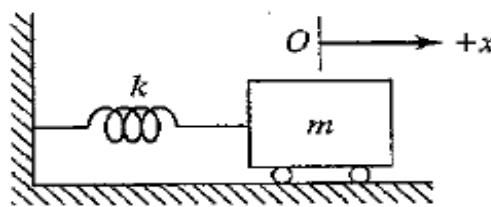
$$\bar{F}(t) = m \frac{d^2 \bar{x}(t)}{dt^2} \quad (3)$$

Agora, para movimento rotacional, a Equação 4 descreve o fenômeno:

$$\bar{M}(t) = J \frac{d^2 \bar{\theta}(t)}{dt^2} \quad (4)$$

O sistema mais simples que pode ser representado como sistema de um grau de liberdade é o massa-mola, representado na Figura 20:

Figura 20 - Sistema massa-mola de uma grau de liberdade



Fonte: Rao (2008)

Considerando que o elemento de massa está sendo apoiado por roletes, sem atrito e que não há outras formas de amortecimento, aplicando a equação de movimento à massa m , tem-se a Equação 5:

$$F(t) = -kx = m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (5)$$

Pode-se, assim, descrever o fenômeno oscilatório do sistema massa-mola com somente uma coordenada, como explicado anteriormente.

2.3.3 Sistemas com dois graus de liberdade

Quando se necessita de duas coordenadas, totalmente independentes, para descrever o movimento oscilatório de um sistema, tem-se um sistema com dois graus de liberdade (RAO, 2018).

Há várias possibilidades de representar sistemas com dois graus de liberdade: a mais simples é de um sistema com massa pontual podendo se mover em um plano, como por exemplo um ponto de massa se deslocando no plano XY.

Desta forma, pode-se expressar o movimento do sistema em função de duas variáveis (x e y). O número de graus de liberdade do sistema se dá pelos tipos de movimentos para cada massa e para o número de massas no sistema (RAO, 2018).

Para descrever o sistema com dois graus de liberdade utilizam-se duas equações de movimento, sendo que cada equação será associada a um grau de liberdade do sistema, e que estarão expostas como equações diferenciais acopladas. Como cada equação descreve uma solução harmônica para uma coordenada, um sistema com dois graus de liberdade apresenta duas formas de vibrar, e essas duas são equivalentes às frequências naturais do sistema. Esta regra também é aplicada para múltiplos graus de liberdade, ou seja, múltiplos graus de liberdade estão associados a múltiplos modos de vibrar (frequências naturais) (RAO, 2018).

Aplicando uma excitação oscilatória qualquer no sistema, a vibração livre de resposta do sistema será o resultado da sobreposição dos modos de vibrar dos pontos de massa. Entretanto, se a excitação externa for uma força harmônica, ocorre ressonância. Ressonância é o nome dado ao efeito em que a frequência excitadora corresponde com a frequência natural do sistema, resultando em amplitudes de movimento máximas nas coordenadas avaliadas (RAO, 2018).

A equação do movimento para uma vibração forçada tem suas equações descritas completamente pelas coordenadas $x_1(t)$ e $x_2(t)$. As duas coordenadas descrevem a posição das massas m_1 e m_2 em todos os tempos. É definido também que as forças externas $F_1(t)$ e $F_2(t)$ atuam, respectivamente, nas respectivas massas m_1 e m_2 . Aplicando a segunda lei de Newton separadamente nas duas massas resultam nas Equação 6 e Equação 7:

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + (c_1 + c_2) \frac{dx_1}{dt} - c_2 \frac{dx_2}{dt} + (k_1 + k_2)x_1 - k_2 x_2 = F_1 \quad (6)$$

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} - c_2 \frac{dx_1}{dt} + (c_2 + c_3) \frac{dx_2}{dt} - k_2 x_1 + (k_2 + k_3)x_2 = F_2 \quad (7)$$

Como é possível observar nas Equação 6 e Equação 7 desenvolvidas, tem termos que associam as duas equações e, portanto, pode-se prever que o

movimento de uma das massas influencia o movimento da outra.

Importante ressaltar que é possível escrever a Equação 6 e Equação 7 de forma matricial. A forma matricial é extremamente importante para análises computacionais, principalmente para sistemas contínuos de oscilação. Reescrevendo a Equação 6 e Equação 7 em matriz tem-se a Equação 8:

$$\begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix} \frac{d^2 \vec{x}}{dt^2} + \begin{pmatrix} c_1+c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2+c_3 \end{pmatrix} \frac{d \vec{x}}{dt} + \begin{pmatrix} k_1+k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2+k_3 \end{pmatrix} \vec{x}(t) = \vec{F}(t) \quad (8)$$

As quais: $[m]$ é a matriz de massa, $[c]$ é a matriz de amortecimento e $[k]$ a matriz de rigidez.

Desta forma, pode-se descrever os movimentos para sistemas com dois graus de liberdade.

2.3.4 Sistemas contínuos

Sistemas discretos são aqueles que podem ser definidos com elementos pontuais de massa, amortecedores e elasticidade presente no mesmo sistema. No caso da guitarra, como essas propriedades funcionam ao longo de todos os componentes, não é possível simplificar e identificar pontos específicos de massa, amortecedores e elasticidades. Esse tipo de sistema é denominado como contínuo ou sistema distribuído, e nesse tipo de sistema, as propriedades de massa, elasticidade e amortecimento ocorrem de forma contínua, sendo impossível identificar pontos discretos específicos que possam ser simplificados (RAO, 2018).

As equações que governam sistemas contínuos são equações diferenciais parciais, diferentes em relação aos sistemas discretos, no quais as equações são diferenciais ordinárias (RAO, 2018). As frequências naturais são sempre infinitas para sistemas contínuos, para estes também é necessário aplicação de condições de contorno para encontrá-las.

Para vibrações transversais (principal em um corda de guitarra) têm-se a Equação 9 para equacionamento do movimento:

$$(P + dP) \sin(\theta + d\theta) + f dx - P \sin \theta = \rho dx \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (9)$$

P é tensão

ρ é massa por unidade de comprimento

θ ângulo que a corda defletida faz em relação ao eixo x

x é a direção longitudinal da corda

w(x,t) é o deslocamento transversal

f(x,t) é a força transversal por unidade de comprimento

t é tempo

Para um comprimento elementar “dx” tem-se como resultados as Equação 10 e Equação 11:

$$dP = \frac{\partial P}{\partial x} dx \quad (10)$$

$$\sin \theta \approx \tan \theta = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (11)$$

Para poder resolver a equação do momento se torna necessário aplicação de duas condições iniciais e duas condições de contorno, isso para determinar a solução de w(x,t) (RAO, 2018). As condições geralmente aplicadas são: a deflexão e a velocidade da corda devem ser conhecidas no tempo zero ($t = 0$). Outra condição é, quando $x = 0$, o deslocamento w também deve ser zero, logo tem-se a Equação 12:

$$w(x=0, t)=0, t \geq 0 \quad (12)$$

Outra condição de contorno é que a extremidade de fixação da corda não suporta a força transversal, resultando Equação 13:

$$P(x) \frac{\partial w(x,t)}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

Quando a extremidade inicial da corda, de posição $x = 0$, for livre e P constante, a Equação 13 torna-se a Equação 14:

$$\frac{\partial w(0,t)}{\partial x} = 0, t \geq 0 \quad (14)$$

A última condição mais comum é quando a extremidade final da corda, de posição $x = l$, for elasticamente restringida, resultando na Equação 15:

$$P(x) \frac{\partial w(x,t)}{\partial x} = -kw(x,t), t \geq 0 \quad (15)$$

Podendo então, descrever o fenômeno oscilatório de um movimento transversal de uma corda contínua.

2.4 Simulação de guitarra ou violão usando elementos finitos

Para a simulação da guitarra é preciso entender como cada um dos componentes do instrumento pode ser representado no modelo matemático. Neste ponto, busca-se que a simulação demonstre um certo grau de precisão sem comprometer a viabilidade de tempo e computacional do cálculo. Como o próprio método numérico é uma aproximação do método analítico, simplificações e condições de contorno que garantam uma melhor aplicação computacional e que, principalmente, não tirem a precisão de maneira significativa, devem ser utilizadas (REDDY, 2019).

2.4.1 Nós e estrutura dos elementos

Para uma análise por elementos finitos, é preciso representar os componentes físicos com elementos que são ligados via nós. Os elementos são uma matriz de rigidezes que pode funcionar de diferentes formas, dependendo do elemento escolhido. As rigidezes que são de nó para nó (sendo também transversal dentro do elemento) interligam o modelo matemático e devido a essa ligação, tem-se dependência entre todas as partes da representação matemática (REDDY, 2019).

O aumento do número de nó geralmente aumenta a precisão do cálculo. Entretanto, também aumenta significantemente o tempo computacional necessário para a realização da análise. A equipe do trabalho pretendeu refinar a análise ao ponto satisfatório, no qual um refino maior não gere grandes diferenças nos resultados.

Os elementos podem ter diferentes tipos de formatos e número de nós. A escolha deles depende da geometria a ser analisada e da propriedade a ser analisada. Em geometrias que apresentam curvas acentuadas, furos ou até vértices, um refino de grão é necessário, a escolha do elemento deve levar em consideração esses pontos. Neste trabalho tem-se a opção de escolher elementos tetraédricos, pentaédricos e hexaédricos (em elementos 3D) (REDDY, 2019).

2.4.2 Tipos de elementos para análise

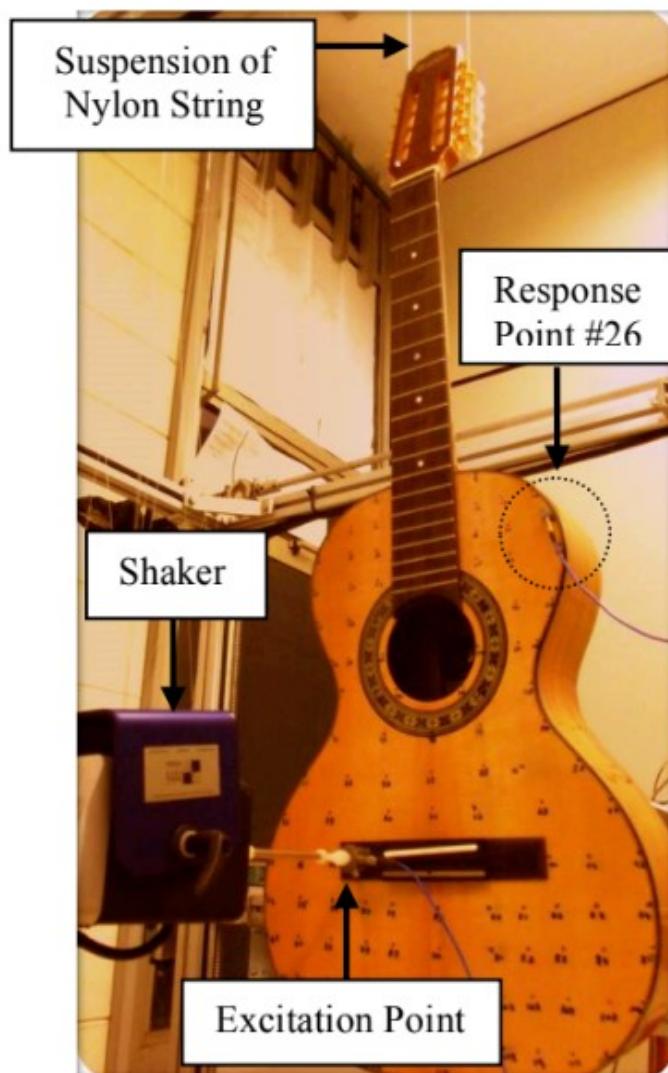
O modelo numérico é diferente em cada um dos componentes, cada característica do modelo pode mudar de uma peça para outra. A análise pode ser feita dependendo do tipo de elemento que será apresentado. Neste trabalho foi feita uma análise de vibração modal 3D, sem elementos 2D.

Como, para uma análise mais fiel, busca-se que todos os modos de vibração da guitarra sejam identificados, componentes da guitarra com mais massa e influência nos modos de vibração devem ser priorizados. A equipe de projeto optou utilizar para o modelamento matemático da guitarra elementos 3D, já que os

elementos 3D permitem expressar massa em todos os sentidos de análise. Durante o processo de modelagem, os autores não viram necessidade de modelamento de componentes da guitarra em elementos 2D. Elementos 3D, simplificações e condição de contorno foram o suficiente para a representação total do sistema oscilatório "guitarra de corpo sólido".

Estudos experimentais utilizam acelerômetros espalhados no instrumento para conferência da vibração do instrumento (PAIVA; SANTOS, 2014). Nestes testes que utilizam acelerômetros para geração de dados e os instrumentos de medição são espalhados ao longo de um plano do instrumento, ignorando a largura do mesmo. Desta forma a análise é simplificada em alguns sentidos. A Figura 21 apresenta um aparato experimental em laboratório.

Figura 21 - Aparato experimental para análise física



Fonte: Paiva e Santos (2014)

2.4.3 Malha

Com a escolha de elemento feita para cada componente do sistema estudado, a geração da malha torna-se necessária. A escolha da malha é feita de forma dinâmica com a análise, sendo necessário uma análise da própria malha, após a confecção da primeira. Encontrar uma malha para a qual a precisão seja boa o suficiente, sem que a velocidade computacional seja perdida, é importante para a análise modal com elementos finitos. Erros de malha devem ser evitados ao máximo, para isso, foi feito um levantamento dos tipos de modelo disponíveis, analisando os defeitos criados por cada um e escolhendo aquele que gere a menor distorção para a propriedade que está sendo analisada. Erros de malha, ainda assim, podem ocorrer. Quando impossível evitar erros, os mesmos foram analisados e, quando confirmados a irrelevância para análise, foram desprezados (FLEISCHER, 2005).

A malha analisada levou em consideração a possibilidade de refino posterior, ou até uma diminuição do número de nós (não houve grandes distoções com a alteração do número de nós). Em visita a uma oficina de luteria foi realizada uma entrevista com um Luthier (Willian - Harpia Custom Guitars). Na entrevista foi expressado que uma pequena diferença de massa no corpo da guitarra pode resultar em uma diferença acústica. Para análises modais com elementos finitos a distribuição de massa deve ser significante somente nos graus de liberdades expressos.

2.4.4 Condições de contorno e restrições do modelo

Além dos elementos escolhidos para representar cada um dos componentes matematicamente, as amarrações e contatos feitos entre os elementos matemáticos

são de extrema importância para análise modal, já que interferem diretamente na vibração podendo amortecer e alterar o modo de vibração da guitarra. O contato entre braço, corpo, ponte e pestana foram elencados previamente pela equipe como os mais críticos para a análise. A escolha da guitarra física que representada tem todos os contatos estabelecidos e claros para uma melhor representação matemática. Para a conclusão do modelo, se mostrou necessário estabelecer algumas condições de contorno nos contatos. Sempre haverá pontos e/ou regiões nas quais a modelagem matemática é dificultada, como por exemplo a distribuição de cola desconhecida no contato, aperto dos parafusos, assimetrias não previstas em projeto, tolerâncias de fabricação etc. Todas essas pequenas modificações entre uma guitarra e outra foram definidas adotando premissas, com algumas sendo desprezadas.

Contatos como: ligação entre braço e corpo, parafusamento da ponte no corpo da guitarra, ligação entre pestana e braço da guitarra. Podem alterar significativamente os resultados. A análise considerou aplicação de simplificação nessas regiões de contato, devido a grande alternância de método de fixação entre os Luthieres. Como o objetivo é analisar somente a influência da madeira nos modos de vibração da guitarra, o cuidado deve ser maior nos pontos em que envolvem a madeira.

As condições de contorno são extremamente importantes para o cálculo realizado. Para o sistema ser possível de ser calculado, ele deve estar matematicamente possível, ou seja, todos os graus de liberdade devem estar interligados com algum tipo de restrição - entenda-se interligado como: restringido ele mesmo; ligado à alguma restrição via rigidez do elemento finito. Em leituras do sistema físico, alguns pontos da guitarra devem ser considerados como fixos. Essa consideração assume fixação totalmente rígida. Somente com essa consideração o cálculo já perde a representatividade fiel à física real, pois a rigidez absoluta é impossível (entretanto a validade do cálculo não é perdida).

Outras considerações como incitação da guitarra devido aos diferentes toques nas cordas de diferentes guitarristas podem ser ignorados. Todo guitarrista impõe uma forma diferente de toque nas cordas (ZOLLNER, 2019), visto que a vibração da corda não tem pouca influência na análise modal.

2.4.5 Análise computacional

Para análise computacional a equipe usou o *software* Ansys com licença fornecida pela UTFPR. O software é utilizado amplamente no mercado e possui mecanismos que foram utilizados para funções importantes deste trabalho.

3 METODOLOGIA

3.1 Modelo realizado

Para a realização do trabalho especificado se torna necessário a escolha de um modelo matemático que simule o comportamento de uma guitarra quanto à análise modal.

Deve ser considerado para o modelamento um estilo de guitarra comum e que represente bem a categoria do instrumento. O estilo proposto pelos autores para a realização da análise é um modelo clássico Stratocaster da Fender, exposto na Figura 22.

Figura 22 - 60 STRATOCASTER® NOS



Fonte: Fender (2021)

Além do desenho da guitarra, alguns outros estilos de modelo devem ser definidos. Para a escolha do modelamento do braço da guitarra deve levar em consideração estilos de guitarras que são usados comumente no mercado e que consigam expressar bem a escolha da madeira para a mesma. Como o modelo escolhido é uma guitarra de corpo sólido inteiramente de madeira, o tensor do braço da guitarra não foi modelado - apesar de ser um elemento comum em braços de guitarra, o tensor é de difícil modelamento e não contribui grandemente para verificação da escolha de material do corpo ou braço da guitarra.

Interfaces da corda com a guitarra também foram definidas no trabalho. Como é desejado examinar somente a influência da troca de material na resposta da frequência, a equipe estudou os modelos das duas extremidades da corda. A

primeira extremidade pode ter sua interface com a ponte, para qual tem-se a prisão da corda, e a segunda extremidade ainda deve ser definida entre as tarrachas e a pestana. A força aplicada no modelo, para representar as cordas, está dentro da faixa do total das forças exercidas pelas cordas, isto é, foi escolhido um força de 750 N (dentro do intervalo de 700 N e 850 N) (ZOLLNER, 2019).

A ligação do braço com o corpo da guitarra foi definido como inteiriço. Importante ressaltar que independente da escolha para o tipo de modelo de guitarra, a influência da madeira da guitarra ainda pode ser medida, mesmo que essa interface braço-corpo altere bastante o resultados de frequência entre as possíveis escolhas.

As propriedades dos materiais escolhidos, bem como quais materiais utilizados nas análises, foram selecionadas de forma com que consiga comparar os tipos de materiais diferentes de maneira isolada.

3.2 Condições de Contorno

Para a execução da análise alguns parâmetros iniciais e condições de contorno são necessários para deixar o modelo matematicamente possível, como explicado no tópico 2.3. Para conseguirmos adquirir as restrições necessárias, as condições de contorno devem restringir totalmente o sistema oscilatório.

Os autores optaram por escolher os dois pontos de interface da guitarra com a correia como restrição do modelo. A restrição foi escolhida nesses pontos, pois possibilitam o movimento oscilatório, quase total, do corpo e do braço da guitarra.

As forças da corda no instrumento devem ser levadas em consideração, como exposto anteriormente. Além da força de tensão, existe uma força de atrito que ocorre entre a pestana e a corda (função do ângulo entre o braço e a mão).

Cada interface entre os diferentes componentes da guitarra foi analisada pela equipe de projeto. Cada interface pode gerar um comportamento dinâmico diferente da guitarra. Entretanto, visando a comparação entre as diferentes madeira, premissas de escolha de modelo foram realizadas.

3.3 Criação de malha

Para a confecção da malha, o tipo de elemento que representa cada componente foi analisado. Elementos 3D e 2D foram comparados para cada elemento e a sua definição se deu de forma dinâmica com a análise. Elementos 3D geram a possibilidade de aplicação de massa em mais graus de liberdade, mas podem não se mostrar necessários, e caso não sejam, a escolha de elementos 2D foi feita para diminuir o tempo computacional. Para o corpo e braço, parte de maior massa da guitarra, os elementos iniciais a serem testados são 3D, para simular uma melhor distribuição de massa (FLEISCHER, 2005).

Com a escolha de elemento feita para cada parte do componente da guitarra, a geração da malha torna-se necessária. A escolha da malha é feita de forma dinâmica com a análise, sendo necessária uma análise da própria malha, após a confecção da primeira. Assim, o grupo realizou testes com outras malhas para verificar a acurácia do modelo matemático. Encontrar uma malha na qual a exatidão seja boa o suficiente, sem que a velocidade computacional seja perdida, se mostrou importante para a análise modal da guitarra.

Erros de malha devem ser evitados ao máximo: para isso, foi realizado um levantamento dos tipos de modelo disponíveis, vendo os defeitos criados por cada um e escolhendo aquele que gere a menor distorção para a propriedade que está sendo analisada. Erros de malha ainda assim podem ocorrer, quando impossível evitá-los os mesmos são analisados e possivelmente ignorados (caso for possível e coeso).

3.4 Análise modal auxiliada por computador

As configurações e *hardware* do computador utilizado tem função importante para a velocidade do cálculo utilizado, entretanto utilizando as simplificações corretas o cálculo foi bem sucedido.

Foi utilizado o módulo “Modal” do *software* Ansys para essa análise, e dele

foi extraído frequências conforme o gráfico de resposta da frequência. Esse gráfico demonstra a forma como a guitarra vibra em diferentes frequências de excitação. O gráfico é ponto chave para análise já que ele é o meio que permite comparar a influência do material nos harmônicos da guitarra, consequentemente em sua resposta acústica.

Com o gráfico de resposta em frequência pode-se utilizar a função de transferência do mesmo para poder fazer a mudança do gráfico no domínio do tempo. Com o gráfico de resposta no domínio do tempo, são comparados os diferentes materiais e verifica-se se há mudanças significativas.

4 DESENVOLVIMENTO

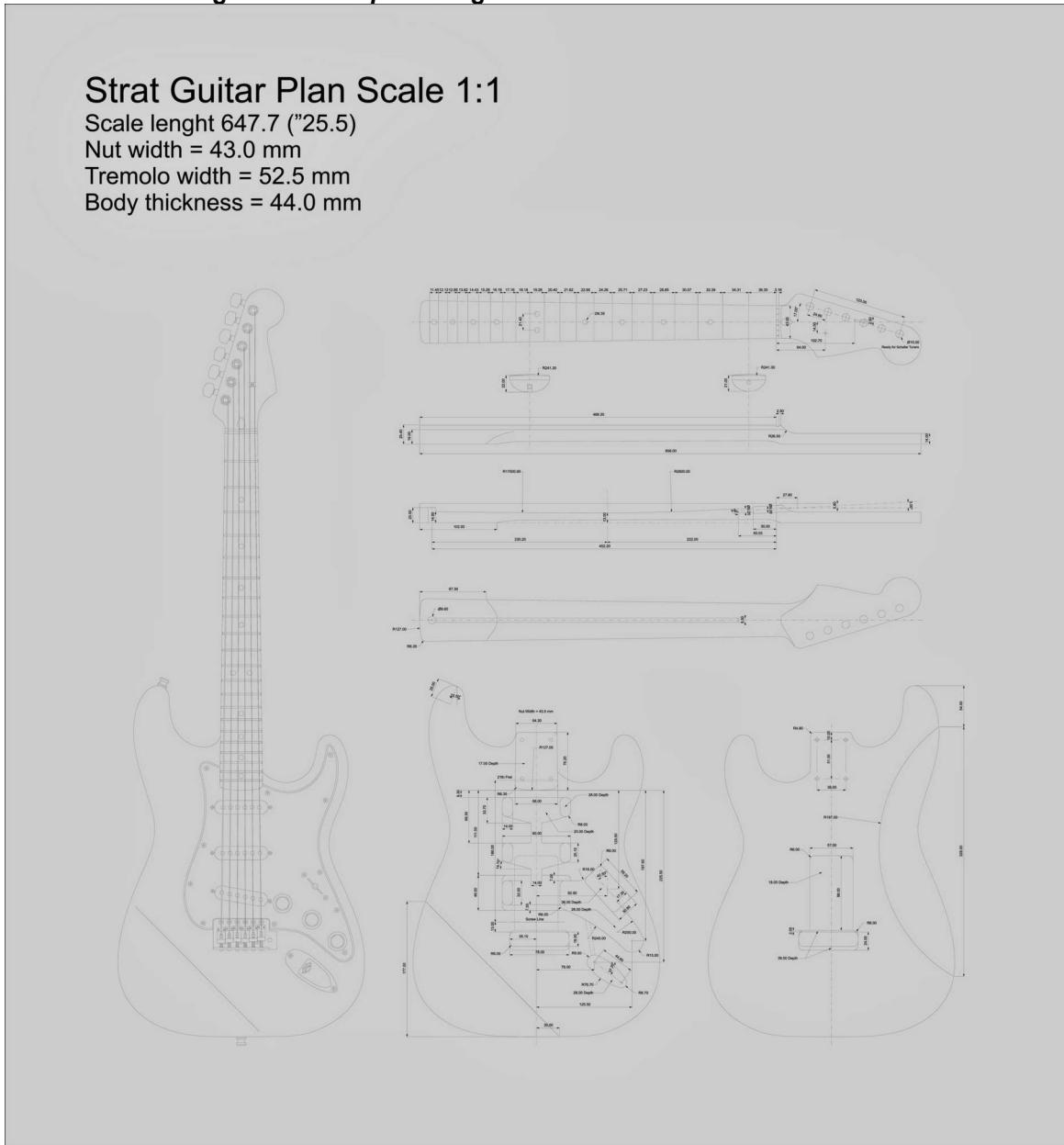
4.1 Confecção do modelo computacional

Para a realização de uma análise numérica, é necessária a criação de uma malha de elementos finitos que representa bem o objeto de estudo. A malha pode ser criada de várias formas, entre elas está na criação de um modelo primitivo computacional inicial, que serve de guia para um *software* terceiro criar a malha a partir dos contornos indicados do modelo computacional. A criação de malhas a partir de modelos computacionais é indicada em peças com contornos complexos, onde a elaboração da malha de forma manual se torna inviável, o modelo de uma guitarra é um bom exemplo disso. Com isso, a equipe de trabalho decidiu confeccionar um modelo computacional para importar em um *software* de criação de malha.

Na busca por um *software* para criação do modelo primitivo, a equipe decidiu utilizar dois *softwares* em conjunto: SolidWorks e o FreeCAD. A escolha dos dois *softwares* se deu porque, além dos dois *softwares* serem de uso e conhecimento da equipe de trabalho, a disponibilidade de uso da licença do SolidWorks cedido pela UTFPR e ao uso do FreeCAD irrestrito por ser um *software* livre.

A modelagem se iniciou no SolidWorks com o objetivo de criar uma réplica do modelo Stratocaster da Fender. O modelo criado no SolidWorks segue o projeto mostrado na Figura 23.

Figura 23 - Template da guitarra Stratocaster em escala 1:1



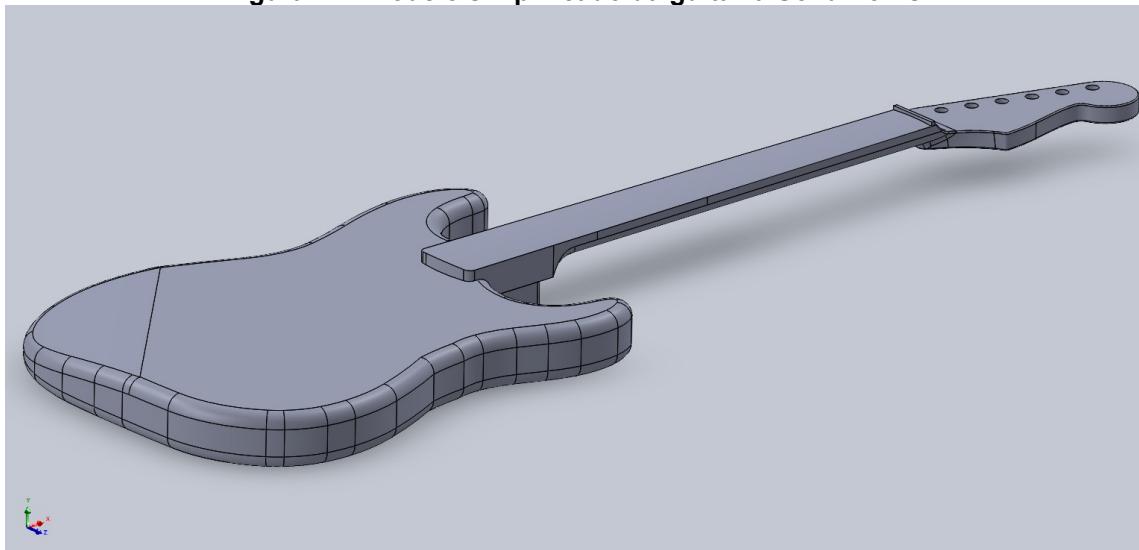
Fonte: Adaptado de Electric Herald (2020)

Para a criação do primitivo com o objetivo de criação de uma malha computacionalmente eficiente, a equipe de projetos teve que simplificar algumas geometrias do projeto original:

- O modelo de guitarra é totalmente sólido e sem espaços vazios internos;
- Todos os componentes da guitarra são conectados a partir de um único material;
- Pequenos recortes e filetes foram desconsiderados.

Com as simplificações citadas, o modelo primitivo é mostrado na Figura 24.

Figura 24 - Modelo simplificado da guitarra SolidWorks



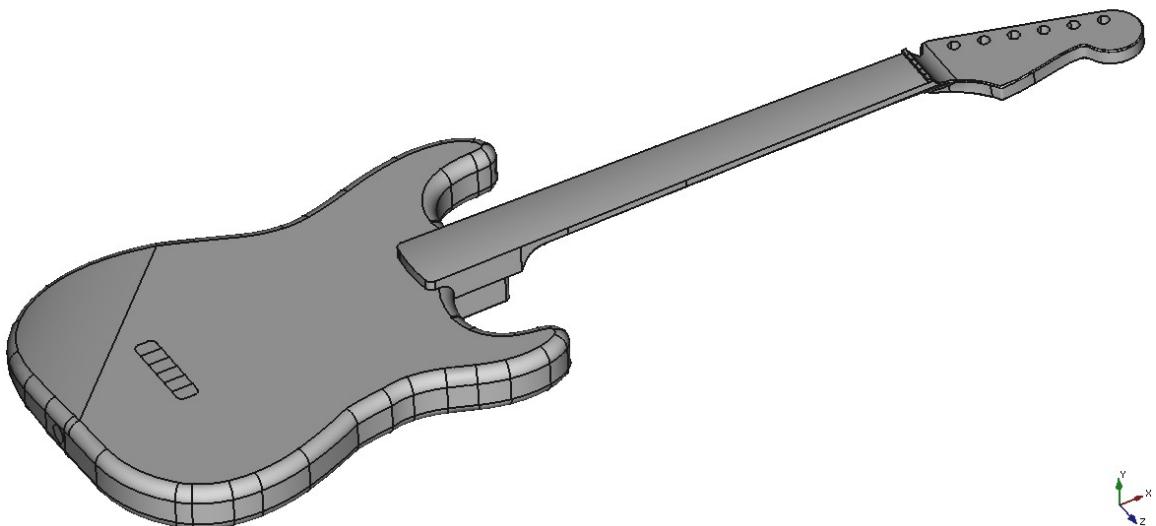
Fonte: Autoria própria (2022)

Com o modelo primitivo realizado, a equipe de projetos tomou algumas ações para preparar o modelo para a exportação no *software* de criação de malha. As preparações eram marcações superficiais na guitarra para alocação de espaço para a correta implementação de futuras condições de contorno. É preciso ressaltar que a marcação é importante para criar contornos na malha desejados, isso auxiliará para uma mais fácil inserção de condições de contorno durante a análise. As marcações foram realizadas no *software* FreeCAD e foram as seguintes:

- Marcação de fixação da correia;
- Marcação da interface ponte/corpo;
- Marcação da interface ponte/corda;
- Marcação da interface pestana/corda.

Após as marcações, o modelo step gerado está exposto na Figura 25.

Figura 25 - Modelo step com marcações FreeCAD



Fonte: Autoria própria (2022)

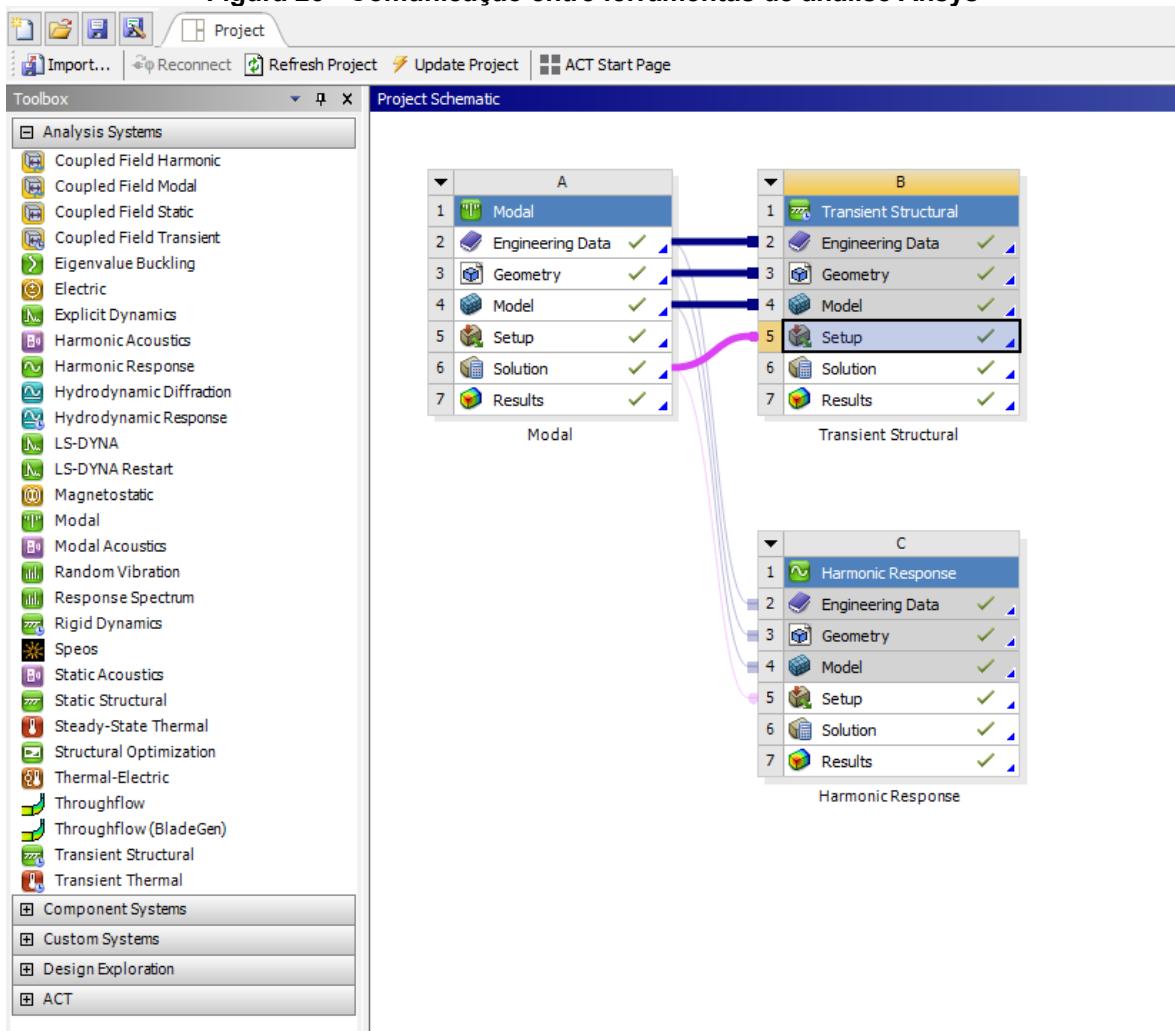
Com a criação do modelo CAD, foi gerado um arquivo step para ser importado no *software* de criação de malha.

4.2 Software de análise e criação de malha

A escolha para o *software* de análise e criação de malha teve influência dos seguintes fatores: conhecimento da equipe a respeito da ferramenta, disponibilidade de licença cedida pela UTFPR, facilidade na busca de informações devido à uma comunidade grande e reconhecimento da ferramenta pelo meio acadêmico. Por esses motivos, o *software* escolhido para análise e criação de malha foi o Ansys. A facilidade de comunicação entre as análises é mostrada na Figura 26.

O *software* o Ansys tem módulos de integração entre análises, criador de malha a partir de arquivos externos como step e módulo de entrada de material ortotrópico, que facilita para a equipe a inserção de materiais como a madeira.

Figura 26 - Comunicação entre ferramentas de análise Ansys

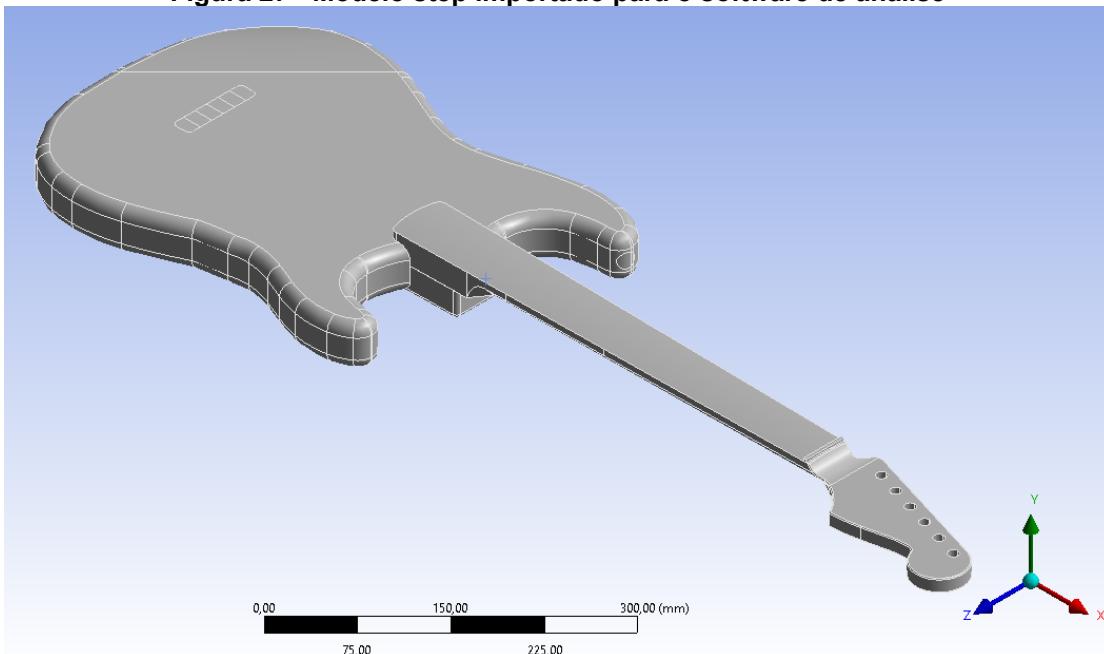


Fonte: Autoria própria (2022)

4.3 Realização da malha

Para realização da malha, como explicado no tópico anterior, a equipe de projeto utilizou o modelo computacional primitivo como guia para a malha. A equipe de trabalho testou alguns tipos de elementos e resoluções diferentes de malha para escolher a definitiva. Uma análise foi realizada para verificar a convergência de resultados. A Figura 27 demonstra a importação do step realizada.

Figura 27 - Modelo step importado para o software de análise

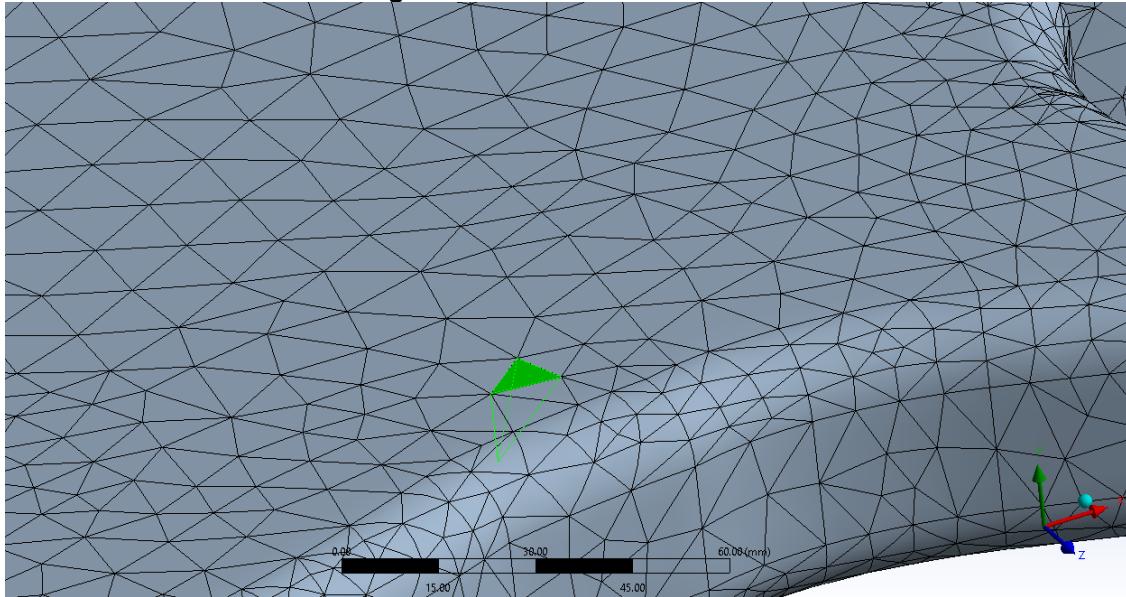


Fonte: Autoria própria (2022)

A escolha de tipo de elementos a ser utilizado foi baseado no tipo de análise que seria feita à posteriori e no tipo de representação dos elementos de massa e rigidez que a equipe deseja atingir. Foi escolhida a representação em três dimensões dos elementos de massa, a espessura no corpo da guitarra, aliado com uma melhor representação da transição do corpo e braço da guitarra foram fundamentais para a escolha de representação em três dimensões.

Os tipo de elementos utilizados para a realização da malha foram do tipo tetraédricos, a escolha se deu principalmente devido ao relevo da guitarra ser extremamente curvilíneo. Esse tipo de elemento também propicia um ajuste de malha de pontos pequenos da guitarra (detalhes) de forma mais fácil. Não foi utilizado a opção de nós intermediários na aresta dos elementos, pois a guitarra foi avaliada como um todo e em pontos específicos já com nós, o ganho na precisão ao inserir nós intermediários não são interessantes em detrimento do custo computacional que seria gerado. A Figura 28 mostra um elemento em destaque no modelo.

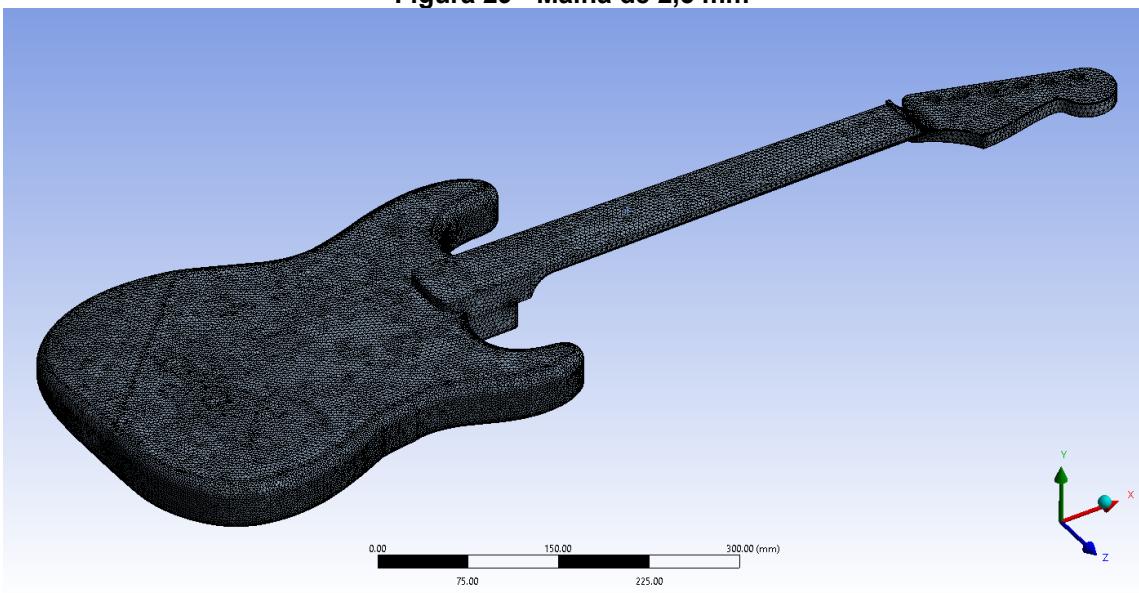
Figura 28 - Elemento tetraédrico



Fonte: Autoria própria (2022)

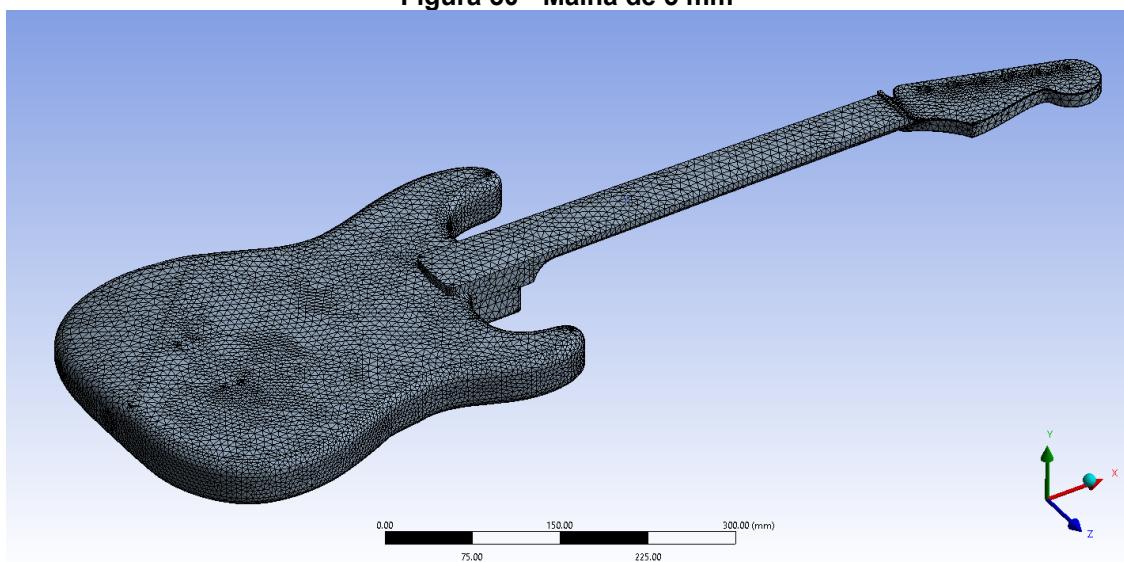
Contudo, com a geração de malha automática aliada às diretrizes de malha anteriormente citadas, foi criado o grupo de teste de refino do tamanho dos elementos. A geração automática, de qualidade 7 (maior do *software*) do *software* Ansys, sugere um tamanho médio dos elementos de aproximadamente 20 mm, totalizando 86356 nós e 52707 elementos. A partir disso a equipe assumiu o teste de quatro malhas, comparando os resultados de análises modais entre elas. As malhas testadas tinham como tamanho médio: 2,5 mm, 5mm, 10mm e 20mm, as Figuras 29, 30, 31 e 32 ilustram as malhas testadas.

Figura 29 - Malha de 2,5 mm

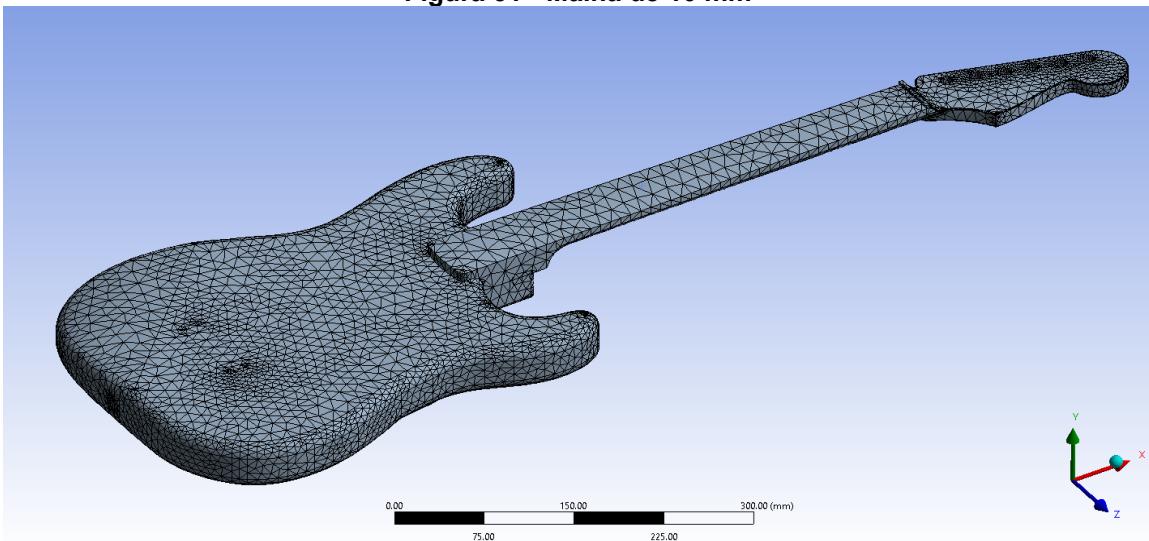


Fonte: Autoria própria (2022)

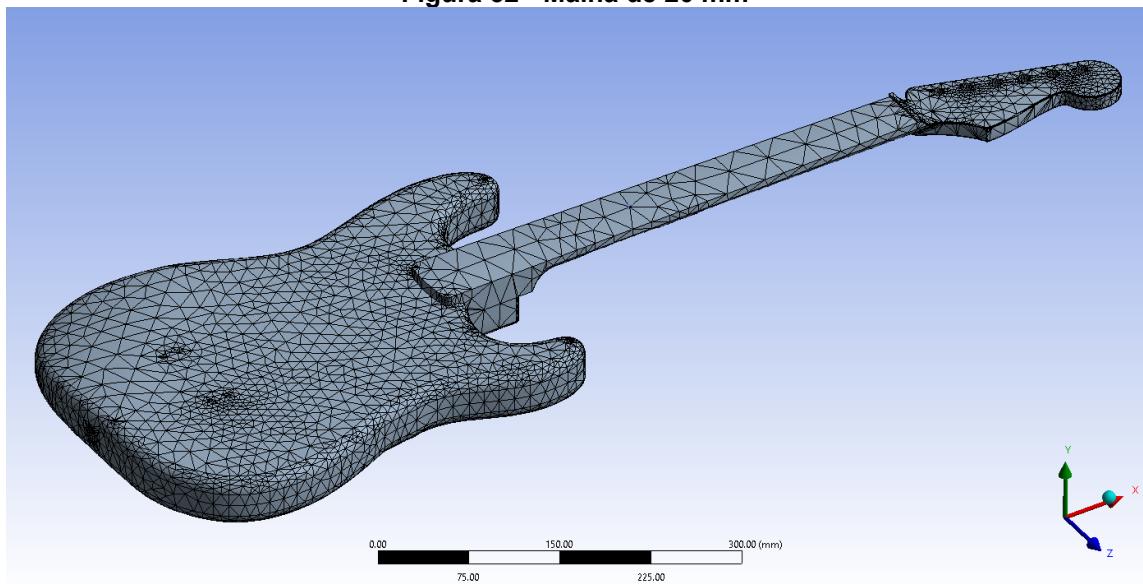
Figura 30 - Malha de 5 mm



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 31 - Malha de 10 mm

Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 32 - Malha de 20 mm

Fonte: Autoria própria (2022)

Após a realização das quatro malhas, foi realizado a análise modal com as seguintes condições de contorno:

- Material: Madeira de espécie Mogno (Mahogany);
- Pontos fixos na correia da guitarra.

Os resultados, alterando somente o parâmetro de refino de malha, são expostos na Tabela 2, para calcular o erro associado entre eles, utilizou-se os resultados do terceiro modo de vibrar como base:

Tabela 2 - Resultados modais para diferentes resoluções de malha

Malha [mm]	Modo 1 [Hz]	Modo 2 [Hz]	Modo 3 [Hz]	Modo 4 [Hz]	Modo 5 [Hz]	Modo 6 [Hz]	Erro (Modo 3)	Nós	Elementos	Tempo para resolver [s]
2,5	38,7	62,2	94,3	187,6	221,3	296,7	-0,06%	550811	352642	16773 (4h 39m 33s)
5	38,8	62,5	94,4	187,9	221,6	297,3	-0,08%	171277	106142	307 (5m 7s)
10	38,9	62,6	94,5	188,1	222	297,5	-0,13%	84842	51577	93 (1m 33s)
20	39	63	95	188,6	222,7	298,0	0,12%	62008	37504	65 (1m 5s)
Default (~17)	39	63	95	188,2	222,0	297,6	-	86356	52707	80 (1m 20s)

Fonte: Autoria própria (2022).

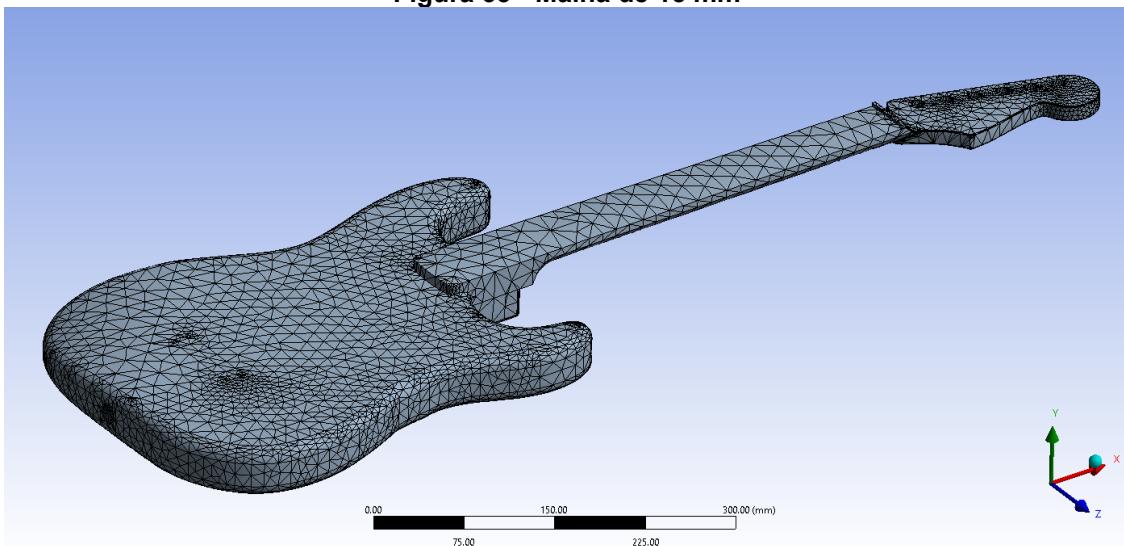
Com os resultados, foi possível verificar que a malha tem pouca diferença entre os resultados obtidos, a equipe cogitou testar uma malha mais grosseira, de 40 mm, para mostrar a não convergência de resultados. No entanto, uma malha com 40mm mostrou-se inviável, devido à má formação de elementos seguindo a orientação do arquivo primitivo.

É importante ressaltar que para realizar um teste deste tipo, o comprimento máximo do elemento em uma de suas direções deve ser inferior à 1/10 do comprimento de onda da análise realizada (Celep e Bazant, 1983). A velocidade do som é próxima de 4000 m/s na madeira (Wood handbook, 2021). Como a equipe de projeto deseja realizar as análises para frequências de até 1000 Hz, pode-se utilizar a Equação 16 para encontrar o comprimento de onda associado.

$$v = \lambda * f \quad (16)$$

Utilizando a Equação 16, é possível encontrar o valor de λ igual a 4 metros. Um décimo desse valor é igual a 400 mm. Um valor bem maior que o valor utilizado para comprimento médio de elemento. Isso se dá principalmente pelo fato que iremos atuar em baixas frequências para a análise.

Para a escolha final de resolução de malha, a equipe levou em consideração o tempo computacional gasto em cada uma das análises. Lembrando que o trabalho ainda propõe análise de harmônica e transiente (de custo computacional muito maior que a modal). Como para a análise de 10mm e 20mm o tempo ficou em um parâmetro razoável, a equipe escolheu um refino de malha de 15mm para realizar suas análises futuras. A visualização da malha pode ser feita na Figura 33. Os resultados dos primeiros 6 modos de vibrar podem ser vistos na Tabela 3.

Figura 33 - Malha de 15 mm

Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 3 - Resultados modais para malha de 15 mm

Modo	Frequência [Hz]
1	39
2	63
3	95
4	188
5	222
6	298

Fonte: Autoria própria (2022).

4.4 Material de análise

Para a escolha dos materiais de análise, a equipe de projeto priorizou madeiras de uso frequente na indústria de guitarras. As madeiras escolhidas foram: Acer (*Acer saccharum*), Mogno (*Khaya*), Tília americana (*Tilia americana*) e Populus (*Populus deltoids*) que, respectivamente, têm seus nomes comercialmente conhecidos do inglês: *Maple*, *Mahogany*, *Basswood* e *Cottonwood*. Todas usadas em fabricantes nacionais e internacionais.

É importante ressaltar que para a execução da análise foi realizado algumas premissas e simplificações. As premissas utilizadas para a inserção das

propriedades mecânicas da madeira no software de análise foram:

- Madeira considerada como material ortotrópico de forma uniforme. Em outras palavras, a madeira considerada no cálculo tem propriedades longitudinais, radiais e tangenciais diferentes, contudo, as propriedades ao longo de um único eixo se mantêm constantes (propriedades ao longo do trecho longitudinal, radial e tangencial não foram alteradas).
- Considerado material único na guitarra, sem espaços vazios ou outros materiais embutidos.
- Utilizando umidade da madeira em 12% (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997). Esse parâmetro altera todas as propriedades da madeira inseridas para análise.

Como já citado, madeira é um material ortotrópico, tendo propriedades diferentes em cada eixo de análise. Os eixos são: longitudinal, radial e tangencial. A Figura 34 ilustra os sentidos de cada um dos eixos em comparação com os sentidos de fibras da madeira.

Figura 34 - Relação dos eixos longitudinal, radial e tangencial com as fibras da madeira

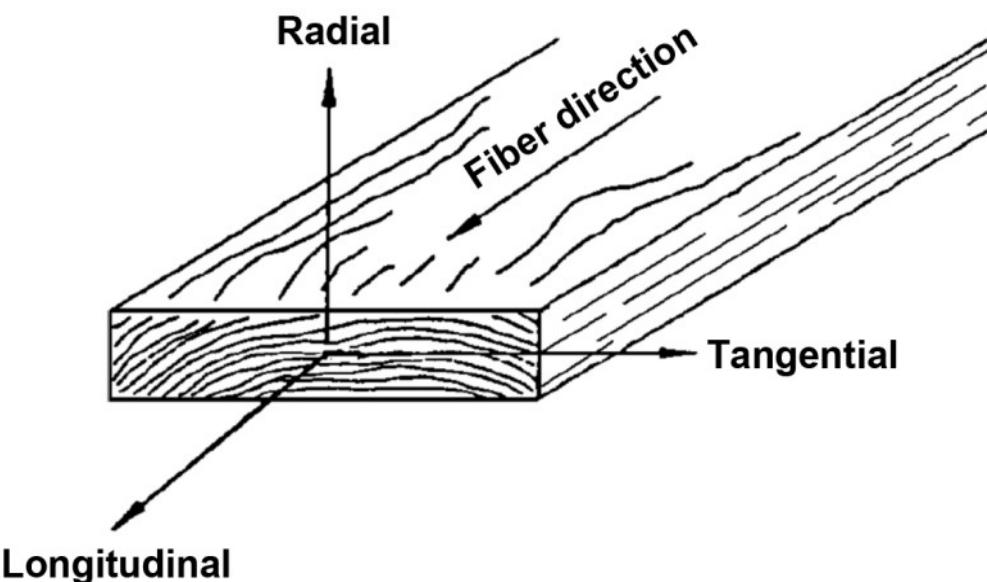


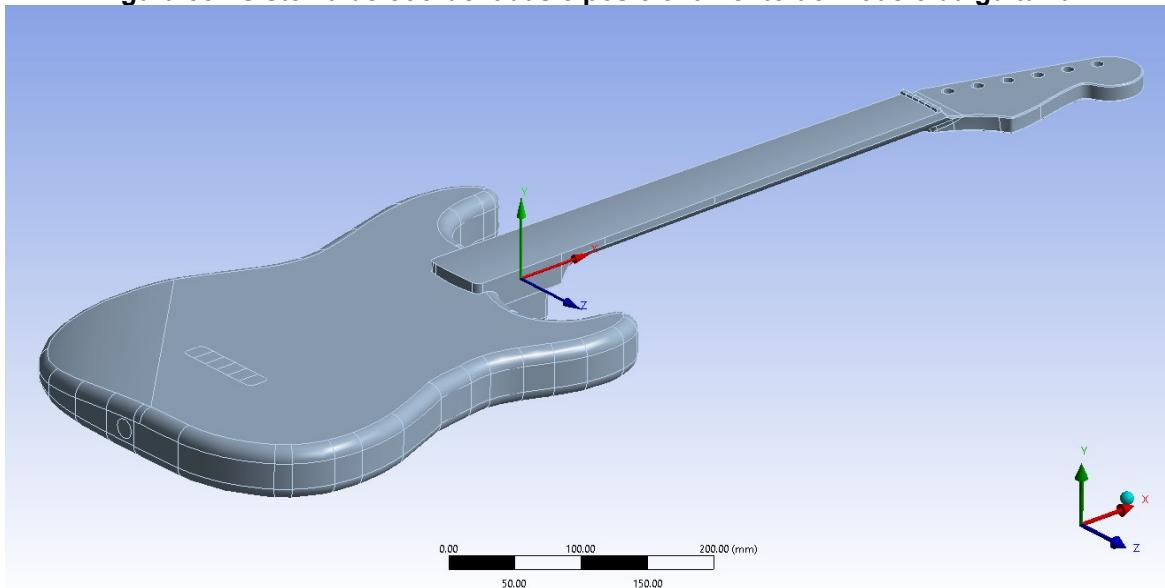
Figure 5–1. Three principal axes of wood with respect to grain direction and growth rings.

Fonte: Wood Handbook (2021)

A orientação das fibras da madeira na montagem da guitarra foi considerado

o mais tradicional entre os fabricantes: longitudinal ao longo do comprimento da guitarra (eixo x do modelo), radial na espessura da guitarra (eixo y do modelo), tangencial ao longo do sentido transversal às cordas (eixo z do modelo). A Figura 35 ilustra quais foram os eixos utilizados para a inserção de propriedades ortogonais, já a Figura 36 mostra uma guitarra real com as fibras na direção longitudinal destacadas.

Figura 35 - Sistema de coordenadas e posicionamento do modelo da guitarra



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 36 - Direção das fibras em uma guitarra.



Fonte: Adaptado de Dhgate.Com (2021)

Utilizando uma umidade de 12% na madeira, temos os seguintes valores inseridos para cada uma das espécies na Tabela 4 , todos os dados foram retirados do Wood Handbook (2021).

Tabela 4 - Propriedades inseridas no modelo matemático

Propriedade	Acer	Mogno	Tília americana	Populus	Unid.
Densidade	668,5	504	375,3	442,5	kg/m ³
Módulo de elasticidade na direção X	13860	10670	11110	10340	MPa
Módulo de elasticidade na direção Y	1829,5	1184,4	733,2	858,2	MPa
Módulo de elasticidade na direção Z	900,9	533,5	299,9	186,1	MPa
Coeficiente de Poisson XY	0,424	0,297	0,364	0,344	-
Coeficiente de Poisson YZ	0,774	0,604	0,912	0,875	-
Coeficiente de Poisson XZ	0,476	0,641	0,406	0,42	-
Módulo de cisalhamento XY	1538,4	938,9	622,1	785,8	MPa
Módulo de cisalhamento YZ	13,8	224,0	11,1	10,3	MPa
Módulo de cisalhamento XZ	873,1	629,5	511,0	537,6	MPa

Fonte: Autoria própria (2022)

Com todos os parâmetros necessários para a análise foram estabelecidos. A equipe de projeto os inseriu no software Ansys, o material utilizado foi incorporado à base de dados local.

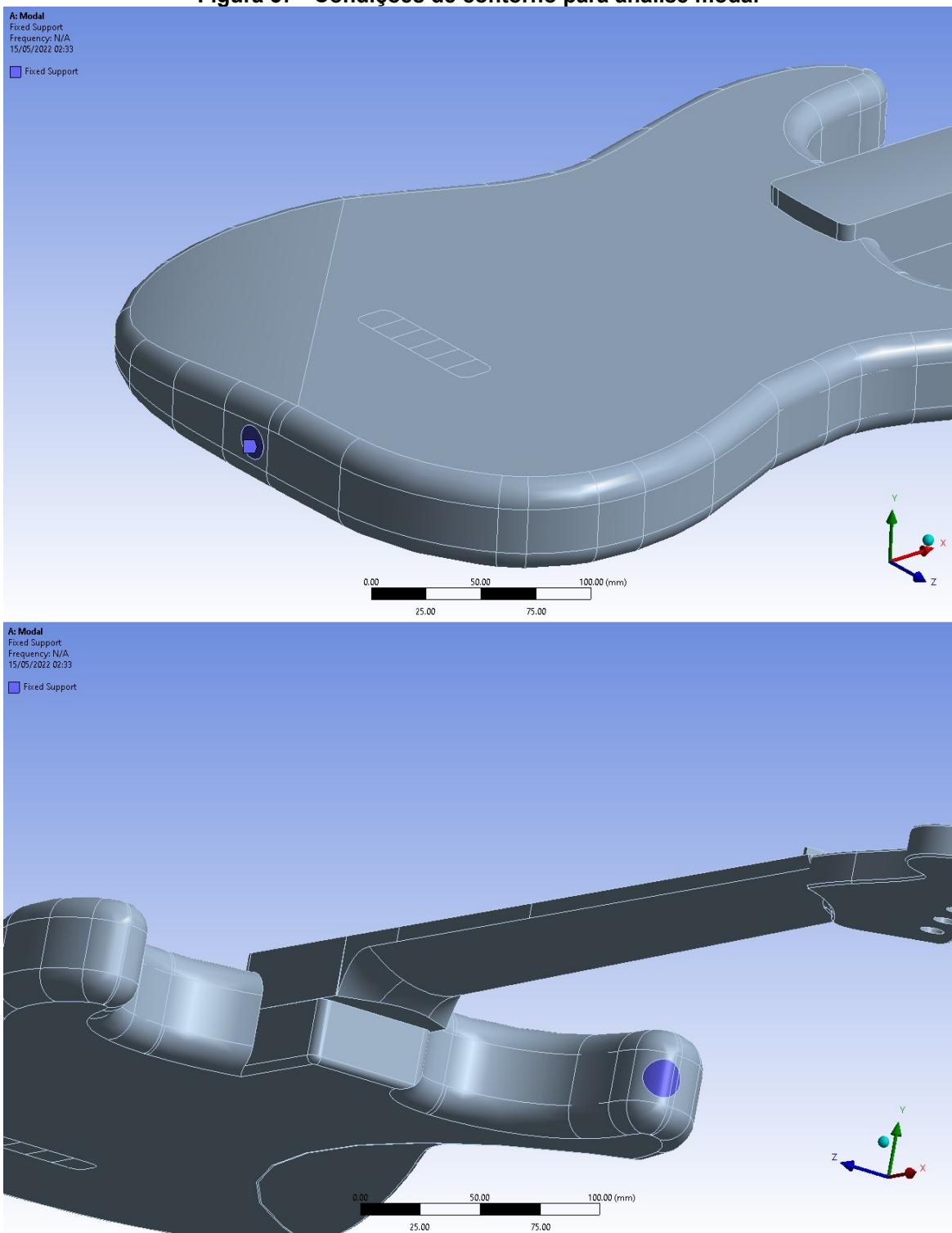
4.5 Condições de contorno na análise modal

Com o modelo computacional finalizado, definidas as condições de contorno e materiais de estudo, partiu-se para a realização das análises. A primeira delas foi a análise modal e seus resultados seriam usados posteriormente como condições fundamentais para as análises transientes e análises harmônicas. Para tanto, o módulo “Modal” do Ansys foi escolhido para essa primeira análise.

A análise modal é usada no estudo de propriedades dinâmicas de estruturas. O presente trabalho busca determinar, para um modelo simplificado de guitarra, a propriedade dinâmica denominada de frequência natural de vibração bem como o perfil de vibração associado a essa frequência, isto é, busca determinar os modos de vibração da guitarra estudada.

Como condições de contorno para a análise modal foram adotados pontos fixos nas regiões nas quais a correia é fixada, mostrada na Figura 37. Nenhum pré-tensionamento foi adicionado ao modelo como condição inicial.

Figura 37 - Condições de contorno para análise modal



Fonte: Autoria própria (2022)

A análise modal foi realizada quatro vezes, cada qual com um material de madeira diferente (Acer, Mogno, Tília americana e Populus).

Para a análise harmônica foi definido 1000 Hz como frequência de interesse, e é recomendado que a análise modal extraia um intervalo de modos de vibração

grande o suficiente para cobrir, pelo menos, 1,5 vezes a máxima frequência estudada na análise harmônica. Portanto, como saída escolheu-se encontrar os primeiros 32 modos de vibração de maneira que fosse possível identificar frequências naturais superiores a 1500 Hz. Não foi imposta nenhuma limitação para a máxima frequência buscada. A Figura 38 mostra as configurações para a análise modal.

Figura 38 - Configurações de análise modal

Options	
Max Modes to Find	32
Limit Search to Range	No
Solver Controls	
Damped	No
Solver Type	Program Controlled
Rotordynamics Controls	
Coriolis Effect	Off
Campbell Diagram	Off
Advanced	
Contact Split (DMP)	Off
Output Controls	
Stress	Yes
Surface Stress	No
Back Stress	No
Strain	Yes
Contact Data	No
Nodal Forces	Constrained Nodes
Volume and Energy	No
Euler Angles	No
Calculate Reactions	Yes
Store Modal Results	Program Controlled
General Miscellaneo...	No
Result File Compress...	Program Controlled
Analysis Data Management	
Solver Files Directory	D:\UTFPR\Template\Strato\Ansys\Corpo_Braco_Mao...
Future Analysis	MSUP Analyses
Scratch Solver Files ...	
Save MAPDL db	Yes
Contact Summary	Program Controlled
Delete Unneeded Fil...	Yes
Solver Units	Active System
Solver Unit System	nmm

Fonte: Autoria própria (2022)

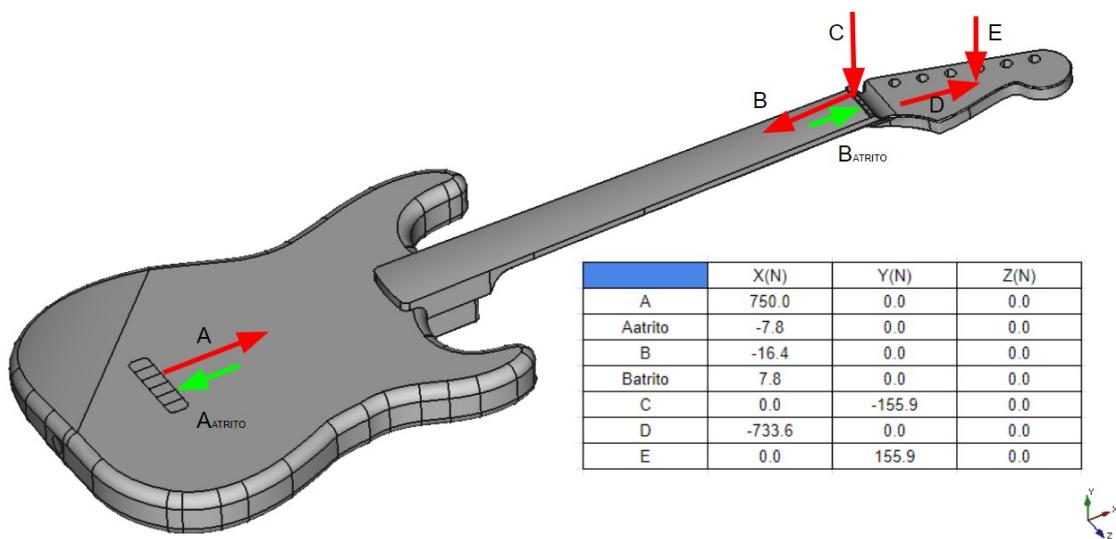
4.6 Condições de contorno para análise harmônica

A terceira análise realizada, com a mesma malha e material, foi a análise harmônica. A análise harmônica tenta predizer o comportamento estrutural de peças quando submetidas a uma certa excitação cíclica. Criando um gráfico de resposta de amplitude do movimento, pela frequência excitadora, podemos dizer a qual carregamento externo cíclico a peça é mais sensível.

Para as condições de contorno da análise, foi considerado que a guitarra está fixa nos dois pontos de interface com a correia, força de tração nas cordas aplicada de forma constante e força de excitação constante no centro da ponte da guitarra.

Para a força de tração das cordas na guitarra foi considerado uma tração fixa de 750N como somatório de todas as cordas, a reação da tração das cordas na guitarra foi considerada na pestana, cabeçote e ponte da guitarra. Para a reação na pestana (ângulo de 12°), foi realizado o diagrama de corpo livre da guitarra, considerando um ângulo de 12° de inclinação do cabeçote e coeficiente de atrito de 0,05 como premissa. A Figura 39 ilustra o diagrama de corpo livre para a reação de tração das cordas na guitarra.

Figura 39 - Diagrama de Corpo livre



Fonte: Autoria própria (2022)

Para a análise foi considerado uma divisão nos intervalos de solução de frequência de 1000 e com a gama analisada partindo de 0 Hz até 1000 Hz. A equipe utilizou como premissa um valor de 0,06 no coeficiente de amortecimento viscoso. Um valor intermediário entre 0,1 para a madeira quente e úmida 0,02 para a madeira quente e seca (Wood handbook, 2021). A Figura 40 ilustra as configurações da análise realizada.

Figura 40 - Configurações de análise harmônica

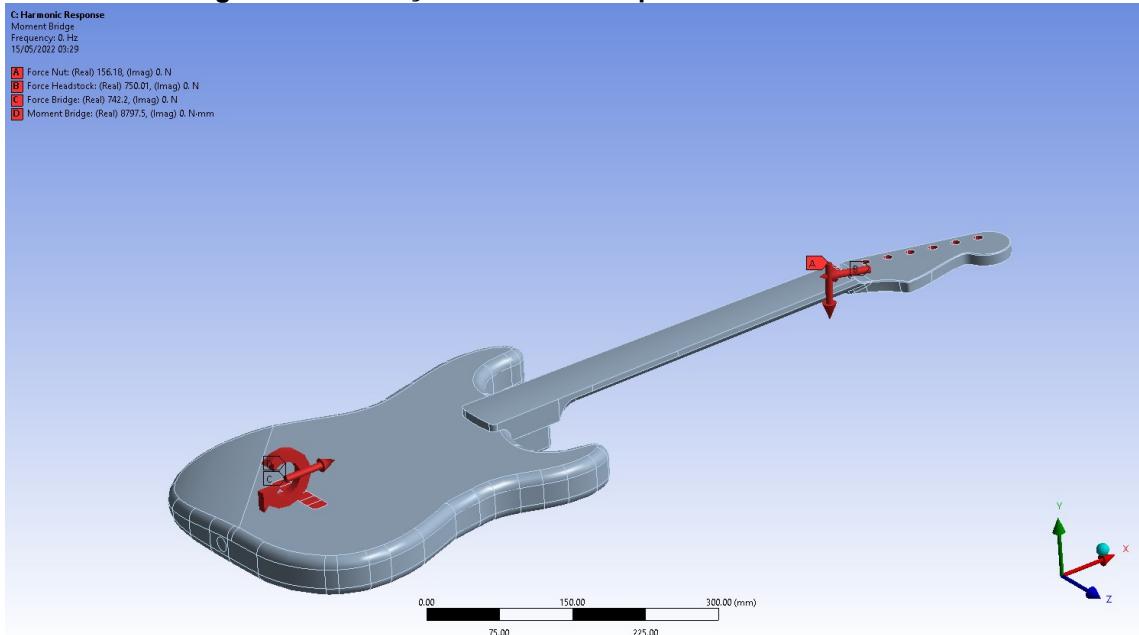
Details of "Analysis Settings"	
Step Controls	
Multiple RPMs	No
Options	
Frequency Spacing	Linear
Range Minimum	0. Hz
Range Maximum	1000. Hz
Solution Intervals	1000
User Defined Frequencies	Off
Solution Method	Mode Superposition
Include Residual Vector	No
Cluster Results	No
Skip Expansion	No
Store Results At All Frequencies	Yes
Rotordynamics Controls	
Coriolis Effect	Off
Output Controls	
Stress	Yes
Surface Stress	No
Back Stress	No
Strain	Yes
Contact Data	Yes
Nodal Forces	No
Volume and Energy	Yes
Euler Angles	Yes
Calculate Reactions	Yes
General Miscellaneous	No
Expand Results From	Program Controlled
-- Expansion	Modal Solution
Result File Compression	Program Controlled
Damping Controls	
Eqv. Damping Ratio From Modal	No
Damping Define By	Damping Ratio
Damping Ratio	6.e-002
Stiffness Coefficient Define By	Direct Input
Stiffness Coefficient	0.
Mass Coefficient	0.
Analysis Data Management	
Solver Files Directory	D:\UTFPR\Template\Strato\Ansys\Corpo_Braco_Mao_v03...

Fonte: Autoria própria (2022)

É importante ressaltar que há um desnível das cordas com a ponte, considerando a elevação das cordas em relação a ponte de 11,73 mm, temos um momento aplicado a ponte de 8797,5 N*mm.

Considerando todas as condições do contorno da análise foi gerada a Figura 41 para melhor entendimento.

Figura 41 - Condições de contorno para a análise harmônica



Fonte: Autoria própria (2022)

A análise harmônica foi realizada para os quatro tipos de madeira, utilizando a mesma malha, sendo que os resultados retirados do *software* foram importantes para a comparação entre os diferentes tipos de madeira.

4.7 Condições de contorno na análise transiente

Seguindo a análise modal, uma análise transiente foi realizada no modelo computacional da guitarra. Para tanto utilizou-se o módulo “*Transient Structural*” do Ansys e os resultados obtidos na análise modal foram usados como parâmetros de entrada.

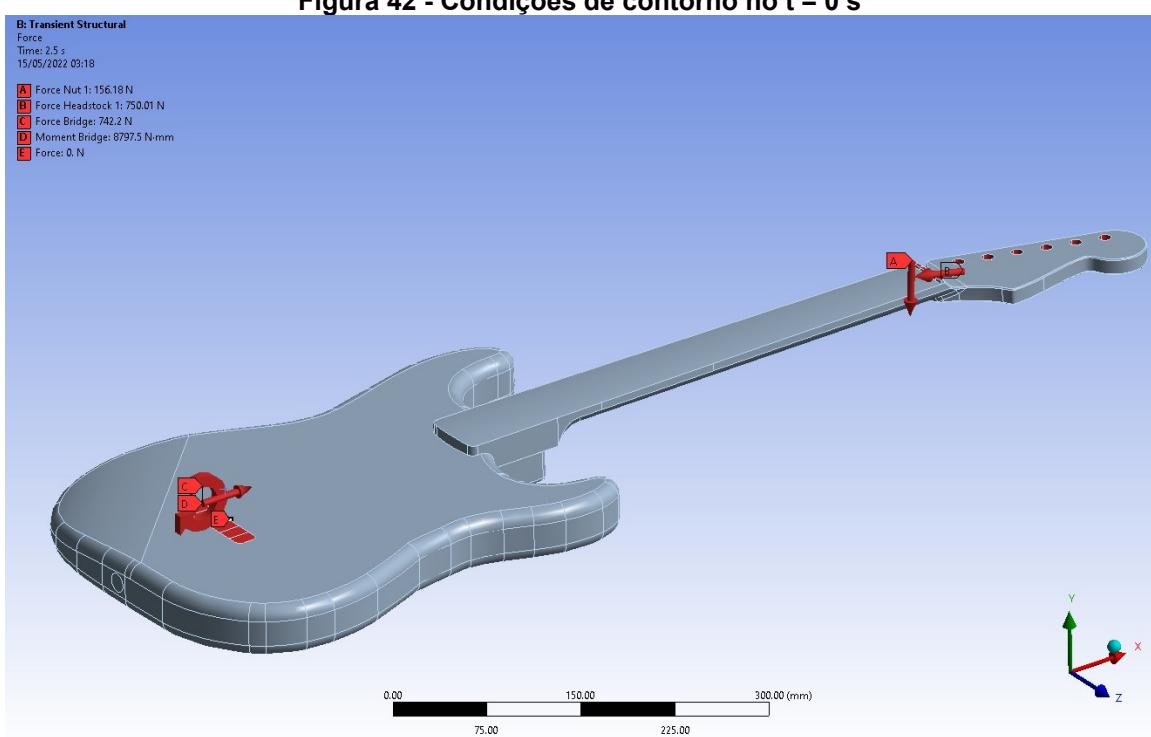
No presente estudo, a análise transiente realizada teve como objetivo avaliar

qual seria o comportamento dinâmico de uma guitarra ao longo do tempo, dada uma excitação externa de intensidade e tempo de atuação conhecidos. Esse tipo de análise tem como resultado, o comportamento da estrutura como variação da deformação ou tensão ao longo do tempo. Com esses dados pode-se gerar um gráfico chamado de resposta ao impulso. Neste trabalho foi escolhido gerar o gráfico de resposta ao impulso como sendo a aceleração por tempo, por ser dados comuns aos obtidos em análises experimentais.

As condições de contorno para a análise transiente se deu com a fixação das duas regiões nas quais a correia da guitarra é presa, a tração exercida pelas cordas foi considerada como constantes e inserida na ponte (*bridge*), pestana (*nut*) e mão (*headstock*). Este último simulando as forças das cordas nas tarraxas (*machine heads*). Para a força de excitação, definiu-se que seria aplicada uma força no centro da ponte de 5000 N durante 0,001 s, resultando em um impulso de 5 N*s. Esse impulso é aplicado no $t = 0,001$ s, isto é, após decorrido um milissegundo de análise. A duração total da análise foi definida em 2,5 s e foi dividida em 2500 passos ou *time steps* de um milissegundo. A Figura 42 mostra o modelo preparado para a análise. É possível verificar as configurações aplicadas na Figura 43.

Um coeficiente de amortecimento de 0,06 foi adotado para as análises e foram realizadas quatro análises transientes, uma para cada tipo de madeira.

Figura 42 - Condições de contorno no t = 0 s



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 43 - Configurações de análise transiente

Details of "Analysis Settings"	
Step Controls	
Number Of Steps	3.
Current Step Number	3.
Step End Time	2.5 s
Auto Time Stepping	Off
Define By	Time
Time Step	1.e-003 s
Time Integration	On
Options	
Include Residual Vector	No
Skip Expansion	No
Output Controls	
Stress	Yes
Surface Stress	No
Back Stress	No
Strain	Yes
Contact Data	Yes
Nodal Forces	No
Volume and Energy	Yes
Euler Angles	Yes
Calculate Reactions	Yes
Calculate Velocity and Acceleration	Yes
General Miscellaneous	No
Expand Results From	Program Controlled
-- Expansion	Modal Solution
Store Results At	All Time Points
Result File Compression	Program Controlled
Damping Controls	
Eqv. Damping Ratio From Modal	No
Damping Ratio	6.e-002
Stiffness Coefficient Define By	Direct Input
Stiffness Coefficient	0.
Mass Coefficient	0.
Numerical Damping	Manual
Numerical Damping Value	0
Analysis Data Management	
Solver Files Directory	D:\UTFPR\Template\Strato\Ansys\Corpo_Braco_Mao_...
Future Analysis	None
Details Section Planer	

Fonte: Autoria própria (2022)

4.8 Tempo de reverberação

O tempo de reverberação da guitarra é um importante fator para guitarristas,

chamado no meio de *sustain*, o tempo de reverberação indica o tempo em que a guitarra continua o movimento de oscilação mesmo depois de não ter nenhuma força externa oscilatória atuando sob a mesma.

Para obter o tempo de reverberação, a equipe de projeto utilizou as respostas obtidas na análise transiente, isto é, a partir das respostas ao impulso obteve-se as curvas de decaimento das madeiras e, a partir dessas curvas, estimou-se o tempo de reverberação para cada madeira estudada.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nas três análises: análise modal, análise harmônica e análise transiente, para os quatro tipos de madeira: Acer, Mogno, Tília americana e Populus.

Da análise modal de cada madeira obteve-se a Tabela 5 que relaciona os modos de vibração e a frequência associada. Observa-se que para cada tipo de madeira foram extraídas frequências maiores que 1500 Hz.

Tabela 5 - Modos de vibrar e frequência associada das madeiras estudadas

(continua)

Modo	Acer (Maple) Frequência [Hz]	Mogno (Mahogany) Frequência [Hz]	Tília americana (Basswood) Frequência [Hz]	Populus (Cottonwood) Frequência [Hz]
1	32,93	38,99	34,5	31,75
2	55,71	62,73	62,39	56,19
3	89,33	94,55	103,55	92,3
4	150,81	188,33	163,6	150,55
5	195,19	222,25	211,26	189,01
6	254,91	297,78	266,68	231,08
7	288,38	325,51	291,97	249,55
8	323,22	397,04	352,71	324,69
9	373,01	451,78	398,32	353,55
10	415,65	512,25	461,68	412,27
11	531,27	593,48	578,84	515,21
12	586,58	733,65	636,98	551,29
13	642,25	819,9	675,51	570,33
14	692,49	866,87	702,93	617,86
15	693,75	962,08	761,94	682,2
16	804,8	1.023,50	852	767,79
17	903,49	1.142,50	977,82	871,63
18	926,57	1.163,80	1.021,50	905,95
19	944,73	1.245,40	1.041,30	925,95
20	1.005,00	1.327,40	1.085,50	959,84
21	1.063,20	1.372,30	1.145,30	1.034,80
22	1.113,50	1.495,10	1.243,60	1.087,10
23	1.148,70	1.509,30	1.272,70	1.131,10
24	1.188,80	1.696,00	1.309,40	1.138,50
25	1.264,50	1.705,00	1.389,90	1.171,30
26	1.330,10	1.815,50	1.419,10	1.175,90
27	1.371,00	1.867,80	1.501,80	1.254,50

**Tabela 5 - Modos de vibrar e frequência associada das madeiras estudadas
(conclusão)**

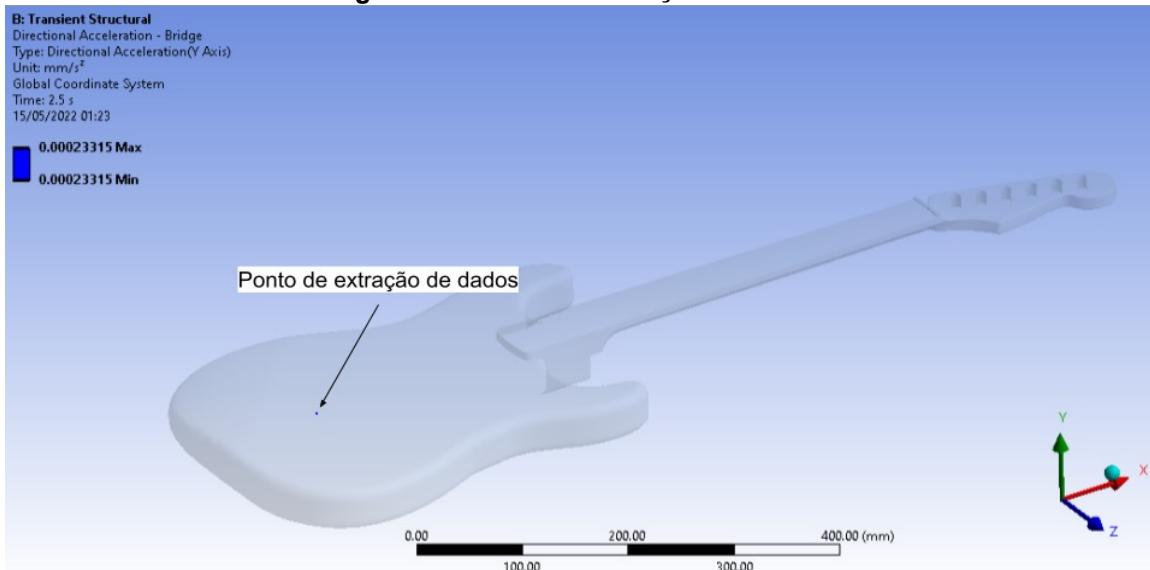
	Acer (Maple)	Mogno (Mahogany)	Tília americana (Basswood)	Populus (Cottonwood)
Modo	Frequência [Hz]	Frequência [Hz]	Frequência [Hz]	Frequência [Hz]
28	1.417,20	1.990,90	1.530,70	1.343,20
29	1.526,60	2.014,50	1.576,50	1.369,60
30	1.552,30	2.106,40	1.600,70	1.417,70
31	1.606,40	2.180,60	1.682,90	1.497,70
32	1.614,20	2.215,50	1.718,90	1.545,60

Fonte: Autoria própria (2022)

A partir da Tabela 5, pode-se observar que as frequências naturais de vibração associadas aos modos de vibração são diferentes para cada tipo de madeira.

No caso dos resultados da análise harmônica, os dados foram extraídos e gráficos da resposta em frequência para cada tipo de madeira foram gerados. Foi definido que, tanto para a análise harmônica quanto para a análise transiente, os dados seriam extraídos de um ponto infinitesimal localizado na ponte, a Figura 44 mostra esse ponto.

Figura 44 - Ponto de extração de dados

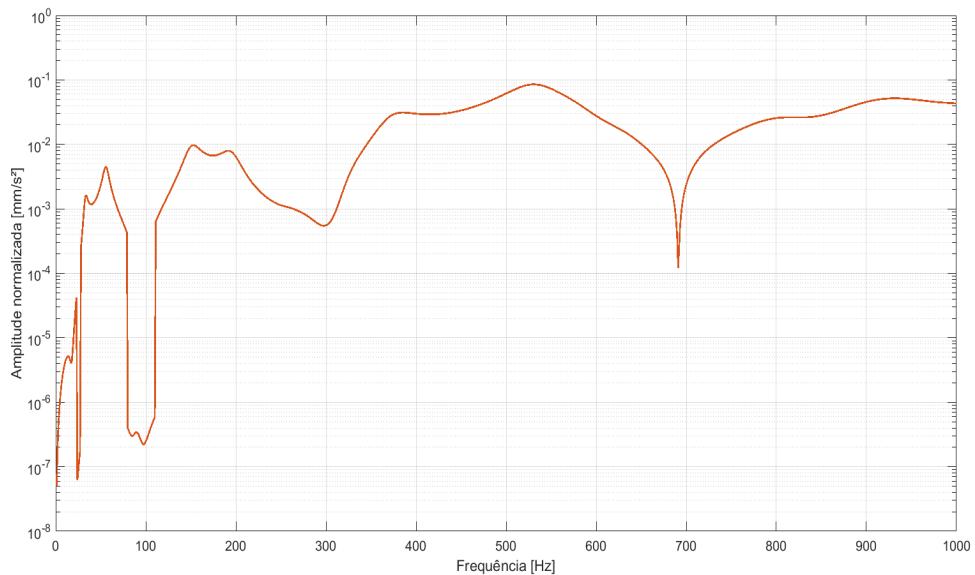


Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 45 mostra o gráfico da resposta em frequência para o Acer, a Figura 46 para o Mogno, a Figura 47 para a Tília americana e a Figura 48 para o

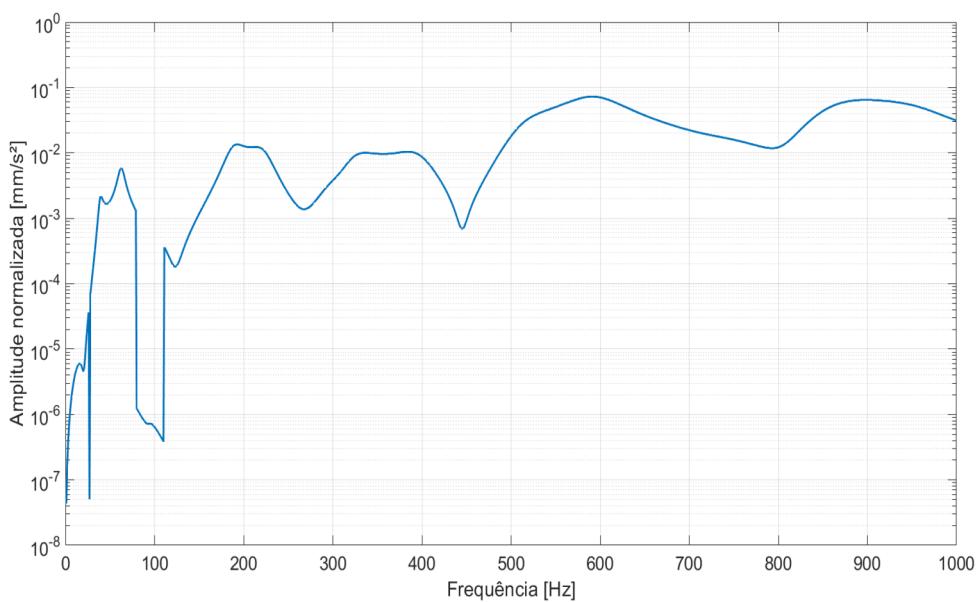
Populus.

Figura 45 - Resposta em frequência do Acer



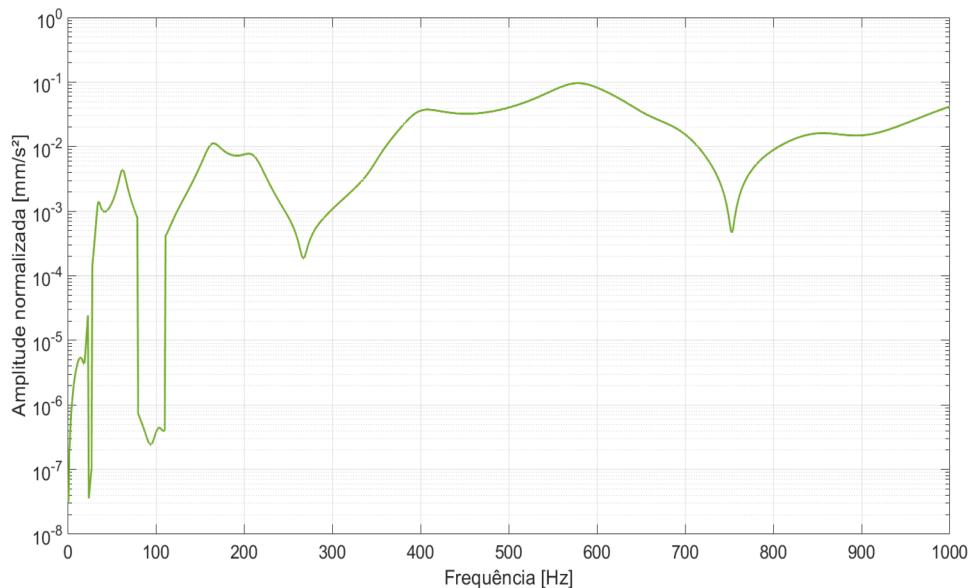
Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 46 - Resposta em frequência do Mogno



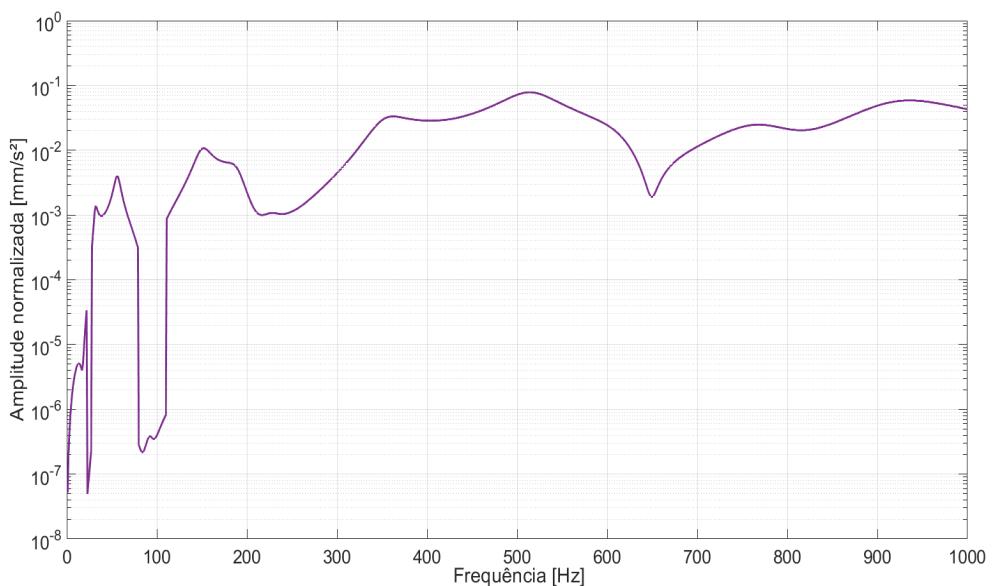
Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 47 - Resposta em frequência da Tília americana



Fonte: Autoria própria (2022)

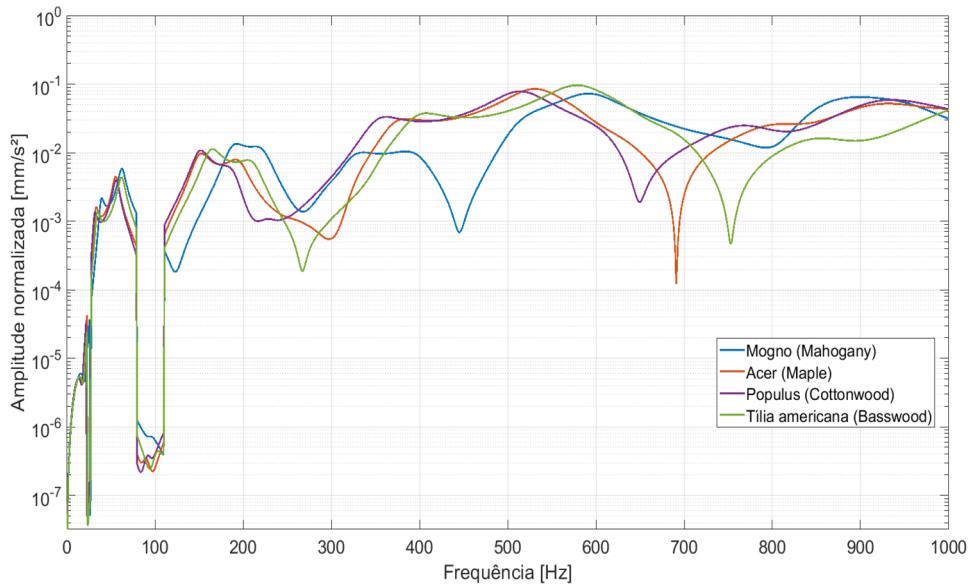
Figura 48 - Resposta em frequência do Populus



Fonte: Autoria própria (2022)

Os quatro gráficos com as respostas harmônicas sobrepostas foram sobrepostos e o resultado é mostrado na Figura 49.

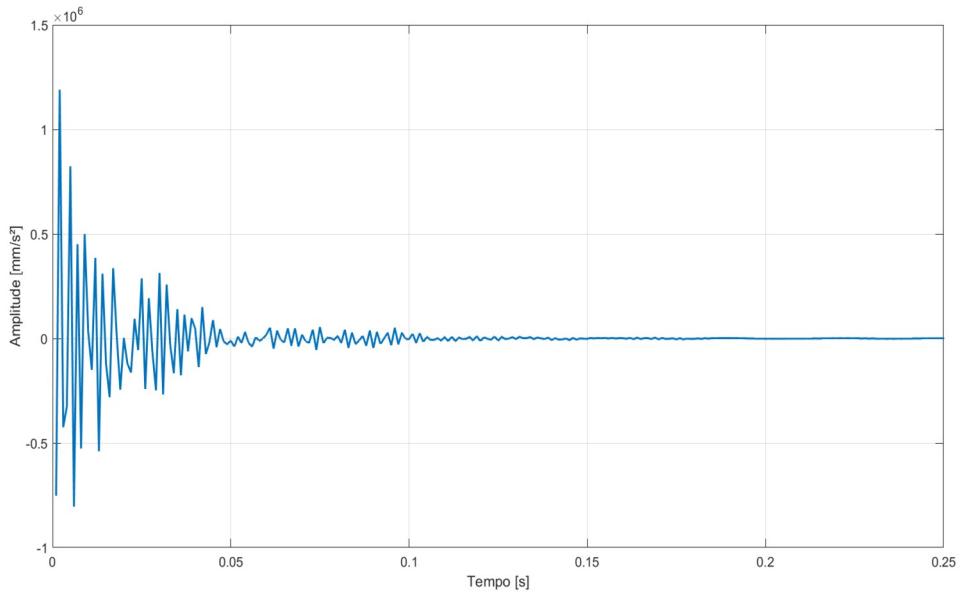
Figura 49 - Resposta em frequência das quatro madeiras sobrepostas



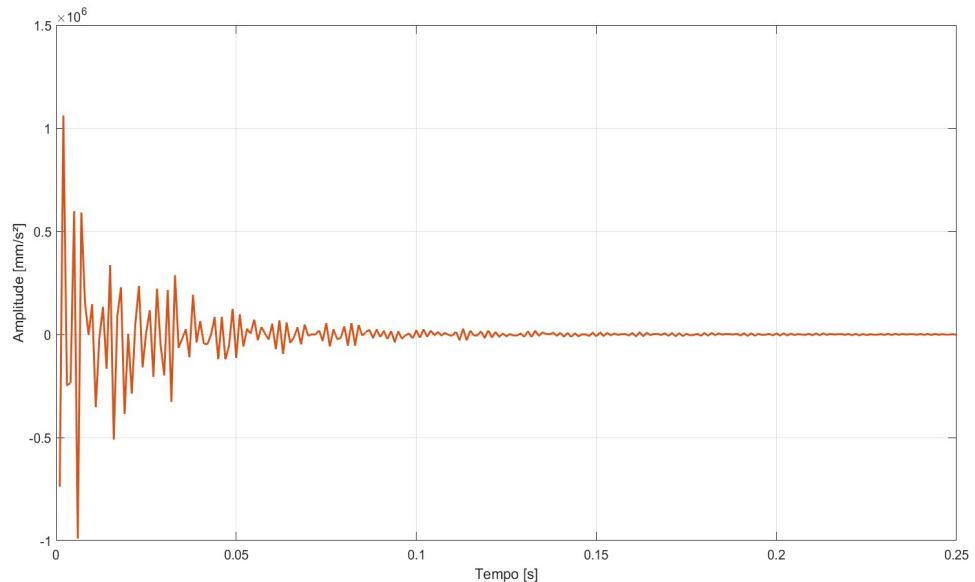
Fonte: Autoria própria (2022)

Analisando Figura 49 é possível verificar a diferença tanto em amplitude quanto nas frequências as quais os picos ocorrem. A diferença entre os traçados das diferentes madeiras evidencia a diferença entre os resultados vibratórios das madeiras. Evidenciando a influência das madeiras sob a guitarra.

Os dados retirados das análises transientes foram compilados e com eles os gráficos de resposta ao impulso para os quatro tipos de madeira foram gerados. A Figura 50 mostra o gráfico da resposta ao impulso para o Acer, a Figura 51 para o Mogno, a Figura 52 para a Tília americana e a Figura 53 para o Populus.

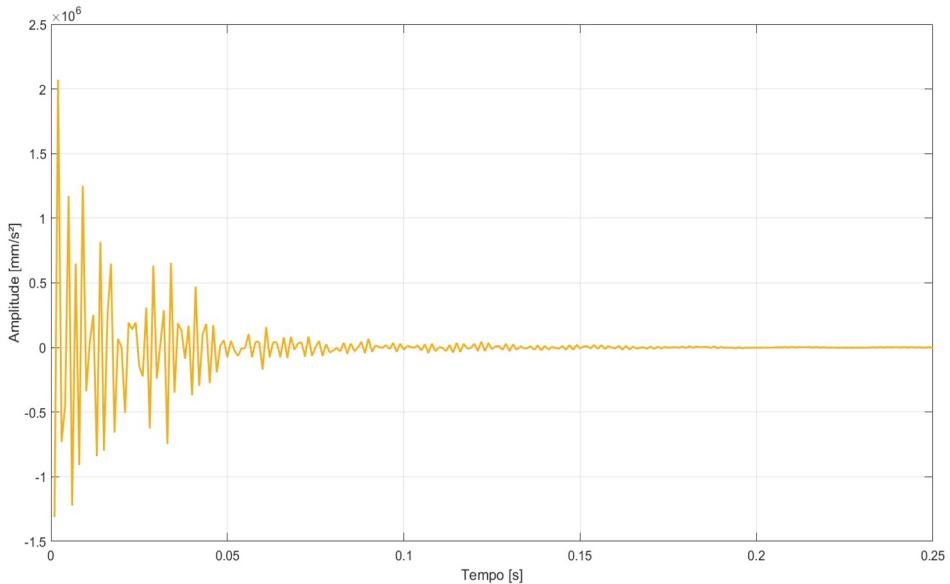
Figura 50 - Resposta ao impulso do Acer

Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 51 - Resposta ao impulso do Mogno

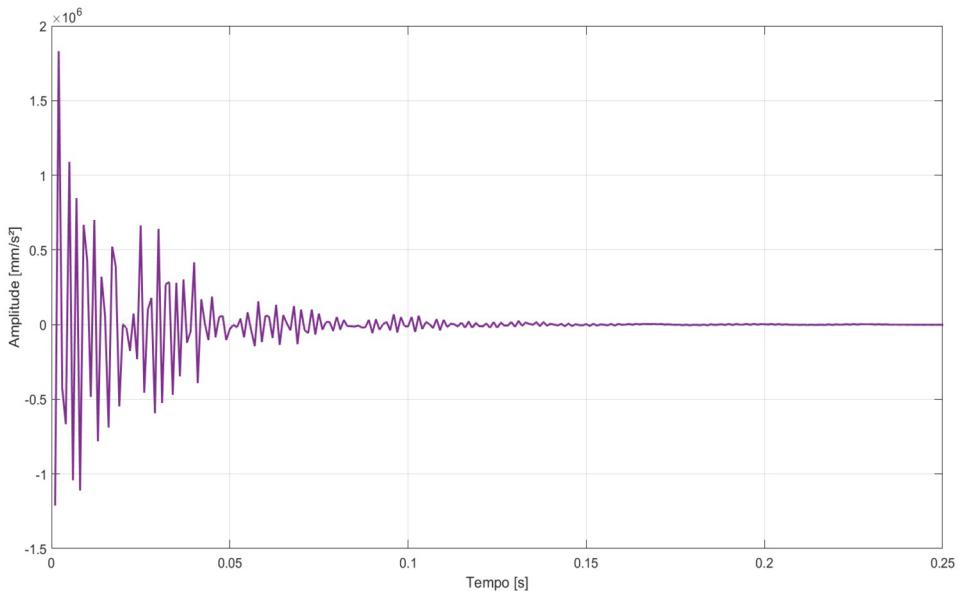
Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 52 - Resposta ao impulso da Tília americana



Fonte: Autoria própria (2022)

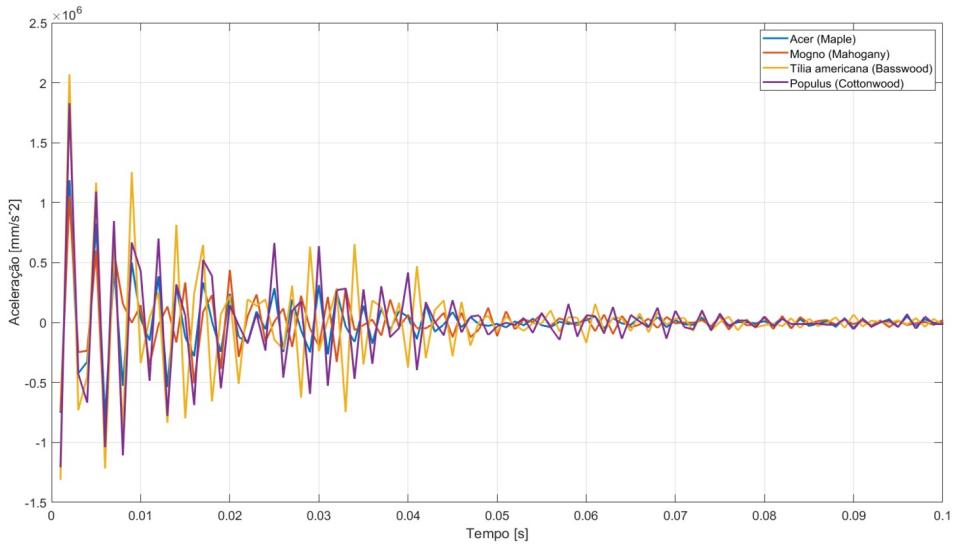
Figura 53 - Resposta ao impulso do Populus



Fonte: Autoria própria (2022)

A partir das Figuras 50, 51, 52 e 53 observa-se que as amplitudes de movimento diferem ao longo do tempo devido a excitação inicial, mas passados 0,2s todas as quatro madeiras já estão em repouso. A Figura 54 mostra os 4 gráficos sobrepostos.

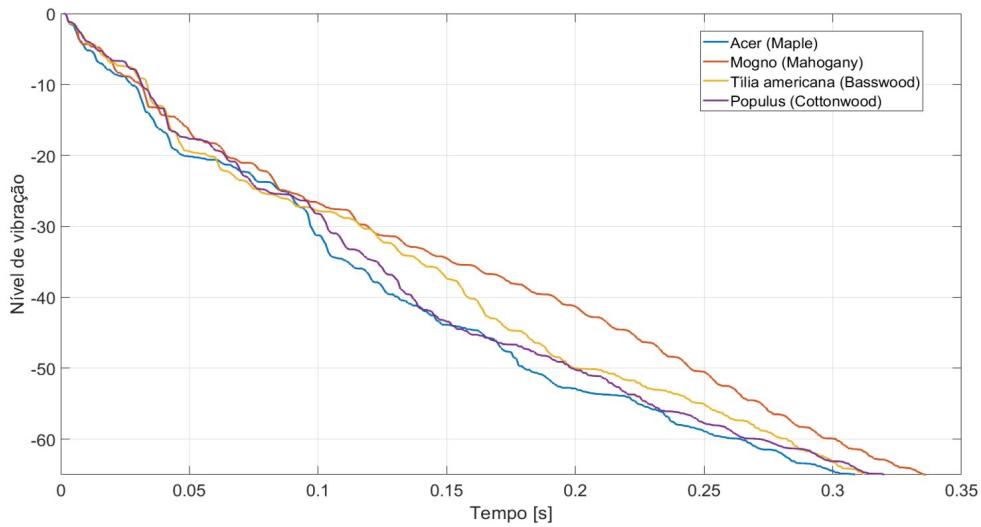
Figura 54 - Resposta ao Impulso das quatro madeiras



Fonte: Autoria própria (2022)

A partir dos dados das análises transientes foi possível obter as curvas de decaimento para cada madeira, a Figura 55 mostra as curvas de decaimento para os quatro tipos de madeira estudados.

Figura 55 - Curvas de decaimento das quatro madeiras estudadas



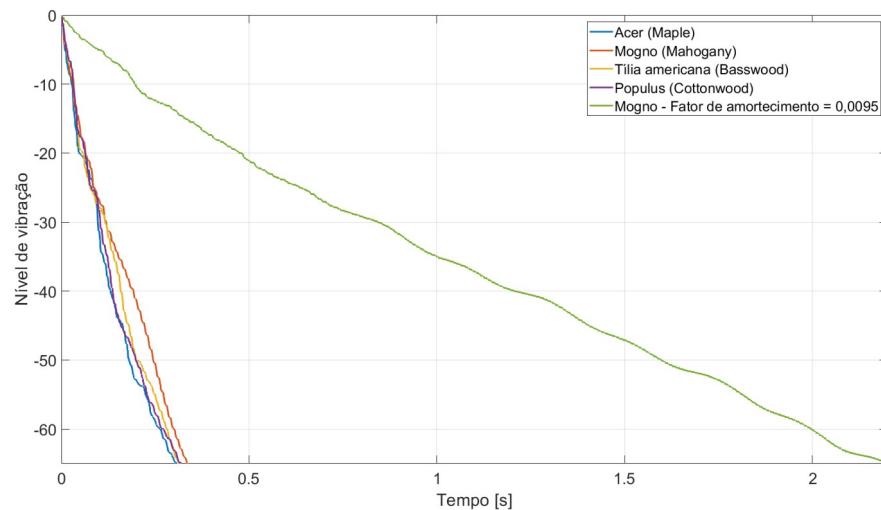
Fonte: Autoria própria (2022)

A partir das curvas de decaimento, pode-se obter o tempo de reverberação das madeiras estudadas. Considerando a definição de tempo de reverberação, ou T60, que é o tempo em segundos para o nível de som perder 60 dB (nesse trabalho mede-se o nível de vibração cair em 60 dB), pode-se estimar esse tempo

calculando-o como sendo o dobro do T30. Do gráfico, observa-se que para todas as madeiras o decaimento de -5 dB até -35 dB, o T30, leva 0,1 segundo, logo, o tempo de reverberação, T60, é 0,2 segundo, com diferença apenas na segunda casa decimal.

A fim de investigar o comportamento do T60 com a alteração do coeficiente de amortecimento, os autores fizeram mais um estudo com o Mogno. Adotou-se o novo valor de coeficiente de amortecimento como 0,0095 e manteve as condições de contorno das análises iguais às análises anteriores. A Figura 56 apresenta as curvas de decaimento do novo estudo com os anteriores. O tempo de reverberação do Mogno com coeficiente de amortecimento de 0,0095 é de 2 segundos. Evidenciando que essa propriedade é importante para resultado de tempo de reverberação.

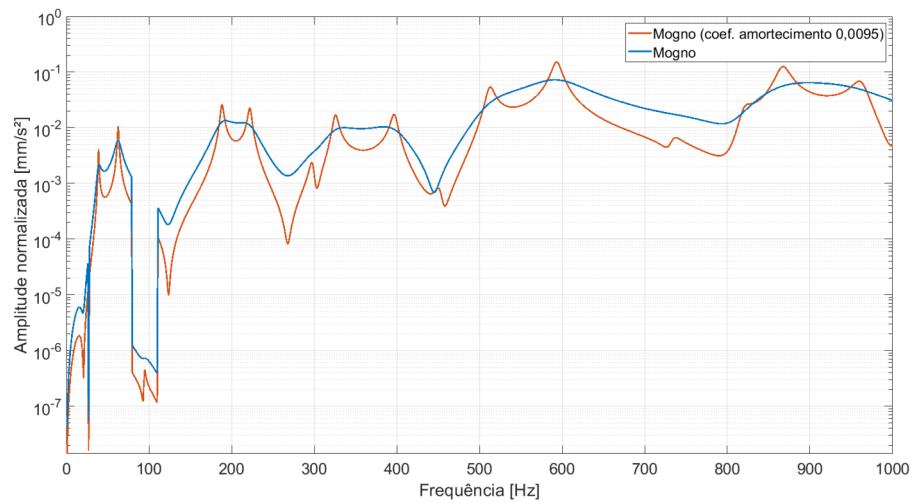
Figura 56 - Curvas de decaimento das quatro madeiras e Mogno com coeficiente de amortecimento de 0,0095



Fonte: Autoria própria (2022)

Pode-se ver, também, a influencia desse parâmetro na resposta em frequência, mostrado na Figura 57.

Figura 57 - Resposta em frequência do Mogno para dois coeficientes de amortecimento diferentes



Fonte: Autoria própria (2022)

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho proporcionou a oportunidade de realizar um estudo numérico da dinâmica de uma guitarra elétrica de corpo sólido. Trabalho este, que pode ser o ponto inicial de trabalhos futuros que venham para expandir ou aprofundar a temática aqui estudada. A teoria estudada possibilitou que os autores definissem o que é uma guitarra elétrica de corpo sólido, bem como permitiu entender os seus principais componentes, suas funções, importância e a relação entre si. O estudo das espécies de madeiras comerciais comumente usadas na fabricação de guitarras, tal como das espécies nativas brasileiras com potencial de uso, foi uma atividade que demandou tempo dos autores para entender e buscar informações corretas e confiáveis de um material com comportamento diferente do que habitualmente se tem contato no curso de engenharia. A madeira é um material ortotrópico. Além disso, o estudo evidenciou para os autores a existência de uma escassez, do ponto de vista de propriedades mecânicas, de informações para as madeiras nativas, o que impossibilitou um desejo inicial de analisar numericamente guitarras com madeiras nativas. Há, também, certa dificuldade em encontrar informações específicas de madeiras comercialmente usadas na construção de guitarras, como por exemplo o coeficiente de amortecimento. Os conhecimentos adquiridos durante a graduação puderam ser aprimorados e colocados em prática na realização da simulação por elementos finitos e ajudaram a alcançar os objetivos propostos neste trabalho.

O estudo de quais análises seriam feitas e de como seriam realizadas no software Ansys foi a atividade que mais exigiu tempo dos autores. Destaque-se a realização da análise transiente como um dos maiores desafios do trabalho, pois são poucas as informações encontradas desse módulo do Ansys que podem ser comparadas com o presente estudo.

Após a realização das análises com os quatro tipos de madeiras, foi possível verificar que as amplitudes máximas de resposta ocorrem em frequências diferentes, ou seja, tanto os modos de vibrar como as frequências de ressonância ocorrem em frequências diferentes da madeira. Isso pode ser um parâmetro importante para um guitarrista que pretende atingir algum efeito sonoro na guitarra em certas notas musicais.

Foi possível verificar, também, que os parâmetros de rigidez e densidade têm pouca influência no resultado de tempo de reverberação. Para alcançar um resultado mais satisfatório neste tema, a equipe de projetos carece de informações a respeito do coeficiente de amortecimento das madeiras utilizadas. Considerando a literatura lida, a equipe sugere que sejam feitos ensaios laboratoriais das diferentes madeiras testadas para obtenção desta propriedade.

A análise realizada buscou comparar a influência da madeira no comportamento dinâmico de uma guitarra elétrica de corpo sólido. Para a obtenção de resultados cada vez mais fiéis aos resultados laboratoriais, a equipe sugere que seja feito um estudo para verificar a influência dos tipos de ligação entre braço e corpo nos modos de vibrar. Além disso, considerar a criação da interface interna da guitarra, com os elementos eletrônicos e espaços vazios, o que é um desafio para a representação numérica do modelo.

Tendo em mente os objetivos traçados para execução deste trabalho, é possível afirmar que a equipe obteve com êxito a função transferência de uma guitarra elétrica, podendo comparar os diferentes resultados da mesma, considerando as premissas e simplificações já citadas. Para tanto, a equipe atingiu todos os objetivos específicos relacionados no capítulo 1.3.1 deste trabalho.

REFERÊNCIAS

3422763. **GUITAR Acoustic Music**: Free photo on Pixabay. Free photo on Pixabay. 2017. Disponível em: <https://pixabay.com/photos/guitar-acoustic-music-2751125/>. Acesso em: 12 nov. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

BAQERSAD, Javad et al. Comparison of modal parameters extracted using MIMO, SIMO, and impact hammer tests on a three-bladed wind turbine. In: **Topics in Modal Analysis II**, Volume 8. Springer, Cham, 2014. p. 185-197.

BATTY, Philip. **What is the difference between Roundwound and Flatwound bass strings**: quora. Quora. 2016. Disponível em: <https://www.quora.com/What-is-the-difference-between-Roundwound-and-Flatwound-bass-strings>. Acesso em: 12 nov. 2021.

BEZANGER, Jeremy. **Statue of a woman holding a book photo**: free vienna image on unsplash. Free Vienna Image on Unsplash. 2021. Disponível em: <https://unsplash.com/photos/-WpnS-VT9aI>. Acesso em: 22 nov. 2021.

BUY Holmer Guitar Fret Wires 2.9mm 22 Frets Stainless Steel Fretwire Compatible with Fender Electric Guitar Bass Guitar Fingerboard Replacement: Online in Hungary. B07ZK894V6. **Online in Hungary**. B07ZK894V6. 2021. Disponível em: <https://www.ubuy.hu/en/product/FGULPLG-holmer-guitar-fret-wires-2-9mm-22-frets-stainless-steel-fretwire-compatible-with-fender-electric-gui>. Acesso em: 13 nov. 2021.

CHEVRIER, André Augustin. **Harpo-lyre**. 2021. Disponível em: <https://www.metmuseum.org/art/collection/search/503435>. Acesso em: 22 nov. 2021.

CHING. **Lute (by Princess Ruto, 2013-02-11)**. 2013. Disponível em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lute_\(by_Princess_Ruto,_2013-02-11\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lute_(by_Princess_Ruto,_2013-02-11).jpg). Acesso em: 22 nov. 2021.

CARAVEO, Saulo Christ; CHADA, Sonia. Quatro décadas de guitarrada: a configuração de um movimento musical pós-moderno no Pará. **OPUS**, [s.l.], v. 25, n. 3, p. 336-356, nov. 2019. ISSN 15177017. Disponível em: <<https://www.anppom.com.br/revista/index.php/opus/article/view/opus2019c2515>>. Acesso em: 24 out. 2021. doi:<http://dx.doi.org/10.20504/opus2019c2515>.

CELEP, Zekai; BAŽANT, Zdeněk P. Spurious reflection of elastic waves due to gradually changing finite element size. **International journal for numerical methods in engineering**, v. 19, n. 5, p. 631-646, 1983.

DAGANI, Mary. The Rule of 18: It's Something to Fret About. 2017. Disponível em: <https://artsintegration.com/2017/05/01/rule-18-nothing-fret/>. Acesso em: 06 nov. 2021.

DENYER, Ralph et al. The guitar handbook. Alfred A. Knopf, 1992.

Dhgate.Com. Frete Grátis Zebra Madeira TI Guitarra Corpo Um Pedaço Corpo De Madeira Sem Pintura, BRAND Melhor Qualidade E Preço Mais Baixo]. 2021. Disponível em: <https://pt.dhgate.com/product/zebra-wood-tl-guitar-body-one-piece-wood/487769084.html>. Acesso em: 24 mai. 2022.

DURR, Grant. **Brown and black acoustic guitar photo**: free cape town image on unsplash. Free Cape town Image on Unsplash. 2021. Disponível em: https://unsplash.com/photos/mfRxi6_dUcs. Acesso em: 11 nov. 2021.

E-HOME RECORDING STUDIO. **GUITAR Strings 101**: _ The Definitive Guide For Acoustic_Electric. _ The Definitive Guide For Acoustic_Electric. Disponível em: <https://ehomerecordingstudio.com/best-guitar-strings/>. Acesso em: 12 nov. 2021.

Electric Herald. **Fender Stratocaster Guitar Templates**, 2020. Disponível em: <https://www.electricherald.com/fender-stratocaster-templates/>. Acesso em: 08 abr. 2022.

FENDER. **PRIDE Music Funclub**: Fender - GUITARRA FENDER 60 STRATOCASTER NOS 923-0700-300 3-COLOR SUNBURST.html. Fender - GUITARRA FENDER 60 STRATOCASTER NOS 923-0700-300 3-COLOR SUNBURST.html. Disponível em: <https://www.fender.com.br/produto/10171223/guitarra-fender-60-stratocaster-nos-923-0700-300-3-color-sunburst>. Acesso em: 12 nov. 2021.

FENDER, L. C. **Tremolo device for stringed instruments**. Depositante: United States Patent Office. EUA n. 2741146. Depósito: 30 ago. 1954. Concessão: 10 abr. 1956.

FERNANDES, Gustavo de Amorim. **Avaliação de Madeiras Brasileiras Para Utilização em Guitarras Elétricas**. 2004. 41 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Florestal, Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

FLEISCHER, Helmut. Vibration of an electric bass guitar. **Acta Acustica united with Acustica**, v. 91, n. 2, p. 247-260, 2005.

FOREST PRODUCTS LABORATORY (US). Wood handbook: wood as an engineering material. The Laboratory, 2021.

GALANTE, Rafael Benvindo Figueiredo. **Da cupóia da cuíca: a diáspora dos tambores centro-africanos de fricção e a formação das musicalidades do Atlântico Negro (Sécs. XIX e XX)**. 2015. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

GIBSON. **'57 Les Paul Custom**. 2018. Disponível em: <http://legacy.gibson.com/Products/Electric-Guitars/2018/Custom/Historic-57-Les-Paul-Custom.aspx>. Acesso em: 11 out. 2021.

GIBSON. **Gibson Les Paul Supreme**. 2010. Disponível em: <https://legacy.gibson.com/Products/Electric-Guitars/Les-Paul/Gibson-USA/Les-Paul-Supreme/Neck-and-Headstock.aspx>. Acesso em: 11 out. 2021.

HOME, Connor. **Brown Fender guitar headstock on white surface photo**: free guitar image on unsplash. Free Guitar Image on Unsplash. 2019. Disponível em: <https://unsplash.com/photos/xMQzS8jCUrY>. Acesso em: 10 nov. 2021.

IBÁÑEZ-ARNAL, Manuel; DOMÉNECH-BALLESTER, Luis; SÁNCHEZ-LÓPEZ, Fernando. A Study of the Dynamic Response of Carbon Fiber Reinforced Epoxy (CFRE) Prepregs for Musical Instrument Manufacturing. **Applied Sciences**, [S.L.], v. 9, n. 21, p. 4615-4628, 30 out. 2019. MDPI AG.
<http://dx.doi.org/10.3390/app9214615>.

IMAI, Toshiyuki. **Mandolin**. 2021. Disponível em:
<https://www.flickr.com/photos/matsuyuki/4992964318/>. Acesso em: 22 nov. 2021.

KOCH, Martin. Building Electric Guitars: how to make solid-body, hollow-body and semi-acoustic electric guitars and bass guitars. 2. ed. [S. L.]: Koch Verlag, 2001.

LANG, William, LANG, William A. TUNING. PEG. Depositante: United States Patent Office. EUA n. 566776. Depósito: 21 set. 1895. Concessão: 01 set. 1896.

LAZARINE, Nicholas. **Shallow focus photography black Gibson guitar headstock photo**: free guitar image on unsplash. Free Guitar Image on Unsplash. 2018. Disponível em: <https://unsplash.com/photos/kCvMDohzT1g>. Acesso em: 11 nov. 2021.

LONGOMBE. **Pluriarc**. 2006. Disponível em:
<http://music.africamuseum.be/instruments/english/congo%20drc/longombe.html>. Acesso em: 22 nov. 2021.

MADEIRA, Bruno; SCARDUELLI, Fabio. Ampliação da técnica violonística de mão esquerda: um estudo sobre a pestana. **Per Musi**, p. 182-188, 2013.

MCCLELLAND, Ray. **What is a Floyd Rose**: guitarguitar. guitarguitar. 2021. Disponível em: <https://www.guitarguitar.co.uk/news/141361>. Acesso em: 12 nov. 2021.

MEYER, Luis. **Como o confinamento da pandemia salvou um dos ícones do rock**: gibson, recém-resgatada da falência, foi a grande beneficiada pela maior demanda por violões e guitarras durante a pandemia de covid-19. Gibson, recém-resgatada da falência, foi a grande beneficiada pela maior demanda por violões e guitarras durante a pandemia de covid-19. 2021. Disponível em:
<https://brasil.elpais.com/economia/2021-06-18/como-a-covid-19-salvou-um-dos-icones-do-rock.html>. Acesso em: 11 out. 2021.

MORE, Ajay. **Electric Guitar Market 2021-2025, Worldwide Industry Growing at a CAGR of 5.02% and Industry Size will reach 1629 Million USD in 2025**. 2021. Disponível em: <https://www.ktnv.com/story/44013378/electric-guitar-market-2021-2025-worldwide-industry-growing-at-a-cagr-of-502-and-industry-size-will-reach-1629-million-usd-in-2025>. Acesso em: 16 out. 2021.

NORMAN'S RARE GUITARS. Richie Sambora and Orianthi shops at Norman's Rare Guitars. Intérpretes: Richie Sambora, Orianthi Shops. Los Angeles: Norman's Rare Guitars, 2015. (8.8 min.), son., color. **YouTube**. Disponível em:
<https://www.youtube.com/watch?v=PBwsV4qlbsM>. Acesso em: 22 out. 2021.

- Orianthi Shops. Los Angeles: Norman's Rare Guitars, 2015. (8.8 min.), son., color. **YouTube.** Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=PBwsV4qlbsM>. Acesso em: 22 out. 2021.
- PAIVA, G.; DOS SANTOS, J. M. C. Modal analysis of a Brazilian guitar body. In: **Proceedings of the ISMA International Symposium on Music Acoustics**. 2014. p. 233-239.
- PATÉ, Arthur et al. A vibro-acoustical and perceptive study of the neck-to-body junction of a solid-body electric guitar. In: **Acoustics 2012**. 2012.
- RAO, S. Vibrações Mecânicas. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- RAUCHWOLFF, Sixtus. **Lute.** 2016. Disponível em: <https://www.metmuseum.org/art/collection/search/500554>. Acesso em: 22 nov. 2021.
- RAY, Tony; KALJUN, Jasmin; STRAŽE, Aleš. Comparison of the Vibration Damping of the Wood Species Used for the Body of an Electric Guitar on the Vibration Response of Open-Strings. **Materials**, v. 14, n. 18, p. 5281, 2021.
- RAWA, Łukasz. **Brown and black acoustic guitar photo:** free warszawa image on unsplash. Free Warszawa Image on Unsplash. 2021. Disponível em: <https://unsplash.com/photos/I-NHhR-p5lg>. Acesso em: 12 nov. 2021.
- REDDY, Junuthula Narasimha. Introduction to the finite element method. McGraw-Hill Education, 2019.
- SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **LPF:** laboratório de produtos florestais. Laboratório de Produtos Florestais. 2021. Disponível em: <https://lpf.florestal.gov.br/pt-br/madeiras-brasileiras>. Acesso em: 10 nov. 2021.
- STRANGE, Benjamin. **Making a guitar nut from scratch:** strange guitarworks. Strange Guitarworks. 2013. Disponível em: <https://www.strangeguitarworks.com/guitar-nut-from-scratch/>. Acesso em: 12 nov. 2021.
- TAGIMA. **T-900.** 2021. Disponível em: <https://tagima.com.br/detalhe.php?cod=5f64df728d02d>. Acesso em: 10 nov. 2021.
- TROUCHELLE, Serguei. **File_AX Music Man Bongo 5 Head Rear:** wikimedia commons. Wikimedia Commons. 2010. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AX_Music_Man_Bongo_5_Head_Rear.jpg. Acesso em: 12 nov. 2021.
- VANZELA, Aleksander; TROMBINI, Leandro Mesquita. Características timbrísticas entre guitarras elétricas de corpos sólidos e semi-sólidos. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, v. 11, n. 2, p. 407-419, 2013.
- WEBER, Johannes. **Blue and brown acoustic guitar photo:** free guitar image on unsplash. Free Guitar Image on Unsplash. 2021. Disponível em: <https://unsplash.com/photos/DPu2f60MihA>. Acesso em: 11 nov. 2021.

ZORIC, A.; KALJUN, J. THE INFLUENCE OF THE ACOUSTIC PROPERTIES OF WOOD FOR THE PRODUCTION OF ELECTRIC SOLID BODY GUITARS. **DAAAM International Scientific Book**, 2018.

ZOLLNER, Manfred. Physics of the Electric Guitar. Regensburg: **Gitec**, 2019. 1236 p. Tradução de: Tilmann Zwicker. Disponível em:
<https://www.gitec-forum-eng.de/the-book/>. Acesso em: 23 out. 2021.

Von Hornbostel, E. M., & Sachs, C. (1961). Classification of Musical Instruments: Translated from the Original German by Anthony Baines and Klaus P. Wachsmann. **The Galpin Society Journal**, 14, 3. doi:10.2307/842168.