



UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – DEM
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ANÁLISE DINÂMICA EXPERIMENTAL
E COMPUTACIONAL DA ESTRUTURA
DO TAMPO DE UM VIOLÃO
ARTESANAL**

VÍTOR DE CÓRDOVA MACHADO

JOINVILLE, SC
2019

VÍTOR DE CÓRDOVA MACHADO

**ANÁLISE DINÂMICA EXPERIMENTAL E COMPUTACIONAL DA ESTRUTURA
DO TAMPO DE UM VIOLÃO ARTESANAL**

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Medeiros

JOINVILLE, SC

2019

VÍTOR DE CÓRDOVA MACHADO

**ANÁLISE DINÂMICA EXPERIMENTAL E COMPUTACIONAL DA ESTRUTURA
DO TAMPO DE UM VIOLÃO ARTESANAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso (TCCOOOI) do Curso de Engenharia Mecânica, do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Banca Examinadora:

Orientador:



Prof. Dr. Ricardo de Medeiros
UDESC/CCT

Membros:



Prof. Dr. Eduardo Lenz Cardoso
UDESC/CCT



Me. Douglas Negri
SENAI/Joinville

Joinville, 05 de julho de 2019.

AGRADECIMENTOS

Sem hesitar, o maior sentimento de gratidão é em relação aos meus pais Isaac e Iara. Eles, que proporcionaram ao longo de toda minha vida, boas condições para estudar, qualidade de vida e por todo o amor que me deram. A eles e meus irmãos agradeço por ser uma pessoa feliz.

Novamente ao meu pai, que possibilitou a fabricação dos instrumentos em sua oficina de hobby, por me ensinar a utilizar as ferramentas, por financiar grande parte dos materiais utilizados e me por estimular.

À minha irmã Fernanda por me ensinar a superar as dificuldades e angústias e pela grande amizade e ao meu irmão Felipe por ser uma inspiração nos estudos.

Agradeço à minha namorada Milena Moser pelo entusiasmo compartilhado, pelo companheirismo e pelo carinho.

Obrigado os amigos da Atlética CCT e Apurados que acompanharam e suportaram minha jornada pela faculdade e a tantos outros que tenho grande apreço. Ao Renan Fereli por me introduzir às vibrações e por todo o conhecimento passado e ao Cassiano Herzer pela parceria.

Ao Mateus Comel da Comel Guitars, por me ensinar a arte da luteria, por disponibilizar seu tempo, oficina e pelas dicas fundamentais para a realização de muitas das etapas de construção dos violões.

À Embraco, onde aprendi muito do que foi aplicado neste trabalho, especialmente ao Guilherme Espíndola e ao Andrey Hense pelas inúmeras e cautelosas explicações. Também agradeço aos técnicos do laboratório de vibrações e acústica pelos ensinamentos de experimentação e interpretação.

Aos alunos do LAMEC pelas preciosas dicas e ao professor Ricardo de Medeiros pela boa orientação no sentido literal da palavra.

Aos bolsistas que ajudaram com os experimentos, em especial, a João Rosso que forneceu um grande suporte à realização da análise modal e companhia durante as várias e longas tardes de interação entre devaneios, discussões e troca de conhecimentos.

Sou profundamente grato a todos que, de uma forma ou outra, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Tendências mundiais para substituição de madeiras tradicionais ameaçadas de extinção têm incentivado o estudo de espécies alternativas para a fabricação de instrumentos musicais. O Brasil lança-se à frente devido à grande biodiversidade e renome no mercado madeireiro, ao passo em que estudos discutem possíveis substitutos para a aplicação. Este trabalho apresenta uma proposta de utilização da madeira do Pinho Paranaense (araucária *angustifolia*) como material substituto ao abeto (*picea abies*) na fabricação de tampos de violão com cordas de aço. Dois violões idênticos, exceto pelo material tampo, fabricados artesanalmente são comparados desde a caracterização das propriedades físicas e mecânicas das matérias primas, às características vibracionais do violão como um todo por métodos experimentais de análise modal e modelo de elementos finitos. As técnicas utilizadas servem de base para estudos futuros que podem ajudar os fabricantes a buscar novos critérios e métodos para seleção dos materiais e geometrias sem a necessidade de reproduzir um modelo experimental para prever suas características. Os resultados sugerem que o material proposto seja uma boa alternativa para a substituição dos materiais convencionalmente utilizados na fabricação do violão.

Palavras-Chave: Violão, Análise modal, Araucária, Pinho Paranaense, Abeto.

ABSTRACT

Worldwide tendencies for traditional threatened wood substitution have encouraged the study on alternative species for musical instruments building. Brazil have a headstart due to its great biodiversity and renown in the timber market while studies discuss feasible substitutes for the application. This paper presents a proposal of use of the parana pine (*araucaria angustifolia*) as substitute for spruce (*picea abies*) for the top plate wood on steel strings acoustic guitars. Two identical handcrafted guitars, except for the top wood, are compared since the characterization of its material physical and mechanical properties as well as the vibrational characteristics of the guitar as a whole through experimental and numerical modal analysis. The techniques used serve as a basis for future studies that can help guitar manufacturers to pursue new criteria and methods for selecting woods without the need to reproduce the experimental model in order to predict its characteristics. The results suggest that the proposed material could be a good alternative for the conventional materials used in guitar building.

Keywords: Acoustic guitar, Modal analysis, Araucária, Parana pine, Spruce.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Eixos principais da madeira em relação à direção das fibras.....	30
Figura 2.2 – Tipos de corte do tronco.....	30
Figura 2.3 – Partes externas de um violão.....	33
Figura 2.4 – Partes internas de um violão	33
Figura 2.5 – Primeiro modo flexional do violão	37
Figura 2.6 – Segundo modo (modo de respiração).....	37
Figura 2.7 – Terceiro e quarto modos, respectivamente	38
Figura 2.8 – Quinto modo de vibração e segundo de flexão	39
Figura 2.9 – Sexto modo de vibração do violão	39
Figura 2.10 – Sétimo modo de vibração do violão.....	40
Figura 2.11 – Oitavo modo de vibração do violão	40
Figura 2.12 – Nono e décimo modo de vibração do violão, respectivamente.....	41
Figura 2.13 – Décimo primeiro de vibração do violão.....	41
Figura 2.14 – Fluxograma do processo de análise de elementos finitos.	45
Figura 3.1 – Projeto do violão modelo Martin 00	50
Figura 3.2 – Planificação das faces de colagem do fundo.....	52
Figura 3.3 – Fixação e colagem das lâminas do fundo do violão.....	53
Figura 3.4 – Barras para as estruturas internas.....	54
Figura 3.5 – Lâminas das laterais pressionadas sobre o molde.....	55
Figura 3.6 – Silhueta do violão definida	55
Figura 3.7 – Colagem das estruturas ao fundo na estante de colagem sobre os discos abaulados	56
Figura 3.8 – Adorno em volta da boca do instrumento	57
Figura 3.9 – Conjunto do tampo após colagem e aplicação do óleo	58
Figura 3.10 – Rebaixo para assentamento das estruturas e pressionamento das laterais sobre o molde	58
Figura 3.11 – Fundo incorporado às laterais e adorno	59
Figura 3.12 – Caixa acústica fechada	59
Figura 3.13 – Escala em três etapas de sua confecção	60
Figura 3.14 – Resultado do corte e colagem em ângulo	61

Figura 3.15 – Braço com tensor e escala	61
Figura 3.16 – Braço sendo esculpido.....	62
Figura 3.17 – Braço sendo esculpido.....	62
Figura 3.18 – Cavalete com o rastilho alojado	63
Figura 3.19 – Violões prontos para serem montados.....	64
Figura 3.20 – Ajuste final e encordoamento do violão.....	64
Figura 3.21 – Aparato para medição e tela inicial	65
Figura 3.22 – Marcação dos pontos de medição no violão.....	67
Figura 3.23 – Configuração experimental para a condição de contorno livre-livre	68
Figura 3.24 – Tela de medição no software Pulse LabShop.....	69
Figura 3.25 – Janelamento do sinal do acelerômetro.....	70
Figura 3.26 – Janelamento do sinal do martelo	70
Figura 3.27 – Seleção dos modos	71
Figura 3.28 – Geometria das estruturas externas e internas em 3D.....	72
Figura 3.29 – Malha gerada antes da simplificação da geometria.....	74
Figura 3.30 – Malha gerada após a simplificação da geometria.....	74
Figura 3.31 – Malha dos componentes internos	74
Figura 4.1 – Comparação entre as FRFs experimentais	79
Figura 4.2 – AutoMAC para o modelo experimental em pinheiro.....	80
Figura 4.3 – AutoMAC para o modelo experimental em abeto.....	81
Figura 4.4 – CrossMAC entre os modelos experimentais	81
Figura 4.5 – Primeiro modo numérico. Modo de flexão.....	83
Figura 4.6 – Segundo modo numérico. Modo de “respiração”.....	83
Figura 4.7 – Terceiro modo numérico	83
Figura 4.8 – Quarto modo numérico.....	83
Figura 4.9 – Quinto modo numérico.....	84
Figura 4.10 – Sexto modo numérico.....	84
Figura 4.11 – AutoMAC para o modelo numérico em Abeto	84
Figura 4.12 – AutoMAC para o modelo numérico em Pinheiro.....	85
Figura 4.13 – CrossMAC para os modelos numéricos	85
Figura 4.14 – CrossMAC entre os modelos experimentais e numérico para o abeto.....	86
Figura 4.15 – CrossMAC entre os modelos experimentais e numérico para o Pinheiro.....	86
Figura 6.1 – Forma modal do primeiro modo experimental.....	93
Figura 6.2 – Forma modal do segundo modo experimental	93

Figura 6.3 – Forma modal do terceiro modo experimental	94
Figura 6.4 – Forma modal do quarto modo experimental	94
Figura 6.5 – Forma modal do quinto modo experimental	94
Figura 6.6 – Forma modal do sexto modo experimental.....	95
Figura 6.7 – Forma modal do sétimo modo experimental	95
Figura 6.8 – Forma modal do oitavo modo experimental	95
Figura 6.9 – Forma modal do nono modo experimental	96
Figura 6.10 – Forma modal do décimo modo experimental	96
Figura 6.11 – Forma modal do décimo primeiro modo experimental.....	96
Figura 6.12 – Forma modal do décimo segundo modo experimental	97
Figura 6.13 – Forma modal do décimo terceiro modo experimental	97
Figura 6.14 – Forma modal do décimo quarto modo experimental	97
Figura 6.15 – Forma modal do décimo quinto modo experimental	98
Figura 6.16 – Forma modal do décimo sexto modo experimental	98
Figura 6.17 – Forma modal do décimo sétimo modo experimental.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Frequências das cordas de um violão em afinação padrão	34
Tabela 3.1 – Propriedades das madeiras	66
Tabela 4.1 – Frequências e amortecimentos experimentais	80
Tabela 4.2 – Frequências dos seis primeiros modos numéricos	82
Tabela 4.3 – Comparação entre frequências experimentais e numéricas para a mesma forma modal	86

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	23
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	23
1.2 MOTIVAÇÃO	24
1.3 OBJETIVOS	25
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	25
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
2.1 MADEIRAS.....	27
2.1.1 Grã.....	27
2.1.2 Textura.....	28
2.1.3 Desenho	28
2.1.4 Cor.....	29
2.1.5 Anisotropia	29
2.1.6 Tipos de Corte	30
2.2 VIOLÃO	31
2.2.1 Caixa Acústica.....	31
2.2.2 Braço, Mão e Escala.....	32
2.2.3 Cordas e Trastes.....	34
2.3 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO	34
2.3.1 Luthieria	35
2.4 VIBRAÇÕES	35
2.5 ANÁLISE MODAL.....	36
2.5.1 Modos de Vibração	36
2.5.2 Modos em Violões	37
2.6 TRANSFORMADA DE FOURIER	42
2.6.1 Transformada Rápida de Fourier	42
2.7 MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	43
2.8 COEFICIENTE DE POISSON	43
2.9 MÉTODOS DINÂMICOS (ENSAIO MECÂNICO NÃO DESTRUTIVO)	44
2.9.1 Técnica de Excitação por Impulso	44
2.10 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (FEM)	44

2.10.1	Formulação para análise modal estrutural.....	46
2.11	CRITÉRIO DE GARANTIA MODAL (MAC)	47
2.11.1	Forma de apresentação	47
2.11.2	AutoMAC e CrossMAC	48
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	49
3.1	FABRICAÇÃO DOS INSTRUMENTOS	49
3.1.1	Seleção das Madeiras	50
3.1.2	Preparação das Madeiras	51
3.1.3	Preparação das Estruturas	53
3.1.4	Definição da silhueta	54
3.1.5	Fabricação do Fundo.....	56
3.1.6	Fabricação do Tampo	57
3.1.7	Fechamento da Caixa Acústica	58
3.1.8	Confecção da Escala.....	60
3.1.9	Construção e Fixação do Braço.....	60
3.1.10	Fabricação e Fixação do Cavalete.....	63
3.1.11	Acabamento e Montagem	63
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	65
3.2.1	Ensaio dos corpos de prova	66
3.3	ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL.....	66
3.3.1	Instrumentação	67
3.3.2	Configuração.....	68
3.3.3	Medições	68
3.3.4	Janelamento	69
3.3.5	Gatilho	71
3.3.6	Pós-processamento	71
3.4	SIMULAÇÃO NUMÉRICA	72
3.4.1	Elaboração do modelo.....	72
3.4.2	Simplificação de geometria.....	73
3.4.3	Malha.....	73
3.4.4	Conexões.....	75
3.4.5	Ajustes de análise.....	75
3.4.6	Pós-processamento	75
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	79
4.1	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	79

4.1.1	Violão de Pinheiro.....	80
4.2	RESULTADOS NUMÉRICOS	82
4.3	COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS	85
5	CONCLUSÕES.....	87
5.1	EXPERIMENTAL.....	87
5.2	MÉTODO NUMÉRICO	88
5.3	COMPARATIVO	89
5.4	CRITÉRIOS SUBJETIVOS	89
5.5	FONTES DE INCERTEZA	90
5.5.1	Fabricação	90
5.5.2	Materiais	90
5.5.3	Análise modal	91
5.5.4	Espaço Amostral	91
5.5.5	Modelo Numérico.....	91
5.6	TRABALHOS FUTUROS	92
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99

1 INTRODUÇÃO

Segundo Wegst (2006), as madeiras possuem características mecânicas, acústicas e estéticas que lhes tornam um material de alto padrão para diversas aplicações. Por meio de observação de resultado de sucessivas tentativas ou por identificação de parâmetros mecânicos específicos, as espécies de madeiras mais adequadas são correntemente selecionadas para a fabricação de instrumentos musicais.

Devido à proximidade de algumas propriedades de algumas espécies de madeira em relação às de uso tradicional, é possível considerar a substituição do material por opções alternativas. É esperado que a substituição tenha pequeno impacto na qualidade acústica e estética do instrumento (PORTELA, 2014).

Embora seja inevitável uma alteração na identidade sonora do violão, este fator conhecido como timbre é uma mera questão de preferência do observador. O timbre é uma característica subjetiva do som que possibilita diferenciar dois sons de mesma frequência e amplitude iguais e resulta da correlação subjetiva das propriedades do som que não influenciam diretamente na sensação de intensidade e altura (HENRIQUE, 2007).

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

As madeiras brasileiras são mundialmente conhecidas por sua qualidade estética, estrutural e acústica e são exploradas desde o descobrimento do Brasil com vasta utilização na indústria moveleira, arquitetônica e em instrumentos musicais (CABRAL, 2018). Em decorrência da ausência de legislação para o corte e extração, algumas espécies brasileiras de árvores tornaram-se cada vez mais escassas e passaram a apresentar risco de extinção tendo seu corte e comércio mundialmente monitorado, como aconteceu com o Pau-brasil (*caesalpinia echinata*), muito utilizado para arcos de violino, tintura e móveis, e o Jacarandá-da-Bahia (*dalbergia nigra*) em instrumentos musicais e móveis.

Embora estas madeiras apresentem ótimas características para a fabricação de violões, não suprem a necessidade exigida pelos músicos em todas as partes do instrumento. A parte do instrumento responsável pela transmissão do som, o tampo, deve ser leve e flexível ao mesmo

tempo em que seja estável e resistente para suportar a tensão das cordas e vibrar por um longo período.

As madeiras utilizadas para esta aplicação são, em geral, provenientes de árvores de regiões de clima frio em que o espaçamento entre os anéis de crescimento é pequeno e demorado (BOGDANOVICH, 2007). Tradicionalmente utiliza-se o abeto, incidente no norte europeu e nas regiões norte-americanas, e o Cedro Canadense.

Devido à tradição de escolha madeiras, mais de 70 espécies de árvores encontram-se ameaçadas de extinção e cada vez mais difíceis de utilizar suas fontes. Desafios para encontrar materiais substitutos compatíveis com as madeiras na fabricação de instrumentos musicais têm se mostrado em alta (BEATTIE, 2009).

Segundo Bogdanovich (2007), o tampo do violão é o elemento mais importante na produção do som de um violão e cada construtor tem seu próprio critério sobre quais características definem um tampo de boa sonoridade. Como a percepção do som é diferente para cada ouvinte, o conceito de um som ideal é subjetivo.

1.2 MOTIVAÇÃO

O Brasil possui vasta flora, embora uma pequena parte da mesma tenha sido estudada como material de construção para instrumentos musicais, há registros de características de grande parte delas. Ainda, como as madeiras tradicionais são importadas ou de acesso restrito devido a regulamentações, torna-se interessante buscar novas alternativas em meio ao que há disponível em abundância e variedade.

Portela (2014) estudou as propriedades acústicas da madeira amazônica Marupá para aplicação no tampo de violões de cordas de náilon, caracterizando o material, e comparando-o, numericamente e experimentalmente através das Funções de Reposta em Frequências (FRF's) e formas modais das estruturas, com as tradicionais aplicações do Abeto e Cedro Canadense. A madeira do Pinheiro (*araucaria angustifolia*) pertencendo à mesma ordem do Abeto (*Picea abies*), as coníferas (*coniferae*), apresentam semelhanças como a coloração, densidade e resistência mecânica, sugerindo que sejam madeiras equivalentes do ponto de vista dos resultados de resposta dinâmica.

Diante do exposto, além de estudar uma alternativa mais barata e viável para fabricação de bons instrumentos musicais com matéria prima local, este trabalho servirá como embasamento teórico e experimental para futuros estudos direcionados a otimização estrutural

e processos de fabricação bem como aprofundar conhecimentos de engenharia em um trabalho passível de reprodutibilidade, comparando resultados experimentais com computacionais.

Ainda, o escopo de caráter indisciplinar, com conceitos de materiais compósitos, métodos de elementos finitos, modos de vibração, ensaios mecânicos, ecologia, processos de fabricação e arte abre horizontes para diversas pesquisas e desenvolvimentos.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é estabelecer uma metodologia para o estudo da viabilidade de madeiras alternativas na fabricação de tampos de violão a partir de métodos científicos.

Para tanto, será necessário uma série de etapas preliminares, dentro das quais podemos destacar:

- Realizar uma revisão da literatura sobre os conceitos inerentes ao instrumento, sua fabricação e teoria fundamental para a compreensão do escopo;
- Descrever os processos de fabricação envolvidos na construção de um violão de forma artesanal;
- Aplicação de métodos dinâmicos para caracterização de estruturas de materiais compósitos orgânicos anisotrópicos;
- Caracterização da estrutura do instrumento por meio de análise modal;
- Simulação numérica pelo método de elementos finitos;
- Comparar resultados experimentais com resultados numéricos através do método *Modal Assurance Criterion* (MAC)
- Comparar os resultados experimentais entre os materiais escolhidos pela Função Resposta em Frequência (FRF) e pelo método MAC.
- Analisar o resultado subjetivo da percepção sonora com a variação das madeiras do tampo.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é estruturado para que o leitor tenha embasamento dos conceitos abordados e esteja habituado aos conceitos matemáticos necessários para o entendimento da metodologia

desta pesquisa. Os resultados são apresentados e comparados e, finalmente tomadas conclusões e sugestões para trabalhos futuros. Tal estrutura é dividida da seguinte forma:

- ☑ **Primeiro Capítulo** – contextualização e apresentação dos objetivos.
- ☑ **Segundo Capítulo** – revisão literária dos conceitos físicos e matemáticos de vibrações, definição do material, mecanismo de funcionamento do instrumento, métodos de medição e de comparação.
- ☑ **Terceiro Capítulo** – apresentação dos métodos de fabricação do instrumento, análise dos mesmos, caracterização dos materiais e aplicação do método de elementos finitos.
- ☑ **Quarto Capítulo** – apresentação dos resultados e comparação entre o método experimental e numérico.
- ☑ **Quinto Capítulo** – conclusões, análise de incertezas e sugestões para trabalhos futuros.
- ☑ **Sexto Capítulo** – referências bibliográficas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta o referencial teórico tomado como base para o desenvolvimento das atividades propostas neste trabalho. Conceitos essenciais para a experimentação, análise de dados e execução do experimento são abordados de forma sucinta.

2.1 MADEIRAS

A madeira é um material compósito orgânico sólido com pequenas porosidades que apresenta parede celular e lúmen. Material orgânico, anisotrópico e heterogêneo proveniente de fontes natural, ou seja, sua origem vegetal, das árvores, lhe caracteriza como material renovável. Apresenta propriedades mecânicas distintas conforme a direção e não apresenta uniformidade de densidade e resistência mecânica em todas as regiões de um corpo (VENSON, 2013).

Sua aplicação é ampla e pode ser utilizada como material de construção civil, na indústria moveleira, em instrumentos musicais, acabamento de produtos de alta qualidade e em vários ramos da arte. Embora seja proveniente de uma fonte renovável, é necessário que seu corte seja planejado para minimizar impactos ambientais e perpetuar a espécie, bem como gerar maior aproveitamento possível.

Cor, grã, textura, desenho, odor e sabor são propriedades organoléticas da madeira, que impressionam os órgãos sensoriais e dependem da composição química da madeira, região e clima, idade da árvore e método de corte (MORESCHI, 2014).

2.1.1 Grã

O termo grã (ou fibra) refere-se à orientação geral dos elementos constituintes do lenho em relação ao eixo da árvore ou uma peça de madeira. Esta orientação decorre de diversos fatores em que a árvore é submetida no seu processo de crescimento (MORESCHI, 2014). Alguns dos principais tipos de grã são:

- ☑ *Grã direita ou reta:* Grã considerada normal, apresenta os tecidos axiais orientados paralelamente ao eixo principal da árvore ou peças de madeira. Do ponto de vista estrutural, esta orientação apresenta a maior resistência mecânica e não causa deformações indesejáveis com a secagem da madeira;

- ☑ *Grãos irregulares em espiral*: Grã cujo tecido axial apresenta variação na orientação espiral. Diminuição da resistência mecânica, aumento das deformações de secagem e dificuldade de se obter um bom acabamento superficial são características deste tipo de grã.
- ☑ *Grã entrecruzada*: ocorre quando a direção da inclinação dos elementos axiais se altera durante o período de crescimento da árvore. Este tipo de orientação não reduz significativamente a resistência mecânica da madeira, mas gera deformações de secagem;
- ☑ *Grã ondulada*: os elementos axiais do lenho alteram constantemente suas direções, apresentando-se na madeira como uma linha sinuosa e regular. As consequências para utilização são as mesmas da grã entrecruzada;
- ☑ *Grã inclinada, diagonal ou oblíqua*: Este tipo de grã é caracterizado pelo desvio angular dos elementos axiais em relação ao eixo longitudinal de uma peça de madeira. Quanto maior o desvio das grãs, menor a resistência mecânica e mais acentuada a ocorrência de deformações por efeito de secagem.

2.1.2 Textura

O termo refere-se ao efeito produzido na madeira pelas dimensões, distribuição e porcentagem dos diversos elementos estruturais constituintes do lenho em seu conjunto. Sua classificação de acordo com o grau de uniformidade da madeira pode ser grossa (ou grosseira), em madeira com poros grandes e visíveis a olho nu, parênquima axial abundante ou raios lenhosos grandes (MORESCHI, 2007).

Madeiras de textura fina apresentam vasos de dimensões muito pequenas que se apresentam de forma difusa no lenho, parênquima escasso e tecido fibroso abundante, o que confere à madeira uma superfície homogênea e abundante. A textura média é a situação intermediária entre a textura grossa e a textura fina.

2.1.3 Desenho

Termo usado para descrever a aparência natural das faces da madeira resultante das várias características macroscópicas do cerne, alborno, cor e grã, assim como os anéis de crescimento da madeira. Os desenhos agregam valor estético à madeira, sendo os considerados mais

atraentes provenientes de anormalidades da madeira, como grã irregular, nós, crescimento excêntrico e deposições irregulares de substâncias corantes.

2.1.4 Cor

A cor da madeira é resultante de substâncias corantes depositadas no interior de suas células, bem como impregnadas nas suas paredes celulares. Entre estas substâncias podem-se citar resinas, gomas, derivados tânicos e corantes específicos. A cor da madeira é de grande importância no ponto de vista prático, pela influência que ela exerce sobre seu valor decorativo. Substâncias corantes presentes em altas concentrações na madeira, podem ser extraídas e utilizadas para tingimento.

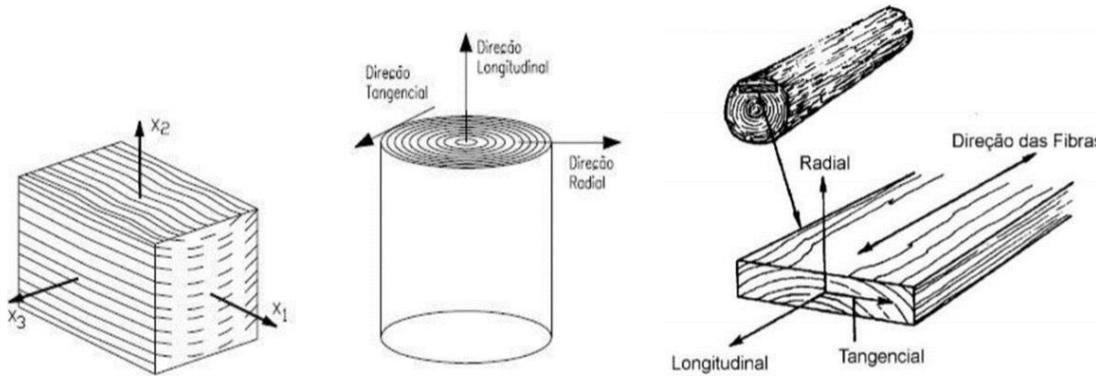
A cor da madeira varia com o teor de umidade e normalmente ela se torna mais escura quando exposta ao ar, pela oxidação das substâncias orgânicas contidas no material lenhoso. Tal efeito é promovido pela elevação da temperatura, como por exposição da madeira a radiação solar ou aquecimento em estufa. Um método de escurecer as madeiras, aumentando seu valor comercial, utiliza-se de um tratamento de corrente contínua de ar quente carregado com ozônio. O processo promove a secagem e envelhecimento artificial da madeira por meio da evaporação da água e oxidação das substâncias presentes no material lenhoso (MORESCHI, 2014).

2.1.5 Anisotropia

Os anéis de crescimento além de registrarem a idade da árvore como já mencionado, também servem de referência para a consideração e o estudo da marcante característica de anisotropia da madeira. A anisotropia é um fenômeno relacionado com as propriedades do material em razão da direção em que se observa. É um dos mais importantes problemas práticos que ocorrem durante a utilização da madeira. É determinante para estabelecer algumas propriedades físicas da madeira, como a estabilidade dimensional, propriedades térmicas, acústicas e mecânicas (SANTOS, 2018).

A madeira apresenta anisotropia da forma ortotrópica, ou seja, possui três principais direções conforme o sentido das fibras, sendo eles: (a) direção tangencial (tangente aos anéis de crescimento); (b) direção radial (na direção dos anéis de crescimento ou na direção da casca ao centro da seção transversal ao tronco); (c) direção longitudinal (no sentido das fibras, ao longo do comprimento da árvore) (SANTOS, 2018). As direções das fibras da madeira são ilustradas na figura 2.1.

Figura 2.1 – Eixos principais da madeira em relação à direção das fibras



Fonte: SANTOS, 2018.

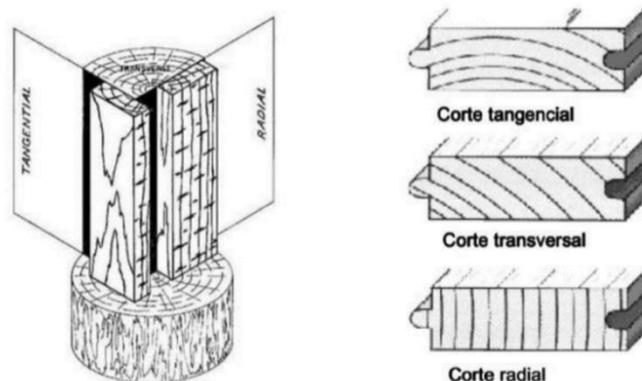
2.1.6 Tipos de Corte

Por se tratar de um organismo composto por células dispostas e organizadas em diferentes sentidos, o aspecto da madeira varia dependendo da face observada. De forma geral existem três tipos de corte de madeira:

- ☑ *Corte radial* é resultante de um seccionamento longitudinal em que divide o tronco da árvore em seções paralelas ao eixo da árvore e perpendicular aos anéis de crescimento. Este tipo de corte visa orientar as grãos paralelas orientadas no sentido longitudinal das peças.
- ☑ *Corte Tangencial* é resultante de um corte longitudinal tangente aos anéis de crescimento e perpendicular aos raios.
- ☑ *Corte transversal* é toda seção resultando do corte da madeira na direção perpendicular ao eixo do tronco.

A Figura 2.2 representa os tipos de corte do tronco da madeira e seu aspecto.

Figura 2.2 – Tipos de corte do tronco



Fonte: SANTOS, 2018.

2.2 VIOLÃO

Os instrumentos de corda funcionam a partir da excitação de cordas bi apoiadas e tensionadas cuja vibração é transmitida a uma caixa de ressonância que amplifica e irradia a vibração do sistema em forma de som (FRENCH, 1995).

O violão é um instrumento musical presente em diversas culturas ao redor do mundo e utilizado na maioria dos gêneros musicais. Este é composto de uma caixa acústica que com a vibração causada por uma perturbação em cordas ancoradas a um braço, desloca o ar em seu interior expulsando-o por um orifício e irradiando energia vibracional na forma de som (KEMPTON, 2002).

As cordas podem ser de náilon, ligas de aço (neste trabalho referidas apenas como aço) ou tripa de animais, sendo a última a forma mais primitiva do instrumento e raramente utilizada nos dias atuais devido à durabilidade e dificuldade de fabricação. Para cada tipo de corda são atribuídos formatos, dimensões e materiais diferentes ao violão sendo o náilon mais largamente utilizado em gêneros como música clássica, *flamenco*, samba e bossa-nova enquanto que as cordas de aço são mais comuns nos estilos *folk*, *rock*, *blues*, *country* e sertanejo embora não haja nenhuma restrição neste quesito.

Para melhor compreensão do escopo deste trabalho, é importante conhecer as partes que compõem um violão, suas funções e propriedades do material utilizado.

2.2.1 Caixa Acústica

Geralmente fabricado em madeira ou laminado de madeira, a caixa acústica tem a função de amplificar e transmitir as vibrações geradas pelas cordas. Também referido como corpo do violão, este varia em formato e dimensões, cada qual apresentando característica sonora diferente.

Para a parte frontal, chamada tampo utiliza-se madeiras de alta relação resistência mecânica por densidade para que se possa ter grandes amplitudes de deslocamento sem colapsar. Juntamente com o formato do corpo é o principal fator que define o som do instrumento e apresenta espessuras entre 1.5 mm em violões com cordas de náilon a 2.5 mm em violões com corda de aço. O tampo conta com uma abertura chamada boca, por onde o volume interno de ar é expelido. Na parte de dentro da caixa encontram-se as barras harmônicas, que têm função estrutural e grande influência na sonoridade do instrumento (CURTU, et al., 2009).

O tampo de um violão geralmente é projetado para ter algumas frequências naturais coincidentes com a frequência das notas do instrumento (FRENCH, 1995).

Definindo a silhueta do violão, há as laterais que possuem formato de oito e quase sempre é fabricado no mesmo material do fundo, que é a parte que oposta ao tampo. A madeira para essa aplicação é preferencialmente dura e com grande valor estético, muitas vezes apresentando tons escuros e veios revesos (CUMPIANO, 1987).

O fundo, laterais e tampo são unidos pelo reengrosso, estrutura segmentada responsável por aumentar a área de contato para colagem das lâminas do tampo e fundo às laterais. Na parte interna também se encontram o tróculo e culatra, ambos responsáveis por unir as laterais. Ainda, o tróculo é responsável por acomodar o encaixe do corpo e do braço.

Afixado sobre o tampo do violão encontra-se o cavalete, que é a parte que segura as cordas ao corpo e transmite suas vibrações para a caixa acústica. A madeira utilizada nesta aplicação é dura, densa e de coloração escura. As cordas são inseridas pelos seus furos e fixadas por pinos cônicos de plástico, madeira ou osso. Sobre o cavalete encontra-se o rastilho, peça de osso responsável por apoiar uma das extremidades das cordas (BOGDANOVICH, 2007).

2.2.2 Braço, Mão e Escala

O braço é a parte que se estende no comprimento do violão e é responsável por sustentar a tensão das cordas enquanto serve de apoio para as mãos do instrumentista. Um bom braço deve ser resistente e estável para que não flexione com a tensão das cordas e não empene com o passar dos anos. Seu formato e comprimento variam de acordo com a preferência do músico (BOGDANOVICH, 2007).

Na ponta do braço, encontra-se a mão que forma um pequeno ângulo com o plano do braço para que as cordas fiquem bem apoiadas sobre a pestana, parte de osso que apoia as cordas em sua outra extremidade. Na mão encontram-se as tarraxas, que são essencialmente manivelas com engrenagens que seguram e tensionam as cordas.

A escala é a parte em que o músico define as notas. Esta é segmentada pelos trastes, onde as cordas apoiam-se quando o instrumentista digita uma nota, variando o comprimento de vibração da corda e, conseqüentemente sua frequência. Os espaçamentos entre os trastes são chamados de casas (FRENCH, 1995).

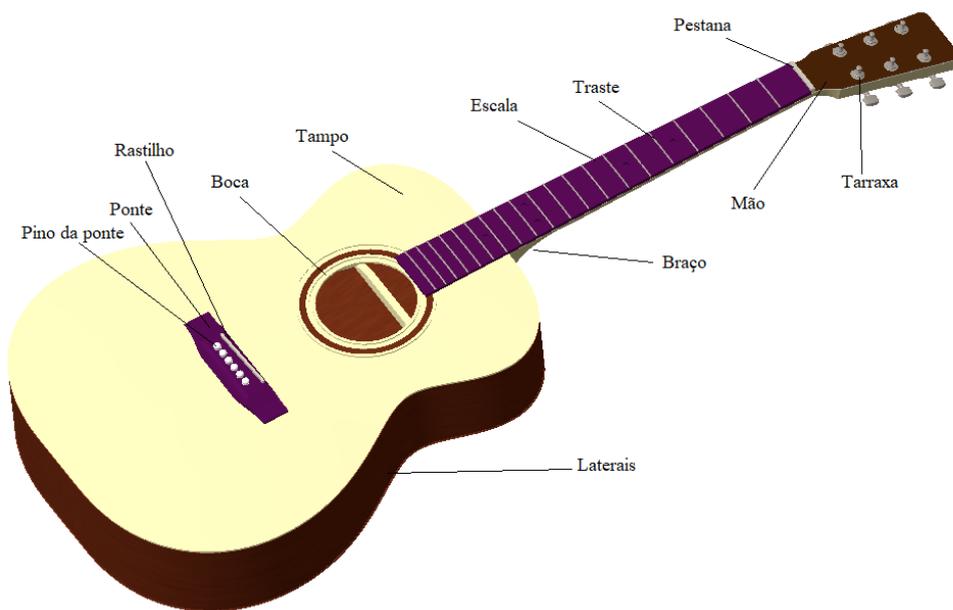
As notas na escala do violão são separadas por semitons e dentro de uma oitava existem doze semitons, de forma que ao pressionar a corda na décima segunda casa, esta tem sua frequência duplicada. Ao aumentar a frequência de qualquer nota por um semitom, a razão entre

as frequências será constante. Ainda, se uma nota com frequência f é elevada em uma oitava e a razão de frequência r , a seguinte relação é verdadeira

$$2f = r^{12}f, \quad (1)$$

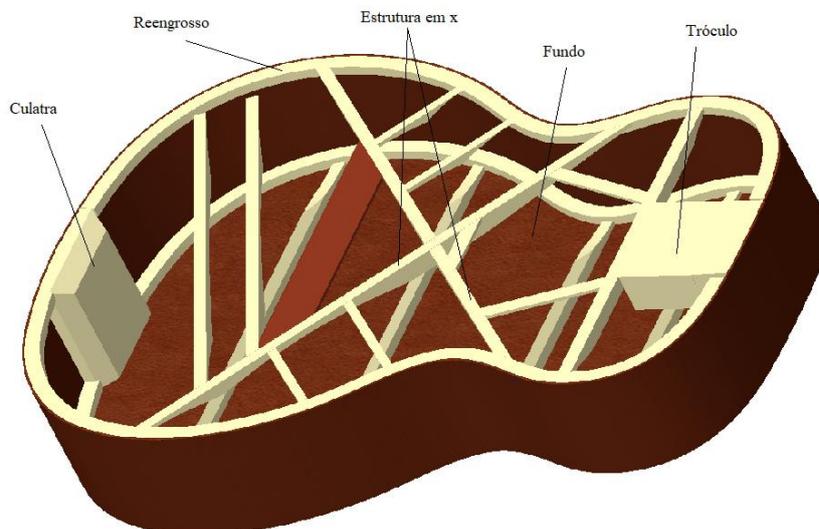
portanto, $r \approx 1.059463$ (FRENCH, 1995). As partes do violão descritas anteriormente estão ilustradas nas Figuras 2.3-2.4.

Figura 2.3 – Partes externas de um violão



Fonte: Produção do Autor, 2019.

Figura 2.4 – Partes internas de um violão



Fonte: Produção do Autor, 2019.

2.2.3 Cordas e Trastes

Embora os componentes do violão com um todo caracterizem sua identidade sonora, ou seja, seu timbre, a resposta em frequência da estrutura é fortemente condicionada pela ação das cordas ao excitarem o tampo. As frequências naturais de uma corda bi-apoiada sob tensão podem ser calculadas precisamente através

$$\omega_n = \frac{n\pi}{L} \sqrt{\frac{T}{\rho}}, \quad (2)$$

em que ω_n é a frequência natural da corda, n um número inteiro, L o comprimento da corda em metros, T a tensão aplicada a esta em newtons e ρ , a densidade linear da corda em kg/m.

Ainda em afinação padrão, cada uma das seis cordas do violão apresenta frequência fundamental conforme a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Frequências das cordas de um violão em afinação padrão

<i>Corda</i>	<i>Nota</i>	<i>Frequência (Hz)</i>
1 ^a	Mi	329.6
2 ^a	Si	246.9
3 ^a	Sol	196.0
4 ^a	Ré	146.8
5 ^a	Lá	110.0
6 ^a	Mi	82.4

Fonte: Adaptado de FRENCH, 1995.

2.3 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Da matéria prima ao produto final, os materiais sofrem transformações em sua forma e composição. As etapas que compreendem essas transformações são chamadas de processos de fabricação e seus estudos são amplos na área de engenharia. Os primeiros instrumentos musicais foram construídos de forma artesanal, evoluindo para utilização de processos industriais mecanizados e controlados. Embora a utilização de tecnologias tenha facilitado a fabricação, ainda são utilizados métodos manuais para a construção de instrumentos de alto padrão (C.F. MARTIN & CO, 2019).

2.3.1 Luthieria

Luthieria ou luteria, cujo nome origina da palavra *luth* de origem francesa que significa alaúde, era o trabalho realizado pelo luthier, que fabricava o instrumento. Hoje em dia generalizou-se o termo e este é designado para o ofício de construir e reparar instrumentos de corda, sopro ou instrumentos de percussão (PORTELA, 2014).

O trabalho de luthieria é essencialmente manual e indispensável na fabricação de instrumentos de alta qualidade seja em escalas artesanais ou até mesmo industriais. Hoje, os melhores e mais caros instrumentos musicais são fabricados por luthiers, mesmo os que levam nomes de grandes marcas. Nestas há setores especializados da empresa que contam com equipes de luthiers.

2.4 VIBRAÇÕES

Vibração é o comportamento de uma estrutura ao ser deslocada de sua posição de equilíbrio, oscilando em movimento de avanço e recuo ao longo do tempo (BALACHANDRAN, 2009). Estão presentes em diversas situações cotidianas, como por exemplo, no corpo humano como os batimentos cardíacos que pulsam o sangue através do sistema vascular e a audição em que as partículas oscilantes de ar transmitem a energia vibracional ao sistema auditivo ou em sistemas mecânicos como massas excêntricas em rotação, movimento de pêndulos, marcha de soldados em uma ponte e dedilhados em cordas.

As vibrações podem ser indesejadas em alguns sistemas como vibração nas rodas de um carro gerando desestabilidade ou desejadas em sistemas de peneiramento e instrumentos musicais.

Segundo Rao (2004), um sistema vibratório possui meios de armazenar energia cinética por meio da massa, energia elástica por meio de um componente elástico e um meio de perda gradual de energia, o amortecimento e o sistema vibratório envolve a transferência alternada de sua energia potencial para energia cinética e vice-versa. Quando o sistema é amortecido, parte desta energia é dissipada para o meio externo, seja em forma de calor ou som.

Para caracterizar uma vibração é necessário estabelecer seu período, que é o tempo necessário para uma oscilação retornar à sua posição inicial, cujo inverso do valor caracteriza a quantidade oscilações por unidade de tempo, grandeza representada no SI por Hertz (Hz).

A frequência, inverso do período, de um sistema ao ser deslocado de sua posição de equilíbrio vibra de forma característica e depende de sua massa e rigidez, ou seja,

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3)$$

em que ω_n é a frequência natural, k a rigidez do sistema e m sua massa.

2.5 ANÁLISE MODAL

Análise modal é o estudo das propriedades dinâmicas de um sistema através de excitações por vibrações. Para vibrações, é importante, ter conhecimento do mecanismo comportamental de estruturas e seus componentes. As características da dinâmica estrutural são definidas pela FRF (Função Resposta em Frequência). Essa relação de causa e efeito descreve o comportamento como uma função da frequência entre dois pontos sobre a estrutura e que há reciprocidade entre a ponto medido e o ponto em que a resposta foi coletada. Em consequência, se ocorrer a medição destas características de transferência da estrutura, então a dinâmica estrutural é conhecida, ou seja, as propriedades que definem um modo de vibração podem ser obtidas (ALMEIDA, 1990).

2.5.1 Modos de Vibração

De acordo com SCHWARZ (1999), os modos de vibração são propriedades inerentes de uma estrutura e são designadas pela massa do material, amortecimento e rigidez, além de suas condições de contorno. Os modos são definidos pela frequência natural, amortecimento modal e uma forma modal de vibração. Caso as propriedades ou condições de contorno da estrutura alterem-se, os modos de vibração também mudarão.

ALMEIDA (1990) afirma que a análise modal determina as propriedades dinâmicas de uma estrutura pela identificação de seus modos de vibração. Um modo de vibração é uma propriedade global de uma estrutura, e, portanto, a mesma pode ser excitada em qualquer ponto, com exceção dos pontos nodais, onde o deslocamento é essencialmente nulo. Cada modo de vibração que pode ser encontrado nas funções de transferência tem uma frequência natural específica, e um fator de amortecimento. A ressonância associada com cada modo é

independente da locação espacial, e é caracterizada por uma única distribuição de deformação ou forma modal através da estrutura.

2.5.2 Modos em Violões

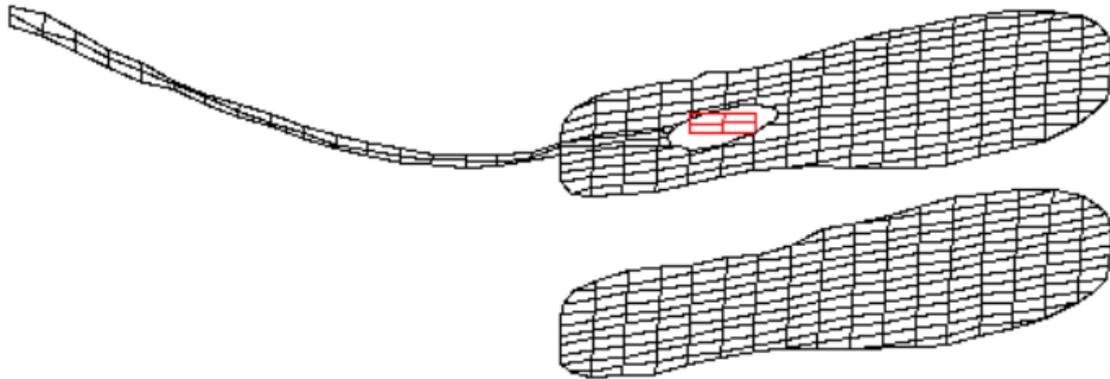
Em 1998, Dan Russel estudou os modos de vibração de um violão com cordas de aço e estrutura interna em X, muito semelhante à estrutura do violão deste trabalho. Russel (1998) caracterizou as frequências e formas modais dos onze primeiros modos do violão acoplados com o volume de fluido na cavidade da caixa acústica.

Nas Figuras 2.5-2.13 o quadrado na região da boca do instrumento representa o movimento do volume de ar através da cavidade do instrumento.

Os quatro primeiros modos, denominados de baixa frequência são dominados por forte acoplamento entre o tampo, o fundo e a cavidade de ar. Esses modos contribuem fortemente para a radiação sonora do violão.

No primeiro modo, de flexão, o violão flexiona como uma viga livre-livre. Este modo contribui pouco para a radiação do som e tem um pequeno efeito sobre a tensão das cordas.

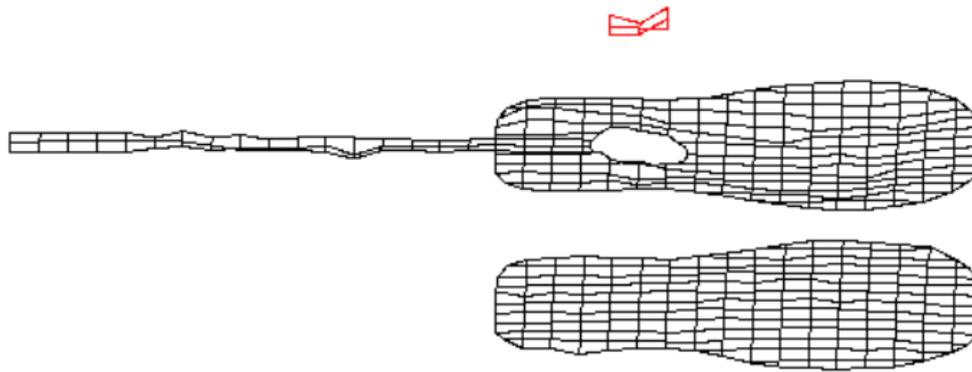
Figura 2.5 – Primeiro modo flexional do violão



Fonte: RUSSEL, 1998.

O segundo modo denominado modo de respiração desloca o ar para dentro e para fora do violão através da cavidade do instrumento como resultado do acoplamento dos primeiros modos de vibração do tampo e do fundo que se deslocam em fases opostas.

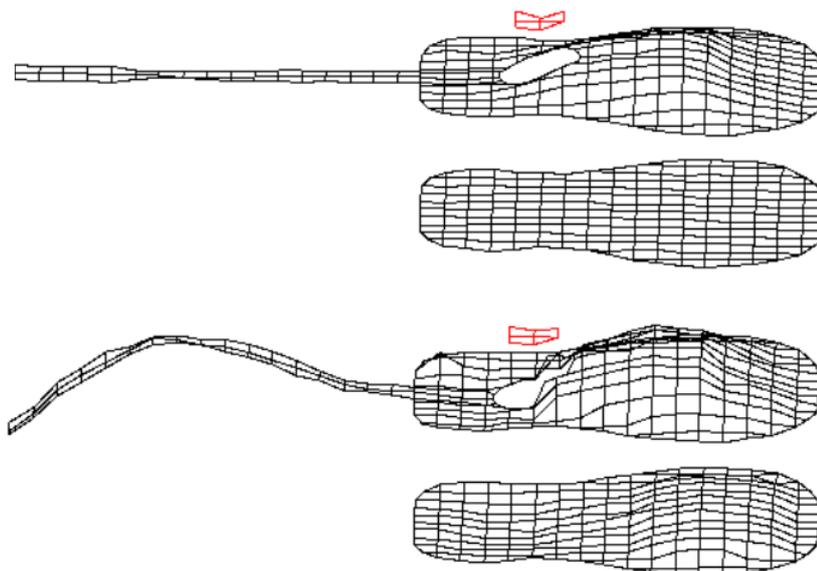
Figura 2.6 – Segundo modo (modo de respiração)



Fonte: RUSSEL, 1998.

O terceiro modo de vibração encontra-se próximo do quarto e a única diferença entre eles é o movimento do fundo. Nestes modos o tampo e o volume de ar movem-se em fase. O quarto modo ainda conta com a flexão do braço do instrumento.

Figura 2.7 – Terceiro e quarto modos, respectivamente

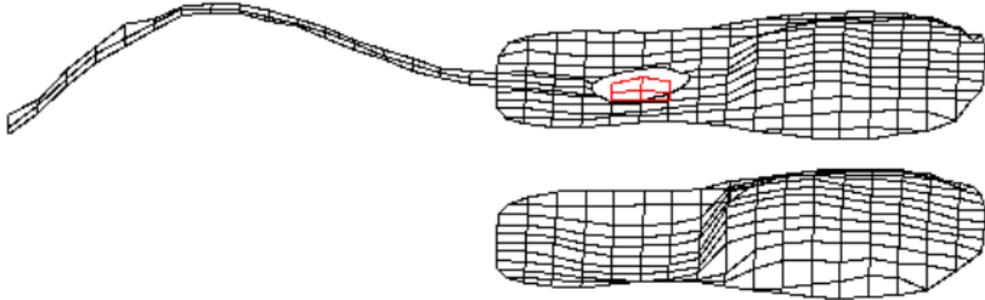


Fonte: RUSSEL, 1998.

Do quinto ao oitavo modo são compreendidas as médias frequências e nestes há pouca interação entre o tampo, fundo e cavidade, porém ainda contribuem significativamente na radiação sonora do instrumento.

O quinto modo é quase idêntico ao quarto modo, exceto que neste possui-se somente movimento da estrutura, enquanto o volume de ar permanece estático. Este é o segundo modo de flexão.

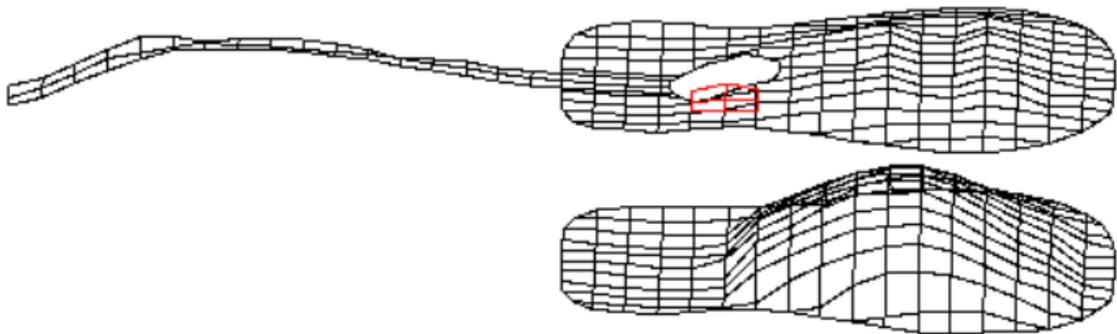
Figura 2.8 – Quinto modo de vibração e segundo de flexão



Fonte: RUSSEL, 1998.

O sexto modo possui maior deslocamento do volume de ar em relação ao quinto modo e grande deslocamento do fundo enquanto o tampo apresenta uma linha nodal na região do cavalete.

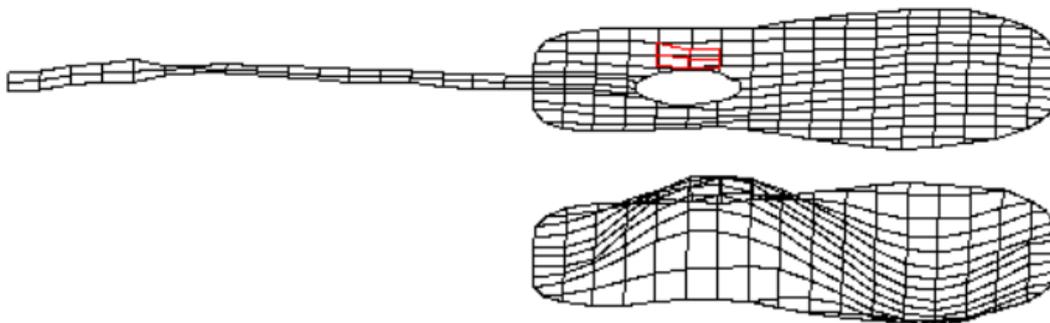
Figura 2.9 – Sexto modo de vibração do violão



Fonte: RUSSEL, 1998.

No sétimo modo de vibração o tampo e o fundo possuem movimento do tipo (0,1) com uma linha nodal (movimento zero) ao longo da largura do violão. O tampo move-se com amplitudes menores do que o fundo e com fases opostas.

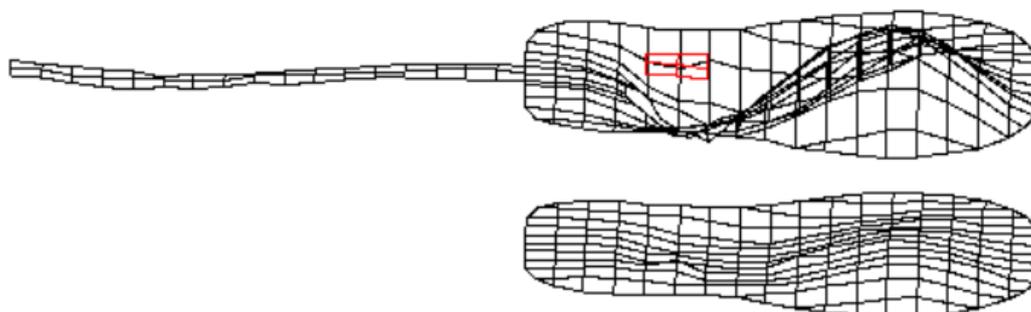
Figura 2.10 – Sétimo modo de vibração do violão



Fonte: RUSSEL, 1998.

O oitavo modo apresenta movimento do tipo (1,0) no tampo e fundo uma linha nodal ao longo de uma das estruturas internas. O ar na boca do instrumento se move pouco devido ao movimento em fase do tampo e fundo.

Figura 2.11 – Oitavo modo de vibração do violão

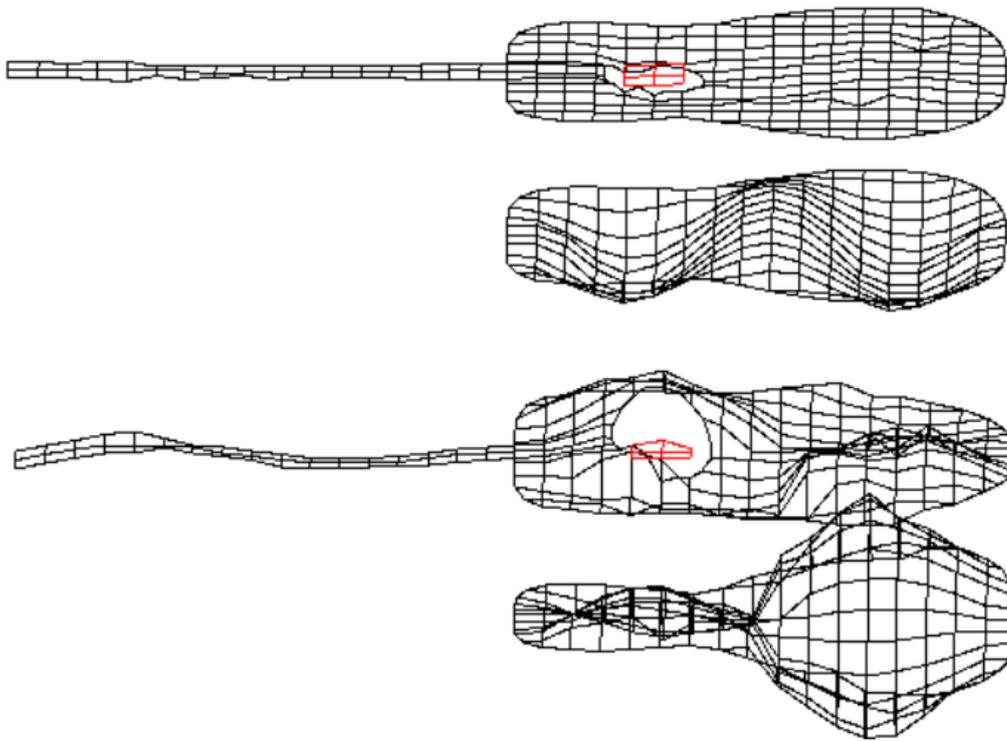


Fonte: RUSSEL, 1998.

As altas frequências compreendidas entre o nono e o décimo primeiro modo, contribuem muito pouco para a radiação do som do violão. Inicialmente estes modos são caracterizados pelo movimento independente do fundo e do tampo. A ineficiência de radiação é resultante de várias partes adjacentes movendo-se em fase oposta.

No nono modo existem duas linhas nodais na largura do tampo enquanto este apresenta pequeno movimento. O décimo modo também contém duas linhas nodais, uma ao longo do comprimento e outra ao longo da largura do violão, tanto no tampo quanto no fundo. A cavidade se encontra em um nó e, portanto, não há movimento de ar nesta.

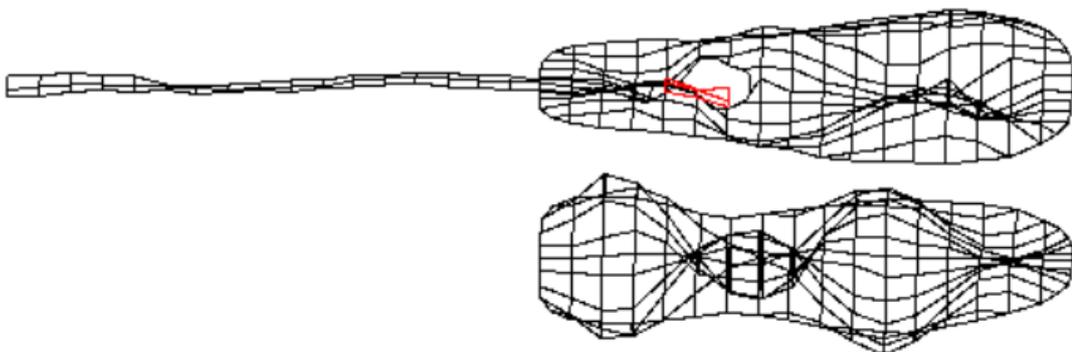
Figura 2.12 – Nono e décimo modo de vibração do violão, respectivamente.



Fonte: RUSSEL, 1998.

Finalmente, o décimo primeiro modo apresenta forma bastante complexa e devido ao movimento em fases opostas das partes adjacentes, este modo não proporciona radiação sonora eficiente.

Figura 2.13 – Décimo primeiro de vibração do violão



Fonte: RUSSEL, 1998.

2.6 TRANSFORMADA DE FOURIER

O Teorema de Fourier permite analisar uma função $f(t)$ contínua e periódica, e esta pode ser representada por uma soma de funções periódicas,

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(k\omega t) + b_n \sin(k\omega t)). \quad (4)$$

Com

$$a_0 = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} f(t) dt, \quad (5)$$

$$a_n = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} f(t) \cos(n\omega t) dt, \quad (6)$$

$$b_n = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} f(t) \sin(n\omega t) dt, \quad (7)$$

onde τ é o período da função, em segundos; n número inteiro; ω a frequência em rad/s; e t o tempo em segundos (DE MEDEIROS, 2018).

2.6.1 Transformada Rápida de Fourier

A Transformada Rápida de Fourier (FFT) é um algoritmo para se calcular a Transformada Discreta de Fourier (DFT) e a sua inversa comumente utilizada para processamento de sinais, em que as funções não periódicas. A DFT é uma função que transforma um sinal no domínio do tempo e define uma representação discreta do sinal do domínio da frequência (FECHINE, 2010).

Seja uma sequência x_m que represente N amostras consecutivas de um sinal contínuo $x(t)$. A transformada discreta de Fourier (DFT) de N termos é definida por

$$\bar{X}_k = \sum_{m=0}^{N-1} x_m W^{mk}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1, \quad (8)$$

$$W = e^{-i\frac{2\pi}{N}}, \quad i = \sqrt{-1}, \quad (9)$$

onde N é o número de amostras do sinal, W , o deslocamento angular, x é o sinal no domínio do tempo e X o sinal no domínio da frequência. A variável m indica o contador das amostras temporais e k indica a ordem harmônica.

2.7 MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade ou módulo de Young é uma propriedade intrínseca dos materiais e depende da composição química, microestrutura e defeitos do material. Esta constante descreve as propriedades elásticas de um sólido submetido à tensão de tração ou compressão em apenas uma direção. O módulo de Young está relacionado com a deformação linear elástica dos materiais, ou seja, deformações não permanentes que desaparecem quando a carga aplicada é retirada (HIBBELER, 2010).

O Módulo de elasticidade pode ser obtido através de ensaios não destrutivos como o quociente da deformação tensão aplicada ao corpo pela deformação específica através de ensaios de tração, ou por ensaios dinâmicos através da resposta acústica do material.

2.8 COEFICIENTE DE POISSON

Quando submetido a uma tensão, um corpo não varia sua dimensão apenas nesta direção, mas também na direção transversal. A razão de Poisson representa a relação entre deformações entre direções normais de um corpo sob aplicação de uma carga. Em termos matemáticos,

$$\nu_{ij} = -\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_j}, \quad (10)$$

onde ν_{ij} é a Razão de Poisson, adimensional, ε_i a deformação do corpo na direção i e ε_j a deformação do corpo na direção j . O sinal negativo indica que o alongamento em uma direção gera contração na outra, na maioria dos materiais. (HIBBELER, 2010)

2.9 MÉTODOS DINÂMICOS (ENSAIO MECÂNICO NÃO DESTRUTIVO)

Os métodos dinâmicos permitem obter informações tanto quantitativas (modos elásticos) quanto qualitativas sobre a integridade de um componente mecânico. O corpo de prova não sofre dano durante o ensaio e, portanto, pode ser repetido e comparado ao longo do tempo (SOUZA, 2016). Caracterizados por mensurar através de respostas dinâmicas (vibrações) de pequenas amplitudes de deformação, este método não destrutivo fornece os módulos de elasticidade calculados a partir das frequências naturais de vibração do corpo de prova e de seus parâmetros geométricos.

2.9.1 Técnica de Excitação por Impulso

A Técnica de Excitação por Impulso segundo a norma ASTM E1876 consiste basicamente na determinação dos módulos elásticos de um material a partir das frequências naturais de vibração de um corpo de prova de geometria regular como barras, cilindros e discos. A frequência natural é excitada através de um impulso de curta duração com a captação da resposta acústica por um microfone.

Aplica-se ao sinal uma Transformada Rápida de Fourier (FFT) para obter o espectro de frequências, que juntamente com a geometria, dimensões e massa do corpo de prova são parâmetros para o cálculo dos módulos elásticos do qual é tomada a frequência de ressonância, possibilitando o cálculo das resistências mecânicas (ACTP, 2006).

2.10 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (FEM)

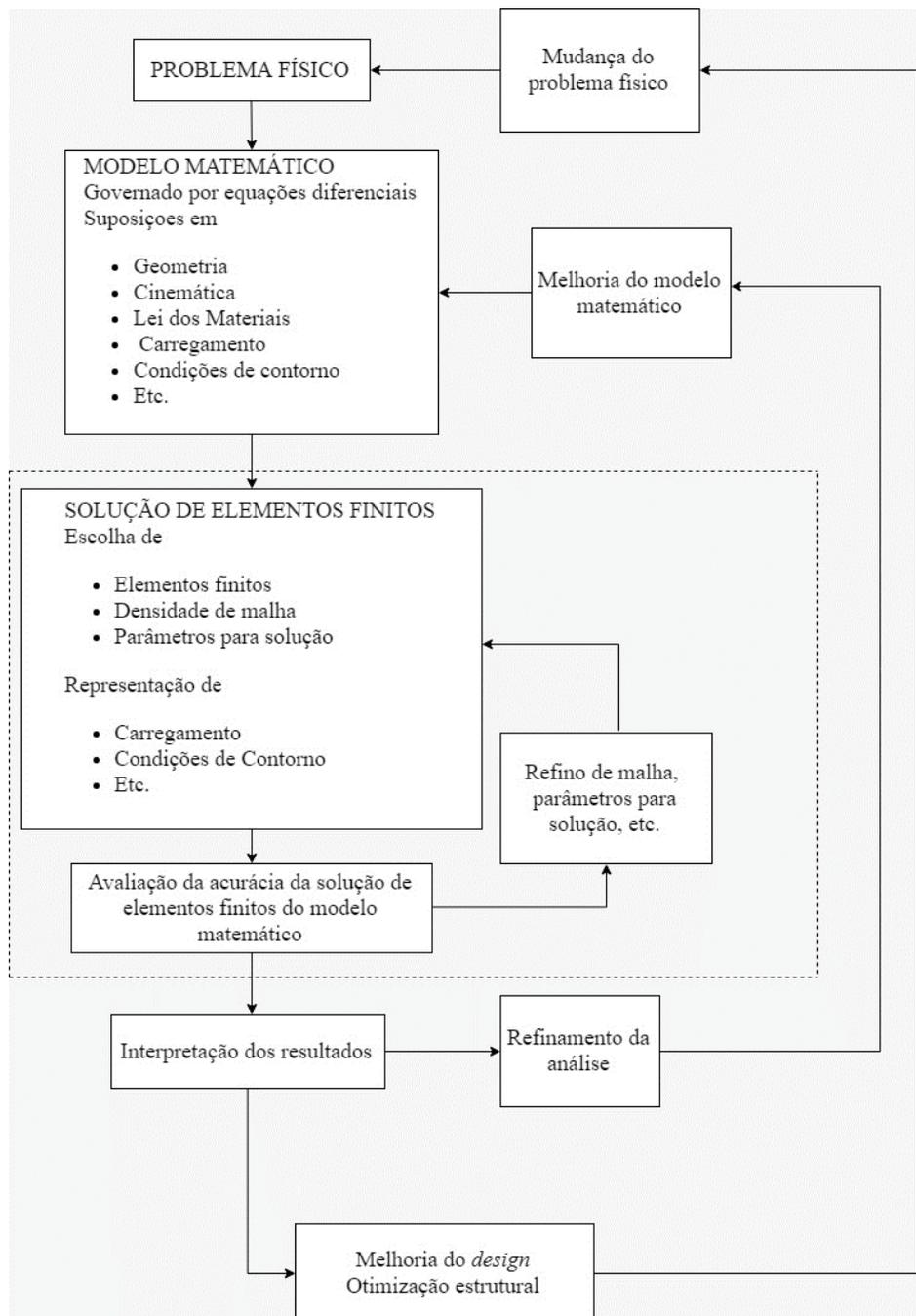
O Método dos Elementos Finitos é um método numérico para solução de problemas de engenharia útil para problemas com complicadas geometrias, carregamentos e propriedades dos materiais, onde soluções analíticas não podem ser obtidas. Com o método de elementos finitos, pode-se confirmar os resultados obtidos através do método analítico e compará-los a modelos experimentais. Uma de suas principais vantagens está na facilidade com que os programas permitem representar as condições do modelo, além da representação 3D dos efeitos estudados (AZEVEDO, 2003).

Procedimentos de elementos finitos são, atualmente parte indispensável e frequente para análises de engenharia e projetos. Programas de elementos finitos são amplamente utilizados

em praticamente todos os ramos da engenharia para análises de sólidos, fluidos, transferência de calor e estruturas.

O desenvolvimento de métodos de elementos finitos tornou-se possível com o surgimento do computador, isto porque a essência da solução para um problema de engenharia por elementos finitos é a resolução de um conjunto de equações algébricas que só podem ser realizadas de forma eficiente por meios computacionais (BATTHE, 1996).

Figura 2.14 – Fluxograma do processo de análise de elementos finitos.



Fonte: Adaptado de (BATTHE, 1996)

2.10.1 Formulação para análise modal estrutural

Da teoria da elasticidade, o comportamento dinâmico de um sólido elástico para o caso linear (pequenas deformações) definido no contorno Γ do domínio Ω pode ser escrito como

$$\sigma_{ij,j} + F_i = \rho_s \ddot{u}_i, \quad (11)$$

em que σ é a matriz das tensões, F_i é o vetor das forças de corpo, ρ_s é a densidade do sólido e \ddot{u}_i é a aceleração nas direções coordenadas $i = x, y, z$. Em seguida, obtém-se a sua forma integral por resíduos ponderados, cuja escolha da função ponderadora baseia-se no Método de Galerkin. Assim, a solução aproximada para um elemento finito em termos dos deslocamentos nodais pode ser escrita da forma (BATTHE, 1996),

$$M^e \ddot{d} + K^e d = q^e, \quad (12)$$

onde d é o vetor de deslocamento nodal, M^e é a matriz de massa, K^e é a matriz de rigidez e q^e é o vetor de força do elemento, os quais são obtidos por

$$M^e = \int_{\Omega} \rho_s N_s^T N_s d\Omega. \quad (13)$$

$$K^e = \int_{\Omega} B_s^T D B_s d\Omega. \quad (14)$$

$$q^e = \int_{\Omega} N_s^T F d\Omega + \int_{\Gamma} N_s^T t d\Gamma, \quad (15)$$

onde, N_s é a matriz das funções de forma do elemento sólido, B_s é a matriz de deformação-deslocamento nodal, D é a matriz das leis constitutivas, F é o vetor das forças de volume e t é o vetor das forças de superfície. Contudo, o resíduo do domínio é a soma dos resíduos de todos os elementos utilizados na sua discretização, o qual conduz ao processo de montagem das matrizes elementares em uma matriz global. Assim, a Equação (12) pode ser escrita em termos das matrizes globais como

$$M \ddot{d} + K d = q. \quad (16)$$

Reescrevendo a Equação (16) no domínio da frequência para a condição de vibração livre obtém-se

$$(K - \lambda_s M) \mathbf{d} = \mathbf{0}, \quad (17)$$

onde λ_s é uma matriz diagonal equivalente ao quadrado das frequências naturais e \mathbf{d} , o vetor deslocamento nodal das correspondentes formas dos modos de vibrar.

2.11 CRITÉRIO DE GARANTIA MODAL (MAC)

O critério de garantia modal (*Modal Assurance Criterion – MAC*) é um indicador estatístico que correlaciona os deslocamentos nodais entre dois modos de vibração. O MAC é calculado pelo produto escalar dos vetores de deslocamento nodal normalizados através de uma regressão linear baseada em métodos de mínimos quadrados, podendo ser calculado por

$$MAC(r, q) = \frac{|\{\varphi_A\}_r^T \{\varphi_X\}_q|^2}{(\{\varphi_A\}_r^T \{\varphi_A\}_r)(\{\varphi_X\}_q^T \{\varphi_X\}_q)}, \quad (18)$$

onde: $\{\varphi_A\}_r$ representa o vetor analítico, modo r; $\{\varphi_X\}_q$ representa o vetor experimental, modo q; e T representa a transposta destes vetores.

O resultado do cálculo de MAC assume valores entre 0 e 1, de forma que valores acima de 0.9 indicam forte correspondência enquanto pequenos valores indicam pouca correspondência entre as formas modais, sendo que o valor zero indica nenhuma correspondência entre os modos (ALLEMANG, 2003).

2.11.1 Forma de apresentação

Os valores de MAC são arranjados em uma matriz simétrica em que as linhas e colunas refere-se a um modo apresentando sua respectiva frequência. Os valores calculados para o MAC são arranjados nesta matriz em que é comumente utilizado escalas de cor para representar a magnitude dos valores (PASTOR, 2012).

2.11.2 AutoMAC e CrossMAC

O AutoMAC compara quantitativamente todas as combinações de pares possíveis entre um único conjunto de formas modais. A diagonal principal de sua matriz resposta sempre será igual a 1, pois relaciona um modo com ele mesmo. Este método pode ser utilizado como ferramenta de identificação de modos, considerando que modos distintos apresentam baixa correlação. Valores próximos de zero podem indicar problemas, em que não houve pontos suficientes.

Já o critério CrossMAC é determinado por dois conjuntos de vetores distintos. Este método pode ser utilizado para comparar dois modelos experimentais distintos, um modelo experimental a um Modelo de Elementos Finitos (FEM) ou os resultados de diferentes algoritmos de análise modal (PASTOR, 2012).

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo abordar-se-á as principais etapas da fabricação dos violões, da madeira bruta ao produto final, o procedimento realizado para caracterização das propriedades mecânicas e físicas das madeiras utilizadas no instrumento por meio de métodos dinâmicos, o procedimento experimental de análise modal dos tampos na condição livre-livre e a elaboração do modelo de elementos finitos no software ANSYS.

3.1 FABRICAÇÃO DOS INSTRUMENTOS

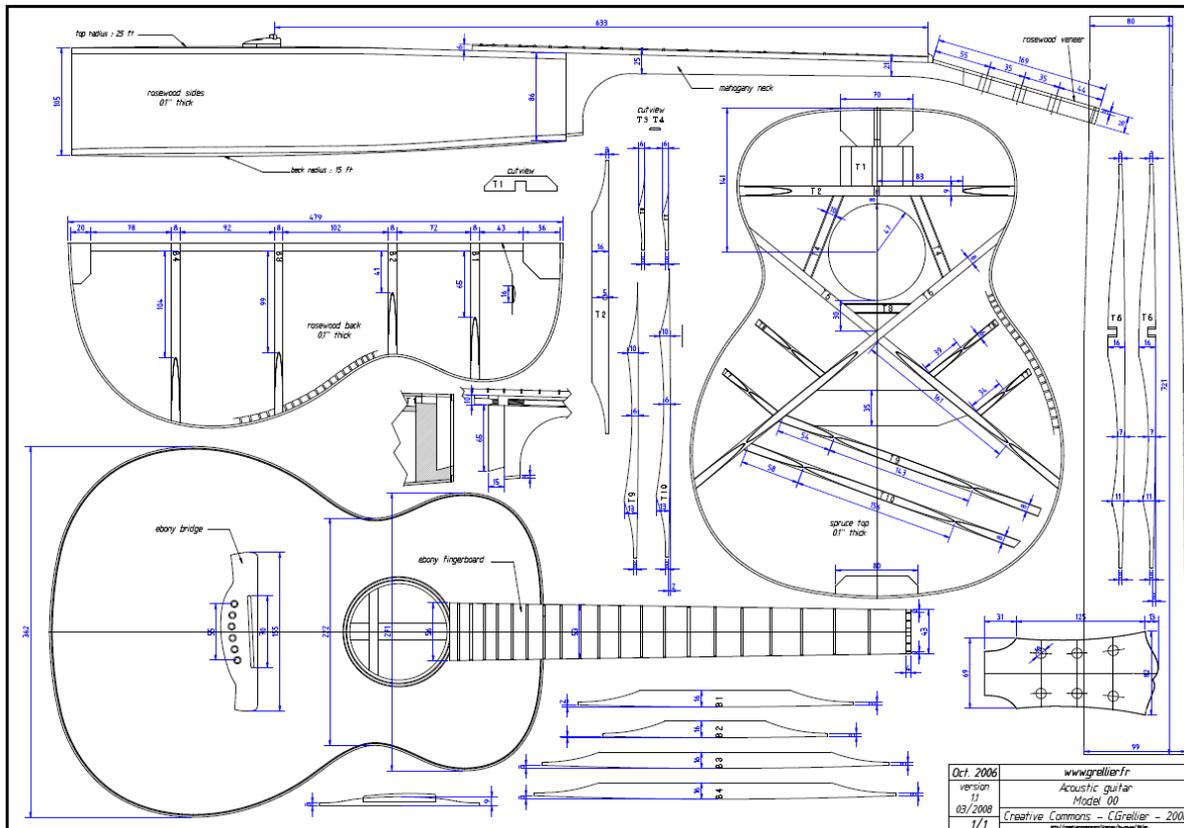
Para este trabalho foram fabricados quatro violões de cordas de aço a partir da concepção de um violão tradicional modelo 00, da fabricante Martin com adaptações nos materiais e preferências do autor. O projeto com dimensões e especificações foram coletados do site *grellier.fr* em que é disponibilizado de forma gratuita o modelo no formato *.pdf* a ser impresso em papel A0 em escala 1:1, para impressão e em *.dxf* para ser aberto em softwares de CAD. O projeto utilizado pode ser visualizado na Figura 3.1.

Os violões foram fabricados pelo próprio autor em uma oficina de quintal na cidade de Lages, Santa Catarina, durante os meses de janeiro e fevereiro de 2019 totalizando cerca de 600 horas de trabalho. Para algumas etapas da fabricação, em que não se dispunha do ferramental adequado, foram realizadas na oficina do luthier Mateus Comel, na cidade de Lages, que também forneceu instruções essenciais para a realização do projeto.

A fabricação é extremamente delicada em vários quesitos, fazendo-se necessário precisão de pelo menos um décimo de milímetro e umidade relativa ambiente entre 45% e 60% e temperatura próximas a 25°C para que haja encaixes com boa superfície de contato, sem folgas e extremamente alinhados afim de garantir conforto para o instrumentista; durabilidade não somente mecânica, mas também atmosférica devido à grande variação dimensional das madeiras com umidade e temperatura; estética visto que simetria e harmonia das linhas e contornos é um fator desejado; e principalmente a sonoridade do instrumento.

Desta forma se fez necessária a fabricação prévia de moldes, gabaritos e maquinário para colagens, lixamento, furação, cortes, fresamento e alinhamento.

Figura 3.1 – Projeto do violão modelo Martin 00



Fonte: grellierguitars.fr.

3.1.1 Seleção das Madeiras

Uma vez em que o material de estudo (a madeira da Araucária) e o de referência (Abeto) foram definidos, se fez necessário escolher outras madeiras que compusessem o restante do instrumento seguindo as tendências de fabricação de violões.

Para o fundo e laterais utilizou-se a madeira de Jatobá (*Hymenaeaspp*). De coloração alaranjada, grãs bem definidas, alta densidade e alta dureza, o material foi reaproveitado da estrutura de uma casa antiga que havia sido demolida.

Para a escala optou-se pela madeira vulgarmente conhecida como Roxinho (*Peltogyne spp.*), cujo nome indica a coloração que se acentua após o corte, em contato com o oxigênio atmosférico devido à concentração de ferro em sua composição. Esta madeira é bastante dura e resistente a organismos xilófagos (IPT, 2019), o que torna adequada nesta aplicação em que a região sofre bastante desgaste por fricção e acúmulo de óleos e pele morta causados pela digitação das notas no instrumento.

Para a confecção do braço foi utilizado o Mogno (*Swietenia macrophylla*) que é uma das madeiras mais tradicionais nesta aplicação devido à sua estabilidade, trabalhabilidade e baixa densidade. Este material foi reaproveitado dos pés de uma antiga mesa que foi desmontada.

O Abeto (*Pices Habeas*) foi utilizado não só para o tampo, mas também para as estruturas internas do tampo. Devido à baixa densidade e alta resistência mecânica este recurso é escolha praticamente unânime sendo substituído, em alguns casos, pelo Cedro. Esta madeira é de origem alemã e foi importada pela distribuidora de madeiras para lutheria Strings de São Paulo. A madeira foi adquirida beneficiada e com dimensões próximas às de aplicação do instrumento sendo dois pares simétricos de chapa de aproximadamente 5mm de espessura, 600mm de comprimento e 220mm de largura para os tampos e dois blocos de 430mm × 100mm × 25mm para as estruturas as maiores medidas no sentido longitudinal das fibras.

Embora o corte da Araucária seja proibido, salvo conformidades com a Instrução Normativa nº 27 e nº 57 da FATMA (Fundação do Meio Ambiente), esta foi utilizada como alternativa ao Abeto no tampo e nas estruturas internas excluindo as adjacentes ao tampo. A madeira foi selecionada e comprada com nota fiscal em uma madeireira localizada na Zona Industrial da Cidade de Lages, Santa Catarina. A peça possuía 4m de comprimento, 40cm de largura e 5cm de espessura. A direção de maior comprimento acompanhando o sentido das fibras, seguido da direção tangencial e axial.

Dentre as madeiras brutas que haviam disponíveis procurou-se utilizar as que apresentavam veios paralelos e uniformes ao longo do corte em detrimento de veios revessos por uma questão de homogeneidade estrutural e visual, bem como a integridade da forma da madeira que tende a liberar tensões internas de acordo com o sentido das fibras ao realizar corte e lixamento na mesma (KLIGER, 2010).

3.1.2 Preparação das Madeiras

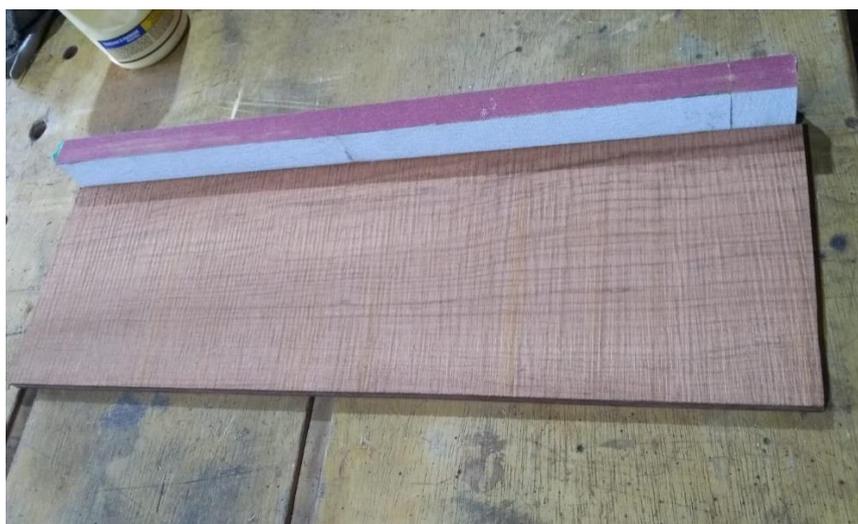
Como a maioria das madeiras estava em seu estado bruto, se fez necessário aplicar alguns processos antes que esta pudesse ser trabalhada para tornar-se um componente do violão. Foram cortadas em uma serra circular de bancada pedaços da madeira com largura pouco maior do que a especificação do projeto para ter-se uma margem de erro devido à perda de material em cortes posteriores. Os cortes foram realizados de tal forma a obter os veios da madeira orientados longitudinalmente ao longo da peça.

Em seguida todas as madeiras foram plainadas em uma plaina desgrossadeira elétrica com regulagem de altura para retirar irregularidades, fungos e restos de tinta que se encontravam na superfície dos materiais resultando em madeiras com duas faces paralelas e planas. Passaram-se as bordas destas madeiras em uma galopa desempenadeira para garantir uma superfície plana, tomando cuidado para deixar todas as faces adjacentes ortogonais.

Para as partes em que se necessita espessuras menores que 2.5mm, cortaram-se em uma serra-fita com suporte guiado lâminas de aproximadamente 4mm de espessura e em seguida lixadas em uma lixadeira de tambor para desgrosso realizando passos curtos até que se atingisse a espessura desejada de 2.5mm para as madeiras do fundo, 2.3mm para o tampo e 1.7mm para as laterais.

Cada par de lâminas para o fundo e tampo teve suas bordas percorridas por uma lixa colada a uma barra de face retificada, conforme a Figura 3.2, para garantir que houvesse duas superfícies tão planas que ao apoiá-las em um vidro contra a claridade não fosse possível enxergar a luz passando entre a junta. Esse processo é conhecido como espelhamento ou, em inglês, *bookmatching*, que se refere à abertura das páginas de um livro e resulta na simetria estética e estrutural dos veios da madeira. Ambas as faces foram coladas com cola à base de PVA (Acetato de polivinila) específica para madeira e aplicada compressão durante vinte e quatro horas. A compressão foi aplicada através de fixadores de barra roscada conforme a Figura 3.3.

Figura 3.2 – Planificação das faces de colagem do fundo



Fonte: Produção do Autor, 2019.

Todas as lâminas foram lixadas com grão 100, 150, 200, 360 e 500, nesta ordem, até que se eliminasse todos os riscos da lixa anterior.

Figura 3.3 – Fixação e colagem das lâminas do fundo do violão



Fonte: Produção do Autor, 2019.

3.1.3 Preparação das Estruturas

As estruturas internas foram fabricadas a partir de blocos de abeto e pinheiro, cortados em barras retangulares com as dimensões de cada elemento com as fibras orientadas longitudinalmente na direção de maior comprimento e agrupadas de acordo com sua aplicação, conforme a Figura 3.4.

As estruturas do tampo, em abeto, foram retificadas na face de colagem enquanto que às estruturas do fundo, em pinheiro, foi aplicado um raio de doze pés na face de colagem.

Às barras que formam o “X” da estrutura do tampo foram realizados meios-cortes que se encaixaram em ângulo de 50° em relação à linha de simetria e tiveram as faces alinhadas no plano de colagem.

Nesta etapa também foram preparados em pinheiro os blocos do tróculo e da culatra que assim como o reengrosso foram fabricados em pinheiro. A fabricação do reengrosso consistiu na realização de cortes transversais igualmente espaçados deixando 1 milímetro de material para que se tornasse bastante flexível.

Figura 3.4 – Barras para as estruturas internas

Fonte: Produção do Autor, 2019.

3.1.4 Definição da silhueta

O dobramento das laterais é o processo que determina a silhueta do violão e consiste na aplicação de calor e pressão em finas lâminas de madeira com veios longitudinalmente orientados.

Aspergiu-se água nas lâminas a serem dobradas para que os poros retenham umidade e em seguida, levemente flexionadas contra um tubo metálico aquecido por um soprador térmico. O tubo aquecido transfere calor para a madeira amolecendo a lignina, resina interna da madeira, permitindo que a madeira seja moldada e quando resfriada, enrijeça e mantenha o formato adquirido. A água retida nos poros evita que a madeira queime e gere manchas pretas e rachaduras, além disso ajuda no amolecimento da mesma.

Após ser pré-moldada no tubo aquecido, a lâmina foi transferida para um molde com a silhueta exata do violão, aplicada pressão, umidade e calor na mesma até que se encaixasse perfeitamente na forma onde repousou durante vinte e quatro horas (Figura 3.5).

Figura 3.5 – Lâminas das laterais pressionadas sobre o molde



Fonte: Produção do Autor, 2019.

Para a silhueta completa do violão, foram elaboradas duas lâminas curvas simétricas que após retiradas do molde tiveram os excessos das pontas removidos e unidas pelo tróculo e pela culatra com cola PVA. Após doze horas de secagem da cola foram colados os reengrossos com cola à base de cianoacrilato de etila, comumente conhecida como super-cola (Figura 3.6).

Aplicou-se óleo mineral em todas as superfícies que não receberiam colagem posteriormente para minimizar os efeitos de variação dimensional causada pela absorção de umidade do ar.

Figura 3.6 – Silhueta do violão definida



Fonte: Produção do Autor, 2019.

3.1.5 Fabricação do Fundo

As lâminas de Jatobá, unidas e lixadas tornaram-se chapas, em que se realizou a marcação do contorno da caixa acústica e da posição das estruturas e retirados os excessos em uma serra de fita deixando cerca de 5 mm de sobra no contorno.

A colagem das estruturas ao fundo fez-se por meio de uma estante de colagem, em que se utiliza da tensão de flexão de barras de madeira forçadas entre duas superfícies paralelas de menor comprimento, pressionadas sobre um disco abaulado com raio de doze pés com cola PVA. Ainda, adicionou-se uma tira de abeto com fibras transversais às fibras do fundo para reforçar a junta das lâminas (Figura 3.7).

Após retirar o fundo com as estruturas coladas, esculpiu-se com formões, plainas e lixas o perfil transversal especificado no projeto das estruturas. Aplicou-se óleo mineral em todo o conjunto, exceto nas áreas que receberiam colagem posteriormente, para garantir estabilidade higroscópica às madeiras.

Figura 3.7 – Colagem das estruturas ao fundo na estante de colagem sobre os discos abaulados



Fonte: Produção do Autor, 2019.

3.1.6 Fabricação do Tampo

Com as lâminas unidas e espessura desejada, os tampos tiveram seu contorno traçado e marcadas as posições das estruturas. Antes que se realizasse a colagem das estruturas, abriu-se a boca do instrumento utilizando uma tupa de palma presa à distância do raio da abertura por um aparato que permitia apenas o movimento circular da mesma.

Com o mesmo aparato realizou-se um rebaixo circular onde foram acomodados adornos anelares de madeira colados com cianoacrilato (Figura 3.8).

Figura 3.8 – Adorno em volta da boca do instrumento



Fonte: Produção do Autor, 2019.

Assim como no fundo, as estruturas do tampo foram coladas com o uso da estante de colagem, porém sobre uma superfície plana. Após a secagem da cola PVA, as estruturas foram esculpidas com formões, plainas e lixas conforme especificações de seção transversal do projeto.

Embora o procedimento de “afinação” do tampo não tenha sido realizado, a etapa é muito importante e delicada. Neste procedimento os luthiers removem massa das barras coladas de acordo com a resposta sonora desejada. Artesões mais experientes possuem a audição apurada e conseguem distinguir e identificar as frequências em que o conjunto vibra, mas também é possível utilizar microfones neste procedimento (Figura 3.9).

Finalmente, foi aplicado óleo mineral no tampo e estruturas (exceto nas partes em que receberiam colagem posteriormente) para evitar efeitos da umidade.

Figura 3.9 – Conjunto do tampo após colagem e aplicação do óleo



Fonte: Produção do Autor, 2019.

3.1.7 Fechamento da Caixa Acústica

Após lixar sobre uma superfície plana as faces que colam as laterais ao fundo e tampo, nivelando o tróculo, culatra, reengrosso e lâmina das laterais, marcou-se a posição em que as estruturas interceptam as laterais para realização de um rebaixo onde as estruturas apoiam-se. Barras roscadas com porcas pressionaram blocos com o formato interno da silhueta do violão contra o molde para garantir a preservação da silhueta (Figura 3.10).

Figura 3.10 – Rebaixo para assentamento das estruturas e pressionamento das laterais sobre o molde



Fonte: Produção do Autor, 2019.

Após aplicação de cola PVA no reengrosso, encaixou-se sobre este o fundo e aplicou-se pressão para colagem através de barras flexionadas na estante de colagem. Removeu-se tiras das laterais na região do tróculo e culatra onde foram adicionados adornos em madeira. O excesso de material do fundo foi removido por uma fresa copiadora de perfil, processo em que as laterais do instrumento foram percorridas por um rolamento rente à lâmina da ferramenta (Figura 3.11).

Figura 3.11 – Fundo incorporado às laterais e adorno



Fonte: Produção do Autor, 2019.

O mesmo procedimento de rebaixo, colagem e remoção de excesso aplicado ao fundo foi replicado para a superfície de colagem do tampo. O resultado da caixa acústica fechada está ilustrado na Figura 3.12.

Figura 3.12 – Caixa acústica fechada



Fonte: Produção do Autor, 2019.

3.1.8 Confeção da Escala

Para a escala, com tiras de 6 milímetros de espessura de roxinho, utilizando um gabarito para a posição dos trastes, canais para alojamento dos trastes foram cortados com um serrote de japonês de precisão.

Marcou-se o centro dos espaços entre os cortes onde foram realizados furos que foram preenchidos por uma madeira de outra coloração que servem como referência para o instrumentista. Transferiu-se um raio de doze polegadas à seção transversal da escala percorrendo-a um taco de lixa côncavo. Em seguida foram traçadas linhas concorrentes no sentido longitudinal da madeira que serviram como guia para corte na serra de fita (Figura 3.13).

Figura 3.13 – Escala em três etapas de sua confecção



Fonte: Produção do Autor, 2019.

3.1.9 Construção e Fixação do Braço

A partir das peças de mogno, após serem cortadas em barras retangulares, com as superfícies opostas planas e ortogonais às adjacentes, utilizando um suporte para fixar a madeira formando um ângulo de 7.5° com o plano de corte de uma serra circular de bancada, esta foi separada perto de sua extremidade e dividida em dois pedaços. O pedaço de menor comprimento foi

girado de 180° no eixo longitudinal do comprimento da madeira e a superfície resultante do corte foi colada na parte inferior da parte maior, formando o ângulo de quebra que separa o braço da mão do instrumento (Figura 3.14).

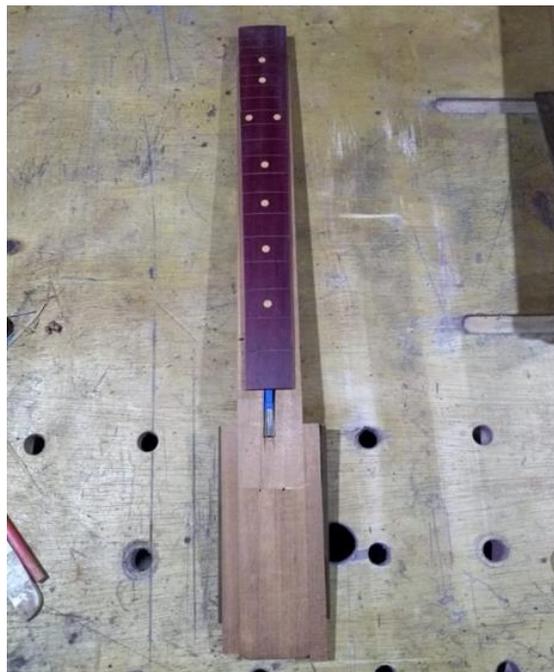
Figura 3.14 – Resultado do corte e colagem em ângulo



Fonte: Produção do Autor, 2019.

Na superfície plana do braço foi aberto um canal onde se aloja-se o tensor e às laterais da mão coladas pequenas barras de mogno para aumentar sua largura, seguidos pela colagem da escala à superfície superior do braço. Os excessos foram retirados com uma serra de fita e alinhados com lixamento (Figura 3.15).

Figura 3.15 – Braço com tensor e escala



Fonte: Produção do Autor, 2019.

Utilizando plainas, lixas e grosas esculpiu-se um perfil elíptico à parte inferior do braço, região onde se apoia a mão do músico. Esta etapa é bastante delicada e resultado é crucial para o conforto do instrumentista exigindo que a superfície seja plana e contínua (Figura 3.16).

Figura 3.16 – Braço sendo esculpido.



Fonte: MILENA MOSER, 2019.

Os trastes foram cortados sob medida e inseridos com um martelo de cabeça macia. Suas bordas foram desbastadas por uma lima inclinada a 45° até ficarem rentes à madeira para que ficassem confortáveis ao percorrer as mãos pelas beiradas.

Para cada braço foi fabricado um gabarito com o contorno da parte a ser fixada na caixa acústica. Este gabarito foi alinhado e colado com fita dupla face na superfície do tampo. Utilizando uma fresa copiadora de perfil abriu-se o encaixe para o braço (Figura 3.17).

Figura 3.17 – Braço sendo esculpido



Fonte: Produção do Autor, 2019.

3.1.10 Fabricação e Fixação do Cavalete

Um bloco retangular de roxinho teve seis furos simétricos, onde as cordas se ancoram com auxílio de pinos, e cortado um canal inclinado onde se aloja o rastilho. As bordas foram percorridas por uma lixa para que ficasse suave ao tato (Figura 3.18).

Figura 3.18 – Cavalete com o rastilho alojado



Fonte: Produção do Autor, 2019.

A peça foi posicionada de forma que o canal se situasse a 633 milímetros do início da escala e colada sobre o tampo utilizando cola PVA e fixada com parafusos temporários em seus furos.

3.1.11 Acabamento e Montagem

Foram adicionadas às superfícies da mão lâminas de madeira canela, cuja única função é estética. Em seguida foi definido o formato da mão do instrumento e este cortado com uma serra de fita e em seguida abertos os furos para acomodar as tarraxas. Os braços foram incorporados ao corpo utilizando cola PVA e aplicado pressão durante 12 horas.

Após lixar com grão 600 toda as superfícies do violão, aplicou-se, suavemente, verniz à base d'água por meio de uma estopa embebida e envolta por um pano macio através de movimentos circulares e uniformes. Foram aplicadas quatro finas camadas de quatro em quatro horas (Figura 3.19).

Para finalizar foram esculpidos em osso de vaca, o rastilho e a pestana e em seguida o instrumento recebeu as cordas e ajustes finais (Figura 3.20).

Figura 3.19 – Violões prontos para serem montados



Fonte: Produção do Autor, 2019.

Figura 3.20 – Ajuste final e encordoamento do violão



Fonte: Produção do Autor, 2019.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

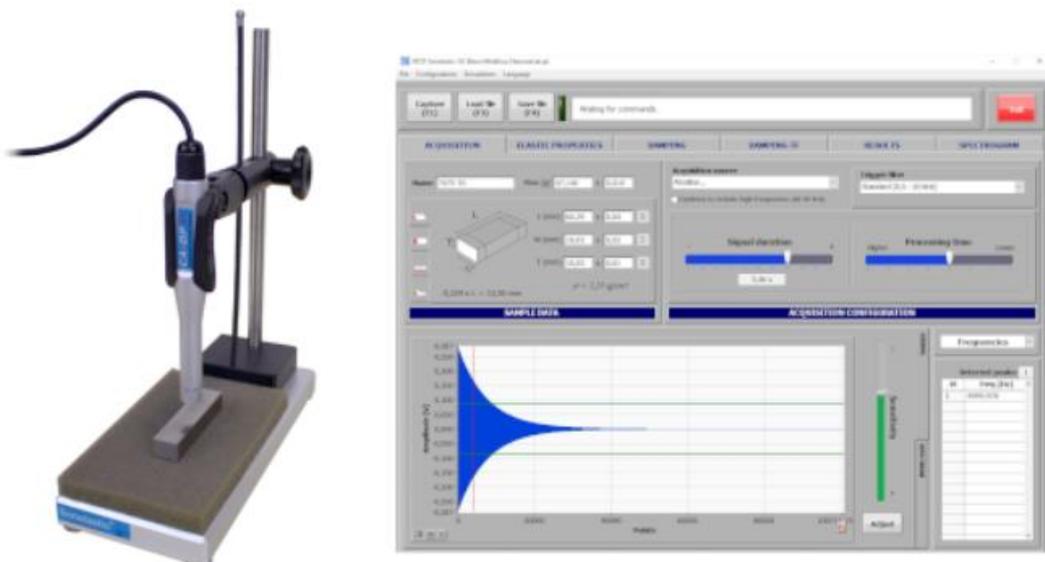
Devido ao fato de as propriedades da madeira ter grande variação não só entre árvores diferentes, mas também entre partes da mesma árvore, não é confiável utilizar valores tabelados para módulos de elasticidade e densidade, além de que não foram encontrados dados para a resistência mecânica e coeficiente de Poisson para as três direções do material.

Torna-se conveniente realizar a caracterização das madeiras a partir de corpos de prova fabricados com as sobras das madeiras que foram utilizadas para a fabricação como forma mais confiável de se obter as propriedades das mesmas.

Embora fosse possível utilizar métodos de ensaio quase estáticos de flexão como a norma ASTM D4761 (2002) para madeira como elemento estrutural, esta requeria corpos de prova com tamanho maior do que os disponíveis e não forneceria todas as informações de interesse. Ainda, a norma ASTM E756 (2005) de medição de propriedades vibracionais e de amortecimento dos materiais seria uma boa alternativa para a caracterização das amostras, porém optou-se pelo uso do software Sonelastic, consoante com a norma ASTM E-1875 (2009) e disponível no Laboratório de Metrologia Dimensional Professor Jürgen Beatus Neermann da UDESC em Joinville.

Este software de caracterização utiliza-se da resposta acústica de um impulso aplicado no material de teste e captado por um microfone e é, portanto, um método dinâmico de caracterização de excitação por impulso. A resposta depende dos parâmetros dimensionais (comprimento, largura e espessura) e da massa da amostra (Figura 3.21).

Figura 3.21 – Aparato para medição e tela inicial



3.2.1 Ensaio dos corpos de prova

Os ensaios para determinação do módulo de elasticidade a partir da resposta acústica com utilização do software Sonelastic seguiram o procedimento proposto por Odebrecht (2016) e os corpos de prova foram excitados em flexão para obtenção dos coeficientes de Poisson e módulos de cisalhamento e longitudinalmente para obtenção dos módulos de elasticidade direcionais.

Embora a madeira seja um material ortotrópico, assume-se neste trabalho como transversalmente anisotrópico para simplificação dos cálculos e considerando um efeito muito diminuto na influência da resistência mecânica da madeira no sentido radial.

Prepararam-se corpos de prova para cada uma das madeiras utilizadas na fabricação do violão. Na Tabela 3.1 são apresentadas suas características.

Tabela 3.1 – Propriedades das madeiras

Material	Densidade [kg/m³]	Módulo de Young Longitudinal [Mpa]	Módulo de Young Transversal [Mpa]	Razão de Poisson (ν)	Módulo de Cisalhamento Transversal [Mpa]	Módulo de Cisalhamento Longitudinal [Mpa]
Abeto	439	7,75	2,2	0,3	3,55	0,58
Pinheiro	616	10	6,47	0,19	6,36	1
Jatobá	986	17	3,37	0,3	9	3,2
Mogno	584	8,73	8,73	0,1	4,37	4,37
Roxinho	1020	20	20	0,25	8	8

Fonte: Produção do Autor, 2019.

3.3 ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL

Para a análise modal experimental foi necessário definir os pontos de medição no instrumento. Para isso traçou-se com marcador permanente linhas paralelas partindo da linha de centro do violão espaçadas em 25 mm ao longo do sentido de maior comprimento do violão e perpendicularmente a estas, a partir da linha central do cavalete, linhas também espaçadas por 25mm e paralelas entre si. Para que a superfície do violão não fosse marcada permanentemente pela tinta do marcador, colou-se fita adesiva transparente nos caminhos em que percorrem as linhas. O resultado foi uma malha quadriculada em que as intersecções das linhas foram utilizadas como pontos de medição. Foram no total, 194 pontos para cada violão (Figura 3.22).

Embora quatro violões tenham sido fabricados para essa finalidade, sendo dois deles com tampo em pinheiro e os outros dois em abeto, foi possível realizar a análise modal de apenas um violão de cada madeira por questões de tempo.

Figura 3.22 – Marcação dos pontos de medição no violão



Fonte: Produção do Autor, 2019.

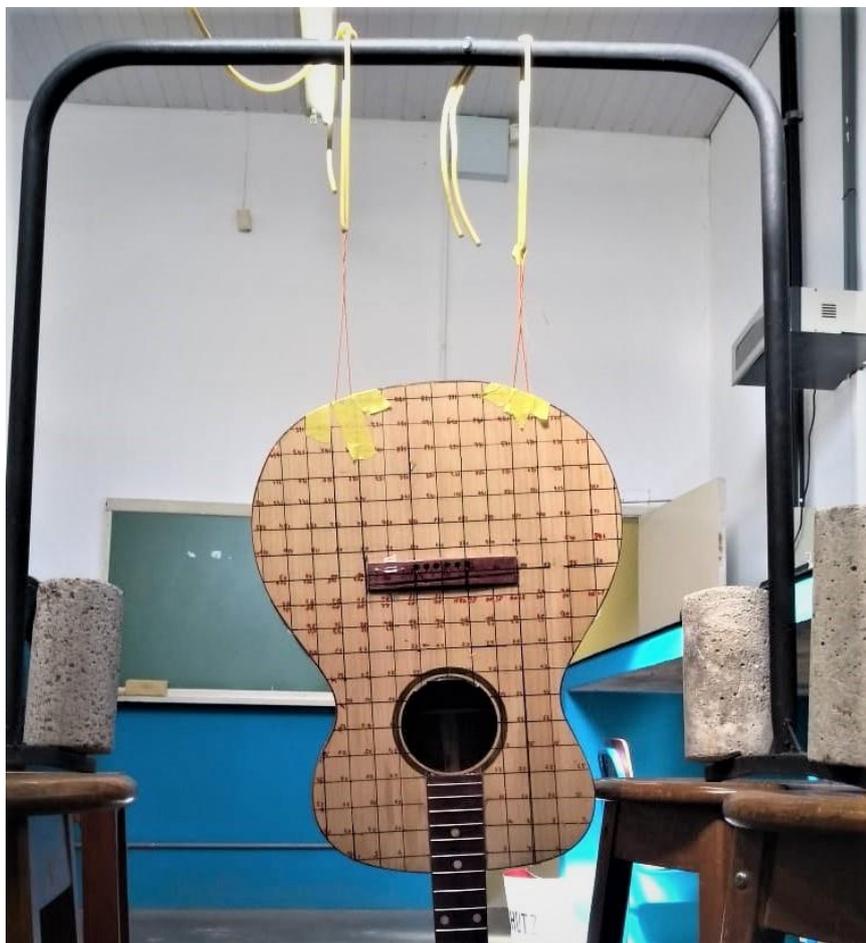
3.3.1 Instrumentação

Para tomar as medições utilizou-se de um micro-acelerômetro *Brüel & Kjør* modelo 4517C cujo sinal é gerado em Coulomb e precisa ser transformado em V para o reconhecimento do sistema de aquisição. A transformação foi feita por meio do conversor de sinal modelo 2647B processado pelo módulo de aquisição de dados, Pulse 3160-A-042, e transferido para um computador por meio de um cabo de rede e neste processado pelo software Pulse LabShop e pós-processamento no software Pulse Reflex. Para causar a excitação na estrutura utilizou-se um martelo com cabeça de impedância modelo 82006-003.

3.3.2 Configuração

Para simplificação da análise e praticidade na medição, o violão teve suas cordas retiradas e suspenso por garrotes cirúrgicos e linhas em uma estrutura de metal elevada firmada por blocos de concreto conforme a ilustrado na Figura (3.23). Tal configuração visava alcançar a condição de contorno livre-livre, que segundo KLOUTSEY (2006), o método mais eficaz para aproximação do caso teórico encontra-se em apoios elásticos em uma estrutura suspensa.

Figura 3.23 – Configuração experimental para a condição de contorno livre-livre



Fonte: Produção do Autor, 2019.

3.3.3 Medições

Foram adquiridas três medições em cada um dos pontos, de forma que o acelerômetro ficou fixo em um ponto em cima do cavalete na linha central do violão, enquanto a excitação com o martelo percorria os pontos do violão. A interpretação do aplicativo dos pontos se deu por meio de uma reprodução da malha dos pontos marcados no tampo do violão e estes conectados entre

seus pares adjacentes. Tanto a leitura do sinal acelerômetro quanto do martelo foram medidas na direção perpendicular ao plano do tempo.

A aquisição de força do martelo e aceleração do acelerômetro foram transferidos ao módulo de aquisição de dados e deste transferidos para o software LabShop que transformou o sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência através de uma Transformada Rápida de Fourier (FFT), ponderando o sinal do acelerômetro pelo sinal do martelo, resultando em uma Função Resposta em Frequência (FRF).

A resposta de cada ponto foi a média linear das três FRFs medidas em cada ponto. Para cada conjunto de medições também foi gerada a função coerência no domínio da frequência para que fosse possível manter um controle de consistência entre as excitações.

A tela principal de medição no software contava com a FRF da última impactação, a FRF média das impactações, a função coerência, o ponto de impactação esquematizado na malha, o nível de sinal dos transdutores, o contador de medição e o detector de repique, conforme a Figura 3.24.

Figura 3.24 – Tela de medição no software Pulse LabShop



Fonte: Produção do Autor, 2019.

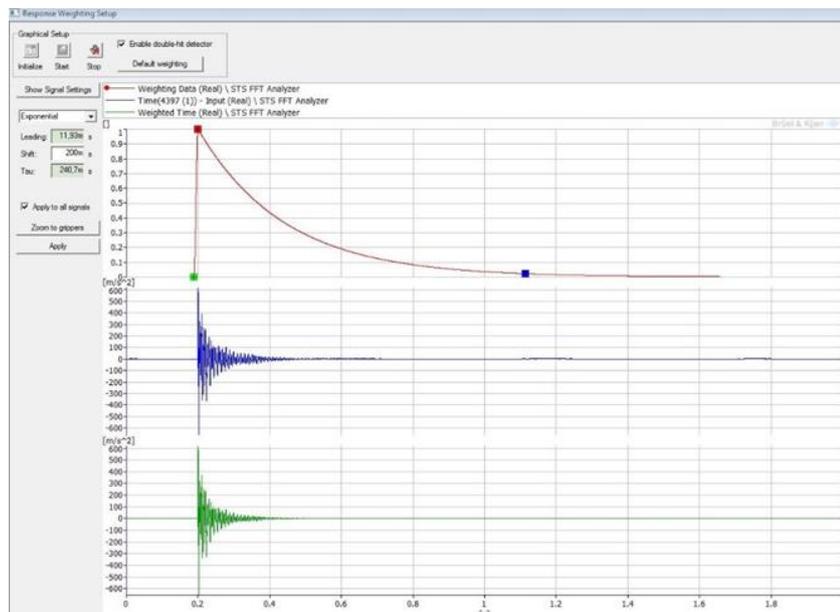
3.3.4 Janelamento

Para reduzir problemas de descontinuidade do sinal com a transformação deste do período do tempo para a frequência, utiliza-se o janelamento, que limita o sinal dentro de um intervalo de tempo.

Para o sinal do martelo utilizou-se um janelamento do tipo transiente que representa bem o impulso instantâneo do martelo (Figura 3.25), enquanto para o sinal do acelerômetro, um janelamento do tipo decaimento exponencial torna-se mais adequado (Figura 3.26).

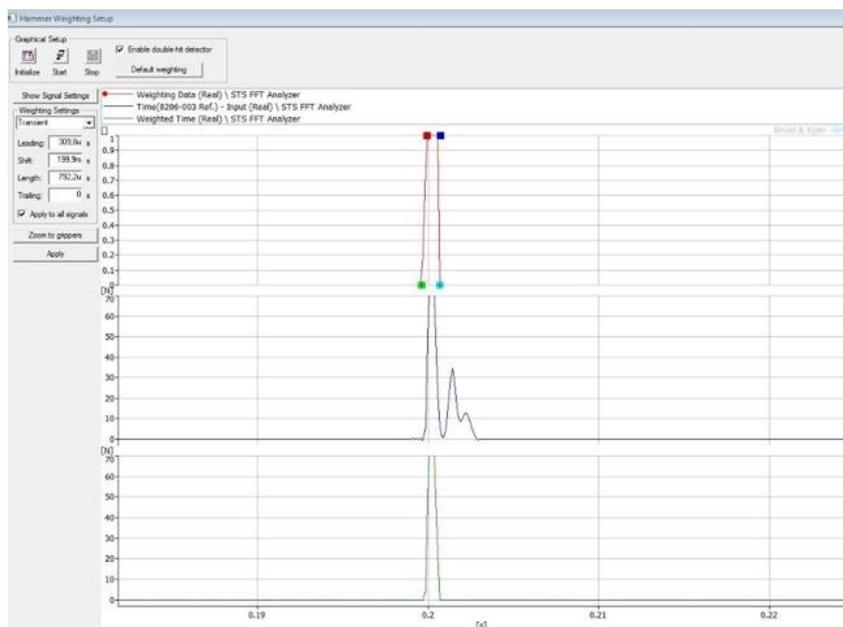
Caso uma excitação seja imprecisa e atinja a estrutura mais de uma vez dentro do sinal de janelamento do martelo, o sinal gerado pela medição será impreciso e deve ser descartado. O fenômeno conhecido como repique é detectado pelo programa e invalida a impactação.

Figura 3.25 – Janelamento do sinal do acelerômetro



Fonte: Produção do Autor, 2019.

Figura 3.26 – Janelamento do sinal do martelo



Fonte: Produção do Autor, 2019.

3.3.5 Gatilho

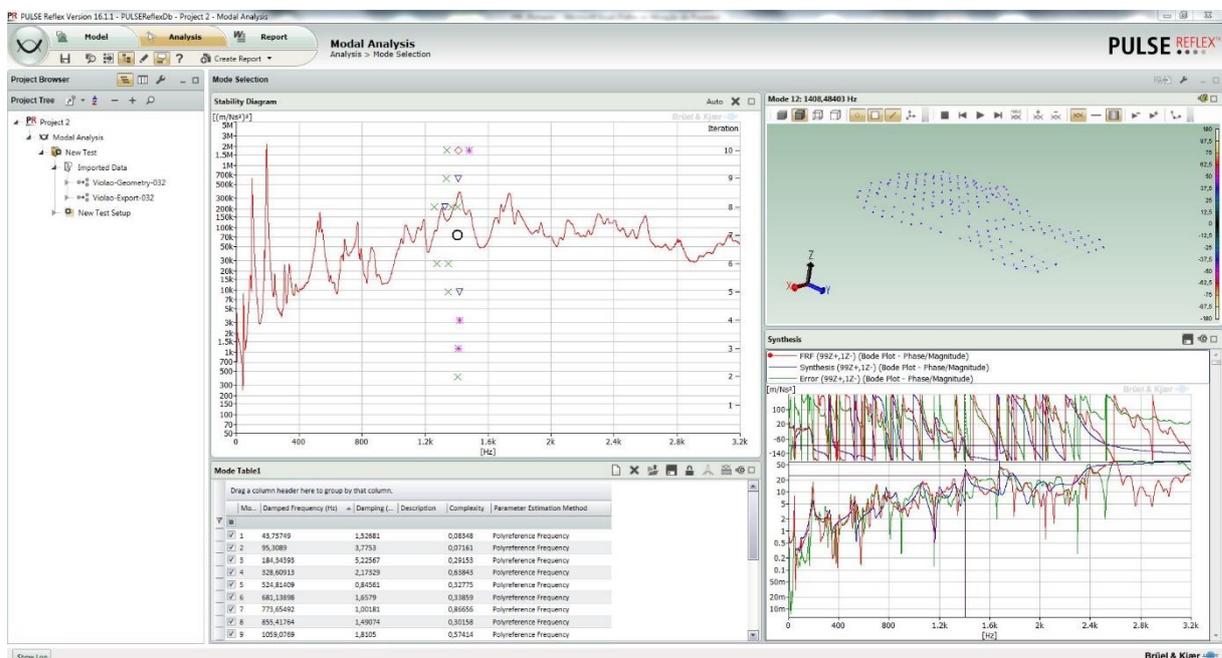
O gatilho, é o parâmetro interpretado pelo software para início à medição a partir de um intervalo de força definida pelo usuário, ou seja, se a força em que o gatilho está programado não for atingida, o software não registra a medição pois o mesmo não considerou a excitação como sendo um impulso de medição.

3.3.6 Pós-processamento

Após a aquisição dos dados, estes foram exportados para o software Pulse Reflex, também da fabricante B&K, onde é possível ver uma animação dos pontos nos modos de vibração da estrutura.

O programa utiliza todas as FRFs e as sintetiza formando uma função global para o sistema. Através de um número de iterações definidas pelo usuário, o programa utiliza um de mínimos quadrados *Poly-reference Frequency* para estimar os parâmetros modais, gerando um diagrama de estabilização (Figura 3.27).

Figura 3.27 – Seleção dos modos



Fonte: Produção do Autor, 2019.

A análise foi realizada no intervalo de 0 Hz a 2400 Hz, aproximadamente o dobro da maior frequência da nota mais aguda do violão, segmentada em bandas de 400 Hz.

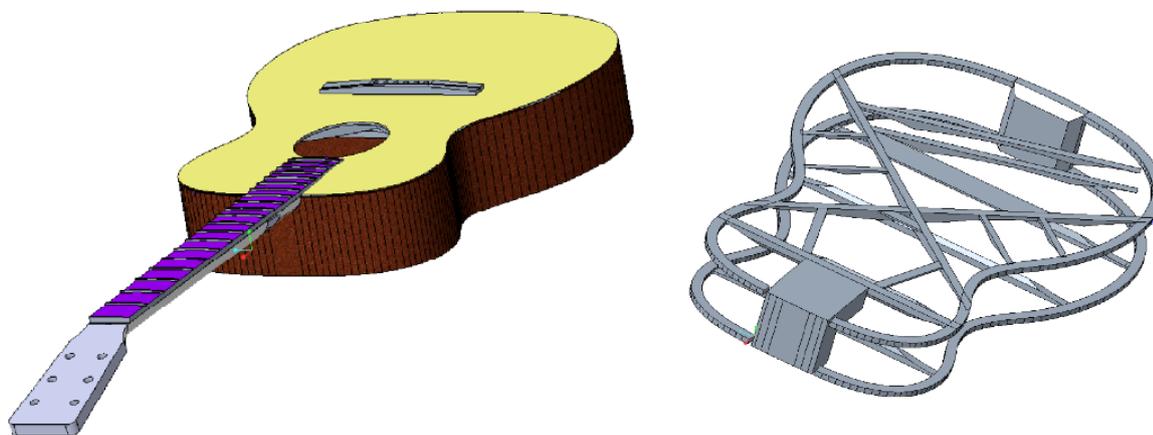
As formas modais dos pontos calculados foram comparadas visualmente com o modelo numérico e com base nos estudos de RUSSEL (1998). Dentro do intervalo analisado foram identificados 17 modos, dos quais foram extraídas as frequências, fator de amortecimento e deslocamentos nodais. Ilustrações das formas modais encontram-se no Apêndice A.

3.4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Como objeto de comparação para as medições, realizou-se uma análise modal do instrumento por métodos de elementos finitos através do software ANSYS. Para isso, primeiramente foi necessário criar um modelo computacional 3D do violão com a maior fidelidade o possível em relação ao modelo real utilizando o software de desenho computacional *Creo Parametric*.

Cada componente do violão foi individualmente projetado e posteriormente unidos em um único arquivo de montagem. Este procedimento se fez necessário para que fosse possível definir a direção das propriedades da madeira em cada parte do instrumento uma vez que o material é anisotrópico e os componentes do violão não são paralelos entre si (Figura 3.28).

Figura 3.28 – Geometria das estruturas externas e internas em 3D



Fonte: Produção do Autor, 2019.

3.4.1 Elaboração do modelo

Importando a geometria em CAD do violão em um módulo de análise modal do ANSYS. À biblioteca de materiais foram adicionadas cada uma das cinco madeiras do instrumento sendo o abeto, o pinheiro e o jatobá, consideradas como materiais ortotrópicos linearmente elásticos

com as resistências nas direções Z e Y com os mesmos valores, uma vez que a hipótese de transversalmente anisotrópico foi assumida. O mogno e roxinho foram considerados como isotrópicos assumindo baixo efeito da anisotropia nos componentes que utilizam essas madeiras.

Ainda para a representar a orientação das direções da anisotropia do material, foi criado um sistema de coordenadas local para componente.

3.4.2 Simplificação de geometria

Embora um modelo computacional idêntico ao real seja desejado, foi necessário simplificar a geometria para simplificação dos cálculos e diminuição do tempo de processamento. Além disso, a licença estudantil utilizada limita a complexidade da geometria e a geração da malha na mesma. Desta forma, tomou-se a superfície média do tampo, laterais e fundo.

A geometria do braço foi significativamente simplificada eliminando superfícies curvas e furos, assim como na geometria da ponte. As estruturas do fundo foram removidas uma vez em que o fundo em si não era objeto principal de análise e com o objetivo de encaixar o modelo dentro das limitações impostas pela licença.

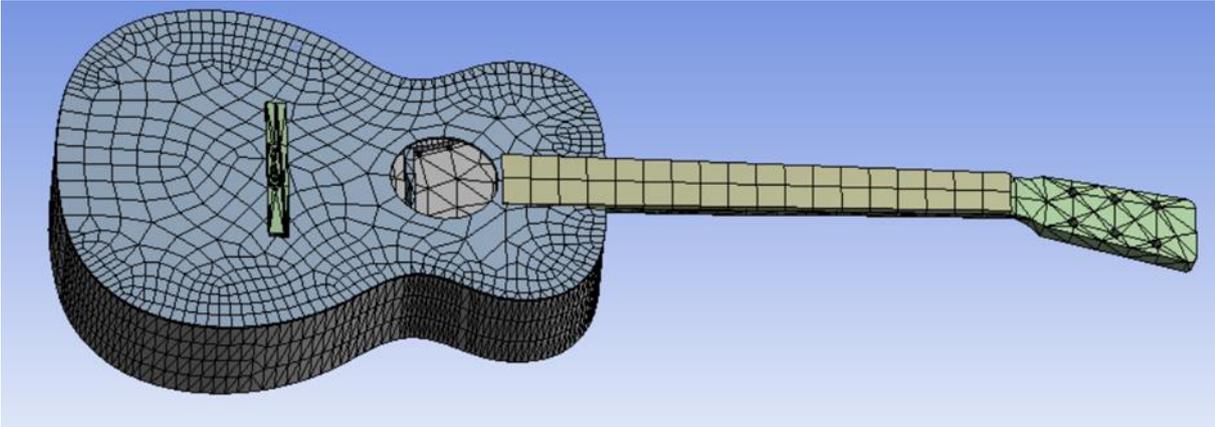
3.4.3 Malha

Foi designado como prioridade a formação de elementos sólidos do tipo *Hex Dominant* para todos os componentes, exceto para o tampo, laterais e fundo, em que se utilizou elementos de casca tipo Shell63. Para todas as faces utilizou-se do recurso de geração de malha mapeada para maior uniformidade dos elementos, embora, em algumas faces, este recurso não tenha sido efetivo ou mesmo aplicável.

Para garantir que os nós da malha simulada fossem coincidentes (ou pelo menos próximos) à malha experimental, foi encontrado como artifício a criação, no modelo numérico, de algumas linhas coincidentes com as do modelo físico para que, ao gerar a malha, os elementos fossem limitados por estas e então nós nos vértices dos quadrados. Mesmo que uma malha totalmente coincidente não tenha sido gerada, esta foi utilizada para a análise e deverá ser aprimorada em trabalhos futuros.

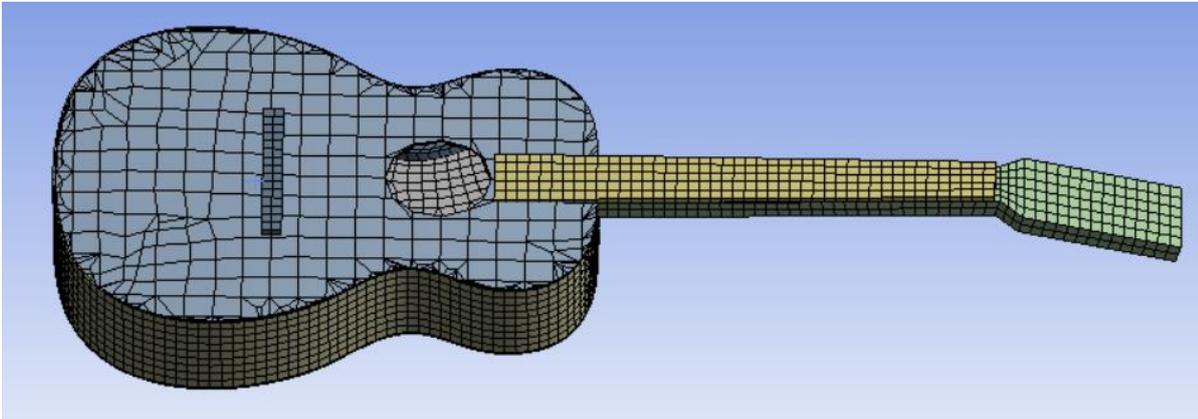
A malha utilizada conteve 21.885 nós e 6.132 elementos.

Figura 3.29 – Malha gerada antes da simplificação da geometria



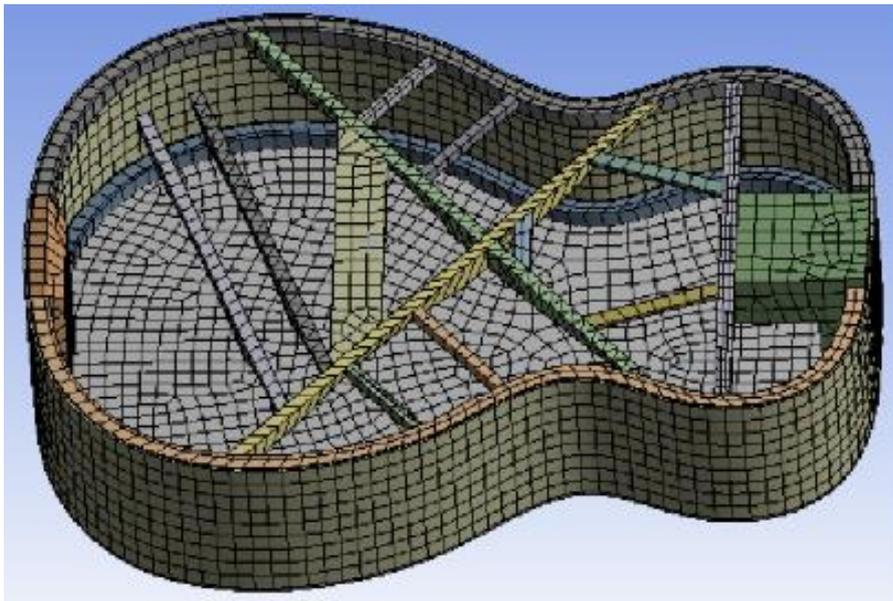
Fonte: Produção do Autor, 2019.

Figura 3.30 – Malha gerada após a simplificação da geometria



Fonte: Produção do Autor, 2019.

Figura 3.31 – Malha dos componentes internos



Fonte: Produção do Autor, 2019.

3.4.4 Conexões

As conexões entre os elementos foram feitas através de contatos do tipo *bonded* entre as faces adjacentes a partir de uma formulação MPC com esfera de influência de 2,66mm. Esta configuração restringe o deslocamento relativo entre os nós da malha faces conectadas a zero. Esta hipótese é razoável uma vez em que a cola utilizada para unir os componentes do violão é mais resistente do que a própria madeira segundo especificações do fabricante. O modelo conteve 81 conexões e 8958 elementos de contato.

3.4.5 Ajustes de análise

Como resposta, calculou-se quarenta modos no intervalo de 5Hz a 3000Hz de forma a eliminar da resposta os seis primeiros modos de corpo rígido enquanto o limite superior possibilitou uma boa margem para análise sem custo computacional significativo. O cálculo foi realizado através do algoritmo de Lanczos.

3.4.6 Pós-processamento

Comparando visualmente os modos obtidos experimentalmente com os calculados pelo ANSYS e em relação à teoria, identificaram-se os modos, e seus resultados exportados para o Excel onde foram separados os nós relativos à malha experimental e tomado e agrupados em um vetor para cada modo com suas respectivas frequências naturais.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo contempla a análise dos resultados experimentais e numéricos comparando-os pelo método MAC, calculados a partir de um algoritmo programado em VBA para o Excel.

Para melhor visualização da matriz de correlação entre os modos utilizou a seguinte escala de cores: vermelho para valores entre 0,9 e 1,0; amarelo, para valores entre 0,5 e 0,9; azul para valores entre 0,1 e 0,5; e branco para valores inferiores a 0,1.

Como o modelo numérico disponibiliza os valores reais de deslocamento nodal, portanto estes foram considerados para os cálculos de MAC. Com os valores experimentais dos vetores de deslocamento nodais reais e a partir da Equação (11), as matrizes de AutoMAC são apresentadas. Da mesma forma foi realizado o cálculo do CrossMAC.

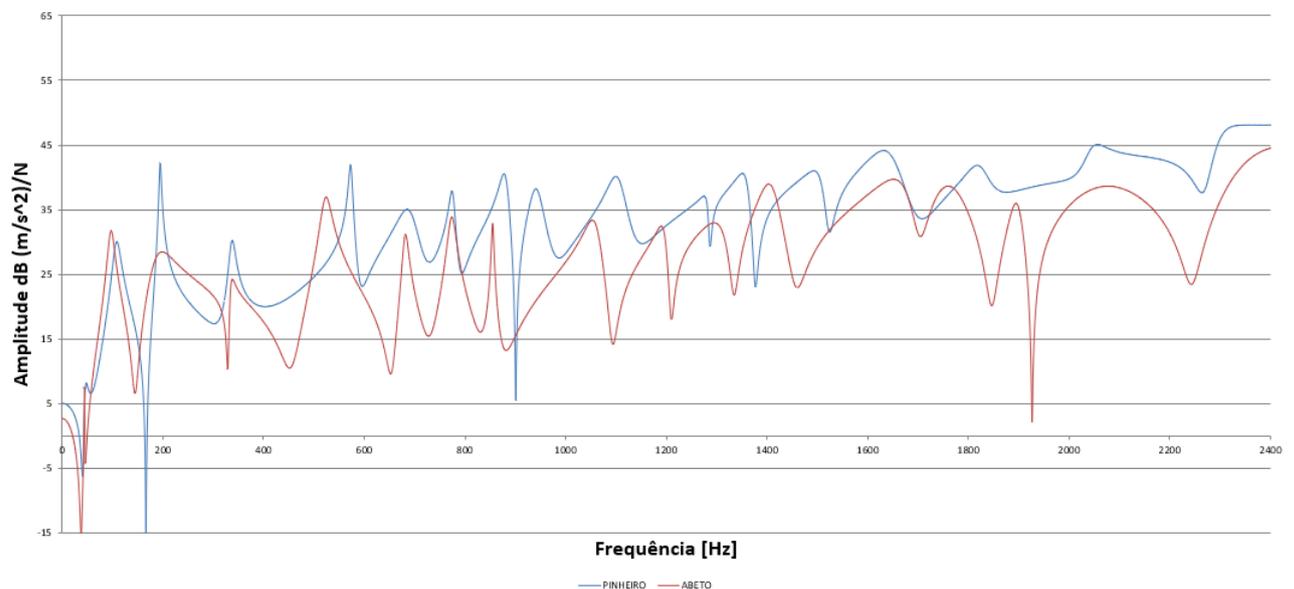
Os vetores foram normalizados dividindo todos os valores do vetor pelo maior valor deste.

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Da síntese de todas as FRFs experimentais, obteve-se uma função global para cada uma das duas estruturas, apresentada na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Comparação entre as FRFs experimentais

Funções Resposta em Frequência (FRF)



Observando isoladamente os valores de frequência natural para os respectivos modos, bem como seus amortecimentos a partir da Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Frequências e amortecimentos experimentais

Modo	Frequência [Hz]		Amortecimento	
	Pinheiro	Abeto	Pinheiro	Abeto
1	45,56	43,76	7,83%	1,53%
2	107,85	95,31	7,28%	3,78%
3	194,65	184,34	1,13%	5,23%
4	337,12	328,61	1,94%	2,17%
5	573,25	524,81	0,65%	0,85%
6	690,73	681,14	3,13%	1,66%
7	775,55	773,65	0,76%	1,00%
8	880,84	855,42	1,09%	1,49%
9	942,04	1059,08	1,58%	1,81%
10	1104,15	1197,24	1,66%	1,10%
11	1283,65	1317,87	0,47%	1,54%
12	1360,78	1409,76	1,02%	1,58%
13	1509,80	1675,46	1,25%	0,02%
14	1645,05	1759,56	2,22%	1,85%
15	1823,79	1896,72	1,44%	5,73%
16	2044,41	2063,65	1,22%	1,49%
17	2123,89	2348,25	0,03%	4,49%

Fonte: Produção do Autor, 2019.

4.1.1 Violão de Pinheiro

A Figura 4.2 apresentada a matriz MAC calculadas para o pinheiro.

Figura 4.2 – AutoMAC para o modelo experimental em pinheiro

		Pinheiro																	
		45,6	107,9	194,7	337,1	573,2	690,7	775,5	880,8	942,0	1104,2	1283,7	1360,8	1509,8	1645,0	1823,8	2044,4	2123,9	
Pinheiro	Frequencia [Hz]	45,6	1,00	0,18	0,06	0,07	0,00	0,00	0,00	0,04	0,02	0,01	0,03	0,00	0,08	0,01	0,02	0,07	0,00
	107,9	0,18	1,00	0,88	0,00	0,04	0,04	0,02	0,03	0,01	0,16	0,37	0,00	0,32	0,10	0,15	0,34	0,10	0,00
	194,7	0,06	0,88	1,00	0,00	0,02	0,08	0,05	0,02	0,01	0,20	0,31	0,01	0,25	0,06	0,11	0,25	0,09	0,00
	337,1	0,07	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
	573,2	0,00	0,04	0,02	0,00	1,00	0,00	0,05	0,02	0,02	0,01	0,01	0,06	0,01	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00
	690,7	0,00	0,04	0,08	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,04	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00
	775,5	0,00	0,02	0,05	0,03	0,05	0,00	1,00	0,35	0,01	0,03	0,08	0,02	0,09	0,02	0,00	0,04	0,00	0,00
	880,8	0,04	0,03	0,02	0,00	0,02	0,00	0,35	1,00	0,10	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	942,0	0,02	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,01	0,10	1,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00
	1104,2	0,01	0,16	0,20	0,01	0,01	0,00	0,03	0,00	0,00	1,00	0,01	0,00	0,01	0,03	0,00	0,04	0,02	0,00
	1283,7	0,03	0,37	0,31	0,00	0,01	0,04	0,08	0,00	0,00	0,01	1,00	0,01	0,53	0,16	0,10	0,31	0,03	0,00
	1360,8	0,00	0,00	0,01	0,02	0,06	0,00	0,02	0,03	0,02	0,00	0,01	1,00	0,06	0,00	0,04	0,04	0,04	0,00
	1509,8	0,08	0,32	0,25	0,00	0,01	0,02	0,09	0,00	0,00	0,01	0,53	0,06	1,00	0,16	0,14	0,37	0,03	0,00
	1645,0	0,01	0,10	0,06	0,01	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,03	0,16	0,00	0,16	1,00	0,11	0,15	0,01	0,00
	1823,8	0,02	0,15	0,11	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,02	0,00	0,10	0,04	0,14	0,11	1,00	0,24	0,08	0,00
	2044,4	0,07	0,34	0,25	0,00	0,02	0,00	0,04	0,00	0,01	0,04	0,37	0,15	0,37	0,15	0,24	1,00	0,02	0,00
	2123,9	0,00	0,10	0,09	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,02	0,03	0,00	0,03	0,01	0,08	0,02	1,00	0,00

Fonte: Produção do Autor, 2019.

É possível notar que os modos, em geral possuem baixa correlação exceto na diagonal principal. Também é perceptível forte correlação entre o segundo e terceiro modo, como esperado a partir dos estudos de Russel (1998).

Figura 4.3 – AutoMAC para o modelo experimental em abeto

		Abeto																
Frequencia [Hz]		43,8	95,3	184,3	328,6	524,8	681,1	773,7	855,4	1059,1	1197,2	1317,9	1409,8	1675,5	1759,6	1896,7	2063,6	2348,3
Abeto	43,8	1,00	0,08	0,12	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,02	0,04	0,10	0,00	0,00	0,02	0,14	0,21	0,16
	95,3	0,08	1,00	0,42	0,46	0,02	0,21	0,00	0,75	0,69	0,74	0,15	0,45	0,47	0,69	0,85	0,82	0,86
	184,3	0,12	0,42	1,00	0,39	0,04	0,17	0,00	0,59	0,55	0,52	0,04	0,38	0,41	0,50	0,41	0,32	0,40
	328,6	0,00	0,46	0,39	1,00	0,00	0,05	0,00	0,49	0,44	0,57	0,07	0,38	0,40	0,46	0,53	0,45	0,51
	524,8	0,00	0,02	0,04	0,00	1,00	0,17	0,05	0,02	0,02	0,06	0,08	0,00	0,00	0,08	0,03	0,04	0,03
	681,1	0,01	0,21	0,17	0,05	0,17	1,00	0,00	0,15	0,16	0,19	0,02	0,11	0,15	0,19	0,18	0,15	0,17
	773,7	0,01	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00
	855,4	0,00	0,75	0,59	0,49	0,02	0,15	0,00	1,00	0,75	0,71	0,14	0,51	0,57	0,62	0,74	0,67	0,74
	1059,1	0,02	0,69	0,55	0,44	0,02	0,16	0,00	0,75	1,00	0,63	0,08	0,52	0,51	0,68	0,76	0,68	0,76
	1197,2	0,04	0,74	0,52	0,57	0,06	0,19	0,00	0,71	0,63	1,00	0,29	0,41	0,46	0,72	0,83	0,77	0,82
	1317,9	0,10	0,15	0,04	0,07	0,08	0,02	0,02	0,14	0,08	0,29	1,00	0,02	0,10	0,20	0,24	0,24	0,25
	1409,8	0,00	0,45	0,38	0,38	0,00	0,11	0,01	0,51	0,52	0,41	0,02	1,00	0,24	0,26	0,43	0,42	0,44
	1675,5	0,00	0,47	0,41	0,40	0,00	0,15	0,01	0,57	0,51	0,46	0,10	0,24	1,00	0,52	0,47	0,36	0,45
	1759,6	0,02	0,69	0,50	0,46	0,08	0,19	0,03	0,62	0,68	0,72	0,20	0,26	0,52	1,00	0,71	0,62	0,71
	1896,7	0,14	0,85	0,41	0,53	0,03	0,18	0,00	0,74	0,76	0,83	0,24	0,43	0,47	0,71	1,00	0,96	0,93
2063,6	0,21	0,82	0,32	0,45	0,04	0,15	0,00	0,67	0,68	0,77	0,24	0,42	0,36	0,62	0,96	1,00	0,96	
2348,3	0,16	0,86	0,40	0,51	0,03	0,17	0,00	0,74	0,76	0,82	0,25	0,44	0,45	0,71	0,93	0,96	1,00	

Fonte: Produção do Autor, 2019.

Percebe-se neste caso que grande parte dos modos apresentaram correlação maior do que 0,1. Este resultado gera questionamento sobre a confiabilidade do experimento realizado, uma vez em que o outro violão experimentado apresentou resultados completamente diferentes para o AutoMAC.

Ainda, o CrossMAC entre os dois modelos, representado na figura

Figura 4.4 – CrossMAC entre os modelos experimentais

		Abeto																
Frequencia [Hz]		43,8	95,3	184,3	328,6	524,8	681,1	773,7	855,4	1059,1	1197,2	1317,9	1409,8	1675,5	1759,6	1896,7	2063,6	2348,3
Pinheiro	45,6	0,71	0,17	0,02	0,24	0,10	0,16	0,07	0,06	0,01	0,06	0,19	0,21	0,17	0,24	0,10	0,12	0,03
	107,9	0,30	0,81	0,73	0,72	0,05	0,40	0,46	0,45	0,32	0,47	0,59	0,41	0,28	0,40	0,56	0,55	0,41
	194,7	0,08	0,68	0,90	0,52	0,07	0,34	0,39	0,32	0,29	0,41	0,46	0,31	0,20	0,22	0,49	0,47	0,46
	337,1	0,19	0,01	0,00	0,13	0,11	0,10	0,04	0,05	0,02	0,02	0,06	0,01	0,06	0,07	0,06	0,06	0,03
	573,2	0,01	0,03	0,00	0,03	0,53	0,01	0,00	0,04	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	690,7	0,00	0,01	0,06	0,00	0,06	0,18	0,05	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,02	0,00	0,05	0,05	0,07
	775,5	0,01	0,01	0,04	0,00	0,01	0,02	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	880,8	0,07	0,02	0,02	0,09	0,07	0,15	0,00	0,03	0,02	0,08	0,10	0,07	0,01	0,06	0,10	0,09	0,04
	942,0	0,01	0,00	0,00	0,02	0,08	0,11	0,00	0,00	0,02	0,03	0,03	0,05	0,00	0,02	0,05	0,04	0,02
	1104,2	0,00	0,12	0,20	0,10	0,00	0,06	0,03	0,02	0,00	0,08	0,09	0,05	0,00	0,02	0,11	0,09	0,10
	1283,7	0,08	0,30	0,25	0,25	0,05	0,14	0,28	0,27	0,38	0,25	0,22	0,19	0,15	0,15	0,19	0,19	0,14
	1360,8	0,00	0,00	0,02	0,01	0,12	0,04	0,02	0,01	0,06	0,00	0,02	0,00	0,00	0,03	0,04	0,04	0,05
	1509,8	0,12	0,27	0,17	0,20	0,03	0,08	0,23	0,23	0,20	0,26	0,20	0,27	0,16	0,15	0,14	0,14	0,07
	1645,0	0,02	0,11	0,02	0,01	0,00	0,01	0,02	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,02	0,00	0,06	0,01	0,01
	1823,8	0,04	0,13	0,08	0,08	0,01	0,05	0,06	0,04	0,06	0,07	0,07	0,06	0,00	0,02	0,09	0,08	0,05
2044,4	0,11	0,25	0,17	0,22	0,00	0,10	0,14	0,14	0,10	0,23	0,21	0,11	0,05	0,05	0,17	0,18	0,09	
2123,9	0,01	0,07	0,07	0,07	0,00	0,05	0,06	0,05	0,03	0,09	0,08	0,01	0,02	0,02	0,09	0,07	0,07	

Fonte: Produção do Autor, 2019.

As formas modais do modelo experimentais não foram exibidas neste trabalho pois mesmo analisar sua animação é uma tarefa complicada pois a visualização disponível torna difícil a visualização e apresentá-la como imagens estáticas seria praticamente ininterpretável.

4.2 RESULTADOS NUMÉRICOS

Com os resultados do modelo numérico foi possível identificar apenas seis modos de vibração coerentes com a teoria e os modos experimentais. Como neste modelo as estruturas do fundo estavam ausentes, muitos dos modos encontrados em baixa frequência eram correspondentes a deslocamentos do fundo.

A Tabela 4.2 apresenta as frequências correspondentes a cada um dos modos identificados para os violões com as madeiras testadas.

Tabela 4.2 – Frequências dos seis primeiros modos numéricos

Modo	Frequência [Hz]	
	Abeto	Pinheiro
1	96,17	96,88
2	146,95	147,62
3	215,46	241,35
4	340,77	343,83
5	434,33	462,89
6	480,48	530,83

Fonte: Produção do Autor, 2019.

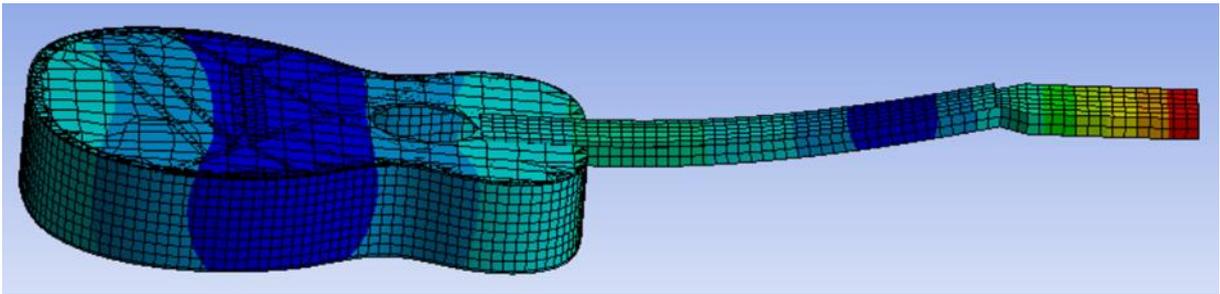
Percebe-se que assim como indicado nos resultados experimentais, as frequências naturais do violão com tampo em abeto são menores do que as do violão com tampo em pinheiro.

O primeiro modo encontrado corresponde com o primeiro modo teórico, que é o modo de flexão do violão. No segundo modo, assim como na teoria, é possível verificar o movimento do tampo e do fundo em fases opostas, este é o modo de respiração. O terceiro modo simulado também coincidiu com o terceiro modo teórico.

Foi observado que o quarto e quinto modo numérico inverteram suas posições em relação aos modos teóricos.

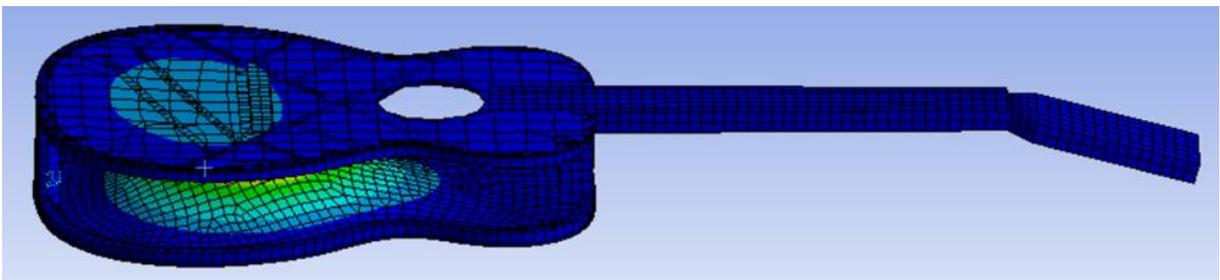
As formas modais correspondentes são ilustradas nas Figuras 4.5-4.10.

Figura 4.5 – Primeiro modo numérico. Modo de flexão



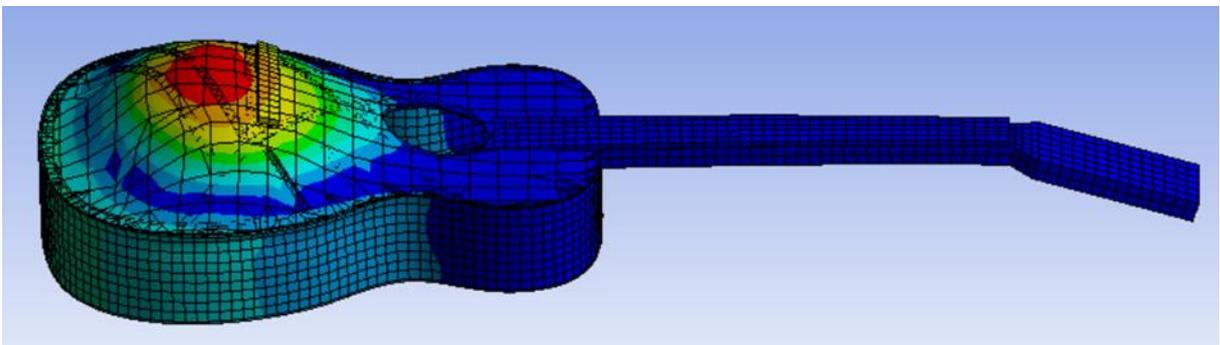
Fonte: Produção do Autor, 2019.

Figura 4.6 – Segundo modo numérico. Modo de “respiração”



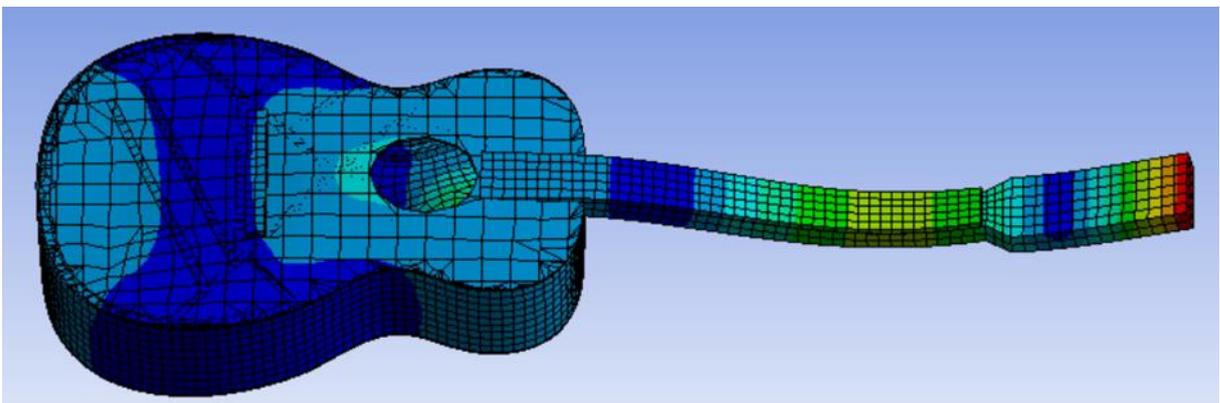
Fonte: Produção do Autor, 2019.

Figura 4.7 – Terceiro modo numérico



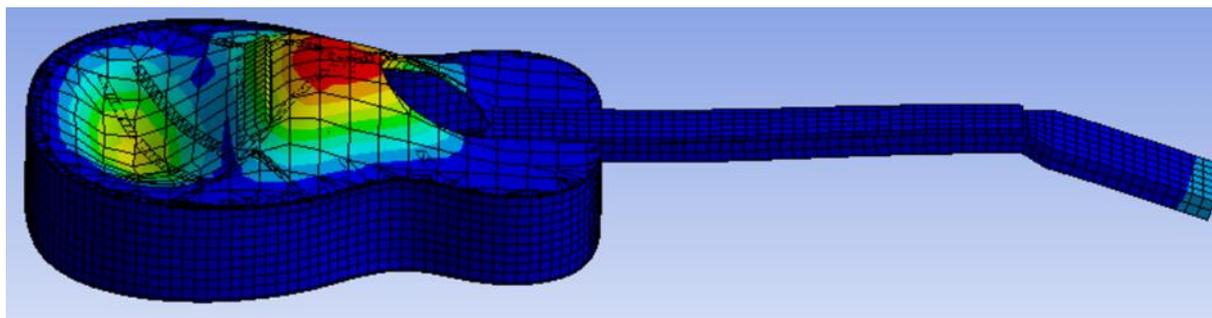
Fonte: Produção do Autor, 2019.

Figura 4.8 – Quarto modo numérico.



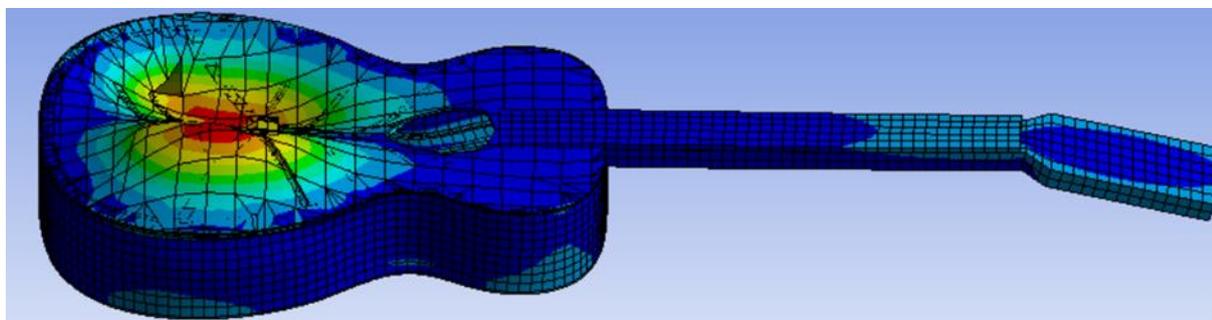
Fonte: Produção do Autor, 2019.

Figura 4.9 – Quinto modo numérico



Fonte: Produção do Autor, 2019.

Figura 4.10 – Sexto modo numérico



Fonte: Produção do Autor, 2019.

As figuras 4.11-4.13 apresentam os resultados de AutoMAC para os modelos numéricos, que apresentaram níveis indesejados de correlação entre modos distintos.

Figura 4.11 – AutoMAC para o modelo numérico em Abeto

		Abeto					
		96,17	146,95	215,46	340,77	443,33	480,48
Abeto	Frequência [Hz]	96,17	0,45	0,30	0,70	0,22	0,26
	146,95	0,45	1,00	0,88	0,56	0,62	0,73
	215,46	0,30	0,88	1,00	0,37	0,47	0,58
	340,77	0,70	0,56	0,37	1,00	0,63	0,37
	443,33	0,22	0,62	0,47	0,63	1,00	0,44
	480,48	0,26	0,73	0,58	0,37	0,44	1,00

Fonte: Produção do Autor, 2019.

Figura 4.12 – AutoMAC para o modelo numérico em Pinheiro

		Pinheiro					
		Frequência [Hz]	96,88	147,62	241,35	343,83	462,89
Pinheiro	96,88	1,00	0,48	0,28	0,72	0,22	0,25
	147,62	0,48	1,00	0,84	0,57	0,61	0,73
	241,35	0,28	0,84	1,00	0,34	0,49	0,60
	343,83	0,72	0,57	0,34	1,00	0,58	0,31
	462,89	0,22	0,61	0,49	0,58	1,00	0,38
	530,83	0,25	0,73	0,60	0,31	0,38	1,00

Fonte: Produção do Autor, 2019.

Figura 4.13 – CrossMAC para os modelos numéricos

		Pinheiro					
		Frequência [Hz]	96,88	147,62	241,35	343,83	462,89
Abeto	96,17	1,00	0,49	0,29	0,73	0,23	0,26
	146,95	0,43	0,99	0,88	0,52	0,61	0,74
	215,46	0,29	0,83	1,00	0,33	0,46	0,59
	340,77	0,70	0,61	0,38	1,00	0,64	0,34
	443,33	0,22	0,61	0,50	0,57	0,98	0,39
	480,48	0,25	0,72	0,60	0,34	0,45	0,96

Fonte: Produção do Autor, 2019.

4.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS

Embora os resultados anteriores indiquem problemas na análise e no modelo devido às fortes correlações entre os modos, a realização de um cálculo de CrossMAC entre o modelo numérico e experimental pode indicar quão distantes estão os modelos (Figuras 4.14-4.15).

Comparando visualmente as formas modais entre o modelo experimental e o numérico, infere-se que o primeiro, segundo e terceiro modo sejam equivalentes entre o modelo experimental, o quarto modo experimental relaciona-se com o quinto numérico enquanto o quinto modo experimental se parece com o quarto modo numérico. O sexto modo numérico aparenta ser o mesmo do sexto modo experimental. Além disso, a Tabela 4.3 compara as frequências dos modos entre os modelos de mesmo material.

Figura 4.14 – CrossMAC entre os modelos experimentais e numérico para o abeto

		Numérico - Abeto					
		Frequência [Hz]	96,17	146,95	215,46	340,77	443,33
Experimental - Abeto	43,76	0,19	0,10	0,02	0,04	0,10	0,04
	95,38	0,22	0,83	0,77	0,52	0,33	0,72
	184,6	0,04	0,27	0,37	0,13	0,06	0,29
	328,69	0,15	0,36	0,33	0,17	0,30	0,30
	524,41	0,05	0,00	0,00	0,26	0,10	0,00
	681,139	0,00	0,11	0,15	0,04	0,00	0,08

Fonte: Produção do Autor, 2019.

Figura 4.15 – CrossMAC entre os modelos experimentais e numérico para o Pinheiro

		Numérico - Pinheiro					
		Frequência [Hz]	96,88	147,62	241,35	343,83	462,89
Experimental - Pinheiro	45,45	0,30	0,22	0,10	0,05	0,03	0,13
	107,85	0,21	0,78	0,78	0,58	0,35	0,63
	194,65	0,02	0,50	0,64	0,56	0,15	0,49
	337,18	0,00	0,02	0,01	0,10	0,24	0,04
	573,25	0,00	0,01	0,02	0,32	0,11	0,08
	690,73	0,06	0,16	0,07	0,10	0,00	0,30

Fonte: Produção do Autor, 2019.

Tabela 4.3 – Comparação entre frequências experimentais e numéricas para a mesma forma modal

Modo	Frequência [Hz]					
	Pinheiro			Abeto		
	Experimental	Numérico	Diferença	Experimental	Numérico	Diferença
1	45,56	96,88	113%	43,8	96,17	120%
2	107,85	147,62	37%	95,3	146,95	54%
3	194,65	241,35	24%	184,3	215,46	17%
4	337,12	462,89	37%	328,6	434,33	32%
5	573,25	343,83	-40%	524,8	340,77	-35%
6	690,73	530,83	-23%	681,1	480,48	-29%

Fonte: Produção do Autor, 2019.

Percebe-se que para ambos os materiais as frequências naturais do modelo numérico não representaram o modelo experimental com coerência. Também é possível verificar que há maior correlação entre o quarto e quinto modo do que entre eles mesmos, confirmando a inversão dos modos.

5 CONCLUSÕES

Considerando os resultados calculados e da observação dos fenômenos ao longo da realização deste trabalho, apresenta-se a seguir algumas conclusões gerais e para cada conjunto de resultados obtidos.

A partir das representações de AutoMAC, é possível notar que a matriz de correlação possui todos os valores da diagonal principal igual a um pois cada modo deve estar perfeitamente correlacionado com ele mesmo e que esta matriz é diagonal, conforme define a teoria. Ainda, há ocorrência de termos não-nulos fora da diagonal, o que significa que alguns dos modos apresentam um grau de correlação com os outros. Segundo Portela (2014), isto pode ocorrer devido à propriedade de ortogonalidade dos modos ser apenas aplicável quando todos os graus de liberdade estão incluídos no cálculo e que é necessário incluir graus de liberdade suficientes para assegurar a discriminação eficaz entre os vários modos.

Da comparação entre as Funções Resposta em Frequência dos modelos experimentais, é possível notar que o abeto teve a maioria das frequências naturais deslocadas à esquerda. Ao considerar a razão entre o módulo de elasticidade longitudinal e a densidade para o abeto e o pinheiro, proporcional à frequência, a partir da Equação (3) é possível observar, de forma qualitativa, que o abeto apresenta menor frequências naturais, uma vez que esta razão é menor para esta madeira do que para o pinheiro, se considerado dois tampos de mesma espessura. Este fenômeno também é percebido para os resultados numéricos.

A seguir são tomadas algumas conclusões específicas:

5.1 EXPERIMENTAL

Confirmando a teoria, a matriz de AutoMAC é diagonal e com valor igual a um em sua diagonal principal. O modelo experimental em pinheiro apresentou, em geral, pouca correlação entre modos distintos, o que sugere que sejam os verdadeiros modos de vibrar da estrutura. Ainda, pela análise das formas modais, foi possível visualizar os modos apresentados na teoria.

Para o abeto, é possível observar que a maioria dos modos possuem correlação maior do que 10%. Tais valores resultam de uma análise experimental pouco confiável. Foi percebido, pelas formas modais apresentadas neste modelo, que os modos calculados a partir das FRFs

experimentais não apresentaram deslocamentos coerentes com a teoria para a maioria dos pontos e que os modos apresentavam acoplamento.

A partir do CrossMac era esperado encontrar valores próximos a um na diagonal principal e valores menores que 0,1 para a maioria da correlação entre os modos, como ocorreu com o AutoMAC para o pinheiro. Todavia, não foi possível visualizar boa correlação entre os mesmos modos dos violões com materiais diferentes, enquanto modos distintos apresentaram alguma correlação indesejada.

Como apenas uma amostra de cada madeira utilizada no tampo foi experimentada, o resultado é bastante suscetível a não representar a verdadeira influência do parâmetro variado. Para se ter um resultado mais confiável seria necessário realizar a mesma análise experimental para mais amostras de cada caso estudado e tomada a média entre eles. Embora estivesse disponível mais uma amostra de cada violão, não houve tempo hábil para a realização de mais experimentos.

5.2 MÉTODO NUMÉRICO

Apesar de o método numérico ter apresentado frequências discrepantes e estas serem proporcionais às do experimento, é possível visualizar, certo nível de correlação dos entre os modos experimentais e numéricos através do CrossMAC. Também é possível perceber um aumento nas frequências naturais no tampo de pinheiro, assim como ocorreu no modelo experimental.

Isto indica que o modelo não está tão afastado do modelo real, embora suas condições de contorno e propriedades dos materiais devam ser revisadas, porém não se pode negligenciar a divergência nas frequências. A este erro atribuem-se alguns fatores: a esfera de influência das conexões considerada foi muito grande, de forma que partes do tampo que não possuem interface de contato com as estruturas tiveram os nós conectados, adicionando rigidez ao modelo. Embora não tenham sido tomadas as massas dos componentes do violão ou mesmo de seu conjunto, é possível perceber pelo modelo numérico que a massa total do instrumento é muito pequena, pesando 1600g. Ambos os fatores geram aumento das frequências, conforme a Equação (3).

Do cálculo de AutoMAC, observa-se forte correlação entre os modos, tal comportamento difere do ocorrido no experimento e deve ser melhor investigado.

5.3 COMPARATIVO

Embora seis das formas modais tenham sido observadas como equivalentes ao modelo experimental e seja perceptível alguma correlação entre os modos, os valores de frequência destoaram de forma bastante significativa e não apresentaram correlação entre os resultados, sendo que, para os quatro primeiros modos identificados, o modelo numérico apresentou frequências superiores às experimentais enquanto que, para os dois últimos modos as frequências naturais experimentais foram menores do que as simuladas. Também, a inversão entre o quarto e quinto modo numérico aumentou esta diferença.

Estes resultados sugerem que o modelo numérico não representa o modelo físico com exatidão, o que é factível dadas as restrições impostas à simulação, as simplificações e divergências de geometria e condições de contorno aplicadas.

5.4 CRITÉRIOS SUBJETIVOS

Apesar de a análise ter sido realizada em um contexto estrutural, é válido analisar o resultado sonoro, estético e estrutural dos violões, pois esta é sua real aplicação. Embora estes critérios sejam subjetivos e devam ser analisado por um júri, o autor toma algumas conclusões baseadas em sua percepção.

O resultado sonoro depende fortemente das cordas utilizadas no instrumento, sendo disponíveis no mercado em várias espessuras e composições, porém, ao utilizar-se um conjunto de cordas com mesmas especificações, o autor percebe que o violão com tampo em pinheiro apresenta maior nível sonoro concentrados nas frequências fundamentais das cordas e maior distinção entre as notas, enquanto o violão em abeto apresenta maior tempo de propagação do som e uniformidade nas amplitudes das frequências das cordas, sendo possível identificar modos superiores de vibração destas.

Do ponto de vista estético, o abeto apresenta um desenho mais uniforme e homogêneo, gerado pelo fino espaçamento entre as grãs enquanto é possível perceber no pinheiro maior espaçamento das fibras e, conseqüentemente, variação na coloração. As imperfeições provenientes do trabalho manual podem ser interpretadas como defeitos por alguns, ou como marcas de autenticidade por outros.

Do ponto de vista construtivo, é necessário avaliar o conforto do instrumento desde o formato da caixa acústica e como este se acomoda no corpo do músico, o formato do braço e

quão ergonômico este é em relação à mão do instrumentista, a distância das cordas à escala e espaçamento entre as cordas, uma vez que estes fatores influenciam diretamente na tocabilidade do instrumento. Estes critérios variam drasticamente de acordo com a preferência de cada instrumentista e não se pode tomar nenhuma conclusão concreta neste quesito.

Finalmente, a madeira do Pinheiro Araucária se mostrou uma alternativa viável para a aplicação em tampos de violão. Sua maior resistência mecânica em relação ao abeto possibilita a utilização de menor quantidade de material. Ainda, a madeira proposta é mais acessível financeiramente e comercialmente para o mercado brasileiro, desde que sua fonte esteja de acordo com a legislação vigente.

5.5 FONTES DE INCERTEZA

Durante os procedimentos deste trabalho, algumas considerações foram realizadas para que fosse possível abordar o tema proposto dentro do escopo. Juntamente com alguns métodos aplicados, essas considerações geram níveis de incerteza para o resultado.

Algumas causas prováveis das incertezas são comentadas a seguir.

5.5.1 Fabricação

O processo artesanal e manual de fabricação dos instrumentos não garante reprodutibilidade absoluta em todos os componentes do violão, e, portanto, algumas regiões do instrumento podem diferir ao se comparar entre dois exemplares diferentes e em relação ao modelo em CAD.

5.5.2 Materiais

Como discutido anteriormente, a madeira é um material anisotrópico e heterogêneo, de forma que diferentes partes de uma árvore apresentarão propriedades ligeiramente diferentes. Devido à falta de corpos de prova, não foi possível fazer uma média para os valores de propriedades físicas e mecânicas com um grande grupo de amostras dos materiais utilizados na fabricação dos instrumentos. Além do mais, as madeiras sofrem grandes efeitos de temperatura e umidade, variando suas dimensões e massa e, conseqüentemente, sua densidade.

O método para determinação dos módulos de cisalhamento e coeficiente de Poisson utilizado pelo software Sonelastic é válido apenas para materiais isotrópicos, de forma que os valores encontrados para estes parâmetros são irrealistas.

5.5.3 Análise modal

As experimentações não foram realizadas em uma única etapa. Durante semanas o mesmo violão foi excitado e submetido a diferentes condições de temperatura e umidade, assim como que para cada semana, a configuração do experimento teve de ser reproduzida de forma que o posicionamento do acelerômetro, a suspensão do violão e a condição de fixação da gaiola em que este esteve pendurado variou, mesmo que minimamente.

Ainda, algumas excitações deixaram marcas no tampo do violão e nestas foi possível observar que o local de excitação ocorreu não exatamente no ponto descrito, mas em suas proximidades. A massa do acelerômetro adicionada ao sistema, embora muito pequena (cerca de 1g), também pode alterar a resposta das medições, assim como a massa da fita transparente utilizada para proteger o tampo e o verniz aplicado à superfície.

5.5.4 Espaço Amostral

Estatisticamente, não é confiável assumir o resultado de uma única amostra como o valor que representa precisamente o modelo. Considerando um espaço amostral cujas respostas sejam distribuídas dentro de um intervalo, o valor que melhor representa o modelo é a média de todos os resultados. Quanto maior for o número de amostras, maior será a convergência a um valor central. Portanto, seria desejável, para fins de centralização, que pelo menos três amostras fossem experimentadas, ainda que duas amostras também permitiriam maior confiabilidade nos resultados.

5.5.5 Modelo Numérico

Devido às restrições de 32.000 nós para as malhas e 300 faces para a manipulação da geometria da licença estudantil de que se dispunha, a análise tornou-se limitada. Não foi possível ajustar a esfera de influência das conexões entre os componentes, de forma que o único modo encontrado para a solução do modelo foi através da geração automática desta medida.

O modelo numérico não representa totalmente o modelo experimental pois foi submetido a simplificações de geometria e não foram considerados fatores como tensões internas da madeira, e a aplicação de verniz.

A malha gerada no tempo não foi a mais adequada, o que pode ter gerado problemas de convergência da resposta.

5.6 TRABALHOS FUTUROS

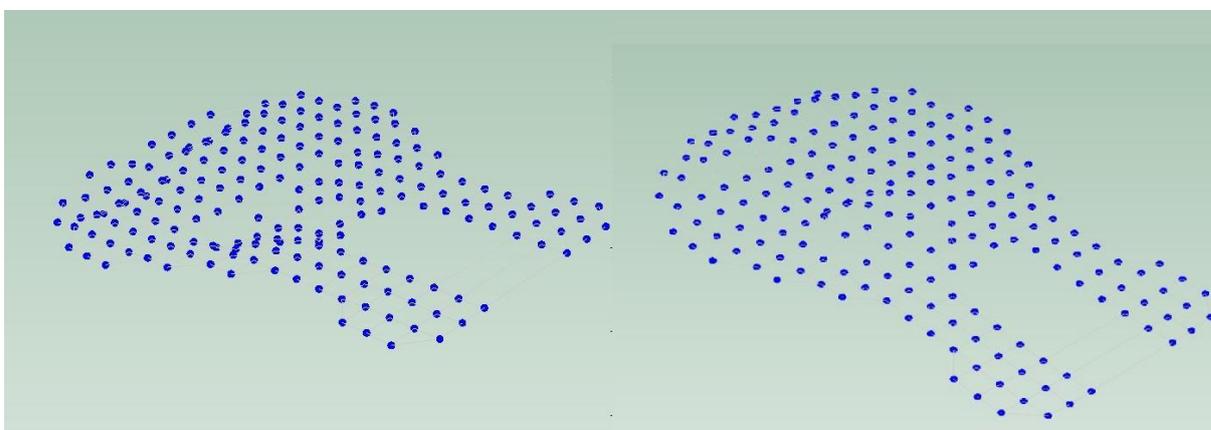
A fim de melhorar e continuar os estudos realizados, propõe-se:

- Primordialmente, ajuste do modelo numérico, aprimorando o estudo de malhas, conexões e condições de contorno;
- Caracterização adequada dos materiais, a partir da investigação da anisotropia das madeiras;
- Experimentação de maior número de amostras;
- Melhoramento dos processos construtivos a fim de aumentar a reprodutibilidade;
- Consideração de um modelo de análise harmônica e interação ar-estrutura;
- Captação da resposta acústica através de microfones;
- Caracterização do timbre em função do espectro da Função Resposta em Frequência;
- Variação da Função Resposta em Frequência ao longo do tempo de utilização do instrumento;
- Variação de outros parâmetros estruturais;
- Realização de análise de critérios de júri.

6 APÊNDICE A: MODOS EXPERIMENTAIS DE VIBRAÇÃO

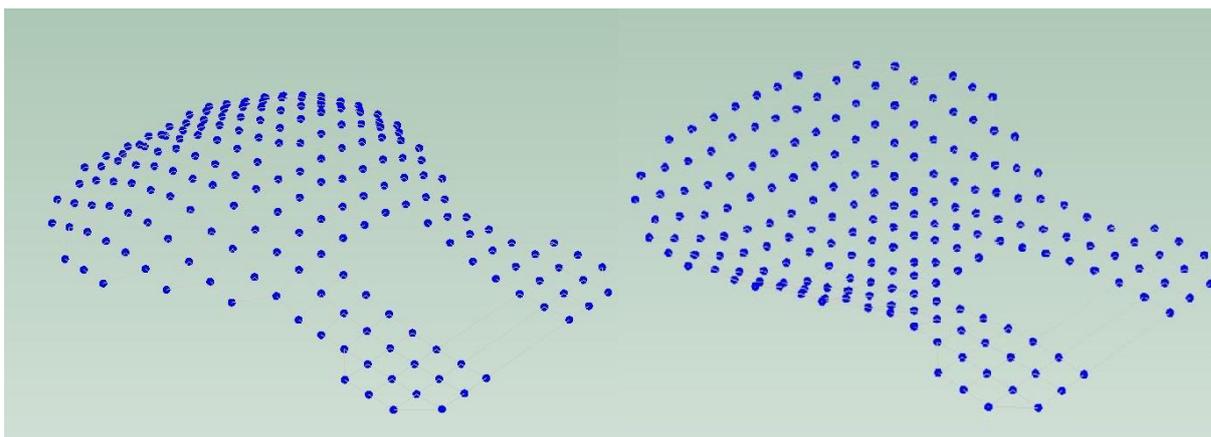
São apresentadas neste apêndice as formas modais encontradas experimentalmente. As imagens foram coletadas a partir da animação dos deslocamentos nodais da malha experimental processada no software Pulse Reflex e foram capturadas nos instantes de máximo e mínimo deslocamento.

Figura 6.1 – Forma modal do primeiro modo experimental



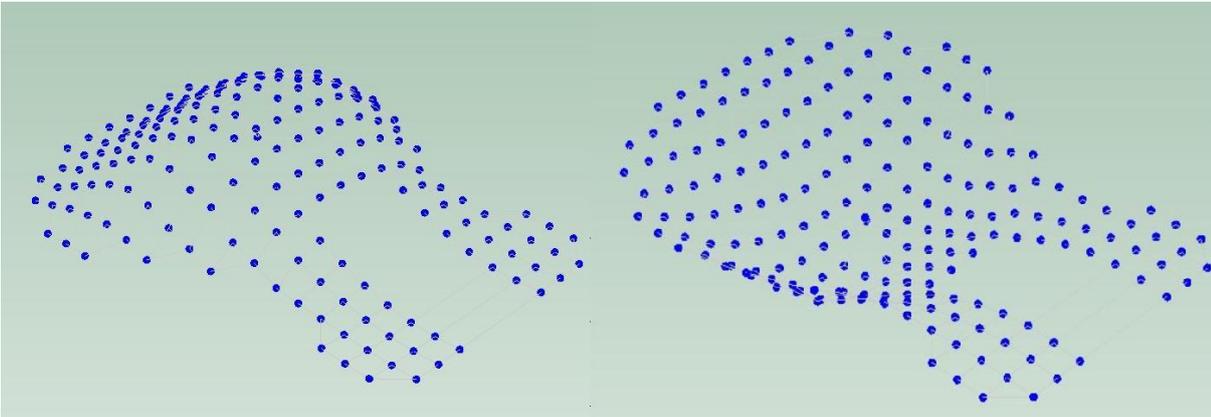
Fonte: Produção do Autor, 2019.

Figura 6.2 – Forma modal do segundo modo experimental



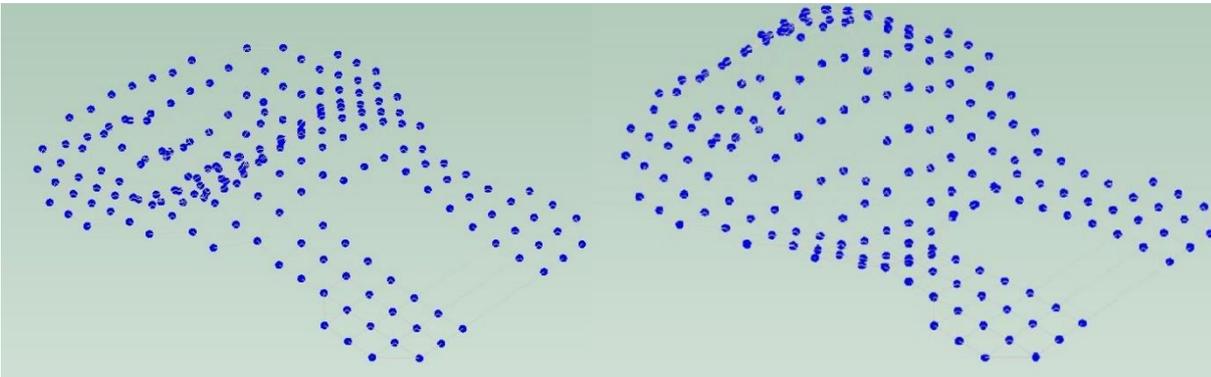
Fonte: Produção do Autor, 2019.

Figura 6.3 – Forma modal do terceiro modo experimental



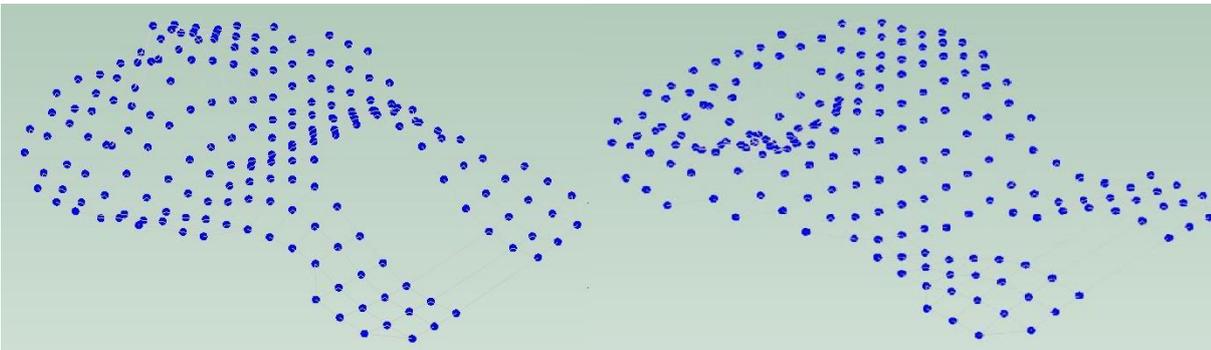
Fonte: Produção do Autor, 2019.

Figura 6.4 – Forma modal do quarto modo experimental



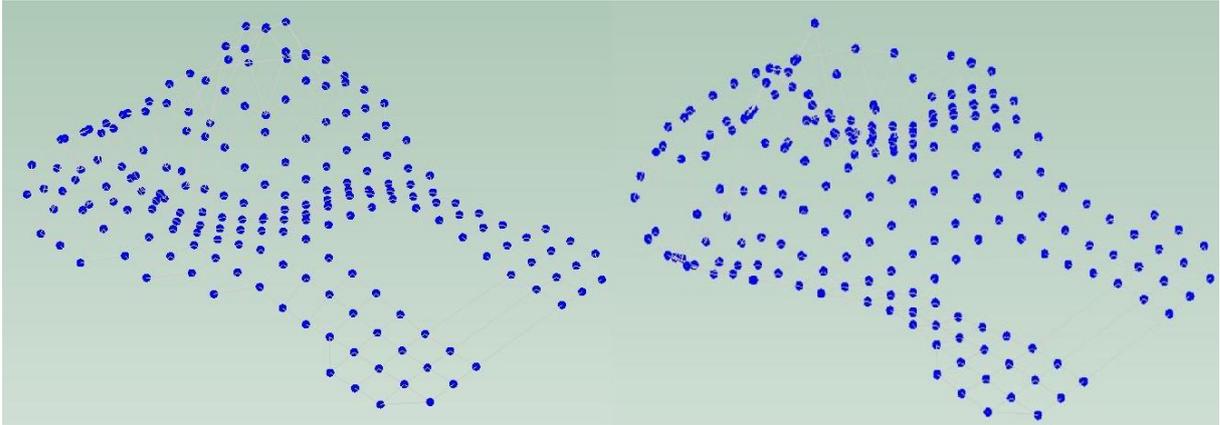
Fonte: Produção do Autor, 2019.

Figura 6.5 – Forma modal do quinto modo experimental



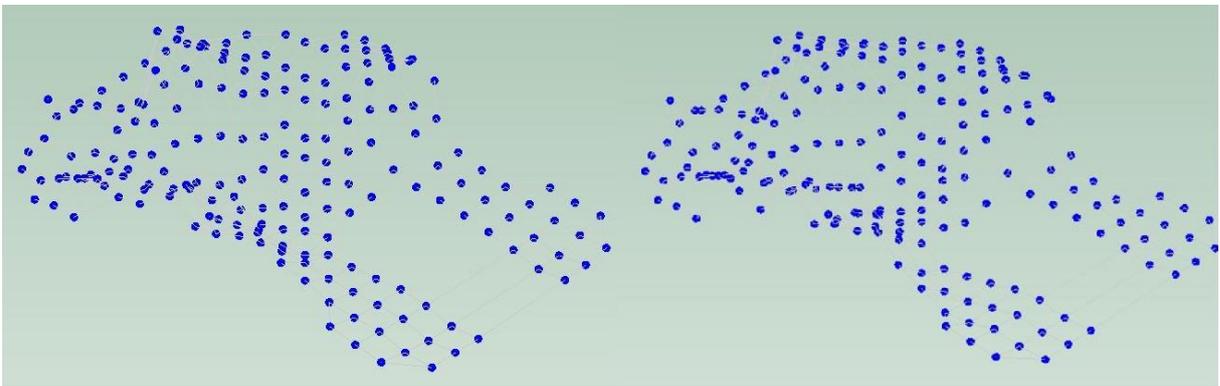
Fonte: Produção do Autor, 2019.

Figura 6.6 – Forma modal do sexto modo experimental



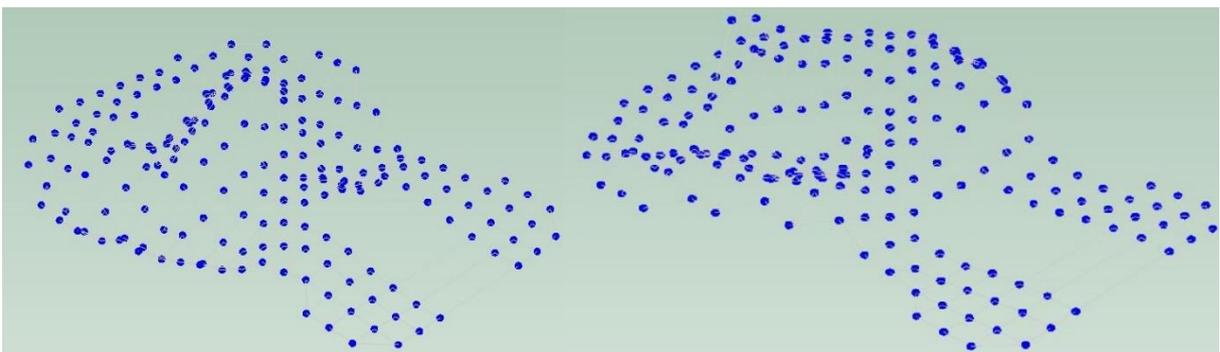
Fonte: Produção do Autor, 2019.

Figura 6.7 – Forma modal do sétimo modo experimental



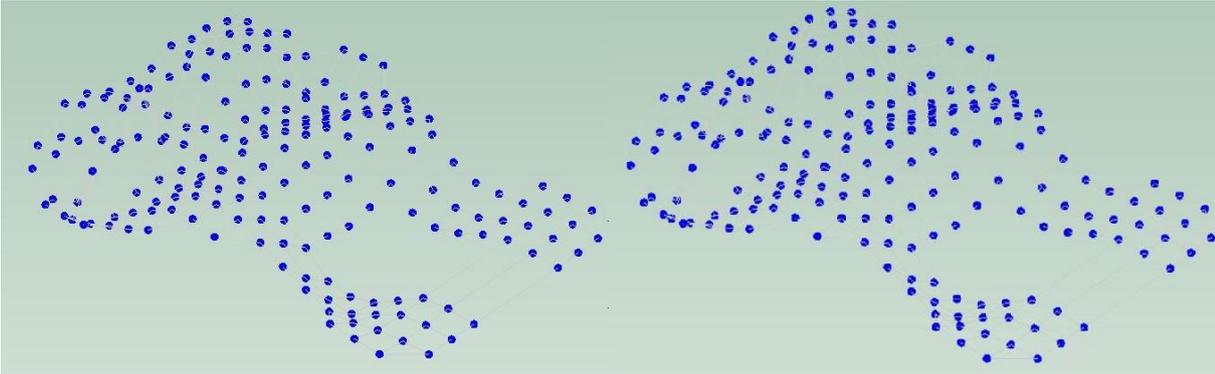
Fonte: Produção do Autor, 2019.

Figura 6.8 – Forma modal do oitavo modo experimental



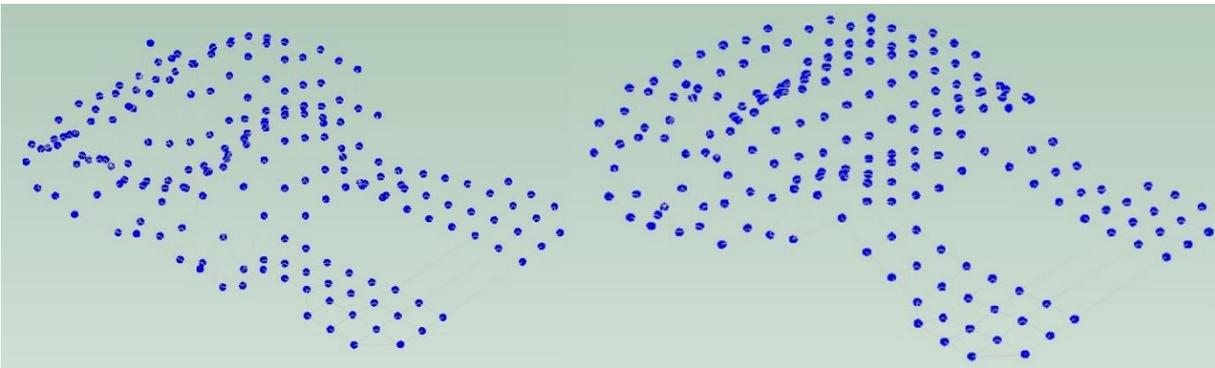
Fonte: Produção do Autor, 2019.

Figura 6.9 – Forma modal do nono modo experimental



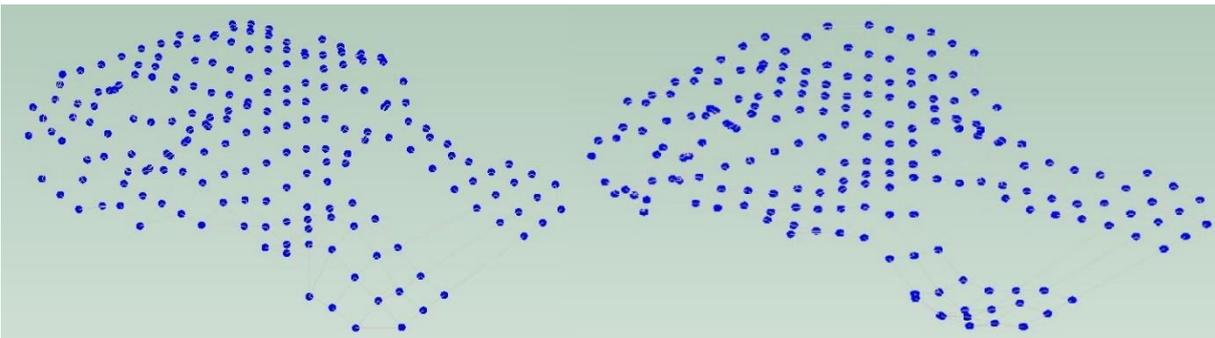
Fonte: Produção do Autor, 2019.

Figura 6.10 – Forma modal do décimo modo experimental



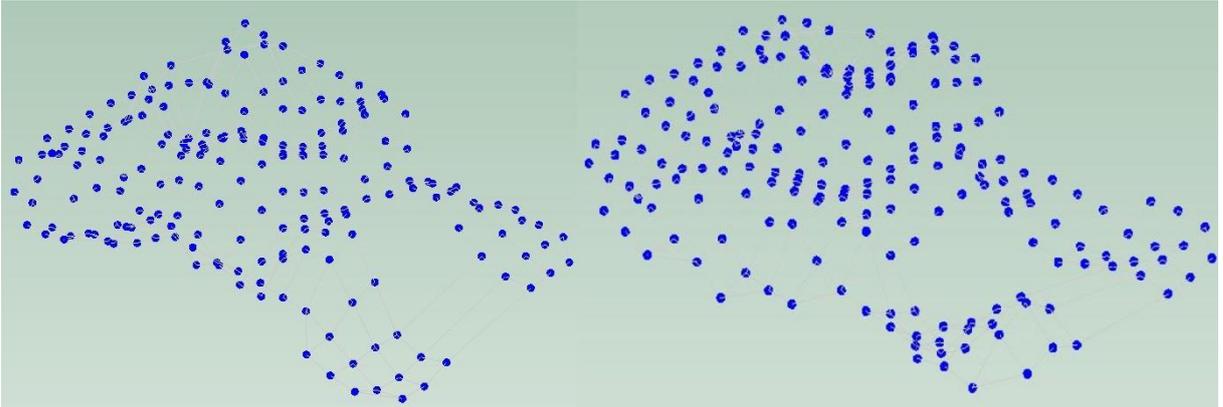
Fonte: Produção do Autor, 2019.

Figura 6.11 – Forma modal do décimo primeiro modo experimental



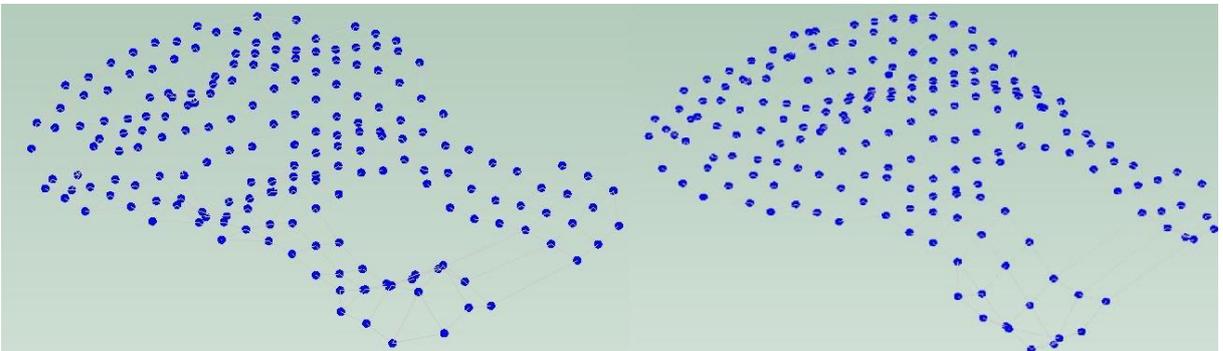
Fonte: Produção do Autor, 2019.

Figura 6.12 – Forma modal do décimo segundo modo experimental



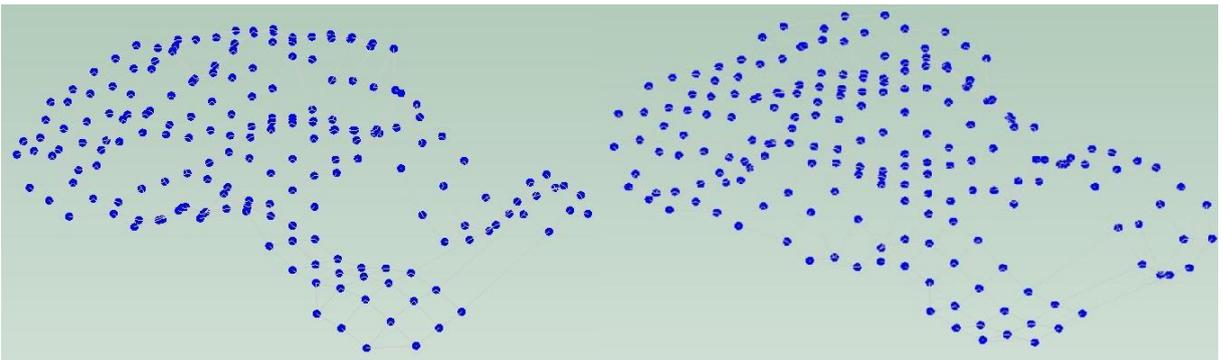
Fonte: Produção do Autor, 2019.

Figura 6.13 – Forma modal do décimo terceiro modo experimental



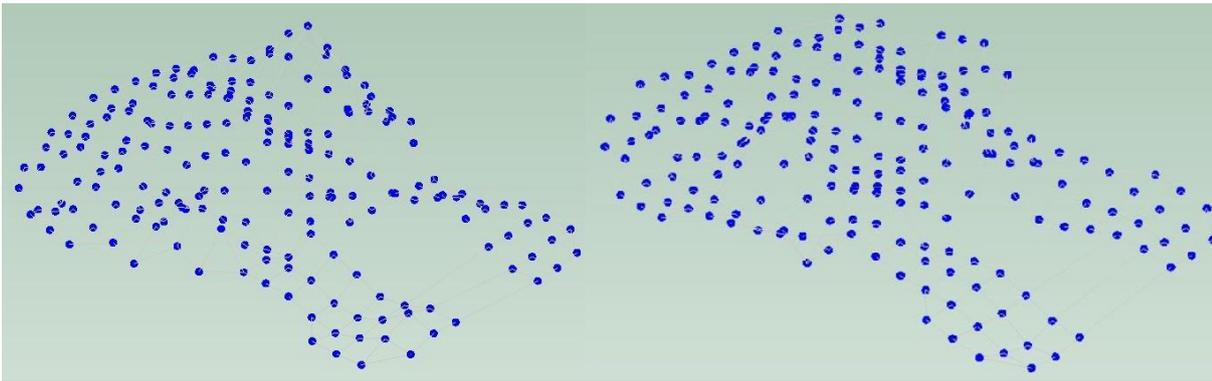
Fonte: Produção do Autor, 2019.

Figura 6.14 – Forma modal do décimo quarto modo experimental



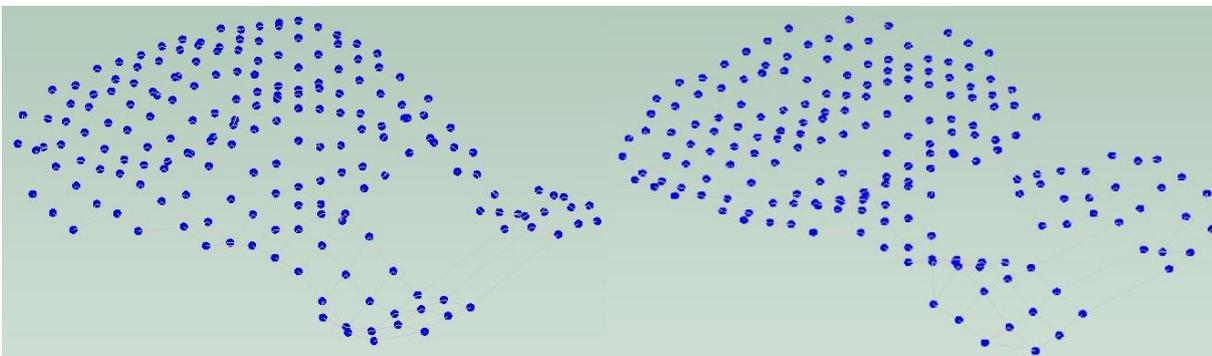
Fonte: Produção do Autor, 2019.

Figura 6.15 – Forma modal do décimo quinto modo experimental



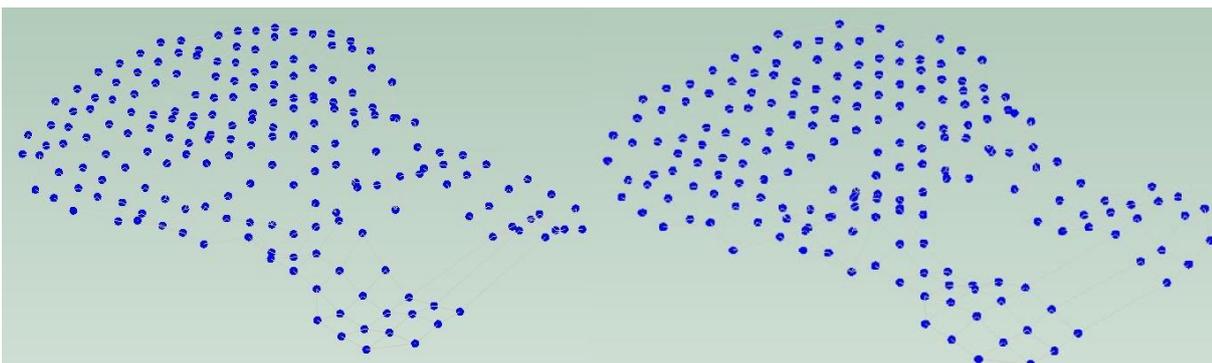
Fonte: Produção do Autor, 2019.

Figura 6.16 – Forma modal do décimo sexto modo experimental



Fonte: Produção do Autor, 2019.

Figura 6.17 – Forma modal do décimo sétimo modo experimental



Fonte: Produção do Autor, 2019.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACTP Engenharia Física. **Caracterização dos módulos elásticos de compósitos utilizando a Técnica de Excitação por Impulso**. Versão 1.4, 2017.
- ACTP Engenharia Física. **Manual de instalação e operação**. Versão 2.2, 2006.
- AZEVEDO, Álvaro F.M. **Método dos Elementos Finitos**. 1ª. ed. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003. p. XX-YY.
- BALACHANDRAN, Balakumar; MAGRAB, Edward B. **Vibrações mecânicas**. Tradução da 2. ed., Austrália: Cengage Learning, 2009.
- BATHE, Klaus-Jürgen; **Finite Element Procedures**. 2ª. ed. Watertown: Prentice Hall, 2016.
- BEATTIE, R. **An Environment in Tone-woods**. Dissertação de mestrado. Londres. Faculdade de Tecnologia de Instrumentos Musicais, London Metropolitan University, 2009.
- BRASIL. FATMA. Fundação meio ambiente. Portaria nº 27, de 04 de abril de 1986. In: CORTE DE ÁRVORES ISOLADAS. Florianópolis, 2010.
- BRASIL. Lei nº 15.167, de 11 de maio de 2010. Dispõe sobre programa de reflorestamento do Pinheiro Brasileiro (*Araucaria Angustifolia*). Palácio Barriga-verde, Florianópolis, SC, 11 de maio de 2010. Art. 2º.
- BOGDANOVICH, J.S. **Classical guitar making: a modern approach to traditional design**. Nova Iorque: Sterling, 2007.
- CABRAL, D. D. C; CESCO, Susana. NOTAS PARA UMA HISTÓRIA DA EXPLORAÇÃO MADEIREIRA NA MATA ATLÂNTICA DO SUL-SUDESTE. **Sociedade & Ambiente**, Campinas, v. 11, n. 1, p. 207-218, dez./2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/asoc/v11n1/03.pdf>. Acesso em: 1 abr. 2019.
- C.F. MARTIN & CO. **The Martin Story**. Disponível em: <https://www.martinguitar.com/about/martin-story/>. Acesso em: 15 mai. 2019.
- CUMPIANO, W.R. **Guitarmaking: Tradition & Technology**. Rosewood Press, 1987.
- CURTU, I *et al.* **Modal Analysis of Different Types of Classical Guitar Bodies**. Braşov: Transilvania University of Braşov, 2009.

- DE MEDEIROS, R.; CARDOSO, E.L. Notas de Aulas da Disciplina de Vibrações. Graduação em Engenharia Mecânica. 24 de fevereiro de 2018. Universidade do Estado de Santa Catarina
- FECHINE, J.M. **A Transformada de Fourier e Suas Aplicações**. Ciclo de Seminários Técnicos. Universidade Federal de Campina Grande, 2010.
- FRENCH, M.; LEWIS, K. **Modal Analysis of an Acoustic Guitar**. Bellingham. SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1995.
- GONÇALVEZ, L.A. **Transformada Rápida de Fourier e seu uso em processamento de imagens**. 67 f. Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Matemática Aplicada – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.
- HENRIQUE, L. L. **Acústica musical**. 2ª edição. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2007.
- HIBBELER, R.C. **Resistência dos Materiais**. 7ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- KEMPTON, A. **Modal Analysis of Guitar Bodies**. Urbana: University of Illinois, 2002.
- KLIGER, R.; *et al.* **Quality Control for Wood and Wood Products**. COST - Action 53. EUROPEAN COOPERATION IN SCIENCE & TECHNOLOGY, 2014.
- KLOUTSEY, A. Eliké H.; DINIZ, Alberto C. G. C; VILLA, Cristiano V. S. **Influência das condições de contorno na análise modal experimental de vigas**. In: Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica POSMEC, 16. 2006, Uberlândia. Artigo: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2006.
- MORESCHI, J.C. **Propriedades da madeira**. 4ª ed. Universidade Federal do Paraná, 2014.
- NEYRA-ARAOZ, J. H. **Transformada de Fourier: fundamentos matemáticos, implementação e aplicações musicais**. São Paulo Instituto de Matemática e Estatística - USP, 2007.
- PAIVA, G.O. **Análise Modal Vibroacústica da Caixa de Ressonância de ma Viola Caipira**. Dissertação de Mestrado. Campinas: UNICAMP, 2013.
- PORTELA, M. S. **Estudo das Propriedades Acústicas da Madeira Amazônica Marupá Para Tampo de Violão**. Dissertação de Mestrado. Florianópolis: UFSC, 2014.
- RAO, S.S. **Vibrações Mecânicas**. 4ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- RUSSEL, D. **Modal Analysis of an Folk Acoustic Guitar**. Flint. Kettering University, 1998.

SANTOS, L.M.A. Madeiras. Programa de pós-graduação em estruturas e construção civil. Universidade de Brasília, 2018.

SOUZA, R.O. **Elaboração de um procedimento operacional padrão para determinação do módulo de elasticidade longitudinal a partir da resposta acústica.** 2016. 87 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2016.

VENSON, I.; **Usinagem da madeira e de produtos base-madeira.** Universidade Federal do Paraná. 2013.