



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL E METALÚRGICA DE VOLTA REDONDA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E MATERIAIS

PAULO SÉRGIO TEIXEIRA

Orientador: D. Sc. Alexandre Furtado Ferreira

Co-orientador: D. Sc. José Flávio Silveira Feiteira

**Sintetização de Som de um Violão a
Partir de um Modelo Computacional**



**Volta Redonda
2021**

Sintetização de Som de um Violão a Partir de um Modelo Computacional

PAULO SÉRGIO TEIXEIRA

Tese apresentada à Escola de Engenharia Industrial e Metalúrgica de Volta Redonda como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Sc. Alexandre Furtado Ferreira

Co-orientador: Prof. Dr. Sc. José Flávio Silveira Feiteira

**Volta Redonda
2021**

Paulo Sérgio Teixeira

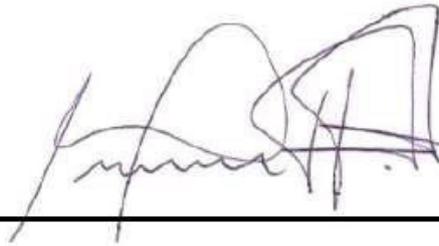
**“Sintetização de Som de um Violão a Partir de um Modelo
Computacional.”**

Tese apresentada à Escola de Engenharia Industrial e Metalúrgica de Volta Redonda como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica.

Área de concentração: Modelamento e Simulação de Processos e Fenômenos.

Aprovado em 17 de Março de 2021.

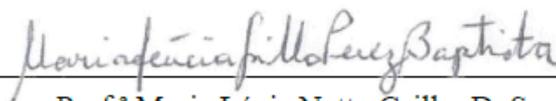
Banca Examinadora:



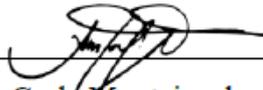
Prof. Alexandre Furtado Ferreira, D. Sc. - Orientador
Universidade Federal Fluminense – PPGEM



Prof. José Flávio Silveira Feiteira, D. Sc. - Co-orientador
Universidade Federal Fluminense – PGMEC



Prof.ª Maria Lúcia Netto Grillo, D. Sc.
Universidade do Estado do Rio de Janeiro



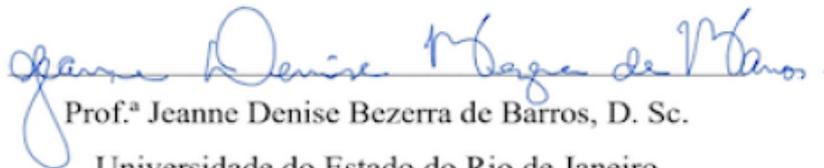
Prof.ª Anna Carla Monteiro de Araújo, D. Sc.

Institut National des Sciences Appliqués – Toulouse, França

WESLEY LUIZ DA SILVA ASSIS Assinado de forma digital por
wesleyassis@id.uff.br:053694 WESLEY LUIZ DA SILVA ASSIS
62720 wesleyassis@id.uff.br:05369462720
Dados: 2021.03.29 21:31:02 -03'00'

Prof. Wesley Luiz da Silva Assis, D. Sc.

Universidade Federal Fluminense – PPGEM



Prof.ª Jeanne Denise Bezerra de Barros, D. Sc.

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Dedicatória

*Dedico este trabalho à minha esposa Maria de Fátima e filhos: Nicolle, Camille e Théo pela
compreensão e apoio para que eu chegasse a este momento.*

*Dedico também ao Professor Dr. Alexandre José da Silva (in Memoriam) um dos grandes
idealizadores deste projeto.*

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Alexandre Furtado Ferreira e ao meu co-orientador Prof. Dr. José Flávio Feiteira pela excelente orientação e por todo o conhecimento passado. Agradeço também a Dra Roseli Felix Ribeiro pela significativa colaboração com este trabalho e a toda a coordenação do PPGEM, em especial ao funcionário Jáder por ser sempre prestativo diante das necessidades. E por fim, agradeço a Deus, toda família, esposa e filhos que contribuíram direta ou indiretamente durante este trabalho.

RESUMO

O violão é um instrumento musical da família dos cordofones dedilhados que são aqueles em que o som é produzido pela vibração de cordas tensionadas. Para impulsionar a vibração das cordas nestes instrumentos pode-se usar dedos e/ou elementos mais rígidos como unhas ou palhetas. Além das cordas o tampo é considerado a parte mais importante do violão, por ele, através do cavalete, as vibrações das cordas são transmitidas e amplificadas para o instrumento todo. Ao vibrar, o tampo provoca o movimento do ar contido na caixa de ressonância resistindo à tensão exercida pelas cordas e minimizando as eventuais deformações devido a variações climáticas. Para dar maior rigidez, atenuando o efeito da temperatura um conjunto de barras chamadas de leques harmônicos é colado na sua parte interna. E estes têm sido objeto de pesquisa de pesquisadores e Luthiers devido à variedade de configurações desenvolvidas ao longo dos tempos. A estrutura dos leques harmônicos também tem a função de acoplar os movimentos desta superfície, de forma que o tampo possua modos de vibração com certas características. Portanto, este trabalho se desenvolve a partir de um modelo computacional de violão construído com configurações de leque harmônico diferentes das tradicionais, mas com inspiração no modelo de leque desenvolvido pelo luthier alemão Hermann Hauser. Tal modelo visa, inicialmente, a obtenção de respostas em termos de frequências naturais e modos de vibração utilizando-se de análises estática, modal, harmônica via técnica de elementos finitos. Tais resultados são analisados com respostas obtidas experimentalmente através do método de excitação por impulso. Além disso, é feito o processamento digital de sinais sonoros para permitir a sintetização de sons usando as características avaliadas no modelo físico e computacional e respostas em frequência através da técnica numérica de deconvolução. As avaliações permitiram a obtenção de respostas em frequências naturais e as respectivas formas dos modos de vibração que permitiram a

comparação com as respostas do modelo físico de violão através do método de excitação por impulso. Além disso, o processamento digital de sinais permitiu a sintetização sonora e uma melhor avaliação das respostas dos modelos físico e computacional através técnica numérica de deconvolução.

Palavras-chave: Violão, Leques Harmônicos, Análise Modal, Sintetização e Deconvolução.

ABSTRACT

The guitar is a musical instrument in the family of strummed cordophones, which are those in which the sound is produced by the vibration of tensioned strings. To boost the vibration of the strings in these instruments, fingers and / or more rigid elements such as nails or reeds can be used. In addition to the strings, the soundboard is considered the most important part of the guitar, for it, through the easel, the vibrations of the strings are transmitted and amplified to the whole instrument. When vibrating, the top causes the air contained in the resonance box to move, resisting the tension exerted by the strings and minimizing any deformations due to climatic variations. To give greater rigidity, attenuating the effect of temperature, a set of bars called harmonic fans is glued to its internal part. And these have been the object of research by researchers and Luthiers due to the variety of configurations developed over time. The structure of the harmonic fans also has the function of coupling the movements of this surface, so that the top has modes of vibration with certain characteristics. Therefore, this work is developed from a computational model of guitar built with harmonic fan configurations different from the traditional ones, but inspired by the fan model developed by the German luthier Hermann Hauser. This model initially aims to obtain responses in terms of natural frequencies and modes of vibration using static, modal, harmonic analysis via finite element technique. Such results are analyzed with responses obtained experimentally through the method of impulse excitation. In addition, digital processing of sound signals is performed to allow the synthesis of sounds using the characteristics evaluated in the physical and computational model and frequency responses using the numerical deconvolution technique. The evaluations allowed the obtaining of responses in natural frequencies and the respective forms of the vibration modes that allowed the comparison with the responses of the physical model of the guitar through the method of

impulse excitation. In addition, digital signal processing allowed sound synthesis and a better evaluation of the responses of the physical and computational models through numerical deconvolution technique.

Keywords: Guitar, Harmonic Fans, Modal Analysis, Synthesization and Deconvolution.

Lista de Ilustrações

Figura 4.1 - Partes do violão: 1-Tampo, 2-Rastilho, 3-Cavalete, 4-Boca, 5-Braço, 6-Traste, 7-Casa, 8-Pestana, 9-Tarraxas, 10-Cabeça, 11-Faixa lateral, 12- Fundo.	32
Figura 4.2 - Principais mudanças na disposição dos leques harmônicos feitas por alguns construtores (Luthiers) de 1759 a1980.	35
Figura 4.3 - Posição de Serramento das Madeiras para Violão e Instrumentos Similares.	38
Figura 4.4 - (a) Medição com dinamômetro; (b) Posicionamento e diagrama de forças.	41
Figura 5.1 – (a) Esboço de alguns padrões de vibração representados em Figuras de Chladni (CHLADNI, 1787); (b) Padrões de Chladni obtidos em laboratório.	47
Figura 5.2 - Equipamento desenvolvido pela ATCP Engenharia Física (Sonelastic®) para medição dos módulos elásticos empregando a Técnica de Excitação por Impulso.	49
Figura 6.1 - Representação de alguns instrumentos musicais no domínio do tempo (esquerda) e no domínio da frequência (direita).....	54
Figura 6.2 - Resposta ao Impulso	57
Figura 6.3 – (a) Sinal contínuo; (b) Sinal discreto.	62
Figura 6.4 - Formas de ondas de diferentes instrumentos para uma mesma nota musical.....	62
Figura 6.5 – Sinal no domínio da frequência.	63
Figura 6.6 - Sinal no Domínio do Tempo e sua Respectiva Transformada de Fourier (Frequência).....	64
Figura 7.1 - Componentes do tampo harmônico desenvolvidos pelo luthier Maurício Barros.	69
Figura 7.2 – (a) Elemento Solid 185; (b) Elemento Solid 187.....	71
Figura 7.3 - Pontos correspondentes às coordenadas de contorno do tampo.	72
Figura 7.4 - Linhas de contorno da placa do tampo.	73
Figura 7.5 - Área da placa do tampo.	73
Figura 7.6 - Varetas, leque harmônico, reforço da boca e lateral.	74
Figura 7.7 - Reforço e travessas do fundo.	74
Figura 7.8 - Modelo computacional de violão finalizado.	74
Figura 7.9 - Discretização do modelo computacional via SMART SIZE.	75
Figura 7.10 - (a) Escolha do tipo de análise, modal; (b) Escolha do método de análise modal e quantidade de modos a extrair.	77

Figura 7.11. Modelo finalizado Discretizado via comando SMART SIZE com Condições de contorno no braço e cavalete.	78
Figura 7.12 - Medidas e tensões para jogo de cordas EJ27H D’Addário Classic Nylon. (Fonte: Catálogo D’Addário - Cordas)	79
Figura 7.13 - Sequência de comandos no Ansys: (a) Para a análise modal e estática; (b) Condições de contorno.	80
Figura 7.14 - Sequência de comandos no Ansys para Pós Processamento das análises modal e estática.	81
Figura 7.15 - Condições de contorno no modelo computacional de violão.	82
Figura 7.16 - Sequência de comandos usados no Ansys para a análise harmônica: (a) Para o processamento; (b) Pós processamento.	83
Figura 7.17 - Ângulo formado pelo cavalete e corda do violão ao ser tocada.	83
Figura 7.18 - Pontos referentes aos nós analisados na análise harmônica.	84
Figura 7.19 - (a) Violão pendurado no suporte; (b) Excitação por impulso na ponte nas posições da primeira a sexta corda (da esquerda para a direita, de cima para baixo).	85
Figura 7.20 - Tela de aquisição de dados no software Sonelastic.	86
Figura 7.21 - (a) Cordas abafadas com espuma; (b) Dispositivo para Simular braço do Violão; (c) Afinação da corda no dispositivo.	91
Figura 8.1. Doze primeiros modos de vibração com respectivas frequências para o modelo sem as condições de contorno.	95
Figura 8.2 - Análise estática do modelo após aplicação das condições de contorno.	97
Figura 8.3. Doze primeiros modos de vibração com respectivas respostas em frequências para as condições de contorno de restrição de movimento nas laterais e tensão das cordas.	98
Figura 8.4 - Plotagem dos pares de frequências homólogas, experimentais e numéricas.	102
Figura 8.5 - Respostas nos nós referentes às posições estabelecidas com estímulo de 1,75 N na posição da primeira corda (“Mí”) - Posições: 1, 2, 3 e 4 no tampo; 5, 6, 7, 8 e 9 na boca; 10 e 11 no braço do modelo de violão.	105
Figura 8.6 - Respostas nos nós referentes às posições estabelecidas com estímulo de 1,33 N na posição da segunda corda (“Lá”) - Posições: 1, 2, 3 e 4 no tampo; 5, 6, 7, 8 e 9 na boca; 10 e 11 no braço do modelo de violão.	106
Figura 8.7 - Respostas nos nós referentes às posições estabelecidas com estímulo de 1,37 N na posição da terceira corda (“Sol”) - Posições: 1, 2, 3 e 4 no tampo; 5, 6, 7, 8 e 9 na boca; 10 e 11 no braço do modelo de violão.	107

Figura 8.8 - Respostas nos nós referentes às posições estabelecidas com estímulo de 1,81 N na posição da quarta corda (“Ré”) - Posições: 1, 2, 3 e 4 no tampo; 5, 6, 7, 8 e 9 na boca; 10 e 11 no braço do modelo de violão.	108
Figura 8.9 - Respostas nos nós referentes às posições estabelecidas com estímulo de 1,76 N na posição da quinta corda (“Lá”) - Posições: 1, 2, 3 e 4 no tampo; 5, 6, 7, 8 e 9 na boca; 10 e 11 no braço do modelo de violão.	109
Figura 8.10 - Respostas nos nós referentes às posições estabelecidas com estímulo de 1,61 N na posição da sexta corda (“Mí”) - Posições: 1, 2, 3 e 4 no tampo; 5, 6, 7, 8 e 9 na boca; 10 e 11 no braço do modelo de violão.	110
Figura 8.11 - Comparação das respostas de nó da posição 1 do tampo superior.	111
Figura 8.12 - Comparação entre Análise Harmônica e modal; a) Posição 1; b) 1º modo de vibração; c) 9º modo de vibração.	112
Figura 8.13 - Comparação entre Análise Harmônica e Modal; a) Posição 2; b) 4º modo de vibração; c) 9º modo de vibração.	112
Figura 8.14 - Comparação entre Análise Harmônica e Modal; a) Posição 9; b) 4º modo de vibração; c) 7º modo de vibração.	113
(Figura 8.15 - Comparação entre Análise Harmônica e Modal; a) Posição 11; b) 4º modo de vibração; c) 5º modo de vibração.	114
Figura 8.16 - Tela do software sonelastic com resultados referentes à posição da terceira corda do violão (“Sol”).	115
Figura 8.17 - Sintetização do sinal Impulso na posição da primeira corda do violão. (a) No domínio do tempo; (b) Frequência de maior amplitude; (c) Frequências de baixas amplitudes.	116
Figura 8.18 - Sintetização do sinal Impulso na posição da segunda corda do violão. (a) No domínio do tempo; (b) Frequência de maior amplitude; (c) Frequências de baixas amplitudes.	117
Figura 8.19 - Sintetização do sinal Impulso na posição da terceira corda do violão. (a) No domínio do tempo; (b) Frequência de maior amplitude; (c) Frequências de baixas amplitudes.	118
Figura 8.20 - Sintetização do sinal Impulso na posição da quarta corda do violão. (a) No domínio do tempo; (b) Frequência de maior amplitude; (c) Frequências de baixas amplitudes.	119

Figura 8.21 - Sintetização do sinal Impulso na posição da quinta corda do violão. (a) No domínio do tempo; (b) Frequência de maior amplitude; (c) Frequências de baixas amplitudes.	120
Figura 8.22 - Sintetização do sinal Impulso na posição da sexta corda do violão. (a) No domínio do tempo; (b) Frequência de maior amplitude; (c) Frequências de baixas amplitudes.	121
Figura 8.23 -Sintetização da Resposta no tampo de excitação na posição da Primeira corda do violão (Mí). (a) No domínio do tempo; (b) No domínio da frequência.	123
Figura 8.24 -Sintetização da Resposta no tampo de excitação na posição da Segunda corda do violão (Sí). (a) No domínio do tempo; (b) No domínio da frequência.	123
Figura 8.25 -Sintetização da Resposta no tampo de excitação na posição da terceira corda do violão (Sol). (a) No domínio do tempo; (b) No domínio da frequência.	124
Figura 8.26 - Sintetização da Resposta no tampo de excitação na posição da quarta corda do violão (Ré). (a) No domínio do tempo; (b) No domínio da frequência.	124
Figura 8.27 -Sintetização da Resposta no tampo de excitação na posição da quinta corda do violão (Lá). (a) No domínio do tempo; (b) No domínio da frequência.	125
Figura 8.28 - Sintetização da Resposta no tampo de excitação na posição da sexta corda do violão (Mí). (a) No domínio do tempo; (b) No domínio da frequência.	125
Figura 8.29- Sinal da primeira corda no domínio do tempo. (a) No violão; (b) No monocórdio; (c) Deconvolução Primeira corda no domínio do tempo.	127
Figura 8.30 - Sinal da primeira corda no domínio da frequência no violão.	128
Figura 8.31 - Sinal da primeira corda no domínio da frequência no monocórdio.	128
Figura 8.32 - Deconvolução da primeira corda no domínio da frequência.	129
Figura 8.33- Sinal da segunda corda no domínio do tempo. (a) No violão; (b) No monocórdio; (c) Deconvolução segunda corda no domínio do tempo.	130
Figura 8.34 - Sinal da segunda corda no domínio da frequência no violão.	130
Figura 8.35 - Sinal da segunda corda no domínio da frequência no monocórdio.	131
Figura 8.36 - Deconvolução da segunda corda no domínio da frequência.	131
Figura 8.37- Sinal da terceira corda no domínio do tempo. (a) No violão; (b) No monocórdio; (c) Deconvolução terceira corda no domínio do tempo.	132
Figura 8.38 - Sinal da terceira corda no domínio da frequência no violão.	133
Figura 8.39 - Sinal da terceira corda no domínio da frequência no monocórdio.	133
Figura 8.40 - Deconvolução da terceira corda no domínio da frequência.	133

Figura 8.41 - Sinal da quarta corda no domínio do tempo. (a) No violão; (b) No monocórdio; (c) Deconvolução quarta corda no domínio do tempo.	135
Figura 8.42 - Sinal da quarta corda no domínio da frequência no violão.	135
Figura 8.43 - Sinal da quarta corda no domínio da frequência no monocórdio.	136
Figura 8.44 - Deconvolução da quarta corda no domínio da frequência.	136
Figura 8.45 - Sinal da quinta corda no domínio do tempo. (a) No violão; (b) No monocórdio; (c) Deconvolução quinta corda no domínio do tempo.	137
Figura 8.46 - Sinal da quinta corda no domínio da frequência no violão.	138
Figura 8.47 - Sinal da quinta corda no domínio da frequência no monocórdio.	138
Figura 8.48 - Deconvolução da quinta corda no domínio da frequência.	138
Figura 8.49 - Sinal da sexta corda no domínio do tempo. (a) No violão; (b) No monocórdio; (c) Deconvolução sexta corda no domínio do tempo.	140
Figura 8.50 - Sinal da sexta corda no domínio da frequência no violão.	140
Figura 8.51 - Sinal da sexta corda no domínio da frequência no monocórdio.	141
Figura 8.52 - Deconvolução da sexta corda no domínio da frequência.	141
Figura 8.53 - Resultados em frequências naturais detectadas para a excitação por impulso no cavalete na posição da primeira corda.	142
Figura 8.54 - Frequências com amplitudes maiores na deconvolução da primeira corda do violão.	143
Figura 8.55 - Frequências com amplitudes menores no resultado da deconvolução da primeira corda do violão.	144
Figura 8.56 - Plotagem dos pares de frequências homólogas, obtidas pelo método de excitação por impulso e deconvolução. (Fonte: Autor, 2021)	147
Figura 8.57 - Plotagem dos pares de frequências homólogas, obtidas pelo método de excitação por impulso e deconvolução, ambos processados digitalmente em <i>Matlab</i> . (Fonte: Autor, 2021).....	149

Lista de Tabelas

Tabela 7.1 - Dimensões e coordenadas para a construção do modelo	72
Tabela 7.2 - Propriedades dos materiais usados na construção do tampo harmônico, do fundo e da caixa acústica (Ribeiro, 2014).....	76
Tabela 7.3 -Carga aplicada no cavalete referente as posições de cada corda no modelo.	84
Tabela 8.1 - Modos e respectivas frequências de vibração para o modelo sem condições de contorno.....	96
Tabela 8.2 - Respostas em frequências naturais (em Hertz) à excitação por impulso no cavalete em posições relativas às cordas do modelo numeradas em ordem crescente.....	100
Tabela 8.3 - Frequências homônimas experimental/numérico.	101
Tabela 8.4 - Comparação entre os valores médios de frequências experimentais e numéricas.	102
Tabela 8.5 - Respostas em frequências obtidas por excitação por impulso e deconvolução.	145
Tabela 8.6 - Comparação de Frequências com valores próximos obtidos pela Excitação por impulso no sonelastic e deconvolução usando Matlab.....	146
Tabela 8.7 - Comparação de Frequências com valores próximos obtidos pela Excitação por impulso e deconvolução usando Matlab.....	148

Lista de Quadros

Quadro 7.1 - Primeira parte da sequência de rotinas em <i>Matlab</i> para a resposta obtida pela análise harmônica.	88
Quadro 7.2 - Segunda parte da sequência de rotinas em <i>Matlab</i> para a resposta obtida pela análise harmônica.	89
Quadro 7.3 - Sequência de Rotinas em <i>Matlab</i> para a Resposta Obtida pela Análise Experimental via Técnica de Excitação por Impulso.	90
Quadro 7.4- Rotinas <i>Matlab</i> para sinal de extensão <i>wav</i> e <i>FFT</i> do sinal sonoro da corda no violão.	92
Quadro 7.5- Rotinas <i>Matlab</i> para sinal de extensão <i>wav</i> e <i>FFT</i> do sinal sonoro da corda no dispositivo que simula o braço do violão sem a caixa acústica.....	93
Quadro 7.6- Rotinas <i>Matlab</i> para obtenção da resposta do violão nos domínios do tempo e frequência.	93

Sumário

1.0 - Introdução.....	21
1.1 – Organização da Tese.....	25
2.0 - Motivação e Relevância	27
3.0 – Objetivo Geral.....	30
3.1 – Objetivos Específicos	30
4.0 – O Violão: Aspectos Gerais.....	31
4.1 - Componentes do violão.....	31
4.1.1 - Tampo.....	33
4.1.2 – Leques Harmônicos	34
4.1.3 - Cavalete.....	35
4.2 - Qualidade Sonora de um Violão	36
4.3 - Materiais para Violão e Similares	37
4.4 - Propriedades físicas e mecânicas da madeira.....	38
4.5 - A tração na corda do violão.....	41
5.0 - Modelo Computacional de violão.....	42
5.1 - Análise Modal	43
5.1.1 - A Técnica de Chladni.....	45
5.1.2 – A Técnica de Excitação por impulso	48
5.2 - Análise Estática	49
5.3 - Análise Harmônica.....	50
6.0 – O Sinal sonoro do Violão: Características e Processamento Digital.....	51
6.1 – Características de um Sinal Sonoro	51
6.2 – Amortecimento	55
6.3 - Sintetização de um Sinal Sonoro.....	58
6.3.1- Transformada de Fourier	60
6.3.2 – Transformada Inversa de Fourier	61

6.3.3 - Sinais Representados no Domínio do Tempo	61
6.3.4 - Sinais Representados no Domínio da Frequência	62
6.4 - Convolução Aplicada aos Sinais de deslocamento na estrutura do violão	64
6.5 – Deconvolução Aplicada aos Sinais Sonoros do Violão.....	66
7.0 - Materiais e Métodos	68
7.1 - Construção do Modelo Computacional (Pré Processamento).....	68
7.1.1 - Geometria do Modelo Computacional	69
7.1.2 - Passos para Construção da geometria do modelo computacional.....	71
7.1.3 - Propriedades dos Materiais	75
7.2 - Processamento	76
7.2.1 - Análise Modal	77
7.2.2 - Análise Estática	79
7.2.3 - Análise Harmônica.....	81
7.3 - Caracterização Experimental.....	85
7.4 - Sintetização das respostas da caracterização computacional e experimental	86
7.4.1 - Sintetização de sinais sonoros obtidos através da análise harmônica	87
7.4.2 - Sintetização de Sinais Sonoros Obtidos na Caracterização Experimental.....	89
7.5 - Caracterização da Resposta em Frequência Através da Deconvolução.....	90
8.0 - Resultados e Discussões	94
8.1 - Primeira Análise Modal	94
8.2 - Análise Estática	97
8.3 - Segunda Análise Modal	97
8.4 - Comparação dos Resultados Numéricos das Análises Modal e Experimental	99
8.5 - Análise Harmônica.....	104
8.6 - Comparação dos Resultados Numéricos da Análise Harmônica e Modal.....	111
8.7 - Sintetização de Sinais Sonoros Obtidos Através da Caracterização Experimental ...	114

8.8 - Sintetização de Sinais Sonoros Obtidos Através da Análise Harmônica.....	122
8.9 - Caracterização e Sintetização da Resposta Através da Deconvolução	126
8.10 - Comparação das Respostas em Frequência pela Excitação por Impulso e Deconvolução	142
9.0 - Conclusões.....	151
9.1 - Análise modal.....	151
9.2 - Análise Harmônica.....	152
9.3 - Sintetização de Sinais Sonoros Obtidos Através da Caracterização Experimental ...	153
9.4 - Sintetização de Sinais Sonoros Obtidos Através da Análise Harmônica.....	154
9.5 - Caracterização e Sintetização da Resposta Através da Deconvolução	154
9.6 – Respostas em frequência pela Deconvolução e Excitação por Impulso.....	155
9.6 – Sugestões para Trabalhos Futuros	156
Referências	158
Anexo I - Artigo publicado na Revista RESEARCH, SOCIETY AND DEVELOPMENT....	169
Anexo II - Artigo publicado na Revista RESEARCH, SOCIETY AND DEVELOPMENT ..	187
Anexo III – Artigo publicado na revista CADERNOS UNIFOA	204

1.0 - Introdução

O violão é um instrumento musical da família dos cordofones dedilhados que são aqueles em que o som é produzido pela vibração de cordas tensionadas. Quanto maior o comprimento e a espessura da corda, mais grave é o som. As cordas podem ser de diferentes materiais. Antigamente, usavam para sua fabricação crinas de cavalo, fios de seda e tripas de animais; hoje, são usados o náilon ou fios de metal enrolados (FILHO, 2009).

O violão clássico, um dos instrumentos musicais mais difundidos no meio artístico, é caracterizado por um timbre único e outras qualidades musicais incomensuráveis, embora seja uma análise de caráter subjetivo da área de psicoacústica, pois passa pelo gosto de cada um. Do ponto de vista físico, ele é descrito pelo acoplamento entre a vibração da caixa de ressonância com o ar contido. Ao sofrer algum estímulo externo a caixa acústica vibra provocando deslocamentos de ar pelo orifício localizado no tampo superior chamado de “Boca” fazendo com que o mesmo funcione semelhante a um ressonador de Helmholtz (CHANAUD, 1994).

A origem do violão é incerta, tendo duas hipóteses prováveis para o seu surgimento. A primeira sugere que o referido instrumento musical seja uma derivação de um instrumento Egípcio, chamado Alaúde. A segunda sugere que o violão é uma variação de um instrumento grego, denominado Assíria. O violão foi modificado sucessivamente pelos Luthiers, responsáveis pela produção e reparo do violão até alcançarem o seu formato clássico, cujos registros de produção datam do século dezoito. Com mais de 150 anos, este projeto é utilizado por muitos construtores (SLOANE, 1976). Os primeiros croquis foram desenhados por Antônio de Torres que é conhecido nos dias de hoje como idealizador deste instrumento. Este Luthier espanhol que começou a sua carreira em 1840 foi um dos principais responsáveis pela determinação das formas e dimensões definitivas do violão. Ainda que tenha sido baseado em instrumentos de cordas antigos, o violão se popularizou substituindo ao longo do tempo o

alaúde, instrumento de cordas muito utilizado na época do Renascimento ao Barroco. Em francês era chamado de Luth, daí o nome de Luthier. Desde então não sofreu alterações drásticas ao seu projeto (LÖW, 2012).

Por mais que o desenvolvimento do design clássico do violão tenha sido um processo basicamente empírico, o entendimento das características vibro acústicas desse instrumento é de grande importância, pois, a qualidade sonora do mesmo está diretamente ligada a essas características. Uma das partes deste instrumento que mais sofreu alterações foi o tampo harmônico com várias configurações do leque harmônico, usado para dar rigidez ao tampo e ao mesmo tempo disciplinar a vibração do mesmo (ZACZÉSKI, 2018).

Para a caracterização desse instrumento se faz necessário a compreensão de alguns parâmetros físicos como projeção e volume que podem ser associados a amplitudes de vibração, frequências naturais, massa, rigidez e amortecimento. (ROSSING, 2010). Um dos importantes aspectos da pesquisa atual em acústica musical consiste na conexão das propriedades físicas mensuráveis de um instrumento musical e sua qualidade sonora. Um melhor entendimento das relações entre qualidade do som e a resposta vibro acústica do instrumento permitirá aos fabricantes de instrumentos o ajuste das características tonais do mesmo alterando seus materiais, geometrias e padrões de construção usados (WRIGHT, 1996). Um dos métodos promissores na solução de problemas da acústica musical tem sido o uso de modelos computacionais que simulem o comportamento de instrumentos reais.

A forma modal de vibração de tampos superior e inferior de violões, bem como a frequência natural e de ressonância já foram estudados por alguns pesquisadores abordando vários aspectos relacionados a este tema como características dos materiais usados, método utilizado e tipos de violões analisados. Entre eles: WRIGHT (1996) e RICHARDSON (2010) realizaram alguns estudos de violões clássicos para estabelecer diferenças com relação às formas modais de vibração e frequências naturais e RUSSEL e PEDERSEN (1999)

investigaram os modos de vibração de vários violões clássicos e elétricos usando a força de um pequeno martelo para excitar as estruturas.

BECACHE e colaboradores (2005) apresentaram uma modelagem numérica do violão no domínio do tempo envolvendo deslocamento transversal da corda excitada por um pulso de força, o movimento de flexão da caixa de ressonância e a radiação sonora no ar.

STANCIU, CURTU E ITU (2008) analisaram o comportamento dinâmico de tampos de violão através do método dos elementos finitos (MEF) onde diferentes tipos de estruturas de placa foram modelados variando a espessura, os materiais, os suportes e leques harmônicos do tampo superior.

CURTU, STANCIU, CRETU e ROSCA (2014) analisaram diferentes tipos de corpos de violões clássicos com relação às frequências ressonantes para investigar as qualidades tonais de tais instrumentos de corda. O método utilizado consistiu na aplicação de uma excitação harmônica das estruturas com frequências pré determinadas por meio de um minishaker, que é um excitador eletrodinâmico de vibrações compacto, resultando em análises dos modos de vibração através das placas de Chladni.

Todos estes trabalhos contribuíram para o entendimento dos parâmetros científicos que envolvem a construção de tais instrumentos. Os trabalhos que analisam as formas modais de vibração, seja através de elementos finitos ou placas de Chladni, procuram analisar separadamente os tampos inferiores e superiores desacoplados do instrumento, ou ainda só analisam a caixa acústica sem o braço, cavalete, tróculo e culatra. Faz-se necessário a análise de modelos mais completos para avaliar as respostas em frequências naturais e modos de vibração, pois as partes analisadas separadamente podem ter comportamentos dinâmicos diferentes no sistema acoplado por causa da rigidez imposta principalmente através da tensão das cordas quando o instrumento está afinado. E, assim, esta pesquisa pretende construir através de elementos finitos um modelo computacional deste instrumento usando dados de um

violão construído artesanalmente por um Luthier colaborador do projeto em um trabalho anterior (RIBEIRO, 2014) a este, onde buscou-se medir e analisar as propriedades de todos os materiais usados na fabricação. O modelo computacional desenvolvido no presente trabalho é usado para simulações dos modos de vibração (análise modal) do sistema com e sem cordas, análise harmônica e estática.

A caracterização experimental é feita através do método de excitação por impulso, que é um sistema já usado em avaliação de propriedades mecânicas de materiais em geral, mas pouco utilizado neste tipo de análise. Com isso pretende-se obter as respostas em frequências naturais deste sistema acoplado.

Outra caracterização é desenvolvida usando processamento digital dos sinais sonoros obtidos no instrumento ao tocar as cordas com a devida tensão característica de afinação. Neste método o sinal sonoro é gravado em um software de edição de áudio usando microfone e salvo também em outro programa, o Matlab, que através de operações matemáticas de deconvolução obtém-se a resposta em frequência do instrumento.

A convolução é um operador linear que, a partir de duas funções dadas, resulta numa terceira que mede a área subentendida pela superposição das mesmas em função do deslocamento existente entre elas (KATZNELSON, 1976). Neste contexto, a idéia é que a excitação da corda seja o sinal de entrada, a resposta do instrumento o segundo sinal e o sinal sonoro emitido o terceiro, que neste caso, seria o produto da convolução dos dois primeiros. E, como neste trabalho o foco é a resposta do instrumento faz-se a operação inversa, a deconvolução. Para isso se faz necessário a gravação do sinal sonoro ao tocar uma corda no instrumento e também outro sinal dessa mesma corda gravada separadamente com a mesma tensão de afinação em um instrumento auxiliar, rígido com as dimensões que se assemelham ao braço do violão. E assim, com auxílio do software Matlab, obtém-se tal resposta. E esta pode ser comparada e analisada com relação à outra caracterização experimental.

Outra parte deste trabalho trata da sintetização de sinais sonoros. Com o processamento digital das informações baseando-se nas equações de Fourier, ou mais precisamente da Transformada Rápida de Fourier (FFT) pretende-se gerar sons a partir de dados obtidos na análise harmônica, experimental e deconvolução.

1.1 – Organização da Tese

O capítulo 1 apresenta uma breve introdução aos conceitos que envolvem o violão abordando aspectos históricos relacionados a evolução construtiva do instrumento. Apresenta também algumas pesquisas atuais que relacionam propriedades físicas mensuráveis, qualidade sonora e parâmetros científicos envolvidos na construção e funcionamento do referido instrumento musical.

O capítulo 2 aborda algumas pesquisas que motivam e dão relevância a este trabalho e que discorrem sobre métodos de avaliação e análise das propriedades físicas e dinâmicas do violão relacionando com características dos materiais usados na fabricação, essencialmente feito de madeiras nobres que podem estar escassas na natureza.

O capítulo 3 estabelece os objetivos do presente trabalho que se concentra inicialmente na construção de um modelo computacional de um violão via elementos finitos fazendo análises estáticas e dinâmicas do referido modelo e comparando com características experimentais pelo método de excitação por impulso. Objetiva-se também a realização de operações matemáticas de deconvolução e sintetização através de processamento digital de sinais sonoros.

O capítulo 4 descreve conceitos relacionados aos componentes de um violão com suas funções, detalhes construtivos, propriedades físicas e mecânicas dos materiais usados.

O capítulo 5 aborda trabalhos relacionados à modelagem computacional de violão via elementos finitos, bem como as principais análises utilizadas para caracterização de propriedades físicas do referido instrumento.

O capítulo 6 apresenta referenciais teóricos fundamentais envolvidos no processamento digital de sinais sonoros do violão tais como, Transformada de Fourier, sintetização, convolução e deconvolução.

O capítulo 7 faz a descrição detalhada dos métodos e materiais utilizados para a construção do modelo computacional e as análises estáticas e dinâmicas (modal e harmônica), para a técnica experimental pela excitação por impulso e processamento digital de sinais sonoros.

O capítulo 8 discorre sobre os resultados obtidos no modelo computacional e na técnica experimental através de características relacionadas às frequências naturais e formas dos modos de vibração e processamento dos sinais.

Por fim, o capítulo 9 discute as principais conclusões obtidas com sugestões para trabalhos futuros.

2.0 - Motivação e Relevância

As partes que compõem o violão são feitas dos mais variados materiais para atender as necessidades referentes a cada componente, conforme suas funções específicas a serem desempenhadas no instrumento. (WRIGHT, 1996; PORTELA, 2014)

O tampo da caixa acústica do violão funciona como um sistema de osciladores acoplados. Ele recebe o impulso das cordas/cavalete e o irradia pela caixa de ressonância, transmitindo determinada frequência. Tal nota musical, ao se propagar no volume de ar que existe no interior da caixa acústica e através das laterais, oscila com o fundo da caixa acústica. Portanto a largura das laterais influencia no volume de ar da caixa acústica e consequentemente, no timbre do instrumento (FLORES, 2015).

Materiais diferentes respondem de formas diferentes a estímulos semelhantes. Portanto, além da forma física, o que irá caracterizar o som produzido por um violão é a escolha do tipo de material de cada componente que poderá influenciar em seus resultados sonoros (CARCAGNO, 2018). Geralmente o violão é construído de madeira. Porém, cada madeira traz consigo algumas características específicas. Algumas absorvem bem o som, outras o refletem com relativa facilidade, tendo como resultado uma maior ou menor “sustentação” da nota musical tocada, uma sensação mais grave ou mais aguda, ou ainda, um som aveludado ou estridente. Algumas, em oposição a outras, têm menor resistência a fortes tensões (como as exercidas pelas cordas) podendo alterar o formato original do violão encurvando seu braço, deixando-o na forma de um arco (COUTO, 2006).

O grande problema na construção desses instrumentos é que as madeiras consideradas de boa qualidade são madeiras nobres, de alto valor agregado, muitas vezes escassas na natureza e de exploração proibida (PORTELA, 2014). É desejável encontrar parâmetros científicos que ajudem a otimizar esses processos de fabricação e, assim, encontrar madeiras alternativas que tenham características semelhantes às tradicionais usadas na lutheria. Nesse

contexto, a construção de um modelo computacional de violão pode colaborar enormemente para o entendimento dos parâmetros científicos que cercam a construção de tais instrumentos podendo, inclusive, contribuir para o desenvolvimento de novas técnicas de produção. E, assim existe um desafio em entender corretamente e modelar os parâmetros que envolvem a construção de instrumentos musicais e o efeito de técnicas e materiais na resposta acústica final do instrumento. (BUCUR, 2006).

A lutheria é a atividade dedicada à confecção destes instrumentos. É necessário compreender melhor estes processos de fabricação, que por vezes são artesanais, para se desenvolver uma abordagem científica da análise da qualidade e de técnicas construtivas que cercam a construção de instrumentos de corda. Tal abordagem visa, por exemplo, aperfeiçoar os processos artesanais e estimular artesãos à solução de problemas inerentes à sua arte (TEIXEIRA, 2015).

A pesquisa em acústica musical é interdisciplinar, pois abrange diversas áreas do conhecimento. São encontrados trabalhos que discorrem desde as propriedades físicas de materiais usados na construção de instrumentos de corda (CARCAGNO, 2018) e até análises psicoacústicas (WRIGHT, 1996). Com isso, muitas técnicas inovadoras têm sido desenvolvidas e, aliadas ao poder de processamento dos computadores atuais, alcançando resultados surpreendentes. ELEJABARRIETA (2000) estudou a evolução do comportamento vibracional de uma caixa acústica ou de ressonância do violão ao longo de sucessivas fases de construção por meio da técnica de análise modal. LUDWIGSEN (2013) comparou o som emitido por vários violões através de características espectrais. As validações de alguns trabalhos se deram através do uso de sensores acelerômetros (BAQERSAD, 2014 e AVITABILE, 2001) para a análise modal experimental da caixa acústica.

Alguns trabalhos mais recentes já usam técnicas de medição e análise de vibração sem contato direto. PATIL (2016) para entender melhor as formas de modos de vibração de um

violão explora as características vibracionais usando um martelo de impacto na análise modal experimental, um modelo de elementos finitos do violão e a técnica de correlação de imagem digital (DIC). A técnica usa um par de câmeras de alta velocidade e imagem e algoritmos de processamento para rastrear padrões e encontrar deformações estruturais. FRENCH e LEWIS (1995) usaram o Vibrômetro Laser Doppler (LDV) e o sistema de vídeo de holografia para identificar os modos de vibração da caixa acústica. O vibrômetro laser Doppler usa a mudança de frequência medida a partir de um feixe de laser refletido de um alvo se movendo paralelamente ao eixo do feixe para medir a velocidade dependente do tempo do alvo (neste caso, o cavalete ou caixa de ressonância). O sistema de holografia de vídeo usa a onda interação de um feixe de laser expandido com a reflexão de outro feixe expandido do alvo para medir deslocamentos.

3.0 – Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal desenvolver um modelo computacional de violão usando elementos finitos baseando-se em um modelo previamente estabelecido por RIBEIRO, 2014. Diferentemente do citado modelo, que foi baseado no estudo da caixa acústica com os reforços e leques harmônicos, a estratégia adotada no presente trabalho é adotar também o braço, tróculo, culatra e cavalete, além do ar enclausurado no instrumento com dimensões baseadas no modelo físico.

3.1 – Objetivos Específicos

- Pretende-se realizar análises modais e estáticas, calculadas pelo método de elementos finitos (MEF) para determinar o comportamento dinâmico aplicando condições de contorno que simulam a rigidez das faixas laterais e a tensão das cordas no cavalete e braço obtendo respostas em termos de frequências naturais e as correspondentes formas dos modos de vibração. E assim, comparar com respostas em frequência obtidas experimentalmente através do método de excitação por impulso.

- Obter dados numéricos referentes à resposta do modelo computacional à excitação vibracional das cordas introduzidas no cavalete através da análise harmônica. E assim comparar com dados experimentais obtidos através de operações de convolução e deconvolução do sinal sonoro separando a resposta do instrumento. Além disso, fazer analogia com os resultados experimentais através da técnica de excitação por impulso.

- Pretende-se ainda sintetizar ou gerar sinais sonoros a partir das respostas obtidas na análise harmônica, na caracterização experimental denominada excitação por impulso e através da caracterização por deconvolução.

4.0 – O Violão: Aspectos Gerais

O violão é um instrumento de cordas, com uma caixa geralmente feita de madeira, que gera uma acústica facilitando a propagação do som. Em alguns países de língua espanhola é conhecido como guitarra. A história do violão nos remete há quase 2.000 A.C. Os atuais violonistas aceitam atualmente duas teorias: O violão é um instrumento derivado do alaúde árabe, levado pelos mulçumanos para a península Ibérica e adaptando-se muito bem as atividades da corte; o violão derivou-se da “Cítara romana”, tendo seu uso expandindo com a dominação do império romano. A utilização do violão é umas das mais diversificadas, podendo ser utilizado tanto na música instrumental (orquestras), quanto em acompanhamento da voz (canções solo) (DUARTE, 2021).

Para se compreender o funcionamento deste importante instrumento para cultura mundial, é necessário que se compreenda alguns aspectos gerais do referido instrumento tais como: evolução histórica, detalhes construtivos, partes que compõem o instrumento com as suas devidas finalidades, bem como propriedades físicas e mecânica dos materiais de fabricação.

4.1 - Componentes do violão

O violão tradicional possui seis cordas com comprimento acústico de 65,0 centímetros medidos entre o rastilho e a pestana. Usando como referência o diapásão de 440 Hertz (Hz) essas cordas são afinadas em frequências características: 82 Hz, 110 Hz, 147 Hz, 196 Hz, 247 Hz e 330 Hz referente, respectivamente, da sexta à primeira corda de notas mi_2 , $lá_2$, $ré_3$, sol_3 , si_3 e mi_4 (ZACZÉSKI, 2018).

Todas as partes que compõem o violão (Figura 4.1) são feitas dos mais variados materiais para atender as necessidades referentes a cada componente conforme suas funções a serem desempenhadas no instrumento.

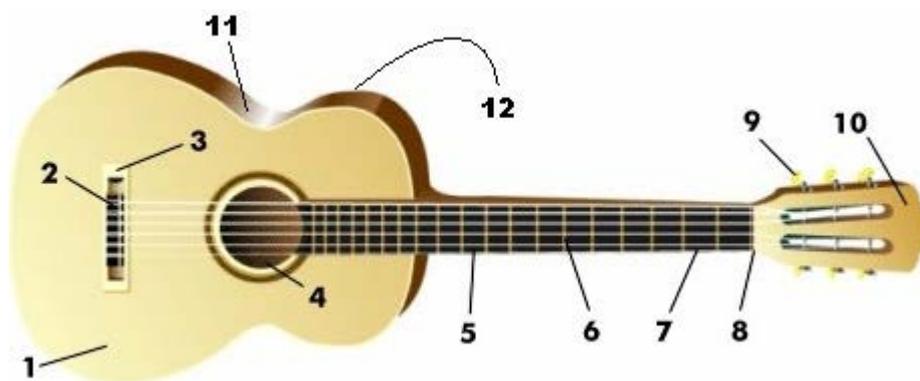


Figura 4.1 - Partes do violão: 1-Tampo, 2-Rastilho, 3-Cavalete, 4-Boca, 5-Braço, 6-Traste, 7-Casa, 8-Pestana, 9-Tarraxas, 10-Cabeça, 11-Faixa lateral, 12- Fundo.

O comprimento vibrante das cordas é definido pela distância entre a pestana e o rastilho, que são duas pequenas barras, feitas geralmente de marfim, osso ou polímeros sintéticos. A pestana se localiza no braço do violão e possui pequenos canais para o assentamento e distribuição uniforme das cordas na largura da escala, o rastilho encontra-se no cavalete e possui uma forma geométrica complexa permitindo que algumas cordas tenham maior ou menor comprimento, visando garantir a afinação das diversas notas tocadas em cada corda (WILLIS, 2010).

O rastilho também é responsável pela transmissão da vibração das cordas para o cavalete, que consiste de uma peça de madeira colada sobre o tampo e tem por função de suportar o rastilho, atuar na transmissão da vibração das cordas para o tampo e sustentá-las. Geralmente o cavalete é confeccionado em diferentes tipos de madeira (SOUZA, 2009). Outra importante função do rastilho, juntamente com o cavalete, é de atuar como uma espécie de filtro acústico, suprimindo certas frequências indesejáveis (DONOSO, 2008).

O tensionamento das cordas se dá através das tarraxas, que consistem de um sistema de eixos e engrenagens fixas na cabeça do violão, permitindo aumentar ou diminuir e, por fim, fixar a tensão aplicada individualmente em cada corda (SANDBERG, 2000).

O fundo ou tampo inferior é a parte do corpo que mantém as laterais no lugar e é feito de duas ou três peças de madeira. Outra parte é o corpo que é a caixa que fornece uma âncora para o braço e cavalete ou ponte que, por sua vez, consiste de uma placa de madeira que ancora as cordas ao corpo (CHAPPELL, 2009)..

A escala é um pedaço de madeira plano, semelhante a uma tábua, que fica no topo do braço, onde se coloca os dedos da mão esquerda para produzir notas e acordes. È conhecida por este nome porque os trastes são embutidos nele. Os trastes são barras finas perpendiculares às cordas que encurtam o comprimento de vibração efetiva de uma corda, permitindo que ela produza variações de notas musicais com suas frequências características. O cabeçote ou cabeça é a seção que contém as máquinas de afinação e fornece um local para o fabricante exibir seu logotipo (CHAPPELL, 2009).

4.1.1 - Tampo

Segundo GOMES (2004), o tampo é a parte mais importante do violão, pois ele transmite as vibrações das cordas através do cavalete. Ao vibrar, provoca o movimento do ar contido na caixa de ressonância. O tampo é construído por duas peças contínuas de madeira, medindo, 550 mm de comprimento, por 200 mm de largura e por 4 mm de espessura. Após o corte da silhueta o tampo é calibrado para 3.5 mm. E depois de incrustada a roseta chega-se a uma espessura de 3 mm.

O tampo harmônico é normalmente decorado com uma roseta e, interiormente é reforçado por sete finas barras de madeira dispostas em leque abaixo da boca. A função destas barras é reforçar a solidez da caixa e, simultaneamente, delimitar partes vibrantes condicionando assim o timbre final do instrumento. (BESSA, 2000).

4.1.2 – Leques Harmônicos

Os leques harmônicos são barras coladas na parte interna do tampo têm a função de disciplinar a vibração do tampo, além de servir como reforço necessário para que o tampo não afunde com a pressão das cordas sobre o cavalete (ANDRADE, 2011).

Um fato relevante no aspecto construtivo do violão é a possibilidade de deformação do tampo devido à tensão das cordas no acoplamento das mesmas com o cavalete. O tampo por ser feito de placas de madeira de espessura muito fina e apresenta uma tendência a um encurvamento ou flexão para fora do instrumento. Este tampo deve suportar a tensão exercida pelas cordas e minimizar as eventuais deformações devido a variações climáticas (SLOANE, 1976). Para isso, na sua parte interna é colado um conjunto de barras chamadas de leques harmônicos que servem também para dar maior rigidez, atenuando este efeito. Além disso, essa estrutura tem a função também de acoplar os movimentos desta superfície, de forma que o tampo possua modos de vibração com certas características (JOVICIC, 2000).

O arranjo dessa estrutura importante para o instrumento consiste em barras longitudinais normalmente dispostas em forma de leque, como o nome já sugere, divergindo a partir da cintura do instrumento, sendo que existem ainda duas ou três barras conhecidas como barras harmônicas ou travessas que atravessam o tampo no sentido transversal acima e logo abaixo da boca (COURTNALL, 1993). Segundo MEYER (1983) o leque mais adequado para a produção de som é aquele em que as barras longitudinais encontram-se separadas por distâncias uniformes. Existem, porém pesquisadores que defendem a utilização de um sistema assimétrico e radial. O leque radial poderia aumentar a amplitude dos movimentos produzidos pelo tampo, e conseqüentemente a projeção sonora e o tempo de ressonância.

ZACZÉSKI (2018) aborda as principais mudanças na posição dos leques harmônicos feitas por alguns construtores (Luthiers) ao longo dos tempos (Figura 4.2). O

presente trabalho apresenta uma configuração dos leques desenvolvida pelo Luthier Antônio Maurício Barros inspirado no trabalho do alemão Hermann Hauser.

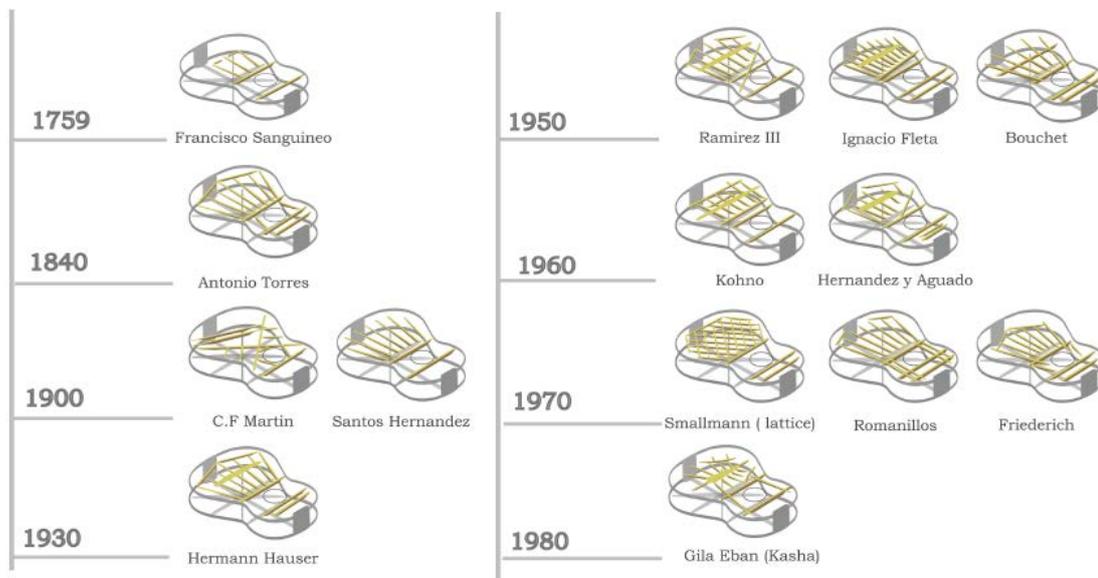


Figura 4.2 - Principais mudanças na disposição dos leques harmônicos feitas por alguns construtores (Luthiers) de 1759 a1980. (Fonte: ZACZÉSKI, 2018)

4.1.3 - Cavalete

O cavalete ou ponte é a peça do instrumento que serve como sustentação das cordas, suportando grande tensão de aproximadamente 40 kgf. Também tem a função de transmitir, através do rastilho, que pode ser feito de osso de canela de boi ou ainda plástico, a vibração das cordas para o tampo e, conseqüentemente, para a caixa de ressonância (GOMES, 2004).

É necessária muita precisão ao posicionar o cavalete sobre o tampo, tanto longitudinalmente (para determinar a afinação correta) quanto transversalmente (para determinar o posicionamento adequado das cordas na escala) e, além disso, o cavalete tem um efeito de enrijecimento acentuado no tampo e, portanto, afeta o vibrações. Um cavalete pesado pode fazer com que a frequência da ressonância do tampo superior diminua contribuindo para o aumento da rigidez (JANSSON 2002).

Um fato relevante no aspecto construtivo do violão é a possibilidade de deformação do tampo devido à tensão das cordas no acoplamento das mesmas com o cavalete. O tampo

por ser feito de placas de madeira de espessura muito fina e apresenta uma tendência a um encurvamento ou flexão para fora do instrumento. Os leques harmônicos, além de distribuir a vibração, servem também para dar maior rigidez, atenuando este efeito (SLOANE, 1976).

4.2 - Qualidade Sonora de um Violão

A avaliação da qualidade do som de violões bem como a qualidade em geral depende do projeto e detalhes da construção que já foram estudadas por vários pesquisadores (JANSSON 2002, MEYER, 1983, RICHARDSON,1998). A maioria dos violonistas gosta de sentir que a força tonal (ou o poder de transporte de energia), que consideram ser o mais importante critério de qualidade, com a amplitude do tom e timbre sendo o segundo mais importante (ROSSING, 2010).

Ao julgar a “qualidade” de um instrumento é preciso estar claro se é a aparência, o artesanato ou o som do instrumento que está sendo avaliado. Todos são importantes para o músico na escolha de um instrumento (WRIGHT, 1996).

Ao lidar com violões, poucos tópicos são mais controversos do que a qualidade do som. Músicos habilidosos e ouvintes experientes geralmente concordam com classificações subjetivas de instrumentos, mas as diferenças são notoriamente difíceis de medir e descrever usando métricas objetivas. Talvez o problema fundamental seja que as descrições do som de um instrumento são quase universalmente imprecisos. É comum que um violão seja descrito como 'brilhante' ou 'suave' (ROAK, 1976). Mas isso, na realidade, são palavras usadas para descrever conotações emocionais à reação ao som. E este tipo de alusão é a pedra angular da literatura e da poesia, mas oferece poucas informações úteis para o analista ou o luthier.

Por conveniência e na tentativa de qualificar tal instrumento, três problemas são associados à qualidade do som de um violão: a descrição da qualidade do som com base em

avaliações subjetivas, a correlação da qualidade do som com características físicas e a previsão da qualidade do som a partir do novo design.

Luthiers qualificados fazem regularmente instrumentos de alta qualidade, então esses três problemas foram claramente resolvidos empiricamente. No entanto, há pouco na literatura para sugerir que existe uma base técnica sólida para qualquer um, exceto o primeiro (FRENCH, 2009).

Não existe uma definição única de boa qualidade de som pela razão óbvia de que diferentes músicos preferem diferentes qualidades tonais em seus instrumentos. Afinal, a música é uma arte e a diversidade de expressões faz parte desse contexto. Além disso, também está longe de ser claro que apenas uma única combinação de características de design pode produzir um tipo específico de som. Mas que tem que levar em consideração também as propriedades dos materiais envolvidos no processo.

4.3 - Materiais para Violão e Similares

A escolha dos materiais para a construção de instrumentos tem uma forte influência sobre a qualidade do som do produto acabado (JANSSON, 2002). Os luthiers mais estabelecidos muitas vezes têm preferência pelos melhores pedaços de madeira, deixando os cortes mais pobres para os fabricantes de instrumentos menos experientes. No entanto, não há nenhuma peça ideal de madeira. Os métodos devem sempre ser adaptados para atender as necessidades dos materiais utilizados. A arte de construir bons instrumentos está intimamente ligada a necessidade de avaliar os materiais disponíveis e adaptar-se a construção para compensar eventuais falhas na madeira. A rigidez de um pedaço de madeira depende criticamente da forma como é cortado da árvore (WRIGHT, 1996).

Este método de corte produz fatias radiais a partir do tronco com o grão fazendo um ângulo de 90 graus com a superfície da madeira (Figura 4.3). A madeira cortada dessa

maneira tende a produzir menos problemas de retração e distorção oferecendo maior rigidez. A orientação das fibras da madeira afeta a dureza ao longo da grã. A madeira é dividida e serrada e isso assegura que as fibras corram paralelas à superfície e, assim, maximizam a dureza (WRIGHT, 1996).

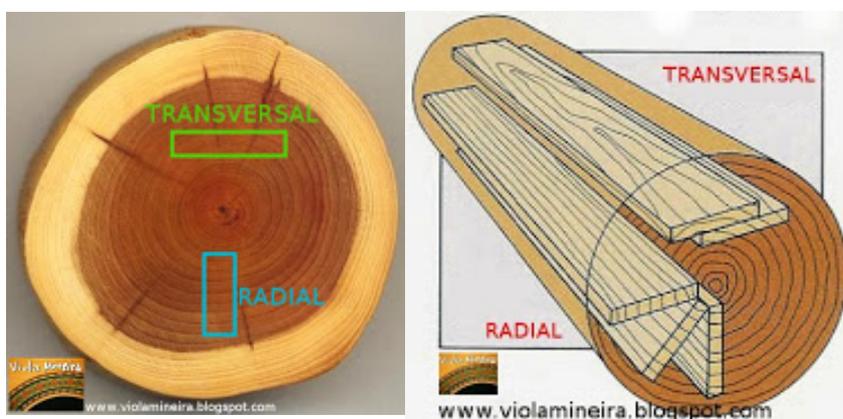


Figura 4.3 - Posição de Serramento das Madeiras para Violão e Instrumentos Similares.

(Fonte: <http://www.violamineira.blogspot.com>)

4.4 - Propriedades físicas e mecânicas da madeira

O som de um violão depende em parte das madeiras utilizadas na sua construção. Universalmente há um consenso que o tampo superior é o componente mais importante do instrumento (RICHARDSON, 1995). No entanto, muitos fabricantes, revendedores e músicos têm uma visão fortemente contrária, que sustenta que a madeira de fundo faz uma diferença significativa e imediatamente óbvia para o som de um violão. Mesmo assim, alguns Luthiers focam a sua escolha nas madeiras usadas na parte de trás e nas laterais da caixa acústica (JOHNSTON, 2006, 2013).

O fabricante tem muita liberdade nos detalhes de construção que podem ser explorados para fazer excelentes instrumentos com qualquer madeira que seja estruturalmente adequada (GORE, 2011). A escassez e o aumento do custo de muitas madeiras tradicionais empurraram os fabricantes de violões para explorar soluções alternativas. Estes incluíram o

uso de espécies menos familiares de madeiras tropicais que são mais prontamente disponíveis (ELLIS, 2008; PORTELA, 2014).

Ao iniciar um novo instrumento, o fabricante escolhe uma espécie de madeira e, em seguida, uma amostra particular dessa espécie. A escolha não é determinada apenas pelas propriedades acústicas: aparência visual, capacidade de assumir o tradicional acabamento de alto brilho, estabilidade e resistência a rachaduras, qualidades de trabalho na bancada e resistência a longo prazo a deformação em resposta ao estresse estático das cordas são todos importantes também (CARCAGNO, 2018). O fabricante então faz algumas escolhas de dimensões detalhadas (forma, espessura, contraventamento padrão, etc.), e o resultado é uma caixa acústica com certos modos de vibração e frequências naturais associadas a fatores de amortecimento. Esses parâmetros modais fornecem 'Impressão digital' acústica do instrumento, e determinam muitos aspectos do som. Mas o som pode sofrer influência de outros fatores também, como a escolha das cordas e detalhes construtivos finais como a colagem e altura do cavalete, trastes, material do rastilho, etc. Uma quantidade considerável de pesquisas estudam as propriedades acústicas da madeira (HAINES, 1979; WEGST, 2006; YOSHIKAWA, 2007).

Segundo PORTELA (2014), muitas das propriedades físicas e mecânicas da madeira se correlacionam com a sua densidade. A determinação do módulo de Young e de cisalhamento na direção paralela e perpendicular à grã do material têm se mostrado fundamental para o estudo musical de um placa de madeira vibratória.

As madeiras para instrumentos musicais devem ter módulo de Young específico mais alto e menor atrito interno na direção longitudinal. As madeiras para o tampo inferior ou do fundo devem ter menos propriedades vibracionais nessa direção. No entanto, as propriedades vibracionais na direção transversal à grã, ou seja, direção perpendicular, também devem

contribuir para as características em relação às frequências naturais (ONO, 1996; SEDIK, 2010).

Segundo a obra *Wood handbook: Wood as an engineering material* (2010) os termos grã e textura da madeira são comumente usados e vagamente relacionados. O termo grã é frequentemente usado em referência a tamanhos relativos e distribuições de células, como em grãs finas e grosseiras. Este uso da grã é mais ou menos sinônimo de textura. Grã é também utilizado para indicar a orientação das células do sistema axial ("direção de fibra"), ou seja, envolve a orientação dos elementos celulares em relação ao eixo vertical da árvore. Quando as células são paralelas ao crescimento vertical, a grã é direita ou regular. Quando a grã apresenta desvios ou inclinações em relação ao eixo principal do tronco, a grã é chamada irregular, podendo ser grã oblíqua, ou ainda grã entrecruzada.

A madeira é um material muito complexo para ser analisado, até hoje tem sido um dos pontos importantes para o desenvolvimento e formalização na fabricação de instrumentos musicais. Tendo uma microestrutura, isso se reflete na macroescala de seu próprio grão. As paredes celulares são em camadas e contém três compostos orgânicos: adesivo celulose, hemicelulose e natureza da lignina (JAROSLAV, 2005).

As propriedades mecânicas da madeira têm um comportamento altamente variável, que depende do envelhecimento do material, temperatura, umidade ou carga. A relação linear é observada na tensão longitudinal e transversal, a compressão e a relação tensão de cisalhamento e deformação não é linear (RECEP E SAMI, 2010). Os modelos constitutivos de materiais de madeira que são implementados na manufatura são modelos não lineares que podem ser analisados usando elementos finitos.

Para a modelagem em elementos finitos, a estrutura é subdividida em uma malha ou grade, que depende da geometria, e consiste em elementos de linha unidimensionais e elementos de área bidimensionais, como triângulos e retângulos ou elementos de volume

tridimensional como tetraédrico regular ou irregular ou outro poliedrico. Os pontos nodais nas fronteiras desses elementos são usados como pontos discretos na estrutura sob investigação. As variáveis dependentes usadas nos sistemas de equação são definidas apenas nesses pontos de nó (GORROSTIETA-HURTADO, 2012).

4.5 - A tração na corda do violão

Um violão afinado está sujeito à ação de forças trativas impostas pelo tensionamento das cordas para sua afinação e determinar os valores de tais forças é importante para estabelecer as condições reais que pode estar sujeito um modelo real para que se possa construir com a máximo fidelidade o modelo computacional. Segundo CATELLI (2014), um conjunto de cordas de violão pode suportar até 500 N e que alguns fabricantes informam que cada corda individualmente, pode suportar até 70 N.

A tração de cada corda do violão pode ser determinada com o uso de um dinamômetro, a partir do conceito de equilíbrio de forças (Figura 4.4 a). Puxando-se cada corda, na direção perpendicular a ela, com uma força (F) em seu ponto médio (Figura 4.4 b), que deve coincidir com a posição do 12º traste, a tração (T) da corda pode ser determinada pela equação 4.13, envolvendo o deslocamento (h) do ponto médio. Usando essa relação para cordas afinadas com o padrão fundamental de 440 Hertz chega-se a valores de tensão média de 55 N (MACIEL, 2001).

$$T = \frac{L.F}{4.h} \quad (4.13)$$

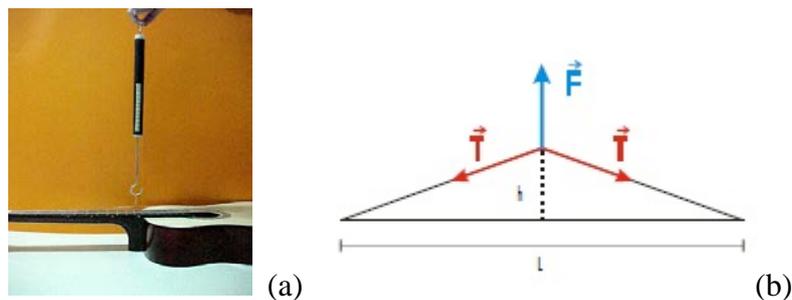


Figura 4.4 - (a) Medição com dinamômetro; (b) Posicionamento e diagrama de forças. (Fonte: Maciel, 2001)

5.0 - Modelo Computacional de violão

O emprego da modelagem computacional é focado na resolução de problemas em várias áreas da ciência tais como: social, ambiental, engenharia, climática, etc. Nessa abordagem é possível antecipar desempenhos, eventualmente detectar falhas, enfim prever o comportamento em condições mais abrangentes que aquelas possíveis de serem realizadas em laboratórios. Embora o desenvolvimento de novos materiais e mesmo da teoria de materiais esteja ainda fortemente associado à tradicional é necessário o componente experimental, da qual não é prudente se afastar por questões metodológicas, os avanços recentes mais significativos requerem uma abordagem nova, baseada em modelagem computacional (CURTU, 2009; LEE, 2018).

Inúmeros trabalhos têm desenvolvido modelagem computacional para instrumentos de cordas como violão, violino, viola caipira entre outros (WRIGHT, 1996; ROSSING, 2010). Muitos desses trabalhos são desenvolvidos para análises dos componentes separadamente como por exemplo, o tampo do violão, que é considerado a parte mais importante e a mais crítica do projeto de construção de um instrumento, pois nele é que são acoplados os leques harmônicos, a boca, além do cavalete ou ponte que tem função de transmitir a vibração da corda para toda a caixa acústica (SHEPHERD, 2014). Alguns autores, discutidos a seguir, desenvolveram modelos de caixa acústica desconsiderando braço, ponte e cordas por exemplo.

PORTELA (2014) desenvolveu uma análise integrada numérico experimental do tampo do violão clássico através da criação de um modelo numérico por elementos finitos para análises de espécie de madeira amazônica, a Marupá, usando critérios de qualidade tanto para tampo livre quanto ao mesmo montado em um violão finalizado. Já PAIVA (2013) desenvolveu um modelo para realização de análises modais acústica, estrutural e vibroacústica com acoplamento entre fluido e estrutura, calculadas pelo método de elementos

finitos (MEF) com o objetivo de determinar o comportamento dinâmico do tampo e da caixa de ressonância da viola caipira em termos de frequências naturais e as correspondentes formas dos modos de vibração. E foi observado que a modelagem por elementos finitos se mostrou eficaz para determinar o comportamento dinâmico do caixa acústica da viola caipira. No entanto, para se obter bons resultados do modelo computacional é muito importante identificar e caracterizar o propriedades mecânicas de todas as madeiras utilizadas. A influência da excitação e o processo de medição são muito importantes devido ao baixo peso da viola e sensibilidade acústica (PAIVA, 2013).

RIBEIRO (2014) acompanhou o processo de construção da caixa acústica de um violão clássico, o mesmo instrumento usado na caracterização do presente trabalho, desde a escolha das madeiras até a formação da caixa para obter, experimentalmente, frequências de ressonância do tampo, do fundo e da caixa acústica, construídos artesanalmente, e além disso, obteve também valores numéricos para os modos de vibração e as frequências naturais do tampo, do fundo e da caixa acústica através da construção de modelos computacionais para o tampo e fundo isolados e para a caixa acústica como um todo. E os resultados em função de frequências naturais de vibração medidos experimentalmente por excitação por impulso em relação aos valores numéricos, via elementos finitos, se mostraram com valores bem próximos.

5.1 - Análise Modal

Segundo GORROSTIETA-HURTADO (2012), as vibrações presentes no violão em geral pode ser descrita em termos de modos de vibração produzidos por elementos estruturais. Os modos normais de vibração são formas independentes provocadas por um estímulo externo. Eles são caracterizados por nós e anti-nós, bem como a frequência modal e amortecimento. A análise modal é um método estabelecido para a identificação de parâmetros

modais de uma estrutura, como frequências naturais, formas modais e amortecimento. Este método foi definido e aplicado na construção de violinos e usado por muitos construtores para determinar certas características do seu instrumento. E também estendido para o violão e relatado em alguns estudos (CURTU, 2008; BADER, 2005). São vários estudos e comparações que analisam os modos de vibração aplicados ao violão, e um exemplo é a publicação de CURTU (2008), que se concentra em uma Tabela comparativa da análise modal de obras de diferentes autores.

A análise modal é usada para calcular as frequências naturais e as formas dos modos de vibração de uma estrutura. A dinâmica de estruturas estuda as modificações ocorridas na quantidade de movimento dos sistemas elásticos. alguns exemplos são: ação de um motor sobre sua base, ação dos ventos ou das ondas do mar em estruturas, ação de terremotos ou explosões, sempre usada para sistemas oscilantes ou vibrantes ocasionados por uma carga provocadora de tal efeito, como por exemplo também, um violão ou outro instrumento de corda, em que sob a ação de uma pequena força faz com que a corda vibre e transmita essa vibração para todo o instrumento (GORROSTIETA-HURTADO, 2012).

Sabe-se que graus de liberdade são coordenadas que definem como se encontram as configurações de um sistema a qualquer instante. Um modo de vibração é uma configuração do sistema segundo a qual este pode oscilar, mantendo-se constante a relação entre os deslocamentos dos diversos pontos da estrutura (CLOUGH e PENZIEN, 1993)

As propriedades dos modos de vibração estão relacionadas com muitos processos físicos que ocorrem no instrumento. Interferometria holográfica e técnicas mecânicas (técnica de Chladni) têm sido usadas para visualizar as formas dos modos de placas e de instrumentos completos. JANSSON (1971) foi o primeiro a publicar interferogramas de alguns modos do tampo de um violão. Ele usa nesse artigo dados holográficos a fim de interpretar os picos observados nas medidas de resposta de pressão sonora, que foram tomadas variando o ponto

de excitação no tampo e variando a posição do microfone. Observou-se que o campo de radiação em alguns modos não foi detectado por microfones posicionados diretamente à frente do tampo do instrumento.

WRIGHT (1996) fundamentou a sua pesquisa na observação da qualidade do instrumento através do estudo da análise modal das partes que compõem o violão, principalmente o tampo superior, que segundo ele, é a parte mais importante no que diz respeito a resposta acústica do instrumento.

Muitos dos processos físicos importantes que ocorrem em um instrumento musical estão relacionados com as propriedades dos modos de vibração do instrumento. E o comportamento da caixa de ressonância do violão utilizando medidas eletromecânicas de entrada e saída em alguns pontos do tampo e suas correlações com a eficiência de radiação acústica (LAI e BURGESS, 1990).

CALDERSMITH (1995) aplicou o mesmo método para diferentes famílias de instrumento de cordas relacionando frequência naturais e formas dos modos de vibração da caixa de ressonância com eficiência de radiação.

5.1.1 - A Técnica de Chladni

Os estudos relacionados a essa técnica foram inicialmente estudados pelo cientista inglês Robert Hooke (1635-1703), um pesquisador da elasticidade dos fluídos, estudioso da gravitação universal, pedagogo, curador de experiências da Royal Society em 1662 e precessor de Isaac Newton neste que é ainda hoje um dos centros mais respeitados de pesquisa. (PURRINGTON, 2009).

No campo da acústica, Hooke foi o primeiro a pesquisar as vibrações sônicas. Em 8 de julho de 1680, Robert Hooke identificou padrões nodais associados aos modos de vibração de um disco de vidro coberto com farinha. Hooke utilizou-se de um arco para friccionar a

borda do prato. Ele não chegou a descrever as relações matemáticas de amplitude da onda com o ângulo do arco, o tom projetado ou a porção fracionada da placa a ser percutida, mas seus experimentos abriram caminho para as pesquisas de Chladni aperfeiçoando os experimentos de Robert Hooke (ALMEIDA, 2017).

Uma das mais conhecidas realizações de ERNST CHLADNI (1756 - 1827) foi a consolidação de mostrar os vários modos de vibração de uma superfície rígida. Uma placa (ou uma membrana) vibrante, quando atinge a frequência de ressonância, é dividida em regiões vibrantes em direções opostas delimitadas por linhas de vibração nula, chamadas de linhas nodais. E Esses resultaram em uma publicação sua denominada de “Descobertas Sobre a Teoria dos Sons”, no ano de 1787, em Leipzig. Nesse trabalho o autor relaciona 166 Figuras com várias formas modais de vibração (ALMEIDA, 2017). Variações desta técnica são ainda comumente usadas na projeção e construção de instrumentos musicais acústicos como o violino, violão e violoncelo.

CHLADNI se utilizou de placas circulares e retangulares em sua pesquisa incluindo, além disso, observações sobre as variantes produzidas pela diferença de intensidade e velocidade com que o arco de violino era percutido, agregado a porção fracionada da placa. Suas experiências produziram imagens variadas que ele classificou e documentou a fim de determinar a ocorrência das similaridades ou disparidades dos padrões imagéticos apresentados (ALMEIDA, 2017). A Figura 5.1 (a) mostra o esboço de algumas Figuras catalogadas pelo autor e a Figura 5.1 (b) mostra experiências obtidas em laboratório utilizando-se de um excitador e variando-se as frequências de vibração.

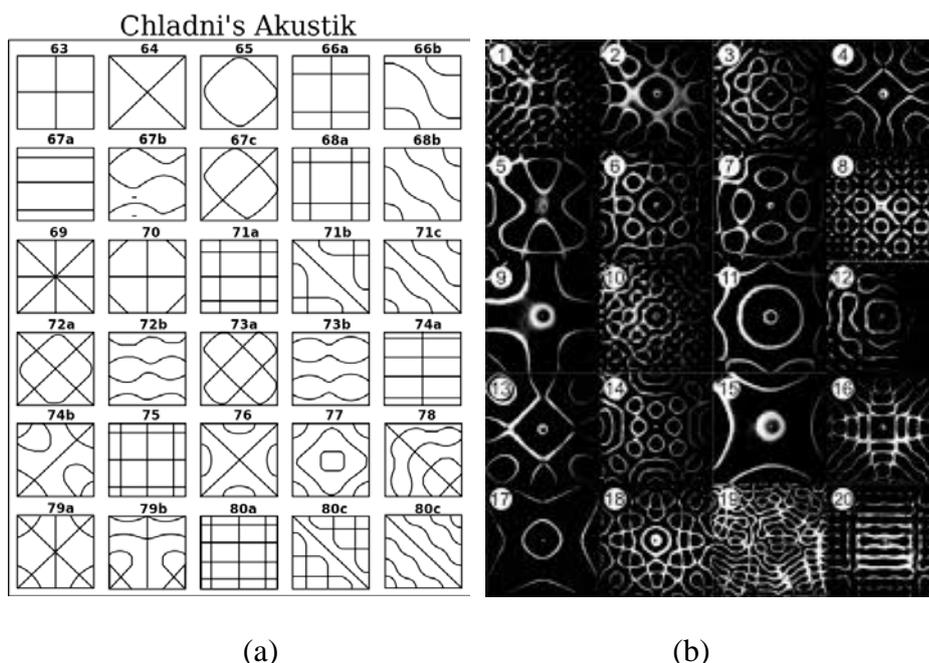


Figura 5.1 – (a) Esboço de alguns padrões de vibração representados em Figuras de Chladni (CHLADNI, 1787);

(b) Padrões de Chladni obtidos em laboratório.

FIRTH (1977) investigou também as duas menores frequências de ressonância do violão utilizando a técnica de Chladni para padrões de vibração e interferometria holográfica para obter informações sobre as formas dos modos de tampo. Medidas de admitância de entrada, fase relativa à força de excitação e pressão sonora irradiada foram feitas para uma banda de frequência incluindo as duas primeiras ressonâncias do instrumento, 70 Hz e 250 Hz, respectivamente. O ponto de excitação inicialmente escolhido foi sobre o cavalete na posição da corda E (Mi), mas foi observado que a resposta obtida era para os dois primeiros modos, respectivamente. Logo, o ponto de excitação foi transferido para o meio do tampo, onde está posicionada a linha nodal do segundo modo de tampo, possibilitando, assim, uma investigação de ambos os modos separadamente. As medidas de resposta em frequência foram feitas com a boca do instrumento aberta e tampada. Quando a boca foi tampada o menor pico de resposta (em torno de 100 Hz) desapareceu, e a frequência do segundo modo diminuiu, indicando que ambos os modos têm relação de acoplamento com a cavidade acústica. FIRTH (1977) ainda descreve o comportamento do violão, nestas baixas frequências, fazendo

analogia com um modelo acústico, similar aos que descrevem os circuitos dos alto falantes de baixa frequência. Ele enfatiza também que os valores para frequências fundamentais de ressonância do tampo e da cavidade acústica desacopladas nunca poderão ser determinadas por medidas diretas nos instrumentos reais, uma vez que o acoplamento entre ambos nunca poderá ser totalmente removido.

GORROSTIETA-HURTADO e Colaboradores (2012) investigaram o comportamento dinâmico de um violão clássico (violão de Torres) ao longo de diferentes estágios de construção por meio de análise modal experimental e numérica, empregando MEF, simulação computacional e medidas de frequências naturais e modos de vibrar (técnica de Chladni) da caixa de ressonância por meio de excitação mecânica. CURTU e Colaboradores (2009) utilizaram procedimentos similares para investigar o comportamento dinâmico do tampo, como estrutura isolada, e de caixas de ressonância com diferentes tipos de leque harmônico.

5.1.2 – A Técnica de Excitação por impulso

O uso dessa técnica consiste em um impulso de excitação para induzir a vibração: um leve impacto é dado ao espécime, neste caso, no tampo do violão, que, após um curto período transitório, irá vibrar em uma ou mais de suas frequências ressonantes. A técnica de excitação por impulso é essencialmente não destrutiva e não requer nenhum formato especial para o objeto testado. E têm tido grande aceitação mundial tanto na indústria e na pesquisa (ROEBBEN, 1997).

Os modos de vibração de um espécime analisado dependem de sua forma, o local do impacto e o tipo de suporte. O local do impacto é próximo a um antinodo da vibração. O impacto pode ser fornecido manualmente, com uma ferramenta simples com uma ponta metálica ou através de dispositivo automático de impacto. A vibração da amostra é registrada por um cristal piezoelétrico ou por um microfone. Um cristal piezoelétrico requer contato com

o objeto analisado e para se ter uma boa medição deve se estabelecer o lugar de contato o mais próximo possível do nó de vibração (ROEBBEN, 1997).

A técnica de excitação por impulso usada no presente trabalho foi desenvolvida pela empresa Sonelastic de acordo com a Norma ASTM E1876 (2007) que consiste essencialmente na determinação dos módulos elásticos de um material a partir das frequências naturais de vibração de um corpo de prova de geometria regular (barra, cilindro, disco ou anel). Estas frequências são excitadas por meio de um impacto mecânico de curta duração, seguido da captação da resposta acústica por um sensor. Um tratamento matemático é feito no sinal para a obtenção do espectro de frequências (Transformada Rápida de Fourier). A partir disso, são calculados os módulos elásticos dinâmicos através de equações previstas em norma, tal que são consideradas a geometria, a massa, as dimensões do corpo de prova e a frequência obtida pelo equipamento (Figura 5.2). Para a excitação dos modos de vibração desejados é necessário impor determinadas condições de contorno.



Figura 5.2 - Equipamento desenvolvido pela ATCP Engenharia Física (Sonelastic®) para medição dos módulos elásticos empregando a Técnica de Excitação por Impulso. (Fonte: OTANI, 2017)

5.2 - Análise Estática

A análise estática é usada para determinar deslocamentos, tensões, etc. sob condições de carga estática. Têm-se dois tipos: linear e não linear, sendo que as não linearidades podem incluir plasticidade, tensão, rigidez, grandes deformações, grandes tensões, hiperelasticidade,

superfície de contato e fissuração. Ela tem por objetivo principal quantificar a magnitude dos esforços internos e dos deslocamentos que se manifestam em qualquer sistema estrutural, quando o mesmo é submetido a um carregamento arbitrário, desprezando-se o efeito das forças de amortecimento e das forças de inércia. No presente trabalho, a análise estática é usada para prever os possíveis efeitos provocados pela tensão de afinção das cordas e a rigidez das faixas laterais, neste caso, usada para manter e fixar no modelo essas condições de contorno para posteriormente fazer a análise modal.

5.3 - Análise Harmônica

A análise harmônica é usada para determinar a resposta de uma estrutura a cargas harmônicas variáveis no tempo. É o ramo da matemática que estuda a representação de funções ou sinais como a sobreposição de ondas base e recebe tal nome devido ao fato de as ondas básicas serem chamadas de harmônicas. Ela investiga e generaliza as noções das séries e da transformada de Fourier. A transformada de Fourier, batizada em homenagem a Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768 - 1830), matemático francês que desenvolveu essa teoria, é indispensável para as diversas áreas da Ciência, como Física, Química e Física Quântica, Teoria dos números, Análise combinatória, Processamento de Sinal e Imagem e muitas outras.

A análise harmônica começou com o esforço de Fourier para analisar (extrair informações) e sintetizar (reconstruir) as soluções para as equações do calor e da onda em termos de harmônicos (LAUGESEN, 2009).

No presente trabalho buscam-se as respostas em frequências naturais de vibração do modelo mediante uma pequena carga impulsiva no cavalete simulando, a princípio, o pulso de vibração das cordas.

6.0 – O Sinal sonoro do Violão: Características e Processamento Digital.

Um sinal pode ser definido como uma função de uma ou mais variáveis, a qual carrega informações sobre a natureza de um fenômeno físico. Para a geração, extração de informação ou recepção de cada sinal há sempre um sistema envolvido, isto é, uma entidade capaz de manipular um ou mais sinais para realizar uma função. Por exemplo, quando alguém fala, o sistema para emissão da voz são as cordas vocais e o ouvido é o sistema para recepção do sinal (HAYKIN, 2001). Assim, pode-se dizer que um sistema é capaz de alterar as características de um sinal, caso desejado.

6.1 – Características de um Sinal Sonoro

Existem diversas classes de sinais: Sinais contínuos e discretos no tempo, Sinais analógicos e digitais, Sinais periódicos e não periódicos. (PINTO, 2018):

Um sinal no qual sua característica física varia continuamente no tempo é classificado como contínuo no tempo. Já um sinal discretizado no tempo é aquele que pode ter apenas valores pertencentes a um conjunto discreto, em outras palavras, um sinal que possui informação apenas em alguns instantes de tempo (ROBERTS, 2009).

Os conceitos de continuidade e discretização de sinal estão vinculados à natureza do sinal ao longo do tempo (eixo horizontal). Já os termos analógico e digital qualificam a natureza da amplitude do sinal (eixo vertical) (LATHI, 2006). Um sinal analógico é definido como um sinal que tem variação no tempo análoga (proporcional) a algum fenômeno físico, com amplitude podendo assumir infinitos valores. Assim, afirma-se que todo sinal analógico é contínuo no tempo, mas nem todo sinal contínuo no tempo é analógico (ROBERTS, 2009). Em contrapartida, sinal digital se refere à transmissão de uma sequência de valores, os quais são representados por dígitos de alguma forma codificados, geralmente binários.

Segundo HAYKIN (2001) um sinal é dito periódico quando sua função satisfaz, para todo t , a seguinte condição:

$$x(t) = x(t+T) \quad (6.1)$$

onde T é uma constante positiva. Uma vez que esta condição é satisfeita para $T = T_0$, ela também satisfaz $T = 2T_0, 3T_0, 4T_0, \dots$. Logo, o menor valor de T que satisfaz a equação (6.1) é chamado período fundamental de $x(t)$, que define a duração de um ciclo periódico de $x(t)$. O recíproco do período fundamental T é a chamada frequência fundamental deste sinal periódico, que é medida em hertz (Hz) e define o quão frequentemente $x(t)$ se repete ao longo do tempo. Contudo, qualquer sinal que não possua algum valor para T que satisfaça a condição da equação (6.1) é chamado aperiódico ou não periódico (LATHI, 2006).

Um fator de grande relevância que quase sempre está presente em um sinal sonoro é o ruído, mas é considerado indesejável, pois pode afetar a qualidade do sinal. O ruído é considerado um fenômeno físico variante no tempo, ou seja, é uma interferência da natureza em um sinal que acontece de forma aleatória. Porém, o ruído não apresenta informação útil sobre a característica do sinal, (ROBERTS, 2009).

O sinal sonoro ou som resulta da vibração de um meio ou perturbação mecânica que se propaga através de ondas quando é produzido algum tipo de mecanismo que altere de forma periódica a pressão do ar em nossa volta. (WUENSCHÉ, 2009).

Para LAZZARINI (1998), o som é uma qualidade perceptiva que é resultado da percepção de distúrbios das moléculas de um meio em um certo espaço de tempo. Esses distúrbios, por sua vez, apresentam-se em forma de ondas em sua propagação pelo meio.

Segundo LACERDA (1996), o som pode ser representado por uma soma de diversas ondas individuais chamadas de componentes de Fourier e cada uma corresponde a uma determinada frequência múltipla da componente inicial.

Essas componentes formam uma série conhecida como série harmônica, onde o harmônico de ordem zero é chamado de frequência natural ou fundamental, o segundo é denominado harmônico de primeira ordem ou primeiro harmônico, o terceiro é chamado segundo harmônico e assim sucessivamente.

As amplitudes e o tempo de duração de cada um dos harmônicos presentes no som resultante podem variar independentemente. A combinação dessas duas propriedades tem o nome de timbre. A síntese sonora de timbres de instrumentos musicais depende, basicamente, do conjunto de harmônicos utilizados (DODGE; JERSE, 1997).

Quando um instrumento musical produz uma determinada nota, ele produz não apenas o som da frequência fundamental, que dá a qualidade de tonalidade, mas também o de frequências harmônicas múltiplas da fundamental. Se não fosse assim, não haveria diferença entre o som de instrumentos diferentes. É a proporção dos harmônicos e sua intensidade relativa produzidos por cada tipo ou qualidade de instrumento que os diferencia, dando-lhes sua qualidade de timbre (FILHO, 2009 e DONOSO, 2008).

Timbre é a propriedade do som que nos permite reconhecer sua origem. O timbre diferencia, “personaliza” o som. Por meio do timbre identificamos “o que”, ou qual instrumento está produzindo o som (RAMALHO JÚNIOR, 1999).

Cada tipo de instrumento musical tem uma espécie de assinatura, um conjunto de características sonoras associado a ele. Embora possam parecer subjetivas, elas têm uma descrição matemática extremamente precisa que torna cada tipo de instrumento único. A mesma nota emitida por um violão soa diferente quando produzida por um piano. Isto acontece porque, embora a frequência fundamental seja a mesma em ambos os instrumentos, o som de instrumentos musicais não é simples. As amplitudes e o tempo de duração de cada um dos harmônicos presentes no som resultante podem variar independentemente. A combinação dessas duas propriedades tem o nome de timbre (DODGE, 1997).

A mesma nota tocada em instrumentos diferentes soará com timbres diferentes pelo fato do som gerado por cada instrumento conter os harmônicos do tom fundamental em proporções diferentes. Essas proporções são características de cada tipo de instrumento, e, para o ouvido mais acurado, características de cada modelo ou exemplar de instrumento (ROGERS, 2013; HALLIDAY, 2009).

O sinal sonoro pode ser representado por uma superposição de sinais mais simples representada por uma série de Fourier onde a intensidade sonora de cada frequência harmônica componente é determinada pelas características do instrumento (SNIEDER, 1994). Por exemplo, o som produzido por instrumentos de corda geralmente possui todos os múltiplos da frequência fundamental como componentes, enquanto alguns instrumentos de sopro, que possuem tubo de ressonância aberto num extremo e fechado no outro, produzem som que contém apenas os harmônicos ímpares. Dessa forma, o som produzido por um clarinete contém quase que somente harmônicos ímpares, já no som de uma flauta ou oboé, o primeiro e o segundo harmônico estão presentes (praticamente só eles) (Figura 6.1).

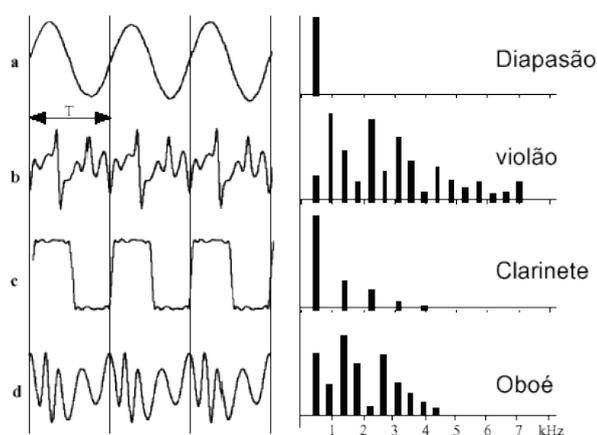


Figura 6.1 - Representação de alguns instrumentos musicais no domínio do tempo (esquerda) e no domínio da frequência (direita). (Fonte: WUENSCHÉ, 2009)

Para analisar os sinais acústicos de um instrumento, neste caso, o violão, é necessário considerá-lo como um sistema vibrante. Os sistemas de vibração podem vibrar em vários

modos diferentes. Cada modo é relacionado a uma frequência diferente e, portanto, um modo de vibração pode ser excitado individualmente por algum tipo de perturbação relacionado a certa frequência (SANTOS, 2013).

A descrição deste movimento vibracional é bastante difícil, pois é necessário saber a amplitude (ou intensidade), a frequência de cada modo de vibração perturbado e a taxa de amortecimento no meio material em que se propaga.

O espectro de uma vibração indica quais frequências estão sendo excitadas e com que intensidade. Esta análise espectral, também conhecida como análise no domínio da frequência, é obtida através da análise de Fourier do sinal sonoro, especificamente pela aplicação da transformada de Fourier ao sinal temporal representativo da vibração estudada (TEIXEIRA, 2014).

As ondas sonoras complexas geradas por um instrumento musical podem ser representadas por uma série de Fourier e são compostas da nota fundamental e da série de harmônicos ou sobretons, cada um com a sua amplitude e fase. Os harmônicos podem ser gerados por qualquer sistema em vibração. Sob condições normais, uma corda vibrante soa não só o tom fundamental, mas também, todos os outros harmônicos (WUENSCHÉ, 2009).

A onda fundamental e seus harmônicos são a identidade de uma voz, de um instrumento ou de um aparelho. O timbre é formado pela intensidade e frequência de todos os harmônicos de uma onda. A análise de Fourier demonstra através de um espectro que qualquer forma de onda pode ser decomposta em uma soma de ondas senoidais e guardam uma relação numérica com a frequência mais baixa da série (WUENSCHÉ, 2009).

6.2 – Amortecimento

Segundo COSSOLINO e PEREIRA (2010), o amortecimento, ou atrito interno, é uma das propriedades mais sensíveis de materiais e estruturas, tanto em escala macro quanto

microscópica. É o fenômeno pelo qual a energia mecânica de um sistema é dissipada (principalmente pela geração de calor e/ou energia). O amortecimento determina a amplitude de vibração na ressonância e o tempo de persistência da vibração depois de cessada a excitação. Em sistemas dinâmicos, o amortecimento é fenômeno pelo qual a energia mecânica é dissipada (DE SILVA, 2007).

O amortecimento de um sistema ou material pode ser classificado de três formas principais: interno, estrutural e fluídico. O interno está associado aos defeitos na microestrutura, granularidade, impurezas do material e a efeitos termo elásticos causados por gradientes locais de temperatura. Já o estrutural, está associado a perdas de energia por atrito em juntas, parafusos e articulações semirrígidas. Por último, o fluídico ocorre por resistência ao arraste em meio fluídico, por exemplo, a conversão de energia cinética de um pêndulo em energia térmica para o ar (DE SILVA, 2007).

Existem diversos métodos para determinação do coeficiente de amortecimento, os quais podem ser obtidos basicamente por dois caminhos: mediante a duração da resposta do sistema a uma excitação transitória (exemplo: método do decremento logarítmico) e em função da resposta do sistema em função da frequência (exemplo: método da largura de meia banda de potência). O método do decremento logarítmico calcula o amortecimento a partir da atenuação da resposta acústica do material ou estrutura após uma excitação por impulso. A importância de se calcular o amortecimento está no fato de que esse parâmetro pode indicar como a energia de vibração é absorvida pelo meio material onde se propaga. O decremento logarítmico é calculado a partir de um simples impulso provocado no sistema (em vibração livre) através da razão entre duas amplitudes sucessivas do sinal. O termo decremento logarítmico refere-se à taxa de redução logarítmica, relacionada com a redução do movimento após o impulso, pois a energia é transferida para outras partes do sistema ou é absorvida pelo próprio elemento (MUSOLINO, 2011).

Quando um sistema oscilatório com um grau de liberdade com amortecimento viscoso é excitado por um impulso (Figura 6.2), sua resposta vem na forma de decaimento no tempo conforme (eq. 6.2),

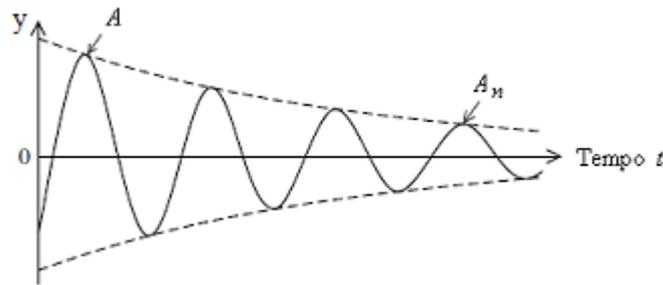


Figura 6.2 - Resposta ao Impulso (Fonte: COSSOLINO E PEREIRA, 2010)

$$y(t) = ye^{-\zeta\omega_0 t} \text{sen}(\omega_d t) \quad (6.2)$$

Onde y é a amplitude, ζ é o amortecimento, ω_0 é a frequência natural e ω_d a frequência natural amortecida.

Para isso, define-se ζ :

$$\zeta = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{n} \ln\left(\frac{A_1}{A_n}\right) = \frac{\delta}{2\pi} \quad \text{para } \zeta < 0,1 \quad (6.3)$$

onde n é números de amplitudes, A_1 é a amplitude do primeiro ciclo e A_n é a amplitude de n ciclos, δ é o decremento logarítmico (eq. 6.3).

Após n períodos, o amortecimento pode ser calculado em função da razão de outra amplitude. A equação 6.3 pode ser usada na análise de sinais para determinação do amortecimento dos sinais captados de cordas. Para a solução $0 \leq \zeta < 1$, o sistema sub-amortecido utiliza a Equação 6.4:

$$x(t) = A_0 e^{-\zeta \omega_0 t} \cos(\omega_d t + \varphi) \quad (6.4)$$

onde A_0 é a amplitude inicial de vibração, φ é a fase inicial de vibração e ω_d é chamada de frequência natural amortecida e é descrita na equação 6.5.

$$\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (6.5)$$

A equação 6.5 é válida para um modelo conhecido como sistema linear amortecido com um grau de liberdade. Dessa forma, assume-se que a ressonância de materiais pode ser vista como uma associação de vários sistemas de um grau de liberdade. O modelo de vibração pode ser observado na equação 6.6:

$$x(t) = \left[\sum_{i=1}^N A_i e^{-\zeta_i \omega_{ni} t} \cos(\omega_{di} + \varphi_i) \right] + R_{wn} \quad (6.6)$$

em que $A_i, \zeta_i, \omega_{ni}, \omega_{di}, \varphi_i$, são, respectivamente, amplitude inicial, amortecimento, frequência natural de vibração, frequência natural amortecida e fase inicial do i -ésimo modo de vibração. O termo R_{wn} é um ruído branco descorrelacionado do sinal.

6.3 - Sintetização de um Sinal Sonoro

Segundo YNOGUTI (1995), existem várias razões para que, cada vez mais, músicos se utilizem da sintetização de sons, ou, sinais sonoros para o seu trabalho. Uma delas é a maior variedade de sons gerados pelo computador. Estes não são limitados àqueles disponíveis pelos instrumentos já existentes: pode-se gerar uma infinidade de novos sons através de processamentos digitais. Outra razão é a precisão com que o computador trata os sinais: é capaz de analisar e processar a forma de onda do som até o nível da amostra individual.

Um sinal acústico pode ser sintetizado a partir da transformada de Fourier. Os sinais podem ser escritos por uma soma de senos e cossenos combinados com características das frequências naturais de vibração, amortecimento, amplitudes, além da variação do fator tempo. Essas características podem ser obtidas através da análise das características do sinal no domínio do tempo e frequência com o objetivo de se separar as frequências excitadas para posterior filtragem e, por conseguinte, determinar as características de amortecimento (TEIXEIRA, 2014).

A Série de Fourier, desenvolvida por Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830), matemático da corte de Napoleão, que teve seu nome imortalizado pelas séries trigonométricas introduzidas em 1807 e que, até hoje, são admiradas por matemáticos, físicos, estatísticos e engenheiros, são valiosas para quem precisa descrever uma função relativamente complexa, de uma forma simples de se visualizar e de se manipular. Ele mostrou que qualquer função, por mais complicada que seja, pode ser expressa como uma soma de senos e cossenos (BASSALO, 2009).

Há muito tempo estudam-se funções seno e cosseno aprendendo-se que suas amplitudes originais são unitárias, e que ambas estão defasadas entre si de $\pi/2$ radianos, conforme equação 6.7 (FEITEIRA, FONSECA e CAMPOS, 2013),

$$\cos(x) = \text{sen}\left(x + \frac{\pi}{2}\right) \quad (6.7)$$

onde x é o valor de um ângulo em radianos.

A série de Fourier é a representação de uma função periódica como uma soma de funções periódicas da forma de harmônicas de e^{ix} . De acordo com a fórmula de Euler, as séries podem ser expressas equivalentemente em termos de funções seno e cosseno (SANDIFER, 2007).

Fourier descobriu que funções periódicas de período fundamental T podem ser expressas como uma série infinita de funções trigonométricas na forma, conforme Equação 6.8 e, em sua forma mais compacta, na equação 6.9 (CARILLO, 2014),

$$\frac{a_0}{2} + a_1 \cos(x) + b_1 \text{sen}(x) + a_2 \cos(2x) + b_2 \text{sen}(2x) + \dots + a_n \cos(nx) + b_n \text{sen}(nx) \quad (6.8)$$

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(nx) + b_n \text{sen}(nx)) \quad (6.9)$$

onde x é o valor de um ângulo em radianos, a é amplitude, n número de termos da equação.

6.3.1- Transformada de Fourier

Após a teoria de Fourier, que se propunha decompor funções periódicas em somas de funções senoidais, surgiu a transformada de Fourier e depois a transformada rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*).

Uma função pode ser convertida do domínio do tempo para o da frequência através de um operador matemático chamado genericamente de transformada integral. Transformada de Fourier decompõe uma função na soma de um (potencialmente infinito) número de componentes senoidais, produzindo um espectro de frequências. A transformada inversa correspondente converte esse espectro de volta para o domínio do tempo, ou seja, para a função original, (CARILLO, 2014).

Ao aplicar-se a transformada de Fourier, passa-se do domínio do tempo para o domínio da frequência e a informação a respeito de deslocamentos de fase do sinal em função da frequência desaparece.

Em acústica e música, a fundamental é a mais baixa frequência das componentes da série harmônica de um som. Tecnicamente, a fundamental corresponde ao primeiro harmônico. Na realidade, o som é composto de várias frequências, mas as que se destacam

são as que entram em ressonância, fenômeno que acontece quando a vibração atinge a chamada frequência natural de vibração do meio. A frequência fundamental ou a primeira que entra em ressonância é responsável pela percepção da altura de uma nota, enquanto que as demais, chamadas de harmônicos, participam da composição da forma de onda do som, (TEIXEIRA, 2015).

A transformada de Fourier de uma função $h = h(t)$ (eq. 6.10) absolutamente integrável, denotada por $H(\omega)$, é definida para $\omega \in \mathfrak{R}$, por:

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{-i\omega t} dt \quad (6.10)$$

6.3.2 – Transformada Inversa de Fourier

A transformada inversa de Fourier de $g = g(\omega)$ é definida na equação 6.11 como:

$$H^{-1}(g(\omega)) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (6.11)$$

Pode-se obter a Transformada Inversa de Fourier da própria Transformada de Fourier de $h = h(t)$, denotada por $H = H(\omega)$, que depende da frequência ω . Se tomarmos a mudança de variável $\omega = 2\pi f$ e substituirmos a diferencial $d\omega = 2\pi df$, a função H agora ficará dependendo da variável f e será denotada por $H = H(f)$. De acordo com a equação 6.12 a definição ficará na forma:

$$h(t) = H^{-1}(H(\omega)) = \int_{-\infty}^{\infty} H(f) e^{2\pi i t f} df \quad (6.12)$$

Isto garante a recuperação da própria função original através da aplicação da Transformada Inversa aplicada à Transformada de Fourier, o que significa que:

$$H^{-1} \otimes H = \text{Identidade}$$

6.3.3 - Sinais Representados no Domínio do Tempo

Domínio do tempo é um termo utilizado para descrever a análise de funções matemáticas com relação ao tempo. Neste domínio, o valor da função é conhecido a cada

instante para o caso do tempo contínuo (Figura 6.3 a), ou em vários instantes separados, no caso do tempo discreto (Figura 6.3 b).

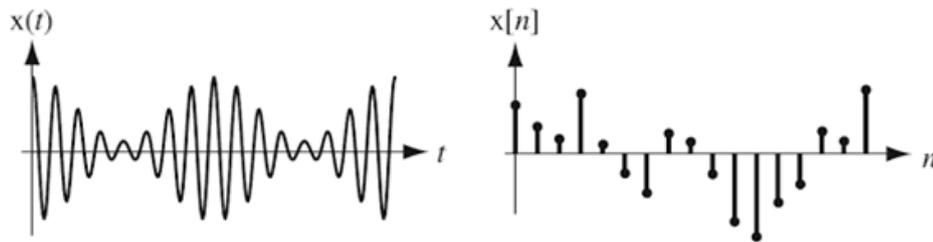


Figura 6.3 – (a) Sinal contínuo; (b) Sinal discreto. (Fonte: PINTO, 2018)

A representação no domínio do tempo indica de que forma a amplitude do sinal varia com o tempo, e em certos casos, fornece algumas indicações acerca da variação do conteúdo em frequência do sinal. Um sinal no domínio do tempo é representado por uma onda que pode variar a sua amplitude no tempo. Em instrumentos musicais o formato dessas ondas para uma mesma nota musical pode variar bastante de acordo com o tipo de instrumento (Figura 6.4).

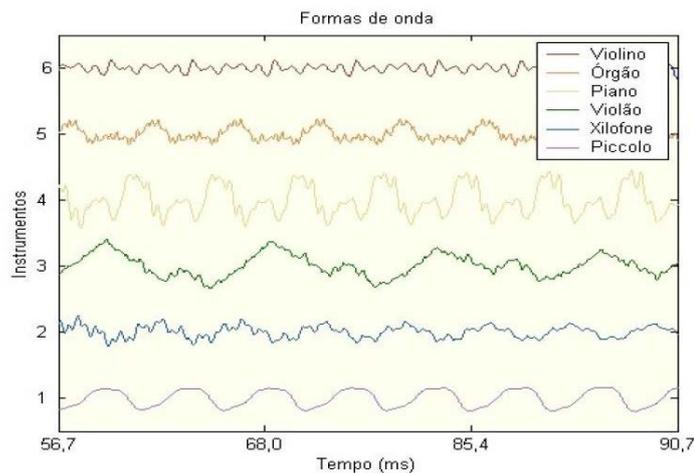


Figura 6.4 - Formas de ondas de diferentes instrumentos para uma mesma nota musical. (Fonte: PINTO, 2018)

6.3.4 - Sinais Representados no Domínio da Frequência

O domínio da frequência designa a representação de funções matemáticas com respeito à frequência, em contraste com a análise no domínio do tempo. O domínio da

frequência f (eq. 6.13) pressupõe periodicidade no tempo, isto é, para existir um mapeamento entre os domínios do tempo e da frequência deve-se assumir que os fenômenos no domínio do tempo se repetem em intervalos iguais a T (TEIXEIRA, 2014).

$$f = \frac{1}{T} \quad (6.13)$$

Tudo se passa como se o domínio da frequência enxergasse o domínio do tempo sob a óptica de intervalos regulares de tempo. Para se perceber melhor as vantagens que essa representação de sinais pode trazer, tome-se um sinal com representação simples nos dois domínios: a senóide.

Na representação do domínio da frequência (Figura 6.5), o mesmo sinal é representado apenas pelos seus parâmetros, ficando subentendida a função temporal escolhida com referência na decomposição.

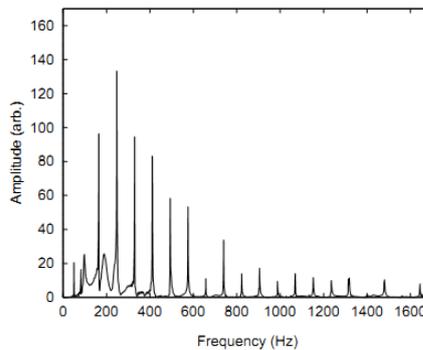


Figura 6.5 – Sinal no domínio da frequência. (Fonte: WRIGHT, 1996)

Este processo pode ser melhor entendido através da Figura 6.6, a qual ilustra a transformada de Fourier de um sinal. Deste modo, é possível visualizá-lo no domínio do tempo e sua respectiva transformada no domínio da frequência. Assim, pode-se afirmar que a Transformada de Fourier decompõe um sinal em suas componentes elementares seno e cosseno (DA PENHA, 1999).

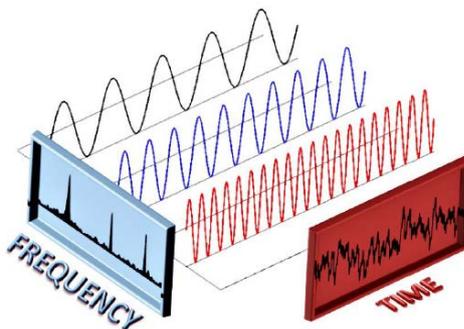


Figura 6.6 - Sinal no Domínio do Tempo e sua Respectiva Transformada de Fourier (Frequência).

(Fonte: PINTO, 2018)

Um dos objetivos do presente trabalho é a sintetização de sinais a partir da transformada de Fourier. E, para isso, foi realizado estudo de características relevantes e a resposta dada por um modelo computacional e um modelo físico de violão.

Utilizando-se do processamento digital de sinais sonoros através de um software (Matlab) e da equação característica de um sistema de vibração (eq. 6.6), onde se considera que a ressonância de materiais pode ser vista como uma associação de vários sistemas de um grau de liberdade, é possível a reprodução ou sintetização dos referidos sinais.

6.4 - Convolução Aplicada aos Sinais de deslocamento na estrutura do violão

Convolução é uma operação realizada em dois sinais que envolvem a multiplicação de um sinal por uma versão atrasada ou deslocada de outro sinal, integrando ou calculando a média do produto e repetindo o processo para diferentes atrasos. A convolução é um processo útil porque descreve com precisão alguns efeitos que ocorrem amplamente em medições científicas. Um exemplo é a influência de um filtro de frequência em um sinal elétrico ou da passagem de banda espectral de um espectrômetro na forma de um espectro óptico registrado, que causa o sinal a ser espalhado no tempo e reduzido na amplitude do pico (O'HAVER, 2008).

Segundo KATZNELSON (1976), convolução é um operador linear que, a partir de duas funções dadas f e g , resulta numa terceira $h(x)$ que mede a área subentendida pela superposição das mesmas em função do deslocamento existente entre elas (eq. 6.11). O teorema da convolução estabelece que a transformada de Fourier de uma convolução de duas funções é igual ao produto ponto a ponto das transformadas de Fourier de cada função. Em outras palavras, convolução em um domínio (no domínio do tempo) equivale à multiplicação ponto a ponto no outro domínio (no domínio da frequência).

Dadas as funções f e g cujo produto $h(x) = f(x)g(x)$, a convolução entre f e g , denotada por $f * g$, é definida por qualquer uma das integrais (eq. 6.14):

$$h(x) = (f * g)(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x - \omega)g(\omega)d\omega = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\omega)g(x - \omega)d\omega \quad (6.14)$$

A convolução é uma forma matemática de combinar dois sinais para formar um terceiro sinal. Esta é uma importante técnica do processamento digital de sinais. Usando a estratégia da decomposição pelo impulso, os sistemas são descritos por um sinal denominado de resposta impulsiva (TEIXEIRA, 2019). A convolução relaciona os três sinais de interesse: o sinal de entrada, o sinal de saída e a resposta impulsiva do sistema,

Como o interesse desse trabalho é analisar as características de um instrumento de corda, a resposta impulsiva representa, neste caso, todas as frequências possíveis da caixa do violão. Não se pode dizer que a corda é que vai gerar um impulso capaz de excitar todas as frequências naturais do violão, mas que notadamente, ela irradia a vibração imposta pela corda à caixa e possivelmente há uma resposta a essa vibração.

Um dos objetivos do presente trabalho é um estudo de características relevantes à resposta dada por um instrumento de corda a partir de respostas sonoras gravadas e analisadas nos domínios de tempo e frequência. E através do estudo da convolução e deconvolução de

sinais estabelecendo a relação entre a excitação da corda e a resposta dada pela caixa do violão na formação do som.

6.5 – Deconvolução Aplicada aos Sinais Sonoros do Violão

Enquanto trabalhava no problema da previsão de fogo de mísseis inimigos durante a Segunda Guerra Mundial, Norbert Wiener (1894-1964) desenvolveu um processo estatístico que separava os sinais de radar do ruído (LEINBACH, 1995). O processo era originalmente conhecido como suavização ou filtragem de previsão de Wiener. O processo inverso de suavização, ou filtragem de erro de predição, foi denominado decomposição e mais tarde foi denominado deconvolução. Hoje, a filtragem de erro de previsão é a técnica mais comumente usada para processar dados sísmicos de reflexão.

Muito usada na geologia, a deconvolução busca a melhoria da resolução temporal do dado sísmico por meio da diminuição da contribuição do pulso enviado pela fonte. Na prática, a deconvolução retira o efeito borrado do dado sísmico e torna as reflexões na subsuperfície muito mais evidentes na imagem da seção geológica gerada (YILMAZ, 1987).

Em matemática, deconvolução é um algoritmo baseado no processo usado para reverter os efeitos da convolução nos dados registrados. O conceito de deconvolução é amplamente utilizado em técnicas de processamento de sinais e de processamento de imagem. Estas técnicas são amplamente utilizadas em muitas aplicações de engenharia. Em geral, o objetivo da deconvolução é encontrar a solução de uma equação de convolução da forma, de acordo com O'HAVER, 2008:

$$(f * g) = h \quad (6.15)$$

Normalmente, h (eq. 6.15) é algum sinal gravado, e f é algum sinal que queremos recuperar, mas foi convoluido com algum outro g sinal. A função g pode representar a função de transferência de um instrumento ou a força motriz que foi aplicada a um sistema físico. Se

g é conhecido, ou se pelo menos se sabe a sua forma, então pode-se realizar a deconvolução. No entanto, quando não se conhece g se faz necessário estimá-la. Isso geralmente é feito através de métodos de estimativa estatística. Em medições físicas, a situação é geralmente próxima.

$$(f * g) + \varepsilon = h \quad (6.16)$$

Neste caso, ε é o ruído (eq. 6.16) que geralmente entra no sinal gravado. Quando se assume que um sinal ruidoso ou imagem é silencioso quando se tenta fazer uma estimativa estatística de g , ela será incorreta. Por sua vez, a estimativa de f também será incorreta. Quanto menor for a relação sinal ruído, pior é a estimativa do sinal deconvoluido, (O'HAVER, 2008).

No presente trabalho busca-se através da deconvolução a resposta em frequências da estrutura de um violão a uma excitação ou vibração provocada por uma de suas cordas.

7.0 - Materiais e Métodos

Neste capítulo são demonstrados os materiais e métodos aplicados para desenvolvimento do modelo computacional de um violão a partir de dimensões de um modelo físico permitindo análises: modal, estática e harmônica e utilizando-se do modelo físico são feitas análises de respostas de sinais de vibração no domínio do tempo e frequência pelo método de excitação por impulso. Além disso, é desenvolvida também a metodologia de processamento de sinais para obtenção de respostas em termos de frequência através do método de deconvolução, permitindo também a sintetização de sinais sonoros.

7.1 - Construção do Modelo Computacional (Pré Processamento)

Como este trabalho é o início de um projeto que visa gerar sons a partir de um modelo computacional, inicialmente se faz necessário a construção do modelo e para isso foi usado o software ANSYS® (Mechanical APDL 14.0). Os modelos foram construídos com geometria 3D, onde todos os elementos foram criados como sólidos geométricos. A proposta é a construção por partes, permitindo a exploração do comportamento de cada componente no que diz respeito às propriedades solicitadas no funcionamento do instrumento.

Algumas pesquisas desenvolvem e analisam modelos com as partes principais do violão, tampo, fundo e caixa acústica separadamente, excluindo-se braço, cordas e ponte (CURTU, 2009; SHEPHERD, 2014; FLORES, 2018). Este presente trabalho objetiva desenvolver um modelo computacional de violão com todas as partes do instrumento inserindo tais como: braço, tróculo e cavalete, além do ar enclausurado. Nesta fase é desenvolvido o modelo completo usando os dados do trabalho “*Análise Experimental e Simulação Numérica da Caixa Acústica de um Violão Clássico e seus Componentes via Método de Elementos finitos*” (RIBEIRO, 2014), que realizou estudos inicialmente acompanhando o processo de construção da caixa acústica de um violão clássico, desde a

escolha das madeiras até a formação da caixa, com o objetivo de realizar o dimensionamento das estruturas a serem modeladas. O projeto de violão analisado neste trabalho, que segue o modelo clássico, vem sendo desenvolvido pelo luthier brasileiro Maurício Barros (Figura 7.1) que tomou como base para o modelo clássico do luthier alemão Hermmam Hauser com uma configuração diferente de leque harmônico. Hauser viveu de 1882 a 1952 e seus projetos estão, atualmente, entre os mais reproduzidos. Depois o trabalho prosseguiu com medições experimentais das propriedades elásticas das madeiras usadas na construção da caixa acústica.

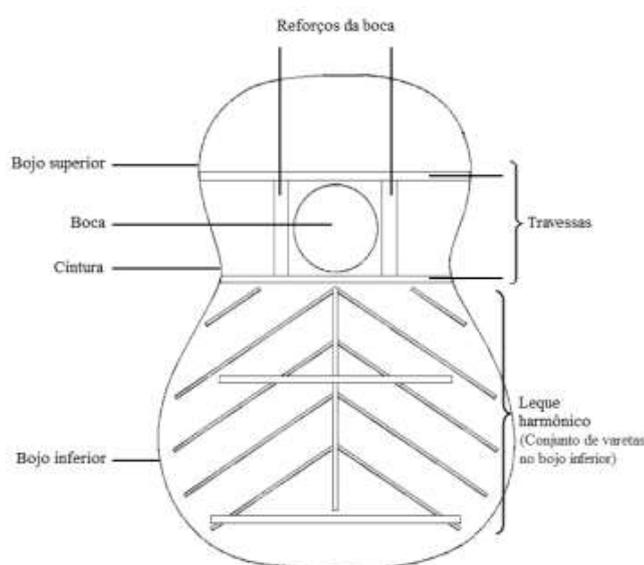


Figura 7.1 - Componentes do tampo harmônico desenvolvidos pelo luthier Maurício Barros.

7.1.1 - Geometria do Modelo Computacional

A construção da geometria também é feita com base nos dados obtidos no trabalho de RIBEIRO (2014) que, através das plantas projetadas para o tampo, fundo e carcaça, obteve valores de coordenadas bidimensionais (x, y) para o contorno das placas, dos reforços, das varetas do leque harmônico, do tróculo e da culatra; com o paquímetro, foram obtidas as dimensões em z (espessuras das placas do tampo e do fundo, alturas das varetas, travessas, reforços e laterais). As medidas do braço são obtidas diretamente da planta do modelo de

violão. A geometria do tróculo foi construída não levando em consideração a geometria de aspecto arredondado, original do modelo.

As varetas à esquerda são construídas por meio da reflexão das varetas à direita; a inclinação das varetas à direita, relativamente ao eixo x, é de 52° e das varetas à esquerda, conseqüentemente, de -52° . Com isso, são criados sistemas de coordenadas locais para representar as diferentes direções das fibras das madeiras, de acordo com a disposição das peças no violão real. Para a discretização, ou seja, criação da malha adotou-se os elementos SOLID187 e SOLID185 do Ansys, adequados a modelos com malha irregular e análises com materiais ortotrópicos e anisotrópicos.

O Ansys dispõe de diferentes tipos de elementos finitos segundo o tipo de análise a ser realizado. Cada elemento finito possui certa característica que o diferencia dos outros. Em particular, são descritos os elementos sólidos e os elementos de casca que podem ser utilizados em uma análise estática e modal.

O elemento Solid 185 (Figura 7.2 a) é usado para modelagem 3-D de estruturas sólidas. É definido por oito nós com três graus de liberdade em cada nó: a translação nas direções nodais x, y e z. O elemento tem plasticidade, hiperelasticidade, deformação, grande deflexão, e grandes capacidades de deformação. Ele também tem a capacidade de formulação mista para simular deformações dos materiais elastoplásticos quase incompressíveis e materiais hiperelásticos totalmente incompressíveis (ANSYS, 2012).

O elemento Solid 187 (Figura 7.2 b) é um elemento 3-D com 10 nós de ordem superior, tem um comportamento de deslocamento quadrático e é adequado para modelar malhas irregulares (tais como as produzidas a partir de vários sistemas CAD /CAM). O elemento é definido por 10 nós com três graus de liberdade em cada nó: a translação nas direções nodais x, y e z. O elemento tem plasticidade, hiperelasticidade, deformação, grande deflexão, e grande capacidade de deformação. Ele também tem a capacidade de formulação

mista para simular deformações dos materiais elastoplásticos quase incompressíveis e materiais hiperelásticos totalmente incompressíveis (ANSYS, 2012).

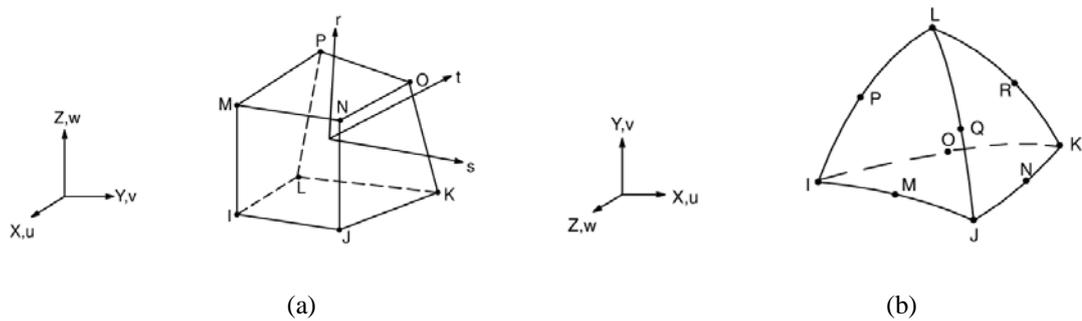


Figura 7.2 – (a) Elemento Solid 185; (b) Elemento Solid 187. (Fonte: Ansys, 2012)

7.1.2 - Passos para Construção da geometria do modelo computacional

A fase pré processamento trata de uma série de comandos usados para construção da geometria do modelo baseados em medidas do violão usado para essa pesquisa. Tal modelo é feito com base no modelo experimental onde se vê a placa, com o recorte da boca, as travessas e o leque harmônico. Não são considerados no modelamento os contornos arredondados das varetas e travessas do leque, além disso, a placa é modelada como volume único, sendo que, no tempo real, a placa é formada por duas partes que são coladas formando uma linha de simetria. Tais simplificações são necessárias devido às complexidades inseridas na discretização com o aumento expressivo do número de elementos, inviabilizando a execução da análise. A seguir, são expostos os principais passos para a construção do modelo geométrico, da aplicação das propriedades e da imposição das restrições.

- Entrada no programa;
- Escolha do elemento SOLID 187 e SOLID 185;
- Criação dos pontos correspondentes às coordenadas do contorno do tampo através do comando “create keypoints” (Figura 7.3). As coordenadas destes estão listadas na Tabela 7.1.

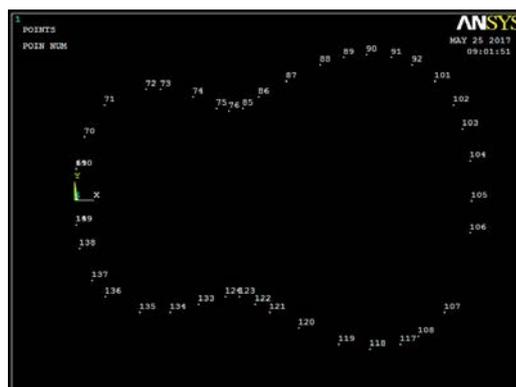


Figura 7.3 - Pontos correspondentes às coordenadas de contorno do tampo. (Fonte: Autor, 2020)

Tabela 7.1 - Dimensões e coordenadas para a construção do modelo (RIBEIRO, 2014).

Coordenadas e dimensões para a construção das travessas, dos reforços e do leque (em metros)						
		Coordenadas de origem do worplane	Coordenadas do ponto central	Comprimento	largura	altura
Reforço da boca (à direita)		-	(0,152; 0)	0,104	0,02	0,0022
Travessas do tampo	Acima da boca	-	(0,0954; 0)	0,276	0,0087	0,012
	Abaixo da boca	-	(0,208; 0)	0,242	0,0087	0,012
Varetas do leque harmônico (à direita)*	Vareta central	(0,22; 0)	-	0,253	0,0065	0,0029
	1	(0,219; 0,072)	-	0,0829	0,0039	0,00297
	2	(0,22; 0,006)	-	0,2045	0,00365	0,00417
	3	(0,27; -0,003)	-	0,204	0,00371	0,00418
	4	(0,326; -0,0025)	-	0,176	0,00363	0,00409
	5	(0,382; -0,002)	-	0,129	0,0038	0,00392
Travessas do leque	Superior	-	(0,314; 0)	0,216	0,01	0,0073
	Inferior	-	(0,443; 0)	0,249	0,006	0,00606
Reforço do fundo		-	(0,254; 0)	0,438	0,02	0,0023
Travessas do fundo	1	-	(0,107; 0)	0,276	0,006	0,016
	2	-	(0,218; 0)	0,246	0,006	0,016
	3	-	(0,305; 0)	0,336	0,006	0,016
	4	-	(0,396; 0)	0,346	0,006	0,016

- Criação de linhas ligando os pontos e formando o contorno da placa do tampo (Figura 7.4);

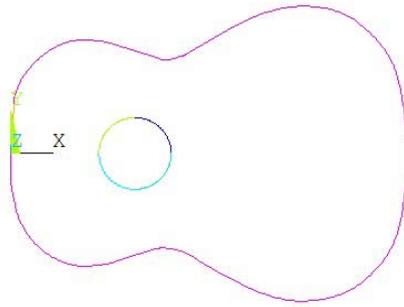


Figura 7.4 - Linhas de contorno da placa do tampo. (Fonte: Autor, 2020)

- Criação da área da placa a partir das linhas (Figura 7.5);

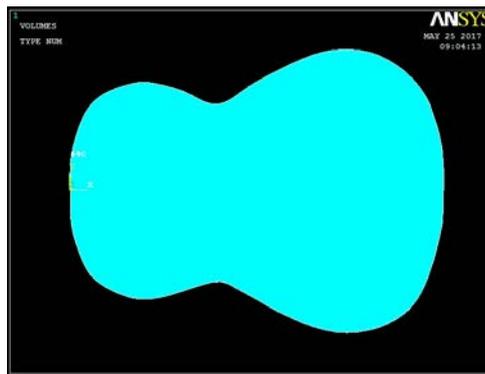


Figura 7.5 - Área da placa do tampo. (Fonte: Autor, 2020)

- Criação do reforço da boca, varetas, travessas do leque harmônico, braço e lateral (Figura 7.6). Estes elementos foram construídos através de áreas no plano x, y e com posterior extrusão na direção z, usando a linha de simetria do leque harmônico como referência através do posicionamento do comando workplane em ângulo;

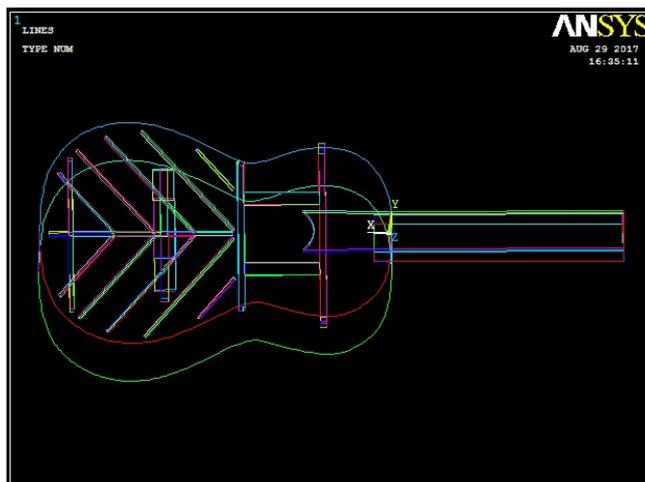


Figura 7.6 - Varetas, leque harmônico, reforço da boca e lateral. (Fonte: Autor, 2020)

- Construção de reforço e travessas do fundo (Figura 7.7). Para estes componentes foram criadas áreas com posterior extrusão;

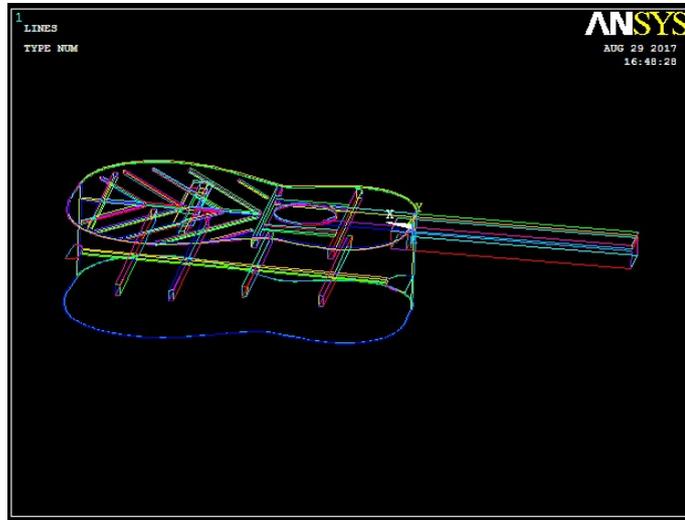


Figura 7.7 - Reforço e travessas do fundo. (Fonte: Autor, 2020)

- Construção do tróculo;
- Colagem dos volumes via comando GLUE (comando no Ansys que permite o acoplamento de elementos que se tocam, área com área ou linha com linha, mas não se sobrepõem) finalizando a construção do modelo (Figura 7.8);



Figura 7.8 - Modelo computacional de violão finalizado. (Fonte: Autor, 2020)

- Discretização da estrutura via comando SMART SIZE (comando do Ansys que permite a geração automática da malha) (Figura 7.9);

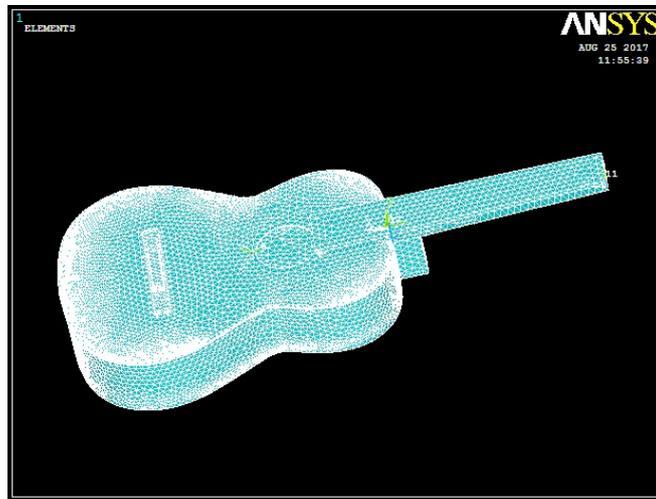


Figura 7.9 - Discretização do modelo computacional via SMART SIZE. (Fonte: Autor, 2020)

7.1.3 - Propriedades dos Materiais

Para a simulação do comportamento do modelo são usados neste trabalho dados referentes às propriedades de diversas madeiras, tais como, coeficiente de Poisson, módulo de elasticidade e massa específica.

Para o tampo e reforço da boca são usados Abeto Alemão e nas vigas, Pinho de Riga. Nas partes de baixo do braço, culatra, tróculos interno e externo, travessas e reforço do fundo são usados Mogno. No tampo do fundo e lateral, Jacarandá da Bahia. Escala e ponte, o Ébano, além das propriedades do Ar que são consideradas para a parte interna.

As propriedades dos materiais usadas no presente trabalho são baseadas na Tabela 7.2 de RIBEIRO, 2014, onde E é o módulo de Elasticidade, G o módulo de cisalhamento e μ o coeficiente de Poisson. As constantes L , R e T , indicam as direções longitudinal, radial e transversal, respectivamente.

Tabela 7.2 - Propriedades dos materiais usados na construção do tampo harmônico, do fundo e da caixa acústica

(Ribeiro, 2014)

	Pinho de Abeto alemão	Mogno	Pinho de Riga	Jacarandá da Bahia	Ébano	Ar
EL (GPa)	10,475	11,740	17,000	14,830	19,50	-
ER (GPa)	1,340	1,303	1,921	0,742	2,120	-
ET (GPa)	0,618	0,587	1,326	0,463	1,510	-
GLR (GPa)	1,298	1,033	1,394	1,059	1,650	-
GLT (GPa)	1,256	0,693	1,377	0,1059	1,535	-
GRT (GPa)	0,106	0,247	0,221	0,0113	0,1572	-
μLR	0,420	0,340	0,330	0,370	0,380	-
μLT	0,460	0,320	0,290	0,500	0,420	-
μRT	0,530	0,410	0,380	0,670	0,450	-
Massa específica (kg/m³)	380	500	630	900	1140	1,204

7.2 - Processamento

Na fase de processamento define-se o tipo de análise. No presente trabalho são feitos quatro tipos: A Análise modal que é feita de duas maneiras. A primeira para avaliar o comportamento dinâmico do modelo sem os efeitos da tensão das cordas e rigidez da lateral. A segunda avalia e compara os efeitos dinâmicos de tais condições.

Antes de iniciar a segunda análise dos modos de vibração, faz-se uma análise estática, que, neste caso, é um recurso no software para garantir e fixar as condições de contorno estabelecidas. Por outro lado, também possibilita a avaliação do comportamento estático do instrumento submetido às condições estabelecidas.

O quarto tipo é a análise harmônica usada para avaliar a resposta dada pelo instrumento a um pequeno vetor força perpendicular ao cavalete, que possivelmente simule o primeiro pulso vibracional de cada corda.

7.2.1 - Análise Modal

A primeira se trata de uma análise modal com as condições que sugerem o instrumento sem a tensão que supostamente seriam impostas pelas cordas quando o instrumento está afinado, termo utilizado no meio musical, mas que se trata do ajuste da tensão estabelecida para a corda em que ela seria capaz de produzir a sua vibração com a frequência característica.

Não é colocada também nenhuma restrição de deslocamento de nenhuma região do modelo, somente as propriedades dos materiais.

Após a escolha do tipo de análise (Figura 7.10 a) escolhe-se o método Block Lanczos (RIBEIRO, 2014), que é um dos métodos de extração de modos de vibração padrão para análise modal no ANSYS. Este método apresentou a vantagem de diminuir consideravelmente o tempo de análise. Escolhem-se também quarenta modos de vibração a extrair (Figura 7.10 b) com as devidas frequências características ou naturais, mas para as análises de visualização dos modos utilizam-se apenas os doze primeiros. As frequências que caracterizam os demais modos são usadas em comparações adiante no método experimental. O intervalo de frequências escolhido para o presente trabalho é entre zero e mil Hertz.

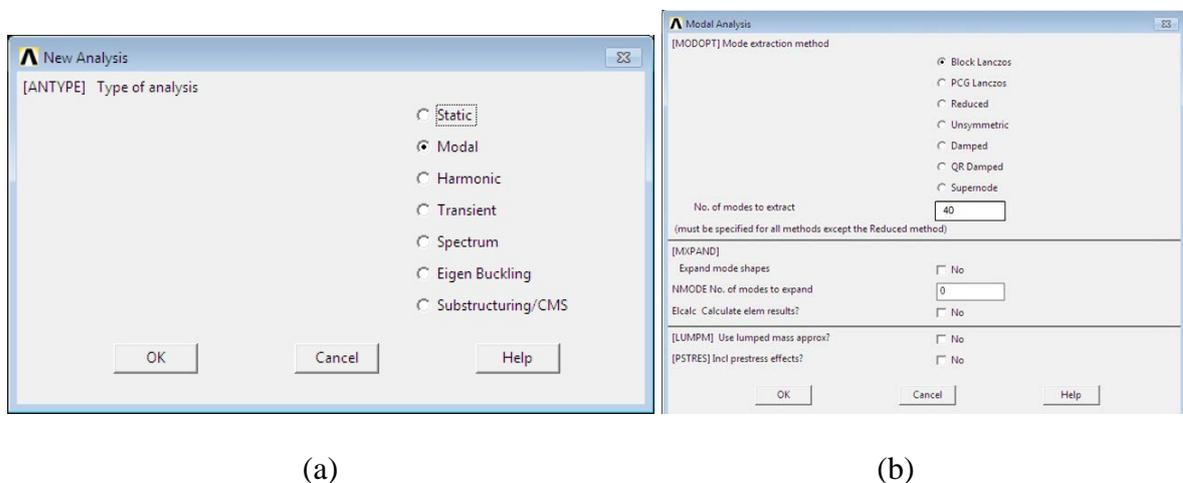


Figura 7.10 - (a) Escolha do tipo de análise, modal; (b) Escolha do método de análise modal e quantidade de modos a extrair. (Fonte: Autor, 2020)

Após a definição dos parâmetros da análise solicita-se a solução pelo comando “SOLVE > Current LS”.

A segunda análise modal é feita após inserir no modelo algumas condições que se acredita ser aquelas que fazem o modelo computacional ter comportamento dinâmico semelhante ao modelo físico. Tais condições são a restrição de movimento nas laterais para simular a possível rigidez imposta pelo posicionamento das fibras da madeira e do processo de montagem dessa parte do instrumento. Para isso é aplicada a de deslocamento igual a zero. A segunda é a aplicação de tensão em nós do cavalete e braço do modelo em posições onde ficariam as cordas. São inseridos vetores força paralelos ao tampo direcionados para a região central, nas mesmas posições relativas às cordas com o objetivo de simular os efeitos da tração das cordas no instrumento quando está afinado (Figura 7.11).

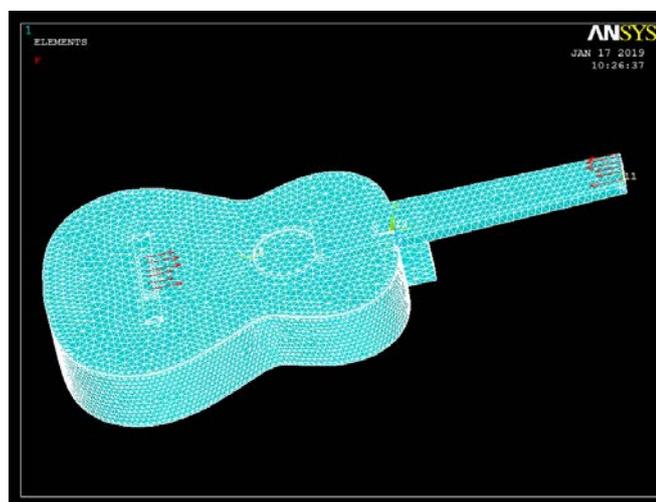


Figura 7.11. Modelo finalizado Discretizado via comando SMART SIZE com Condições de contorno no braço e cavalete. (Fonte: Autor, 2020)

Para isso são utilizados valores catalogados de um fabricante de cordas de nylon para violões (D’ADDÁRIO CORDAS, 2018). Tal catálogo fornece as medidas e tensões de afinação das cordas (Figura 7.12). É usado o modelo EJ27H D’Addário Classic Nylon. Observa-se que as mesmas cordas são usadas no procedimento experimental.

Código	nota	pol	Diâmetro		tração	
			mm	lbs.	kg	
J2701	MI	.028	0.71	15.3	6.94	
J2702	SI	.032	0.81	11.6	5.26	
J2703	SOL	.040	1.02	12.1	5.49	
J2704	RE	.029	0.74	15.6	7.08	
J2705	LA	.035	0.89	15.0	6.80	
J2706	MI	.043	1.09	14.0	6.35	

11029
EJ27H Hard/Prata / Náilon Transparente

Figura 7.12 - Medidas e tensões para jogo de cordas EJ27H D'Addário Classic Nylon. (Fonte: Catálogo D'Addário - Cordas)

7.2.2 - Análise Estática

Antes de fazer a segunda análise modal é feita a análise estática que é, neste caso, para fixar algumas condições ao modelo na tentativa de assemelhar as condições dinâmicas do mesmo. A primeira condição consiste em não movimentação da lateral do instrumento para indicar a rigidez dessa região no modelo. E a segunda na aplicação de tensão imposta pelas cordas no ato de afinar o violão, condição esta que consiste em esticar as cordas através das tarraxas colocadas na cabeça do violão estando elas presas ao cavalete e isto tende a produzir efeitos de encurvamento do tampo, podendo ainda repuxar até o braço dependendo da resistência do instrumento.

Após escolhido o tipo de análise insere-se as condições anteriormente definidas (Figura 7.13 b) para laterais e cordas e novamente solicita-se a solução pelo comando "SOLVE > Current LS".

Processada a análise estática, repete-se a sequência de comandos para a análise modal estabelecida anteriormente para a situação sem condições de contorno que o sistema irá reconhecer as novas condições.

A sequência completa de comandos para processamento das análises modal e estática estão organizadas no fluxograma da Figura 7.13 (a) e (b).

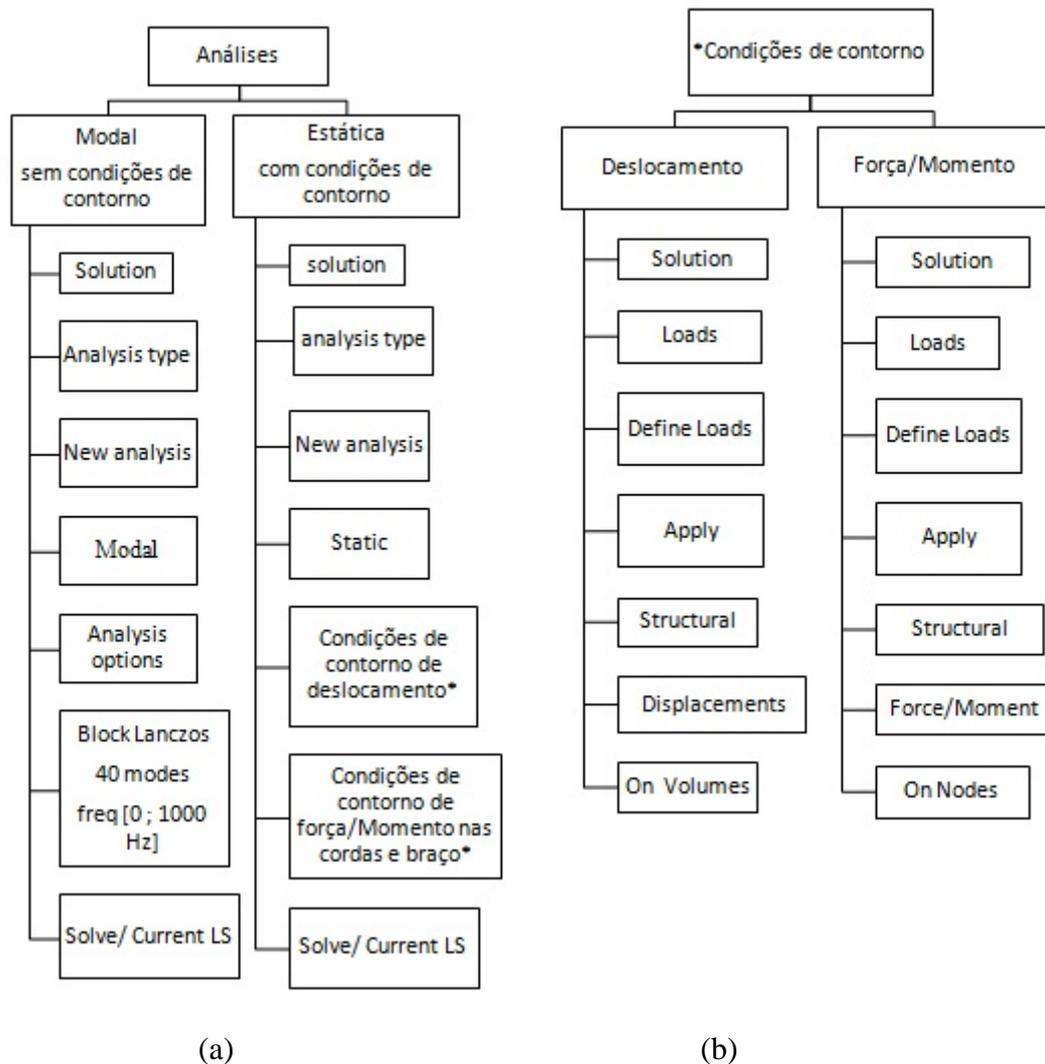


Figura 7.13 - Sequência de comandos no Ansys: (a) Para a análise modal e estática; (b) Condições de contorno.

(Fonte: Autor, 2020)

Na sequência tem-se a etapa de pós processamento (Figura 7.14) em que se pode obter uma lista crescente de frequências naturais em forma de texto, ou a partir de comandos para fazer animações dos modos de vibração e, assim, obter imagens que melhor representem os modos analisados. A animação é importante, pois a partir dela pode-se visualizar em vários ângulos todas as regiões do tampo, lateral, fundo e braço que apresentam vibrações com seus nós e antinós (HATCH, 2001).

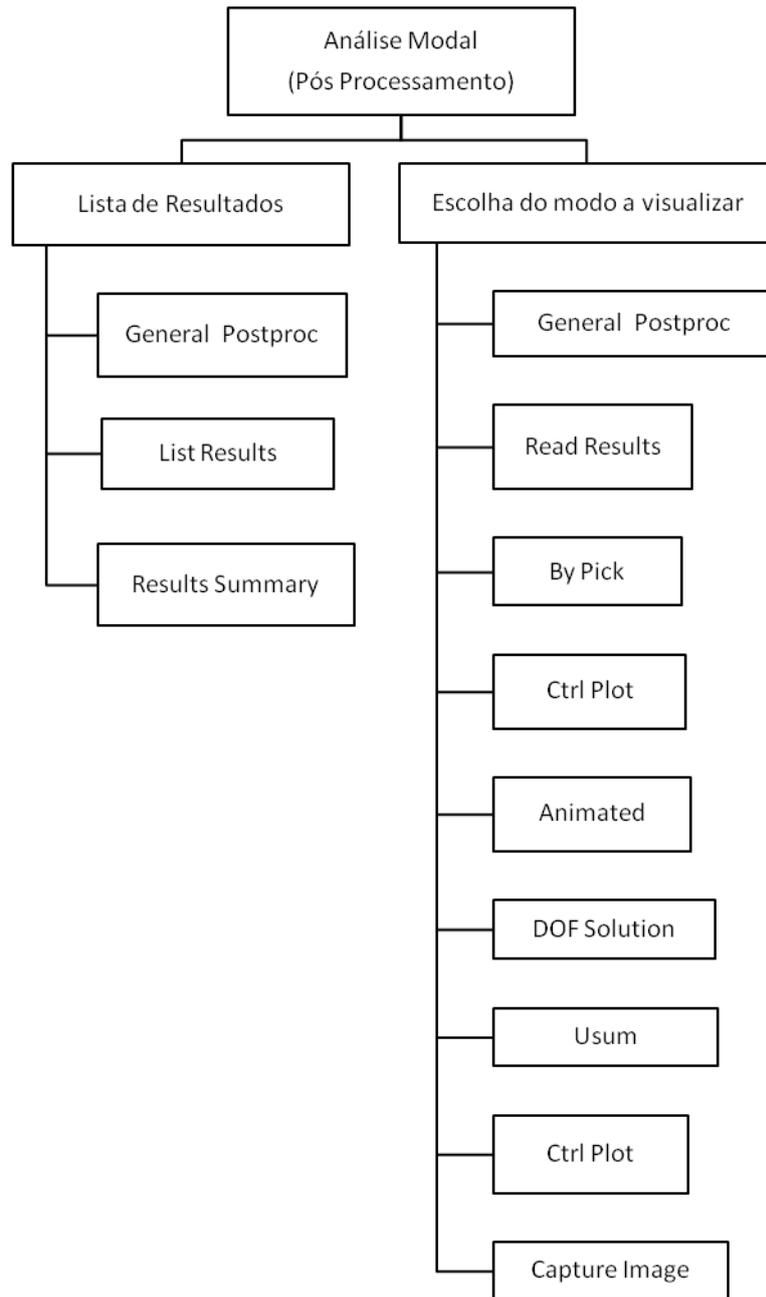


Figura 7.14 - Sequência de comandos no Ansys para Pós Processamento das análises modal e estática. (Fonte: Autor, 2020)

7.2.3 - Análise Harmônica

A análise harmônica, também feita no *Software Ansys*, é usada para avaliar a resposta de uma estrutura a cargas harmônicas variáveis no tempo. O presente trabalho objetiva avaliar a resposta do modelo em função de suas frequências naturais usando para isso as condições de contorno anteriormente mencionadas para simular tensão de afinação das cordas para a

análise modal não sendo feita neste caso a restrição de movimento nas laterais, somente uma restrição de uma pequena área na parte inferior do tróculo. É feita também a inserção de um pequeno vetor força perpendicular ao tampo nas posições relativas a cada corda objetivando simular o primeiro pulso vibracional da corda (Figura 7.15). Ele é calculado pelo produto da força trativa das cordas pelo seno do ângulo de inclinação formado entre as cordas e o cavalete quando elas são tocadas pelo músico e postas a vibrar (Figura 7.17). Este ângulo, notadamente é variável, mas como o objetivo deste trabalho é a resposta do modelo, toma-se como referência o ângulo de cinco graus e os mesmos valores de tensão das cordas do catálogo anteriormente mencionado para a análise modal. E, assim, obtêm-se os valores para as cargas em cada posição de corda (Tabela 7.3).

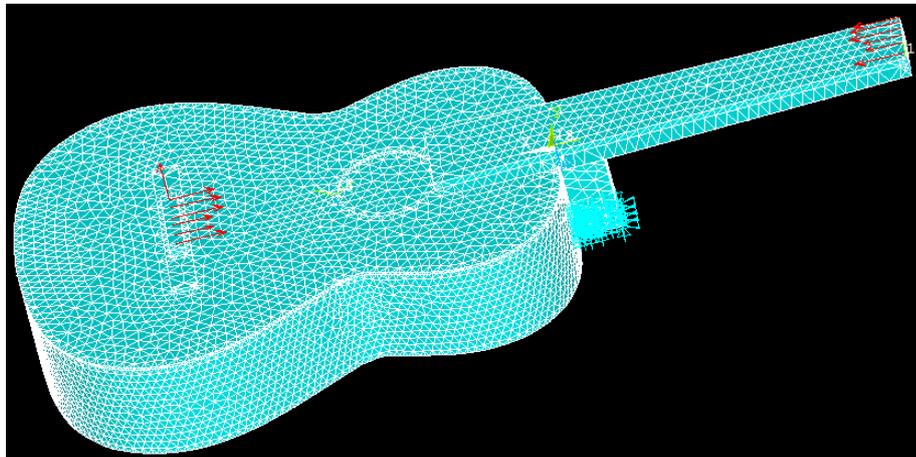


Figura 7.15 - Condições de contorno no modelo computacional de violão. (Fonte: Autor, 2020)

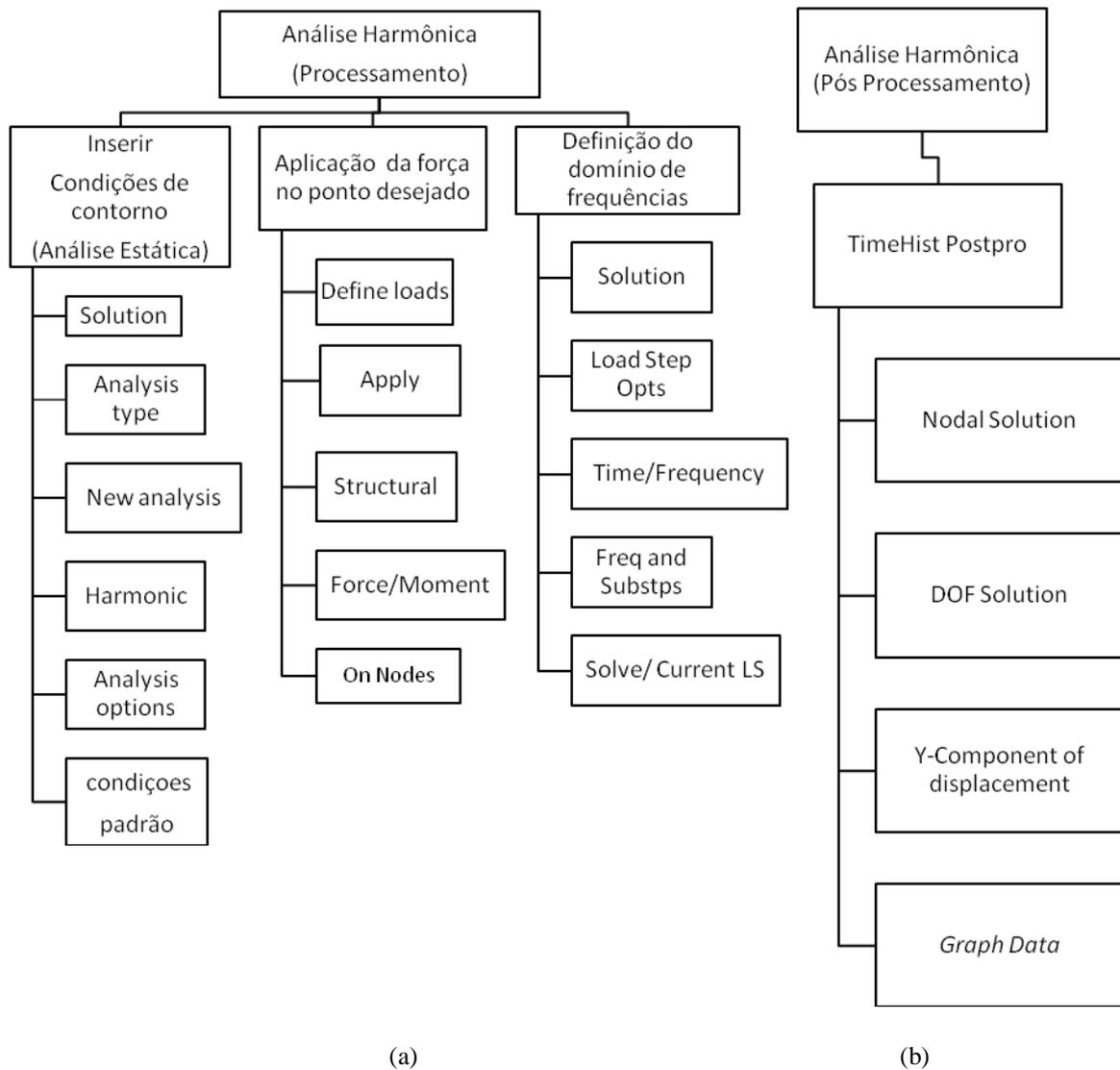


Figura 7.16 - Sequência de comandos usados no Ansys para a análise harmônica: (a) Para o processamento; (b) Pós processamento. (Fonte: Autor, 2020)

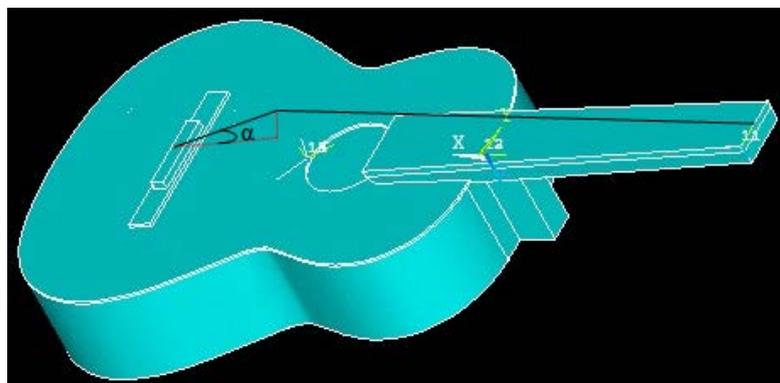


Figura 7.17 - Ângulo formado pelo cavalete e corda do violão ao ser tocada. (Fonte: Autor, 2020)

Tabela 7.3 - Carga aplicada no cavalete referente às posições de cada corda no modelo. (Fonte: Autor, 2020)

Posição das cordas Violão	Carga de tração na corda (N)	Força impulso no cavalete (N) ($F \times \text{sen}\alpha$)
1ª corda (E)	70,34	1,75
2ª corda (B)	53,37	1,33
3ª corda (G)	55,13	1,37
4ª corda (D)	72,50	1,81
5ª corda (A)	70,13	1,76
6ª corda (E)	64,55	1,61

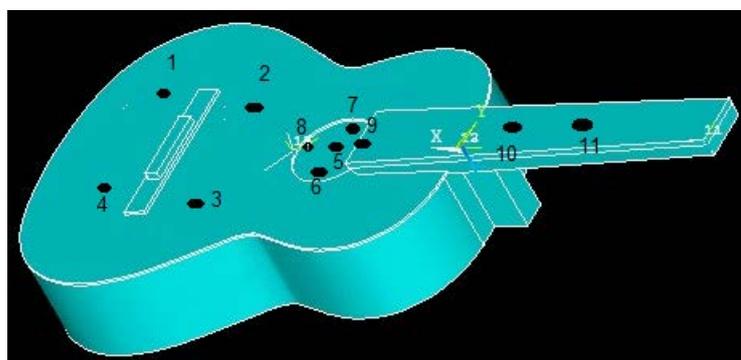


Figura 7.18 - Pontos referentes aos nós analisados na análise harmônica. (Fonte: Autor, 2020)

Para as análises, são considerados onze nós distribuídos em regiões estratégicas do tampo superior do modelo para cada pulso referente às seis cordas (Figura 7.18) com o objetivo de se avaliar o possível comportamento dinâmico nesses pontos. Os quatro primeiros são nós do tampo superior em volta do cavalete. O quinto ao nono são nós tomados na boca do instrumento com o objetivo de encontrar a resposta no material ar e o décimo e décimo primeiro são referentes ao braço.

Esta é uma análise que se mostrou com bastante esforço computacional com um tempo longo de processamento das informações. Por isso resolveu-se limitar a análise para o intervalo entre zero e trezentos e cinquenta Hertz.

A sequência de comandos usados para o processamento dos dados no *Ansys* está na Figura 7.16 (a) e para o pós-processamento na Figura 7.16 (b). Os pontos marcados na Figura 7.18 se referem à posição dos nós analisados para cada variação de posição no cavalete.

7.3 - Caracterização Experimental

Na presente pesquisa utiliza-se da técnica de excitação por impulso através do software sonelastic (OTANI, 2017), que consiste neste caso, em promover um leve impacto na ponte do violão ao lado da posição de cada corda do instrumento captando as respostas em frequências naturais através de microfone (Figura 7.19 b).

Para isso o instrumento foi pendurado pela cabeça por cordas elásticas em um suporte (Figura 7.19 a). Nas cordas do vilão foi inserida a tensão de afinação e, em seguida, abafadas com auxílio de espuma para que não haja interferência de vibração das mesmas como proposto por (COSSOLINO e PEREIRA 2010).

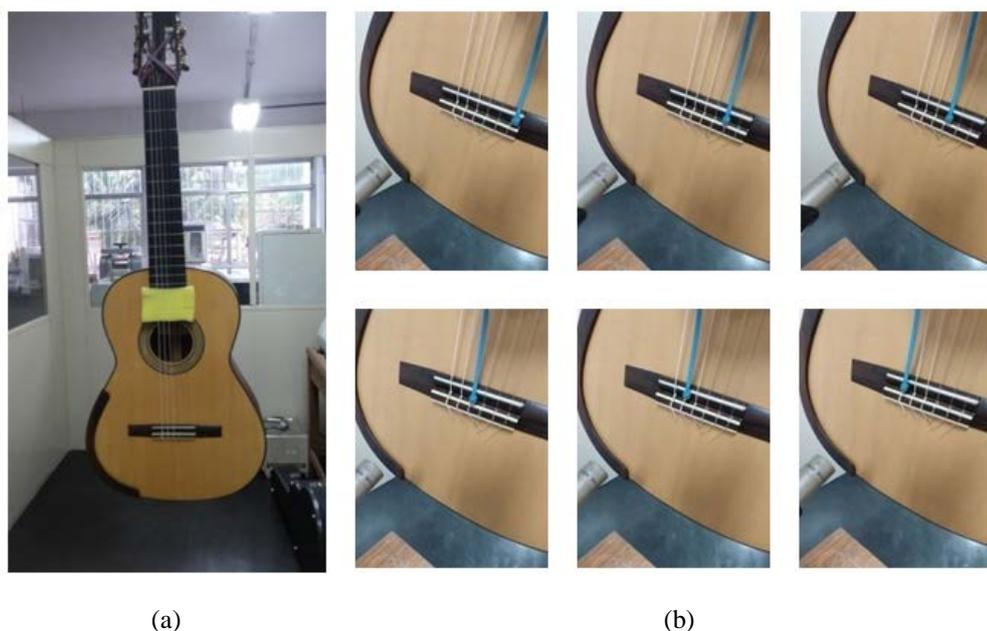


Figura 7.19 - (a) Violão pendurado no suporte; (b) Excitação por impulso na ponte nas posições da primeira a sexta corda (da esquerda para a direita, de cima para baixo). (Fonte: Autor, 2020)

Antes do início da experiência faz-se necessários alguns ajustes de configuração, tais como tempo de aquisição, tempo de processamento e sensibilidade do microfone para melhor aquisição de dados no software Sonelastic de acordo com o material ensaiado. Neste caso, tais ajustes foram necessários, pois em ensaios preliminares algumas frequências naturais não estavam sendo detectadas. E, assim, obtiveram-se os melhores resultados de acordo com as configurações da Figura 7.20. Estes dados foram listados em Tabelas para análises no próximo capítulo.

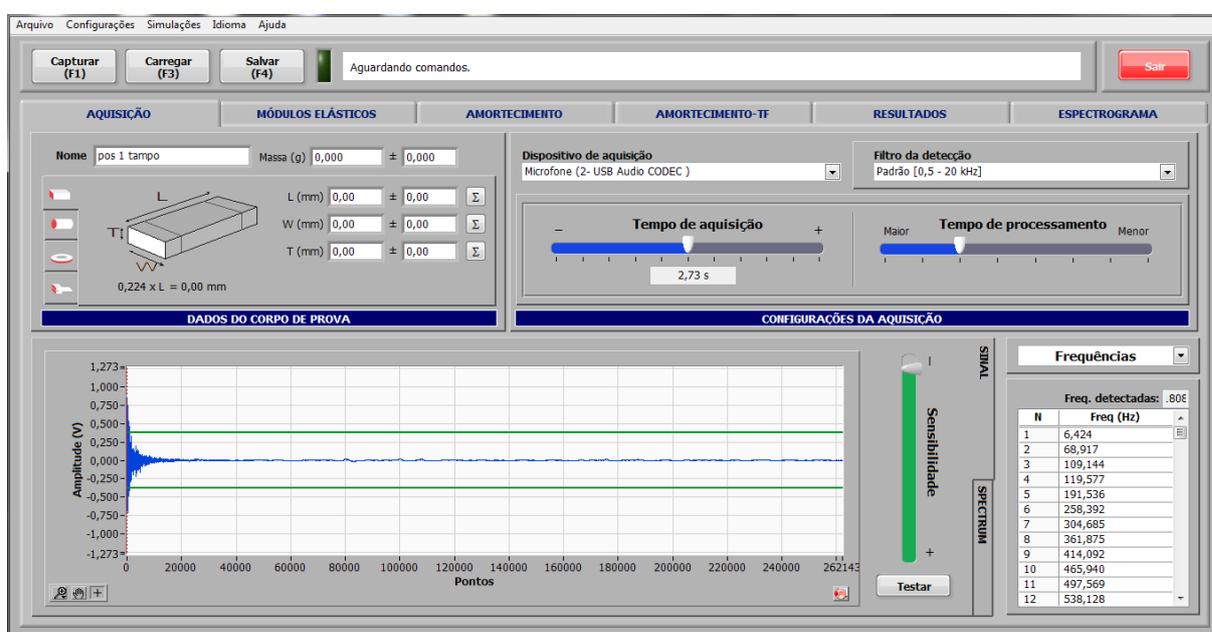


Figura 7.20 - Tela de aquisição de dados no software Sonelastic. (Fonte: Autor, 2020)

7.4 - Sintetização das respostas da caracterização computacional e experimental

Pretende-se neste trabalho realizar a sintetização de três sinais sonoros. Para o primeiro, são usados dados referentes à resposta em termos de frequências naturais obtidas pelo modelo computacional de violão através da análise harmônica. O segundo vem da resposta da caracterização experimental (violão da Marca Barros) obtida pelo método da excitação por impulso. E o terceiro, através da deconvolução entre um som gravado ao tocar a

corda do violão e o som da mesma corda gravada em um instrumento rígido de madeira que simula um braço de violão sem a caixa acústica.

7.4.1 - Sintetização de sinais sonoros obtidos através da análise harmônica

A sintetização dos sinais obtidos através da análise harmônica tem o objetivo de obter o sinal sonoro provocado pelo estímulo ou pulso provocado pelo vetor força no cavalete proposto anteriormente nesta análise (Tabela 7.3). Nesta proposição buscam-se as respostas do nó referente à posição 2 de acordo com a Figura 7.18 variando-se a posição e o estímulo no cavalete de acordo com a posição das cordas.

Para compor o sinal, inicialmente, deve-se estabelecer uma frequência de amostragem e o tempo de duração do sinal sonoro. Da análise harmônica obtêm-se as frequências naturais com as devidas amplitudes iniciais. As taxas de amortecimento são arbitradas, pois não é possível extraí-las através da análise harmônica. Em seguida, calcula-se a frequência natural amortecida e considera-se um ângulo de defasagem de noventa graus. E, através da equação 6.6, monta-se uma rotina em *Matlab* para calcular a composição do sinal assumindo-se a ressonância dos vários materiais envolvidos neste modelo de vibração como sendo de um grau de liberdade.

São feitas as seis rotinas de comandos usando-se como referência os dados obtidos pela excitação no modelo computacional em posições relativas a cada corda do instrumento para obtenção das respostas do modelo como um todo, mas tomando-se como referência informações de nós do tempo superior do modelo.

Nos Quadros 7.1 e 7.2 demonstra-se a rotina implementada para obtenção da resposta da excitação na posição relativa à primeira corda (Mi). Os resultados são demonstrados em gráficos do sinal sintetizado no domínio tempo, no domínio da frequência através da transformada rápida de Fourier (FFT) e em sinal sonoro de extensão wave.

No Quadro 7.1 estão os comandos referentes à frequência de amostragem utilizada (44.100), o tempo de duração do sinal estabelecido de cinco segundos, as frequências ressonantes obtidas na análise harmônica, os índices de amortecimentos adotados e as fórmulas de cálculo das frequências naturais amortecidas que são obtidas através das frequências naturais e índices de amortecimento.

Quadro 7.1 - Primeira parte da sequência de rotinas em *Matlab* para a resposta obtida pela análise harmônica.

(Fonte: Autor, 2020)

```
% Rotina para sintetização da resposta da Análise Harmônica
clear,clc;
fa=44100;
t=0:1/fa:5;
%frequencias naturais ou harmônicos
w1=2*pi*46;
w2=2*pi*62;
w3=2*pi*155;
w4=2*pi*159;
w5=2*pi*176;
w6=2*pi*185;
w7=2*pi*237;
w8=2*pi*241;
w9=2*pi*244;
w10=2*pi*286;
w11=2*pi*298;
w12=2*pi*336;
%índices de amortecimento
am1=0.036490E-01;
am2=0.168435E-05;
am3=0.289126E-03;
am4=0.507013E-05;
am5=0.537529E-03;
am6=0.422774E-06;
am7=0.472471E-05;
am8=0.563551E-04;
am9=0.766997E-03;
am10=0.266790E-05;
am11=0.102987E-02;
am12=0.289479E-03;

%frequências naturais amortecidas
wd1=w1*sqrt(1-(am1)^2);
wd2=w2*sqrt(1-(am2)^2);
wd3=w3*sqrt(1-(am3)^2);
wd4=w4*sqrt(1-(am4)^2);
wd5=w5*sqrt(1-(am5)^2);
wd6=w6*sqrt(1-(am6)^2);
wd7=w7*sqrt(1-(am7)^2);
wd8=w8*sqrt(1-(am8)^2);
wd9=w9*sqrt(1-(am9)^2);
wd10=w10*sqrt(1-(am10)^2);
wd11=w11*sqrt(1-(am11)^2);
wd12=w12*sqrt(1-(am12)^2);
```

Já no Quadro 7.2 são mostradas as rotinas de cálculo da composição do sinal resposta baseado na equação 6.6, de obtenção das respostas gráficas no domínio do tempo e frequência e de sinal sonoro de extensão *wav*.

Quadro 7.2 - Segunda parte da sequência de rotinas em *Matlab* para a resposta obtida pela análise harmônica.

(Fonte: Autor, 2020)

```
% Sintetização do sinal
RT_E1=a1*exp(-am1*w1*t).*cos(wd1*t+pi/2)+a2*exp(-am2*w2*t).*cos(wd2*t+pi/2)
+a3*exp(-am3*w3*t).*cos(wd3*t+pi/2)+a4*exp(-am4*w4*t).*cos(wd4*t+pi/2)+
a5*exp(-am5*w5*t).*cos(wd5*t+pi/2)+a6*exp(-am6*w6*t).*cos(wd6*t+pi/2)+
a7*exp(-am7*w7*t).*cos(wd7*t+pi/2)+a8*exp(-am8*w8*t).*cos(wd8*t+pi/2)+
a9*exp(-am9*w9*t).*cos(wd9*t+pi/2)+a10*exp(-am10*w10*t).*cos(wd10*t+pi/2)+
a11*exp(-am11*w11*t).*cos(wd11*t+pi/2)+a12*exp(-am12*w12*t)
.*cos(wd12*t+pi/2);

figure(1);plot(t,RT_E1);grid

% Sinal sintetizado no dominio da frequência
fh = fft(RT_E1);
fh = fh.*conj(fh);
f = 1:floor(length(RT_E1)/2);
f = f/max(f);
f = f*fa/2;

figure(2); plot(f(1:3000),fh(1:3000));grid
xlabel('Frequencia (Hz)');
ylabel('Amplitude');
title('RT E1-sintetizado');
sound(50*RT_E1,fa);

wavwrite(RT_E1,fa,16,'RT_E1.wav');
```

Este procedimento é repetido para as simulações referentes às posições das outras cordas obtidas na análise harmônica. E os resultados são demonstrados no próximo capítulo.

7.4.2 - Sintetização de Sinais Sonoros Obtidos na Caracterização Experimental

Este método consiste em reproduzir o sinal sonoro em rotinas implementadas em *Matlab* a partir de uma Planilha de dados em formato Excel obtida através da caracterização experimental de excitação por impulso. O programa lê essas informações fazendo a conversão

para um sinal que pode ser observado no domínio do tempo e em forma de sinal sonoro de extensão *wav*.

Faz-se também uso da transformada rápida de Fourier para obtenção de gráficos do sinal no domínio da frequência observando quais entram em ressonância para posterior comparação com os sinais sonoros obtidos através da sintetização das respostas do instrumento provenientes da análise harmônica. A sequência de rotinas em linguagem *matlab* para obtenção dos sinais sintetizados está exposta no quadro 7.3.

Quadro 7.3 - Sequência de Rotinas em *Matlab* para a Resposta Obtida pela Análise Experimental via Técnica de Excitação por Impulso. (Fonte: Autor, 2020)

```
clear,clc
%h=xlsread('Atempol_2.xls');
%h=xlsread('Dtempol_2.xls');
%h=xlsread('E330tempol_2.xls');
%h=xlsread('E82tempo3_2.xls');
%h=xlsread('Gtempol_2.xls');
h=xlsread('Btempol_2.xls');

%break
h2=h(1:50000,2);
t=(0:length(h2)-1)/96000;
figure(1);plot(t,h2);grid
fa=96000;
sound(h2,fa)
%break
%fa=44100;
%sound(h2,fa)

fh = fft(h2);
fh = fh.*conj(fh);
f = 1:floor(length(h2)/2);
f = f/max(f);
f = f*fa/2;
figure(2); plot(f(1:1000),fh(1:1000));grid
title 'h2 takamine frecuencia';

wavwrite(h2,fa,16,'h2.wav');
```

7.5 - Caracterização da Resposta em Frequência Através da Deconvolução

O objetivo desse método é fazer a deconvolução dos sinais sonoros do violão pelo sinal das cordas para obter a resposta em termos de frequência e som do instrumento com auxílio do *software Matlab*.

Para tal, foram gravadas respostas sonoras do violão utilizando o mesmo jogo de cordas usadas na caracterização experimental pela técnica de excitação por impulso.

O método consiste, inicialmente, em produzir respostas sonoras do violão a partir de dedilhamento de notas musicais com base na escala musical para instrumentos de afinação temperada. Para isso, cada corda foi tocada separadamente, abafando-se as demais com auxílio de pequenos pedaços de espuma para não haver interferência de vibração (Figura 7.21 a).

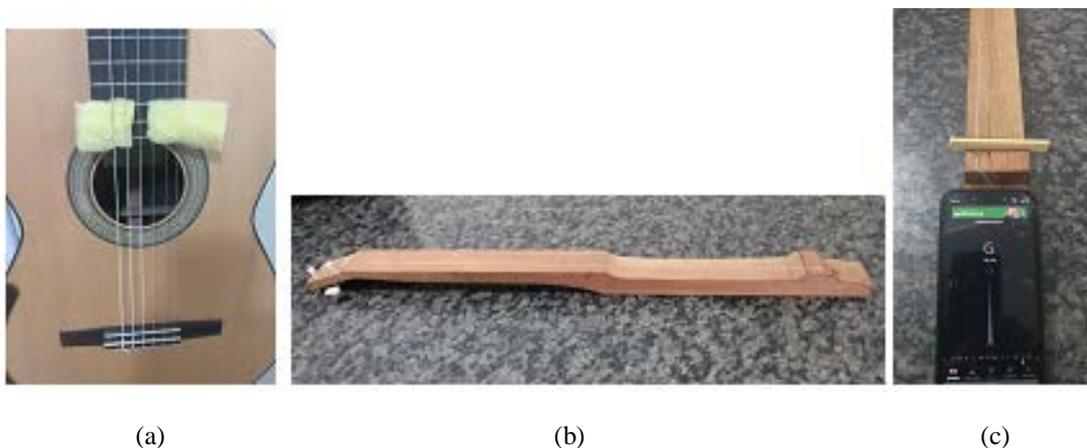


Figura 7.21 - (a) Cordas abafadas com espuma; (b) Dispositivo para Simular braço do Violão; (c) Afinação da corda no dispositivo. (Fonte: Autor, 2020)

Foi elaborado também um dispositivo com as medidas referentes ao braço do instrumento prolongando-se até o cavalete para obtenção das respostas sonoras das cordas sem a presença da caixa acústica (Figura 7.21 b). Neste instrumento são montadas as mesmas cordas, uma de cada vez, usadas no violão com a mesma tensão de afinação (Figura 7.21 c)..

Para captação das respostas sonoras foi usado *microfone condensador Rohs SF-910* e, para a gravação foi usado o *software Cool Edit 2000* gerando sinais na versão wave.

A primeira etapa, depois da gravação, é a transferência dos sinais sonoros para serem lidos no *software Matlab*, gerando-se gráficos de amplitude *versus* tempo. Em seguida, é

elaborada uma série de rotinas de comandos para processar os sinais do violão e da corda e obtenção do sinal resposta através da operação de deconvolução.

A primeira rotina elaborada é para a leitura do sinal wave da corda no violão e com a transformada rápida de Fourier (FFT) obtêm-se os sinais sonoros no domínio do tempo e frequência respectivamente como demonstrado na aplicação para a corda Lá (A) ou quinta corda no quadro 7.4.

Quadro 7.4- Rotinas *Matlab* para sinal de extensão *wav* e *FFT* do sinal sonoro da corda no violão. (Fonte: Autor, 2020)

```
%%% Nota gravada do violão %%%  
[yvio,fa,nbits]=wavread('A.wav');  
sound(yvio,fa);  
t1=(1:length(yvio))/fa;  
figure(1);plot(t1,(yvio));grid  
xlabel('Tempo(s)');  
ylabel('amplitude(volt)');  
title('Nota Lá (5ª corda)');  
%%% FFT nota gravada violão %%%  
fh = fft(yvio);  
fh = fh.*conj(fh);  
f = 1:floor(length(yvio)/2);  
f = f/max(f);  
f = f*fa/2;  
figure(2); plot(f(1:10000),fh(1:10000));grid  
xlabel('Frequência (Hz)');  
ylabel('amplitude');  
title('Nota Lá (5ª corda)');
```

Em seguida, é repetido o mesmo procedimento para a mesma corda no dispositivo que simula o braço do violão sem a caixa acústica obtendo-se também os sinais sonoros nos domínios do tempo e frequência (Quadro 7.5).

Quadro 7.5- Rotinas *Matlab* para sinal de extensão *wav* e *FFT* do sinal sonoro da corda no dispositivo que simula o braço do violão sem a caixa acústica. (Fonte: Autor, 2020)

```

##### Corda no instrumento que simula o braço (monocórdio) #####
[ymono,fa,nbits]=wavread('A_mono.wav');
%[ymono,fa,nbits]=wavread('rastmonol.wav');
sound(ymono,fa);
t2=(1:length(ymono))/fa;
figure(3);plot(t2,(ymono));grid
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('amplitude (volt)');
title('Nota Lá (5ª corda)-monocórdio');
%break
%%% FFT corda monocordio%%%
fh = fft(ymono);
fh = fh.*conj(fh);
f = 1:floor(length(ymono)/2);
f = f/max(f);
f = f*fa/2;
figure(4); plot(f(1:10000),fh(1:10000));grid
xlabel('Frequência (Hz)');
ylabel('amplitude');
title('Nota Lá (5ª corda)-monocórdio');

```

A etapa final consiste em construir uma rotina para obter o resultado da deconvolução do sinal da corda no violão pelo sinal gerado no dispositivo que simula o braço obtendo-se assim a resposta do instrumento no domínio do tempo e frequência, através da FFT (Quadro 7.6).

Quadro 7.6- Rotinas *Matlab* para obtenção da resposta do violão nos domínios do tempo e frequência. (Fonte: Autor, 2020)

```

##### Deconvolução #####
[h]=fdeconv(yvio,ymono);
t3=(1:length(h))/fa;
figure(5);plot(t3,(h));grid
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('amplitude (volt)');
title('Deconvolução');
sound(h,fa)

%%% FFT da deconvolução %%%
fh = fft(h);
fh = fh.*conj(fh);
f = 1:floor(length(h)/2);
f = f/max(f);
f = f*fa/2;
figure(6); plot(f(1:5000),fh(1:5000));grid
xlabel('Frequência (Hz)');
ylabel('amplitude');
title('Deconvolução');

```

8.0 - Resultados e Discussões

8.1 - Primeira Análise Modal

Os resultados, a seguir, são referentes às análises do modelo computacional desenvolvido através de medidas e características dos materiais usados na fabricação do modelo físico.

Inicialmente, é feita análise modal para o modelo sem restrições de movimento (Figura 8.1) e são obtidos os vários modos de vibração com suas frequências características.

O intervalo de frequência escolhido para ser observado, neste caso, foi entre zero e mil Hertz, e quarenta é a quantidade de modos a extrair (Tabela 8.1). Porém para as análises comparativas são usados os doze primeiros modos e as respostas em frequência até setecentos Hertz.

Os doze primeiros modos de vibração do modelo (Figura 8.1) sem aplicação de condições de contorno, mostram que a combinação das várias partes do modelo com madeiras diferentes fazem surgir vários modos de vibração com seus nós, região de menor movimentação vibracional, indicados pela cor azul e antinós, região de movimentação vibracional máxima, indicado pela cor vermelha. Havendo ainda, outras cores indicando movimentações intermediárias, como indicado na escala em cada Figura gerada no *Software Ansys*. Como não há condições restritivas de movimento surgem quarenta modos de vibração com suas respectivas frequências naturais tomando como referência um intervalo entre zero e 700 Hertz (Tabela 8.1).

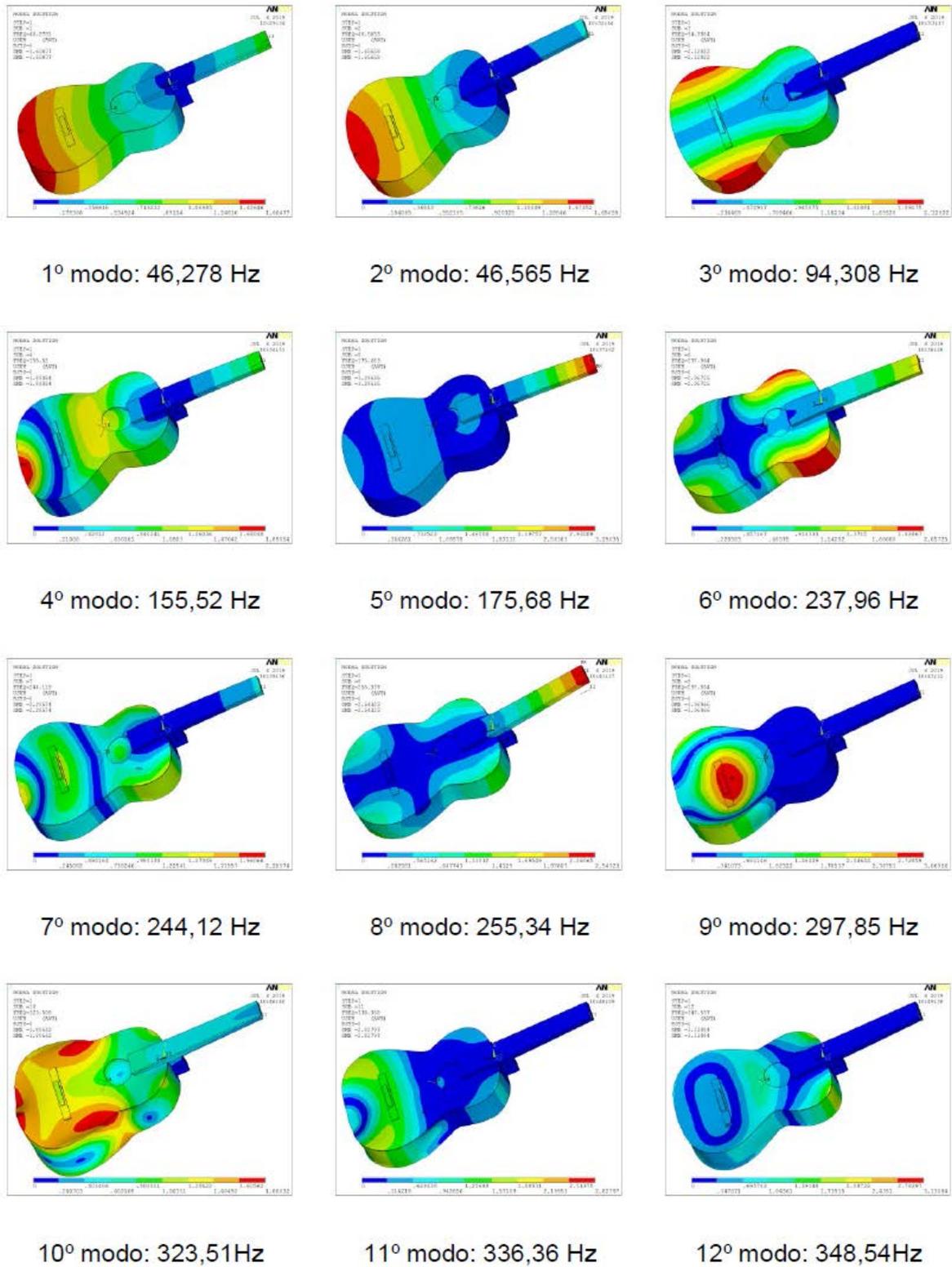


Figura 8.1. Doze primeiros modos de vibração com respectivas frequências para o modelo sem as condições de contorno. (Fonte: Autor, 2020)

Tabela 8.1 - Modos e respectivas frequências de vibração para o modelo sem condições de contorno. (Fonte: Autor, 2020)

Modos	Frequências (Hz)	Modos	Frequências (Hz)
1	46,278	21	488,47
2	46,565	22	489,50
3	94,308	23	505,99
4	155,52	24	528,59
5	175,68	25	551,68
6	237,96	26	562,35
7	244,12	27	568,40
8	255,34	28	586,23
9	297,85	29	591,51
10	323,51	30	609,00
11	336,36	31	614,72
12	348,54	32	615,96
13	388,89	33	622,70
14	404,67	34	636,36
15	421,42	35	639,07
16	422,45	36	646,76
17	440,26	37	659,13
18	455,52	38	680,69
19	461,76	39	691,47
20	474,65	40	699,81

A Tabela 8.1 mostra resultados relevantes, tendo em vista que somente foram inseridas no modelo as propriedades dos materiais e não foi colocada nenhuma condição restritiva de movimento, que poderia diminuir sensivelmente os graus de liberdade, ou, nesse caso, a possibilidade de vibrar com mais intensidade. O modelo apresenta muitas frequências naturais que estão relacionadas ao respectivo modo vibracional.

Para uma nova análise modal aplicam-se algumas condições ao modelo anteriormente mencionadas ao modelo na tentativa de assemelhar as condições dinâmicas do mesmo. A primeira consiste em não movimentação da lateral do instrumento para indicar a rigidez dessa região no modelo e a segunda na aplicação de tensão imposta pelas cordas no ato de afinar o violão.

8.2 - Análise Estática

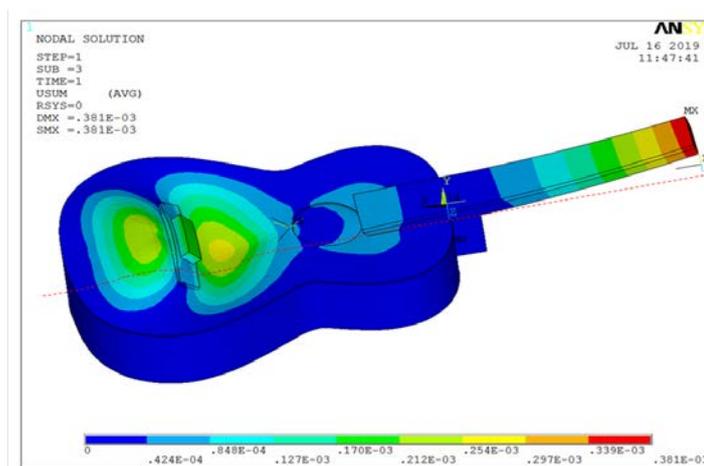


Figura 8.2 - Análise estática do modelo após aplicação das condições de contorno. (Fonte: Autor, 2020)

A análise estática, neste caso, serve como uma pré análise para a análise modal. Ela fixa no modelo as condições preestabelecidas. A Figura 8.2 mostra a restrição de movimento das laterais e bordas do tampo superior indicadas pela cor azul e efeito de arqueamento do modelo provocando certa distorção na forma do instrumento, mais evidente no cavalete e braço provocado pela tensão imposta pelas cordas, assemelhando-se às condições reais do instrumento. O instrumento afinado, ou seja, com as tensões características de afinação o braço tende realmente a um encurvamento sutil e certo abaulamento do tampo na região do cavalete.

8.3 - Segunda Análise Modal

Garantidas as condições de contorno preestabelecidas através da análise estática, faz-se nova análise modal onde se constatou certa diminuição da quantidade de modos de

vibração no intervalo de zero a setecentos Hertz, onde antes, sem condições de contorno, apresentava quarenta modos de vibração (Tabela 8.1), agora apenas doze (Figura 8.3).

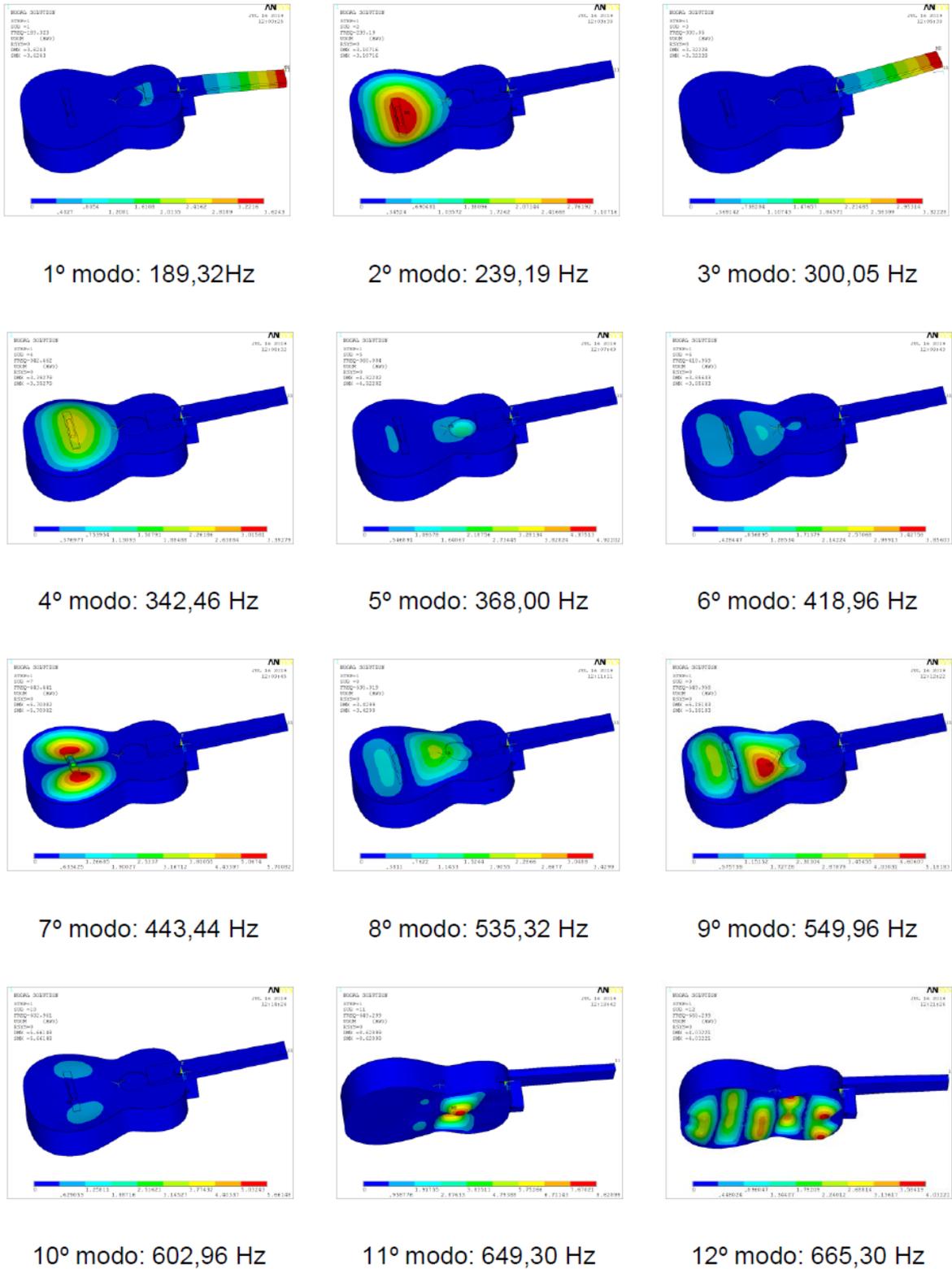


Figura 8.3. Doze primeiros modos de vibração com respectivas respostas em frequências para as condições de contorno de restrição de movimento nas laterais e tensão das cordas. (Fonte: Autor, 2020)

A restrição de movimento diminui significativamente a movimentação do modelo, conseqüentemente as suas frequências naturais que caracterizam cada modo vibracional. Avaliando os doze primeiros modos de vibração percebe-se que a cor azul, que indica menor movimentação ou vibração, é predominante. E isso provavelmente se deve às condições de contorno impostas de restrição de movimento nas laterais e tensão das cordas que diminuiu sensivelmente os graus de liberdade do modelo.

8.4 - Comparação dos Resultados Numéricos das Análises Modal e Experimental

Na Tabela 8.2 são apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados pela técnica de excitação por impulso através do software sonelastic. Foram feitos ensaios com aplicação de força impulsiva manual (batida) da primeira a sexta corda com auxílio de um instrumento feito de plástico com ponta metálica capaz de promover o impulso necessário para provocar a resposta do modelo de violão.

Tal procedimento foi feito nas posições referentes às cordas fazendo excitação no cavalete e variando o grau de sensibilidade do microfone para obtenção do máximo de frequências ressonantes. E assim foram enumeradas as vinte primeiras frequências relacionadas pelo software para cada ponto de excitação e os resultados mostram que a sequência de frequências naturais listadas em ordem crescente são diferentes para cada ponto impulsionado. Embora a vibração se propague para todo o instrumento, quando se muda a posição, provavelmente, o caminho de propagação possa mudar, pois a madeira é um material essencialmente anisotrópico e a direção do alinhamento das fibras pode fazer com que essa vibração encontre regiões com taxas de amortecimentos diferentes, fator que pode influenciar a ressonância dessas frequências.

Tabela 8.2 - Respostas em frequências naturais (em Hertz) à excitação por impulso no cavalete em posições relativas às cordas do modelo numeradas em ordem crescente. (Fonte: Autor, 2020)

Frequências	1ª corda (E)	2ª corda (B)	3ª corda (G)	4ª corda (D)	5ª corda (A)	6ª corda (E)
1	3,953	9,784	4,646	9,442	4,338	20,172
2	23,597	70,338	69,901	89,060	56,640	70,941
3	63,475	102,766	92,571	147,851	105,550	99,651
4	100,576	137,289	192,634	191,068	118,220	132,679
5	136,338	190,890	257,160	219,137	164,239	193,288
6	192,510	249,427	302,668	258,686	197,861	219,093
7	256,642	305,012	360,474	306,623	215,133	260,380
8	304,895	350,563	413,173	332,531	250,561	305,133
9	362,571	413,471	477,488	361,347	307,605	361,749
10	413,658	455,628	539,333	411,469	363,989	416,135
11	449,314	482,771	602,500	475,511	402,221	449,04
12	539,065	540,706	629,093	540,667	417,720	471,173
13	602,699	604,030	644,547	592,609	445,073	493,196
14	628,198	631,524	664,226	630,063	492,568	539,018
15	667,739	679,142	708,599	654,407	503,426	604,286
16	721,026	724,237	736,791	680,473	540,275	626,075
17	807,478	764,435	774,462	712,892	618,211	653,653
18	827,493	806,217	825,948	750,803	651,910	666,648
19	898,584	822,854	908,166	777,706	676,688	736,516
20	935,257	846,262	951,433	800,172	713,284	779,070

Outro fato que se deve considerar é que a excitação para provocar a vibração foi feita manualmente, já que o pulsador automático do Sistema Sonelastic poderia causar danos à estrutura do instrumento e isto pode fazer variar os resultados em função da força aplicada.

No contexto geral, essa técnica deve fazer com que se encontrem todas as possíveis frequências ressonantes do material e a Tabela 8.2 mostra conjuntos relevantes de frequências para cada ponto excitado. Embora parte da energia possa ser perdida no caminho dessa vibração ao variar o ponto inicial, é possível encontrar várias frequências ressonantes com valores bem próximos, que possivelmente possa ser de uma mesma região do instrumento, ou do mesmo modo de vibração.

Para melhor análise, as respostas em frequência foram separadas em faixas com valores próximos. Em seguida, foi calculada a média e feita a comparação com frequências numéricas homônimas (próximas) (Tabela 8.3) para investigação dos possíveis modos de vibração a qual pertencem comparando com os resultados numéricos.

Tabela 8.3 - Frequências homônimas experimental/numérico. (Fonte: Autor, 2020)

Frequências	Experimental						Numérico	
	1ª corda	2ª corda	3ª corda	4ª corda	5ª corda	6ª corda	Média	
1		70,338	69,901			70,941	70,39	
2	100,576	102,766			105,550	99,651	102,13	
3	136,338	137,289				132,679	135,43	
4	192,510	190,890	192,634	191,068		193,288	192,07	189,32
5								239,19
6	304,895	305,012	302,668	306,623	307,605	305,133	305,32	300,05
7		350,563		332,531			341,54	342,46
8	362,571		360,474	361,347	363,989	361,749	362,02	368,00
9	413,658	413,471	413,173	411,469	417,720	416,135	414,27	418,96
10	449,314	455,628			445,073	449,04	449,76	443,44
11	539,065	540,706	539,333	540,667	540,275	539,018	539,84	535,32
12								549,96
13	602,699	604,030	602,500	592,609		604,286	601,22	602,96
14			644,547	654,407	651,910	653,653	651,12	649,30
15	667,739	679,142	664,226	680,473	676,688	666,648	672,48	665,30

Tabela 8.4 - Comparação entre os valores médios de frequências experimentais e numéricas. (Fonte: Autor, 2020)

Modos	Média experimental (Hertz)	Numérico (Hertz)	Erro(%)
1	192,07	189,32	1,45%
2	-	239,19	-
3	305,32	300,05	1,75%
4	341,54	342,46	0,26%
5	362,02	368,00	1,62%
6	414,27	418,96	1,11%
7	449,76	443,44	1,42%
8	539,84	535,32	0,84%
9	-	549,96	-
10	601,22	602,96	0,28%
11	651,12	649,30	0,28%
12	672,48	665,30	1,07%

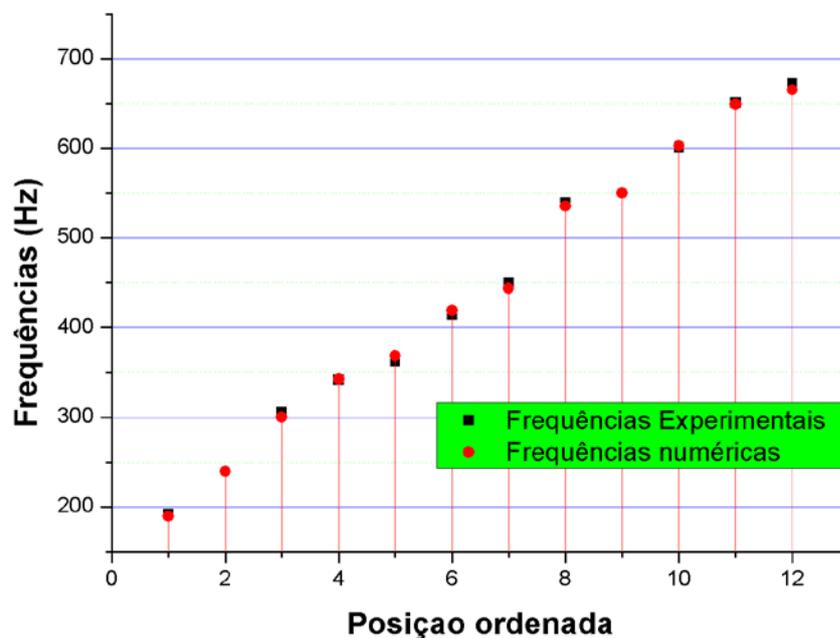


Figura 8.4 - Plotagem dos pares de frequências homólogas, experimentais e numéricas.

Na última coluna da Tabela 8.3 estão listados em ordem crescente valores de frequências naturais referentes aos modos vibracionais encontrados na análise modal, levando em consideração as condições de contorno já discutidas anteriormente que, acredita-se, seja a que mais se aproxime do comportamento dinâmico do instrumento. Estas frequências são usadas como referência para a comparação com o conjunto de frequências obtidas experimentalmente pelo método de excitação por impulso.

Inicialmente é feita a separação das frequências por valores que se aproximam obtidas experimentalmente, onde foram encontrados quinze faixas de acordo com o ponto de excitação. Calculou-se então a média desses valores de acordo com a quantidade observada.

Comparando esses valores médios de frequência percebeu-se que em dez faixas havia valor correspondente próximo nos dados numéricos calculados pelo modelo utilizando-se do método de elementos finitos.

A Tabela 8.4 faz a comparação destes resultados através da diferença percentual (erro) em que se percebeu que a maior diferença não ultrapassa 2% cento e a figura 8.4 indica grande correlação entre os conjuntos de frequências experimentais e numéricas. E isto pode ser indicativo de que tais frequências obtidas experimentalmente possam pertencer aos mesmos modos de vibração encontrados na análise modal via elementos finitos.

A técnica de excitação por impulso se mostra bastante eficiente, pois permite observar um número grande de frequências naturais que são encontradas no instrumento (Tabela 8.2), permitindo a investigação dos possíveis modos de vibração do sistema. Tais modos podem indicar as regiões do instrumento que vibram a determinadas frequências e isso é importante, pois mostram o comportamento dinâmico, principalmente do tampo, que promovem os deslocamentos de ar dentro da caixa acústica que resulta no som produzido.

O mapeamento dessas regiões pode ajudar no aperfeiçoamento das técnicas quase sempre artesanais, ou na escolha dos materiais para fabricação dos instrumentos.

Além disso, essa técnica vem de encontro ao método utilizado pelos Luthiers experientes para classificação da qualidade de madeiras para instrumentos de corda. Eles promovem manualmente uma batida na amostra de material e, através da experiência, conseguem fazer uma avaliação da qualidade pelo som emitido. Essa informação foi fornecida pelo Lúhler Maurício Barros, colaborador desse projeto.

8.5 - Análise Harmônica

Os dados numéricos referentes às respostas são obtidos de nós do tampo superior, boca e braço do modelo computacional, somando-se onze pontos analisados para cada pulso inserido em cada posição de corda. E estes mostram que algumas frequências se repetem quando se muda a posição do nó ou, até mesmo, o ponto de excitação no cavalete. Porém, estas frequências apresentam variações com relação à amplitude para diferentes nós. Por exemplo, a frequência de 46 Hertz aparece em todos os gráficos analisados, mas têm amplitude mais evidente nos nós das posições 1, 2, 3 e 4.

Ao se analisar as frequências para um mesmo nó, variando-se a posição do estímulo no cavalete, não se observa diferenças muito relevantes com relação à amplitude. A exceção está no conjunto dos onze nós que se referem ao estímulo na sexta corda, que foram tomados em nós diferentes com relação às demais cordas. Foram adotados nós diferentes, mas na mesma região dos demais.

As Figuras 8.5 até 8.10, em sequência, mostram os resultados referentes a cada nó de acordo com as posições adotadas e indicadas na Figura 7.18 onde se buscou variar o valor da carga no cavalete, de acordo com a Tabela 7.3. Cada Figura contém o conjunto de onze gráficos de Amplitude versus frequência para cada posição de corda onde é aplicado o pequeno vetor força gerando o estímulo no cavalete.

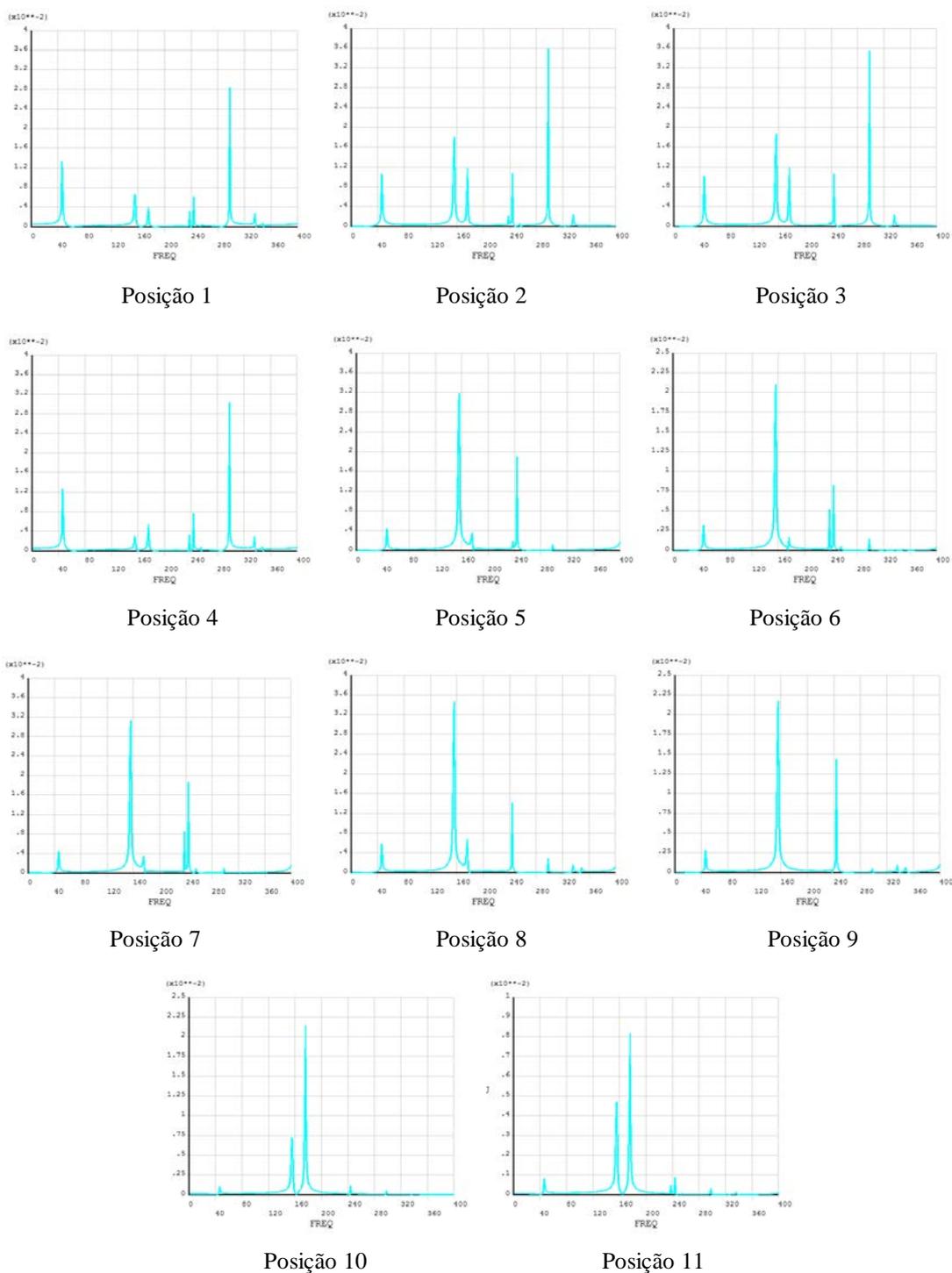


Figura 8.5 - Respostas nos nós referentes às posições estabelecidas com estímulo de 1,75 N na posição da primeira corda (“M1”) - Posições: 1, 2, 3 e 4 no tampo; 5, 6, 7, 8 e 9 na boca; 10 e 11 no braço do modelo de violão. (Fonte: Autor, 2020)

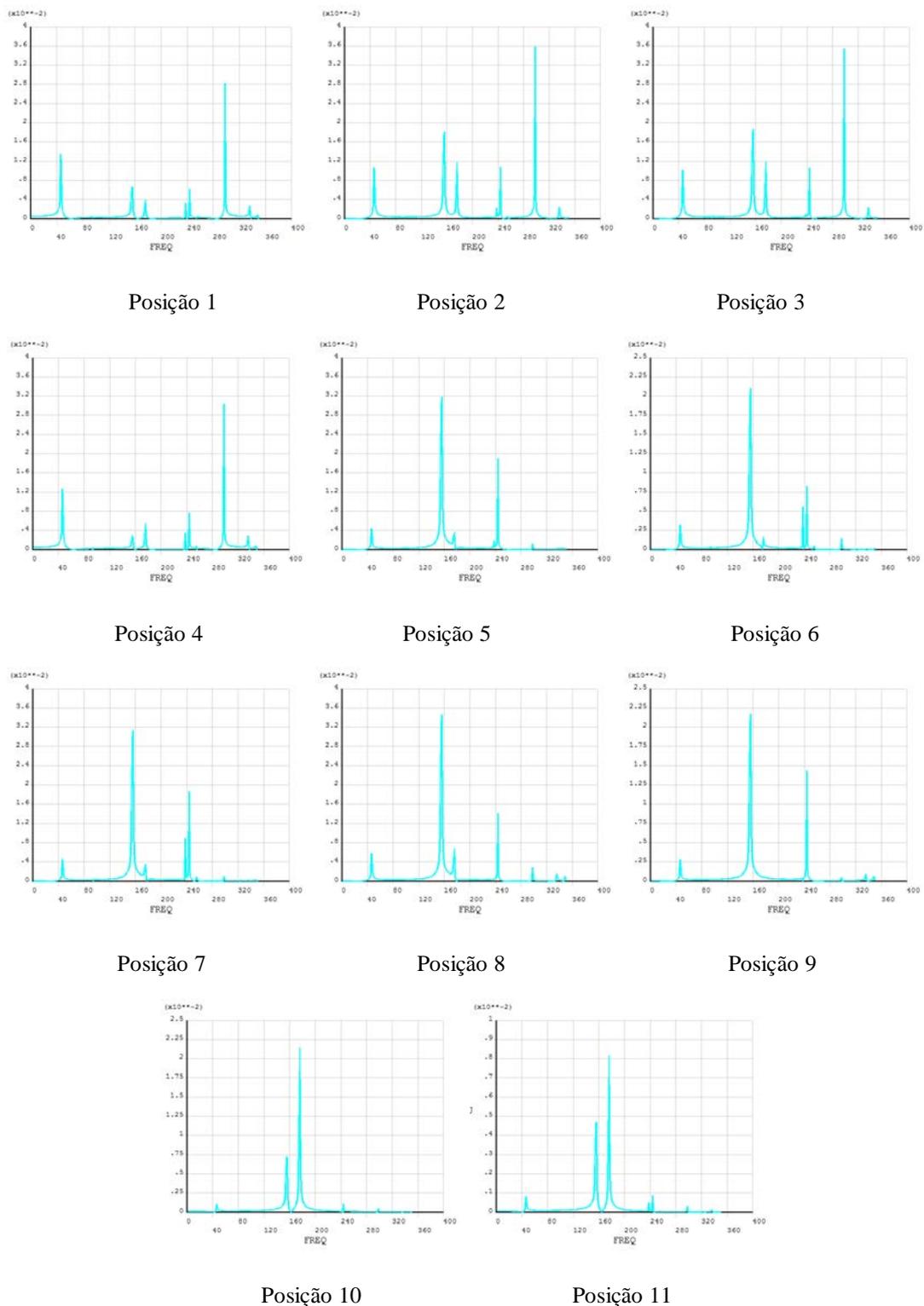


Figura 8.6 - Respostas nos nós referentes às posições estabelecidas com estímulo de 1,33 N na posição da segunda corda (“Lá”) - Posições: 1, 2, 3 e 4 no tampo; 5, 6, 7, 8 e 9 na boca; 10 e 11 no braço do modelo de violão. (Fonte: Autor, 2020)

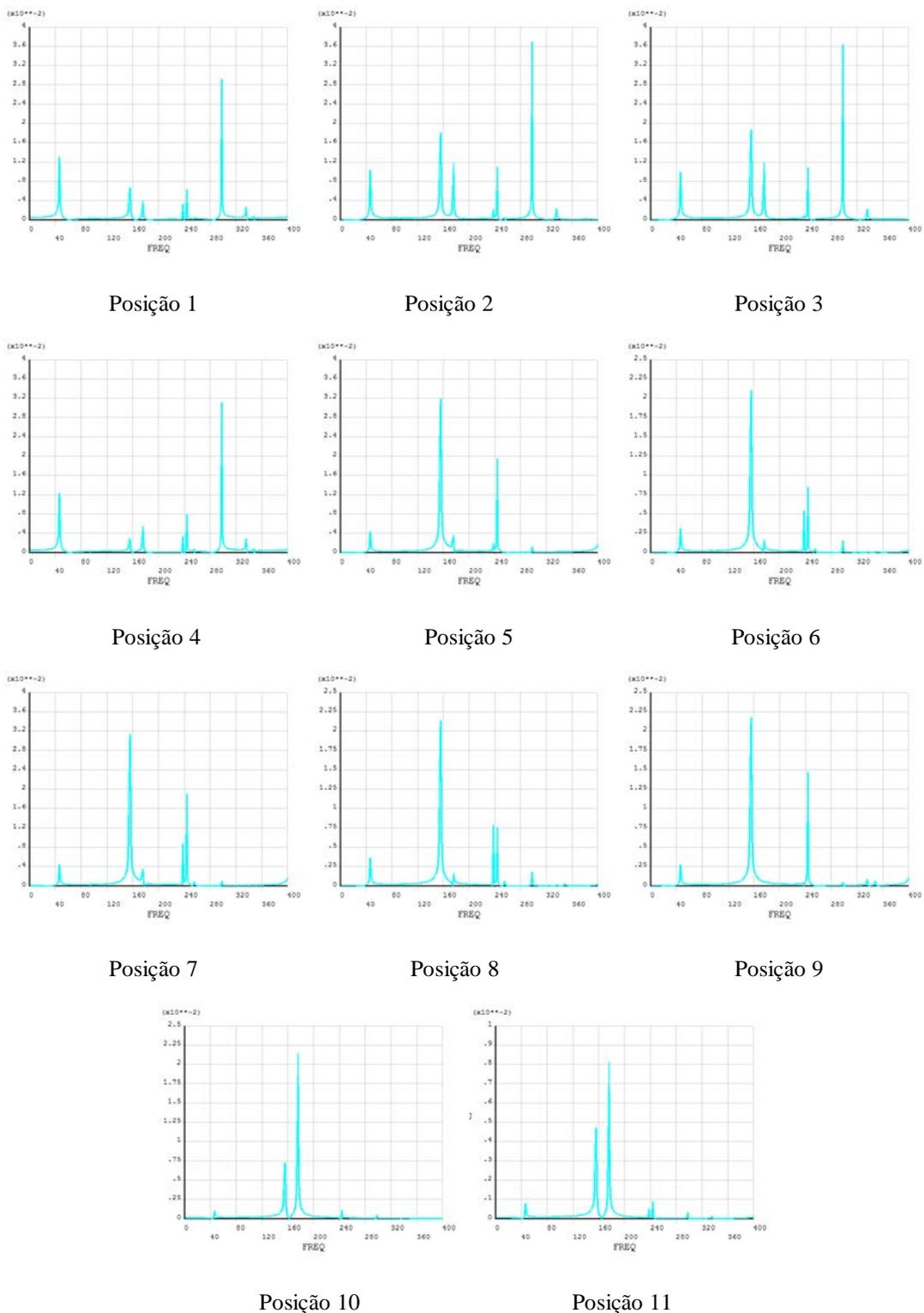


Figura 8.7 - Respostas nos nós referentes às posições estabelecidas com estímulo de 1,37 N na posição da terceira corda (“Sol”) - Posições: 1, 2, 3 e 4 no tampo; 5, 6, 7, 8 e 9 na boca; 10 e 11 no braço do modelo de violão. (Fonte: Autor, 2020)

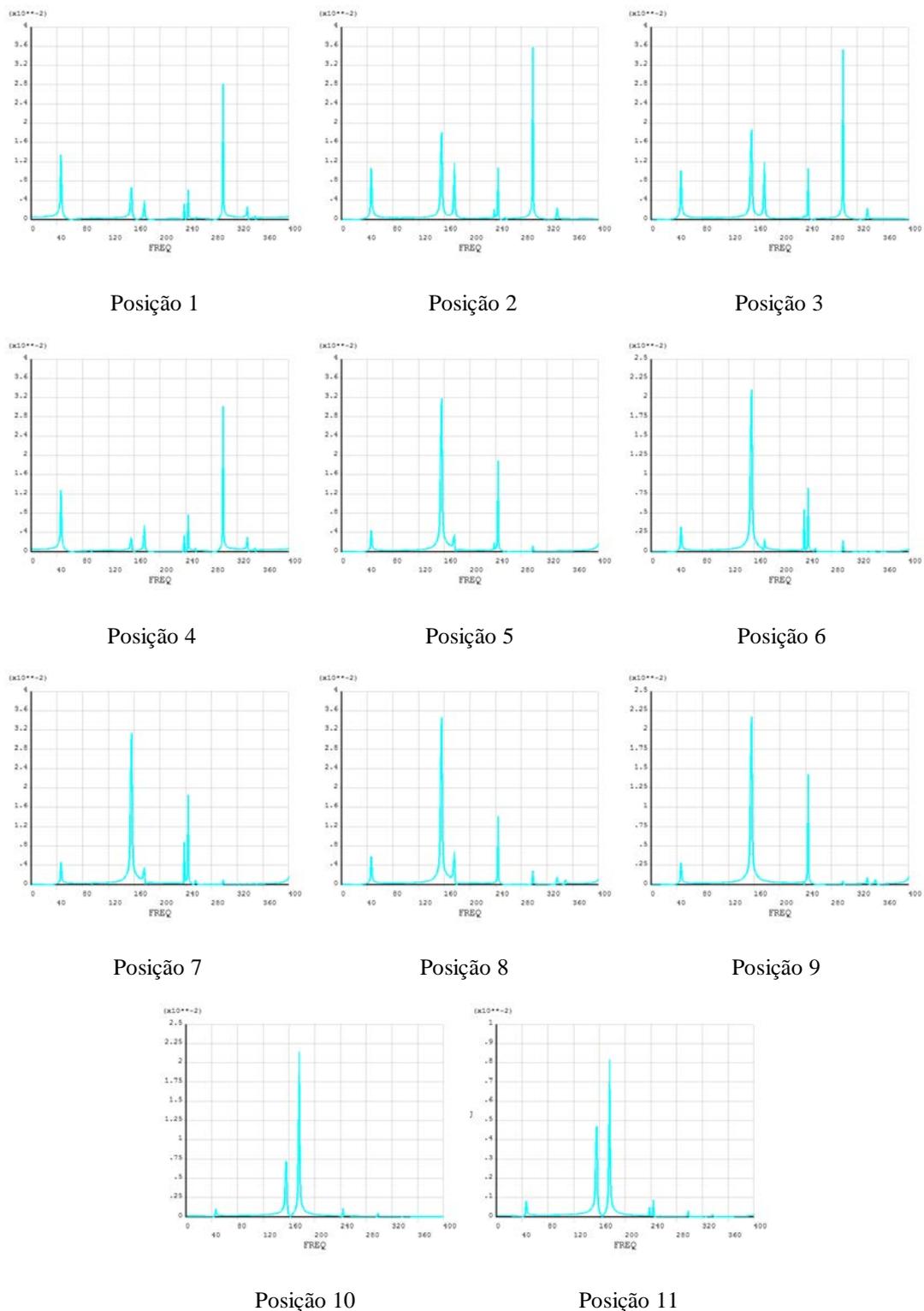


Figura 8.8 - Respostas nos nós referentes às posições estabelecidas com estímulo de 1,81 N na posição da quarta corda (“Ré”) - Posições: 1, 2, 3 e 4 no tampo; 5, 6, 7, 8 e 9 na boca; 10 e 11 no braço do modelo de violão.

(Fonte: Autor, 2020)

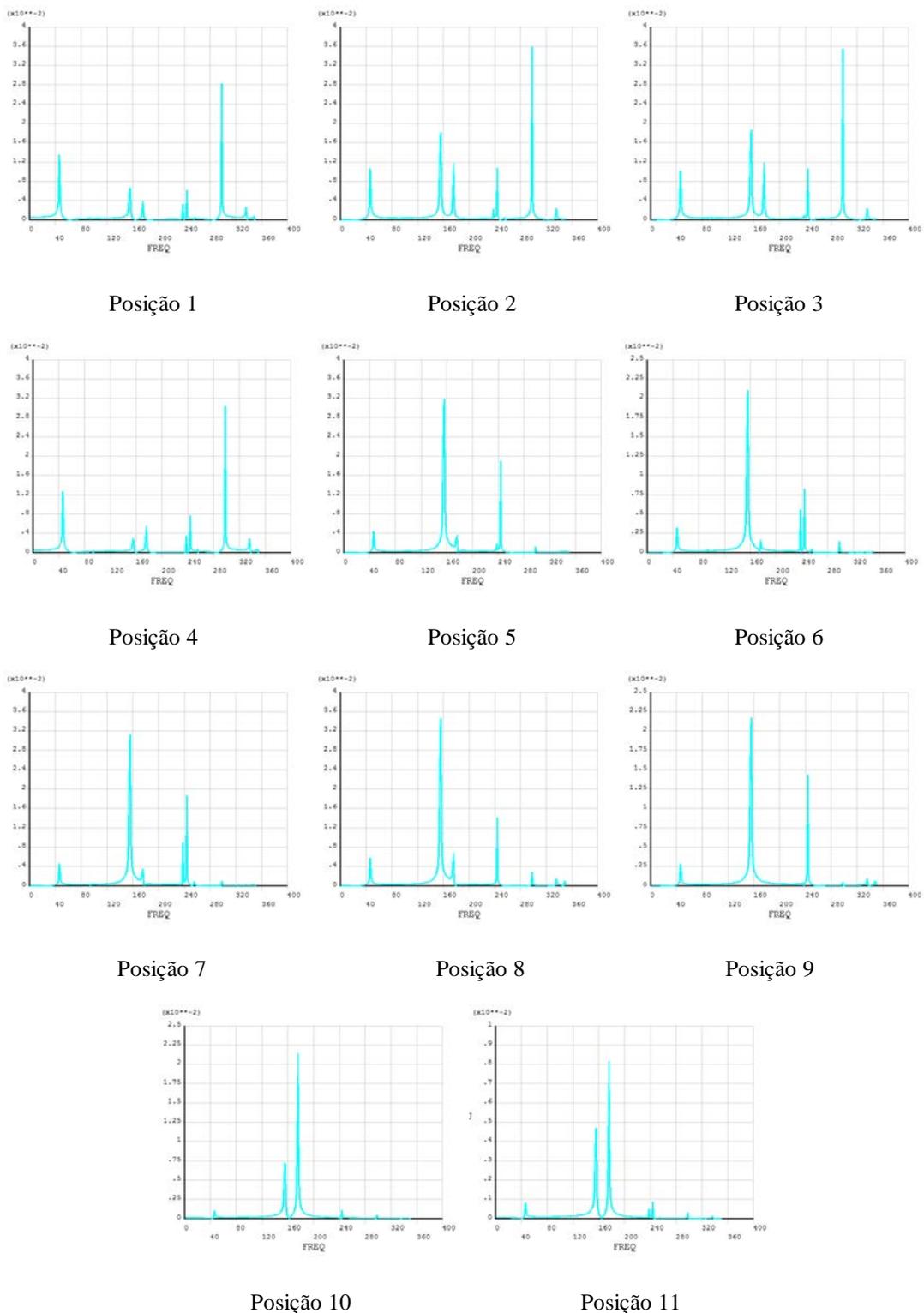


Figura 8.9 - Respostas nos nós referentes às posições estabelecidas com estímulo de 1,76 N na posição da quinta corda corda (“Lá”) - Posições: 1, 2, 3 e 4 no tampo; 5, 6, 7, 8 e 9 na boca; 10 e 11 no braço do modelo de violão.

(Fonte: Autor, 2020)

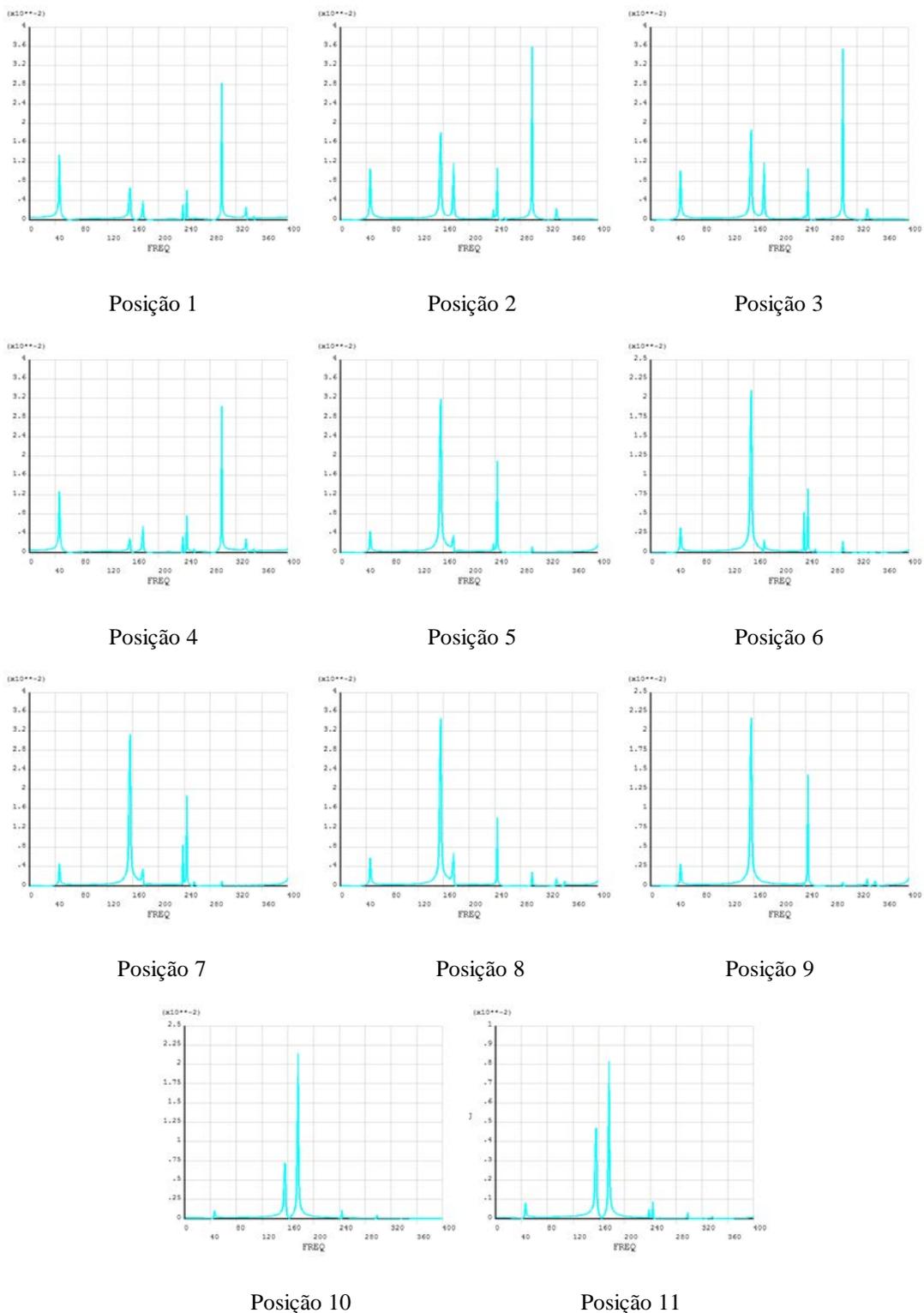


Figura 8.10 - Respostas nos nós referentes às posições estabelecidas com estímulo de 1,61 N na posição da sexta corda corda (“Mf”) - Posições: 1, 2, 3 e 4 no tampo; 5, 6, 7, 8 e 9 na boca; 10 e 11 no braço do modelo de violão.

(Fonte: Autor, 2020)

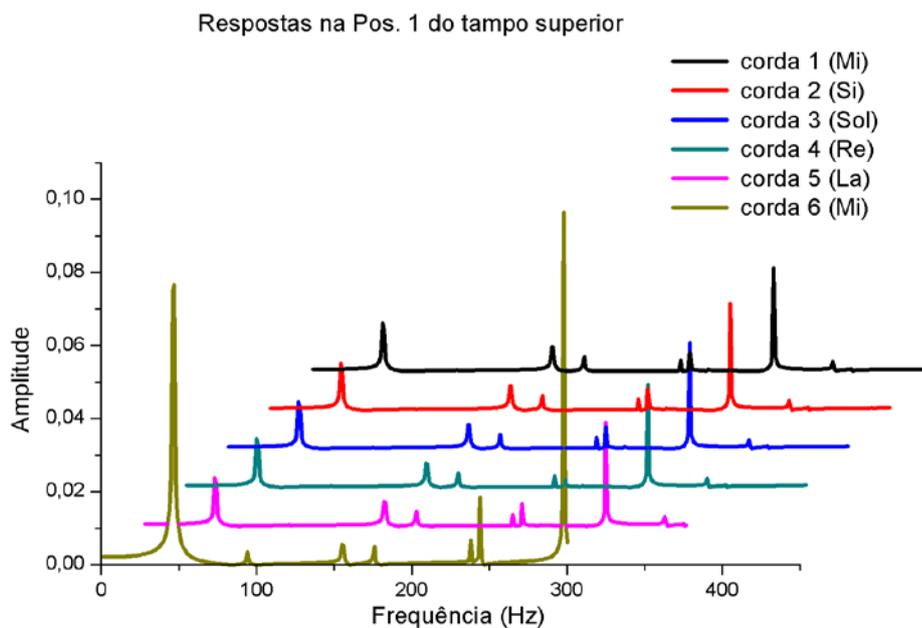


Figura 8.11 - Comparação das respostas de nó da posição 1 do tampo superior. (Fonte: Autor, 2020)

A Figura 8.11 faz a comparação das respostas em termos de amplitude versus frequência para a posição 1, variando-se o estímulo entre as posições relativas às seis cordas. As respostas mostram que, para as cinco primeiras cordas, são excitadas as mesmas frequências com diferenças de amplitudes muito sutis. Já para a sexta corda foram adotados nós diferentes e observa-se que as frequências ressonantes são praticamente as mesmas, porém, com diferenças mais relevantes de amplitudes.

8.6 - Comparação dos Resultados Numéricos da Análise Harmônica e Modal.

A Figura 8.12 relaciona a resposta obtida na análise harmônica para o nó referente à posição 1 (Figura 8.12 a), que é semelhante à posição 4, onde se constata que as frequências de 46 e 298 Hertz são as mais evidentes com relação às amplitudes. E isso permite que se possa relacionar esse resultado com o primeiro e nono modos de vibração que possuem frequências de valor semelhante (Figura 8.12 b e c).

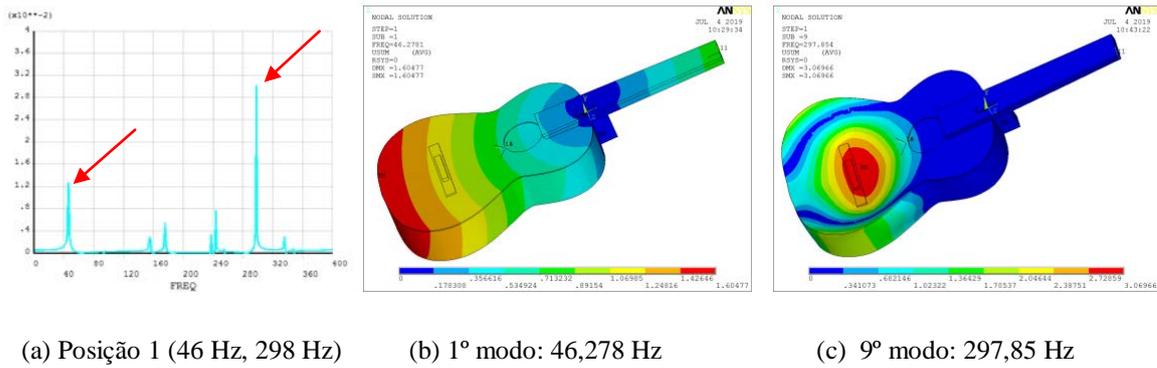
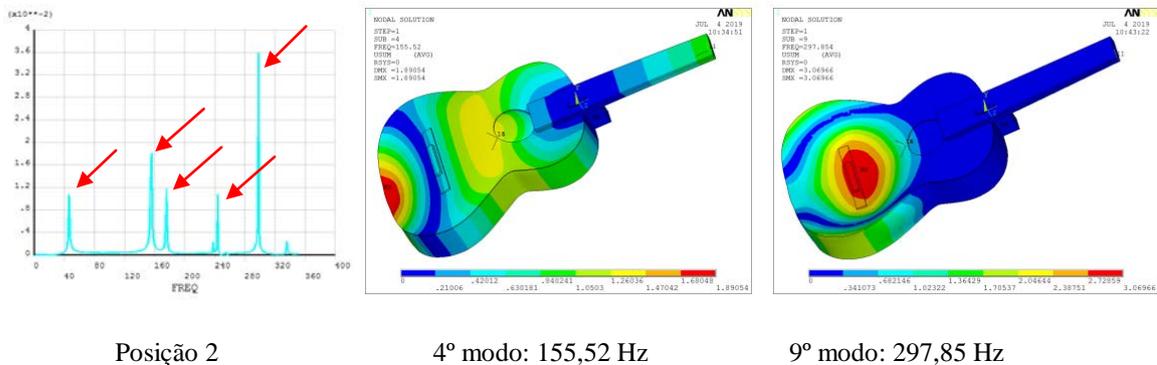


Figura 8.12 - Comparação entre Análise Harmônica e modal; a) Posição 1; b) 1º modo de vibração; c) 9º modo de vibração. (Fonte: Autor, 2020)

Ao analisar tais modos de vibração percebe-se que, como os nós referenciados são de posições à esquerda do cavalete, eles coincidem, na análise modal, com regiões onde se localizam frequências naturais de intensa vibração no tampo ou com grande ressonância.



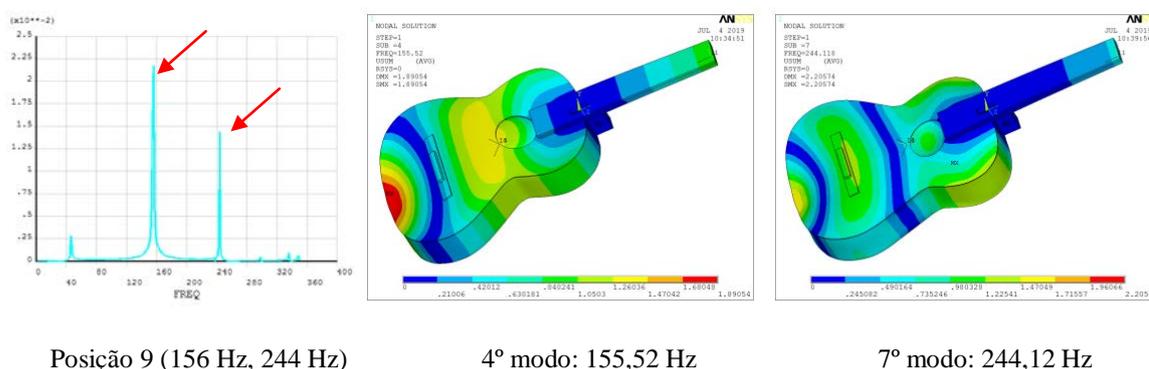
(46 Hz, 156 Hz, 176 Hz, 244 Hz, 298 Hz)

Figura 8.13 - Comparação entre Análise Harmônica e Modal; a) Posição 2; b) 4º modo de vibração; c) 9º modo de vibração. (Fonte: Autor, 2020)

Já a Figura 8.13 relaciona a resposta obtida na análise harmônica para o nó referente à posição 2 (Figura 8.13 a) que é semelhante à posição 3, onde se constata que as frequências de 46, 156, 176, 244 e 298 Hertz são as mais evidentes com relação à amplitude. E isso permite que se possam relacionar os valores 156 e 298 Hertz com o quarto e nono modo de vibração, respectivamente, da análise modal que possuem frequências naturais de vibração semelhante (Figura 8.13 b e c).

Ao analisar tais modos de vibração percebe-se que, como os nós referenciados são de posições à direita do cavalete, eles coincidem, na análise modal, com regiões onde se localizam frequências naturais de intensa vibração no tampo ou com grande ressonância para os dois modos.

A frequência de 46 Hertz, como mencionado anteriormente na Figura 8.12 (a) pode ser referenciada ao primeiro modo, a de 176 Hertz ao quinto modo e a de 244 Hertz ao sétimo modo.

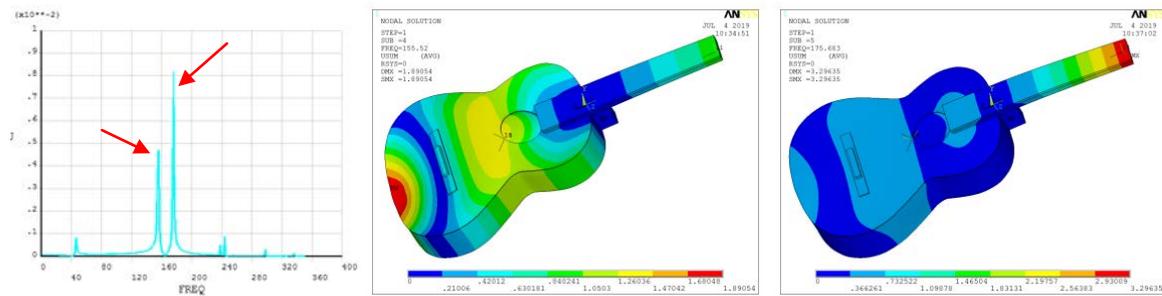


Posição 9 (156 Hz, 244 Hz) 4º modo: 155,52 Hz 7º modo: 244,12 Hz

Figura 8.14 - Comparação entre Análise Harmônica e Modal; a) Posição 9; b) 4º modo de vibração; c) 7º modo de vibração. (Fonte: Autor, 2020)

A Figura 8.14 relaciona a resposta obtida na análise harmônica para o nó referente à posição 9 (Figura 8.14 a) que é semelhante às posições 5, 6, 7 e 8, onde se constata que as frequências de 156 e 244 Hertz são as mais evidentes com relação à amplitude. E isso permite que se possam relacionar tais valores com o quarto e sétimo modo de vibração, respectivamente, da análise modal que possuem frequências naturais de vibração semelhante (Figura 8.14 b e c).

Ao analisar tais modos de vibração percebe-se que, como os nós referenciados estão em posições no furo do modelo e eles coincidem, na análise modal, com regiões onde se localizam frequências naturais de intensa vibração nessa região para os dois modos mencionados.



Posição 11(156 Hz, 176 Hz)

4º modo: 155,52 Hz

5º modo: 175,68 Hz

(Figura 8.15 - Comparação entre Análise Harmônica e Modal; a) Posição 11; b) 4º modo de vibração; c) 5º modo de vibração. (Fonte: Autor, 2020)

E assim, a Figura 8.15 relaciona a resposta obtida na análise harmônica para o nó referente à posição 11 (Figura 8.15(a)) que é semelhante à posição 10, onde se constata que as frequências de 156 e 176 Hertz são as mais evidentes com relação à amplitude. Permitindo também que se possam relacionar tais valores com o quarto e quinto modo de vibração, respectivamente, da análise modal que possuem frequências naturais de vibração semelhante (Figura 8.15 b e c).

Ao analisar tais modos de vibração percebe-se que, como os nós referenciados estão em posições no braço do modelo e eles coincidem, na análise modal, com regiões onde se localizam frequências naturais de intensa vibração nessa região para os dois modos mencionados.

8.7 - Sintetização de Sinais Sonoros Obtidos Através da Caracterização Experimental

A caracterização experimental desse trabalho é feita através do método de excitação por impulso. E neste método, o corpo de prova é excitado com uma leve pancada e responde com vibrações em suas frequências naturais de acordo com as condições de contorno

impostas. Nesta parte do estudo, objetiva-se analisar características do sinal sonoro emitido ao promover no instrumento modelo tal excitação.

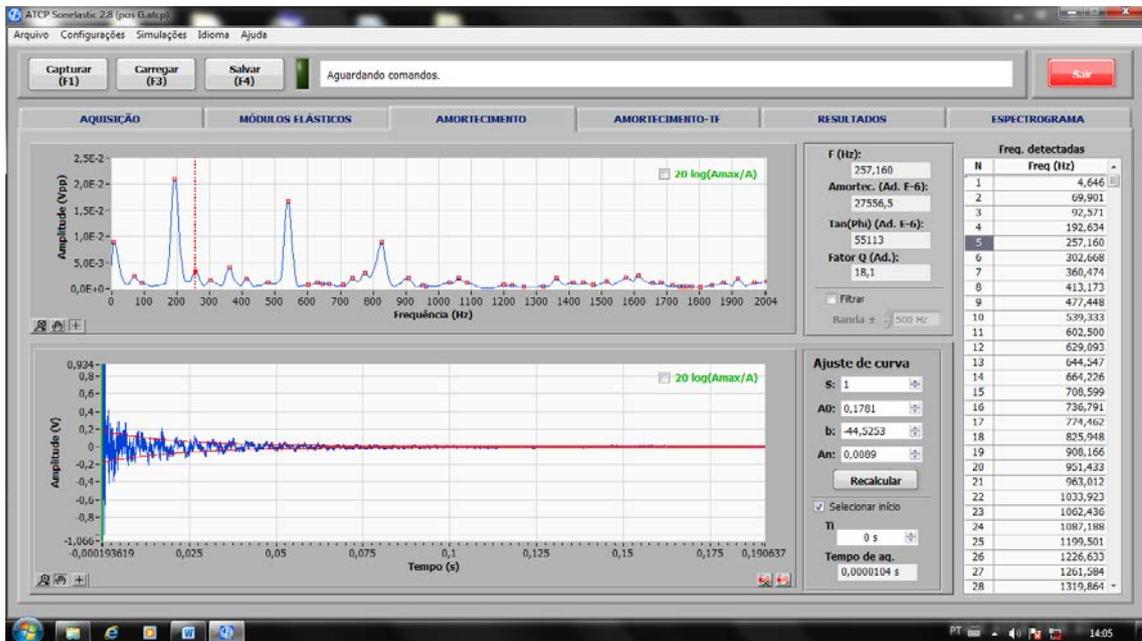


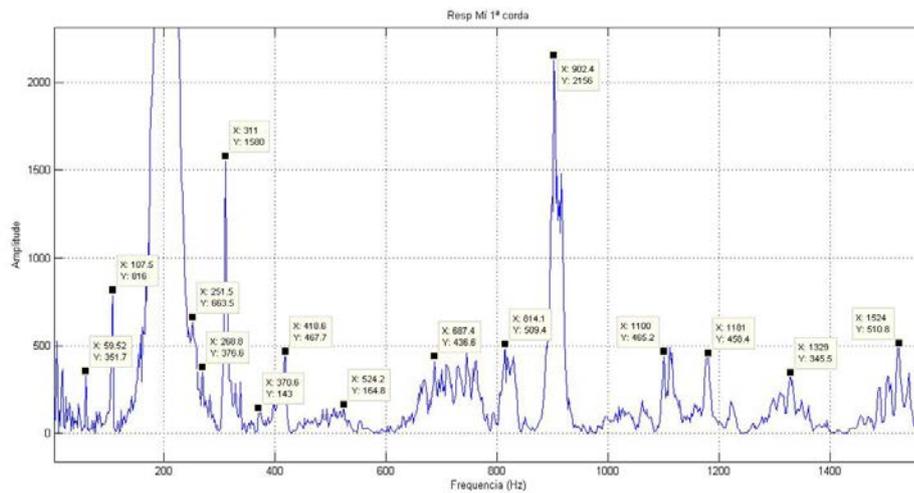
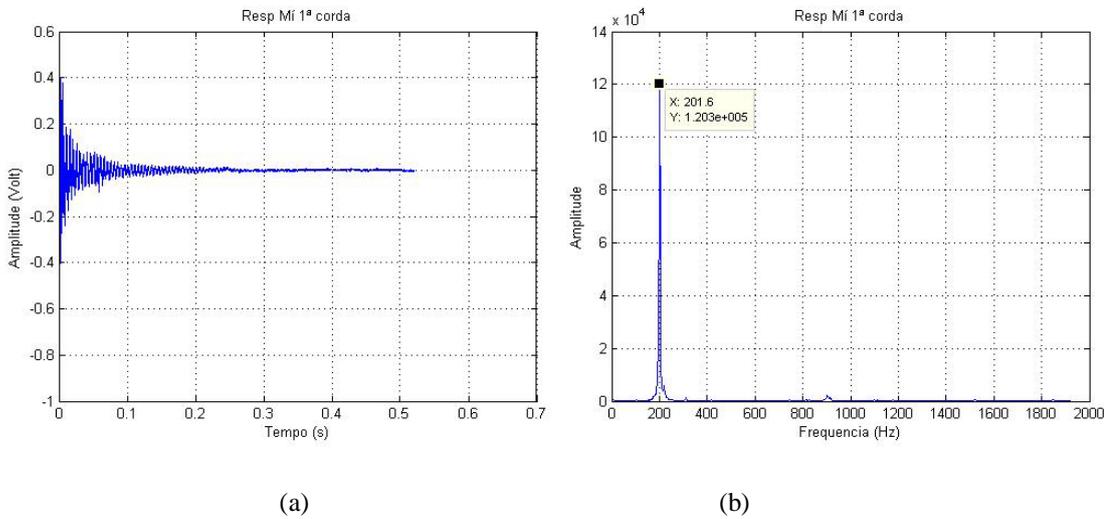
Figura 8.16 - Tela do software sonelastic com resultados referentes à posição da terceira corda do violão (“Sol”).

(Fonte: Autor, 2020)

Para cada excitação feita buscou-se variar a posição no cavalete de acordo com a posição das seis cordas do violão. Com isso foram obtidas respostas no domínio do tempo e frequência através do software do sistema *Sonelastic* (Figura 8.16) que foram salvas em formato de planilha de dados do Excel e transferidas para o *Software Matlab* para serem melhor analisadas. Com isso foi possível também a sintetização dos sinais sonoros de cada excitação feita, o que possibilita melhores análises dos sinais gerados. E assim pode-se analisar melhor, por exemplo, as frequências de baixas amplitudes que podem não ser captadas pelo software *Sonelastic*, tempo de duração do sinal e o próprio som gerado pelo impulso.

A Figura 8.17 (a) mostra o gráfico do sinal referente à excitação impulsiva na posição da primeira corda do violão (“Mi”) no domínio do tempo. A seguir, tem-se a Figura 8.17 (b) evidenciando a frequência de maior amplitude (201,6 Hertz) e a Figura 8.16 (c) mostra um

conjunto grande de respostas em frequências naturais com amplitudes menores com relação à anterior com duas em maior evidência, 311 Hertz e 902,4 Hertz,

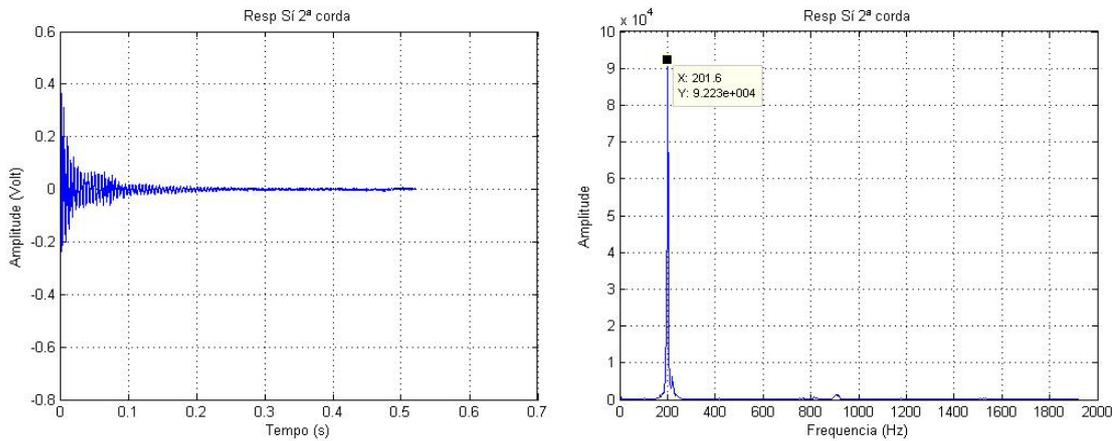


(c)

Figura 8.17 - Sintetização do sinal Impulso na posição da primeira corda do violão. (a) No domínio do tempo; (b) Frequência de maior amplitude; (c) Frequências de baixas amplitudes. (Fonte: Autor, 2020)

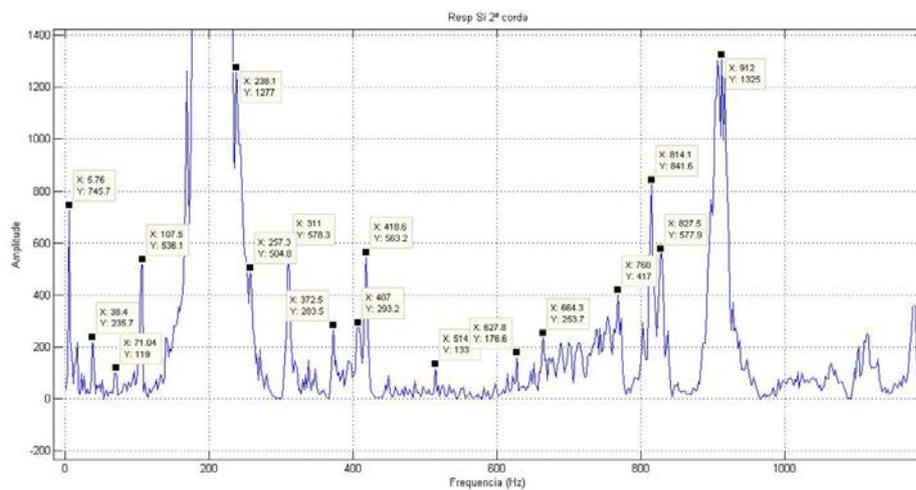
Efeito semelhante acontece para a excitação na posição referente à segunda corda (“S1”). A Figura 8.18 (a) mostra o gráfico do sinal referente à resposta do instrumento no domínio do tempo, na Figura 8.18 (b) evidencia-se a frequência de maior amplitude (201,6 Hertz) e a Figura 8.18 (c) mostra também um conjunto grande de respostas em frequências

naturais com amplitudes menores com relação à anterior destacando-se as frequências 814,1 Hertz e 912 Hertz.



(a)

(b)



(c)

Figura 8.18 - Sintetização do sinal Impulso na posição da segunda corda do violão. (a) No domínio do tempo; (b) Frequência de maior amplitude; (c) Frequências de baixas amplitudes. (Fonte: Autor, 2020)

A mesma análise é feita para a excitação na posição referente à terceira corda (“Sol”). A Figura 8.19 (a) mostra o gráfico do sinal referente à resposta do instrumento no domínio do tempo, na Figura 8.19 (b) evidencia-se a frequência de maior amplitude (201,6 Hertz) e a Figura 8.19 (c) mostra também um conjunto grande de respostas em frequências naturais com

amplitudes menores com relação à anterior destacando-se as frequências 812,2 Hertz e 827,5 Hertz.

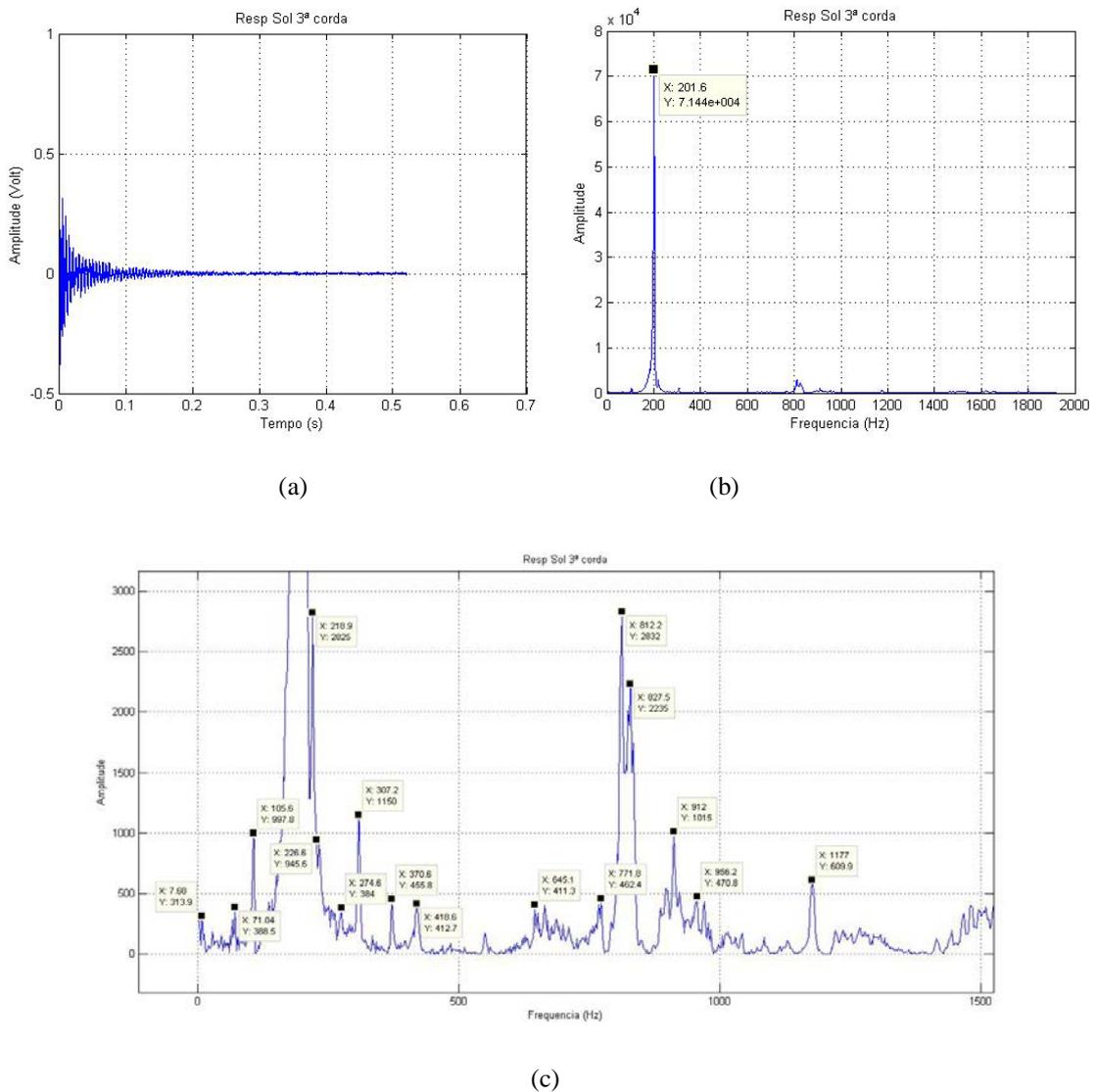


Figura 8.19 - Sintetização do sinal Impulso na posição da terceira corda do violão. (a) No domínio do tempo; (b) Frequência de maior amplitude; (c) Frequências de baixas amplitudes. (Fonte: Autor, 2020)

De modo semelhante tem-se a análise feita para a excitação na posição referente à quarta corda (“Ré”). A Figura 8.20 (a) mostra o gráfico do sinal referente à resposta do instrumento no domínio do tempo, na Figura 8.20 (b) evidencia-se a frequência de maior amplitude (201,6 Hertz) e a Figura 8.20 (c) mostra também um conjunto grande de respostas

em frequências naturais com amplitudes menores com relação à anterior destacando-se as frequências 309,1 Hertz, 812,2 Hertz e 827,5 Hertz.

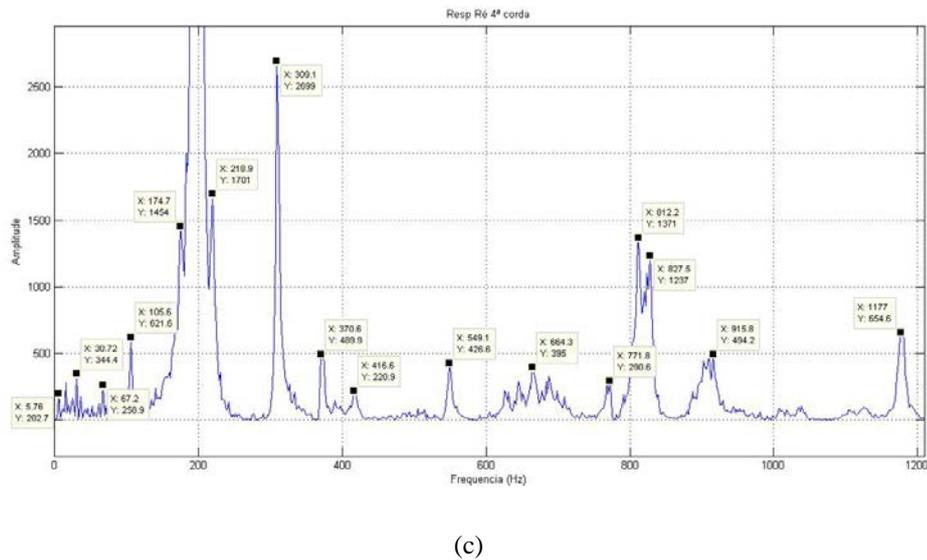
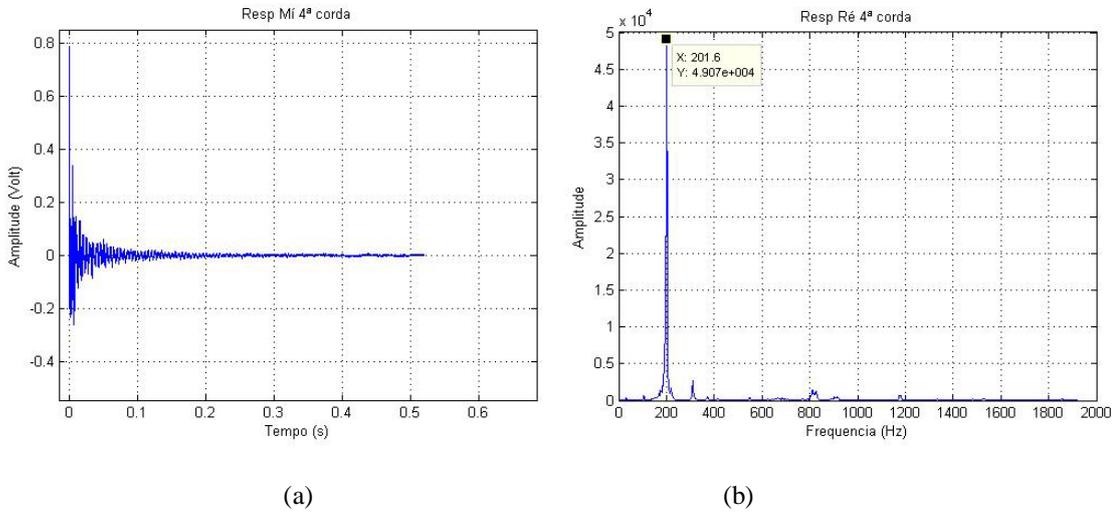
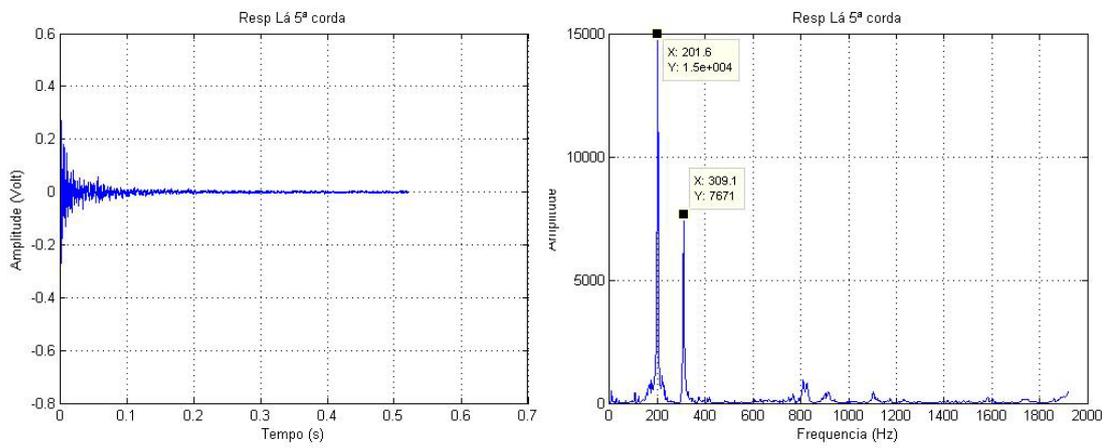


Figura 8.20 - Sintetização do sinal Impulso na posição da quarta corda do violão. (a) No domínio do tempo; (b) Frequência de maior amplitude; (c) Frequências de baixas amplitudes. (Fonte: Autor, 2020)

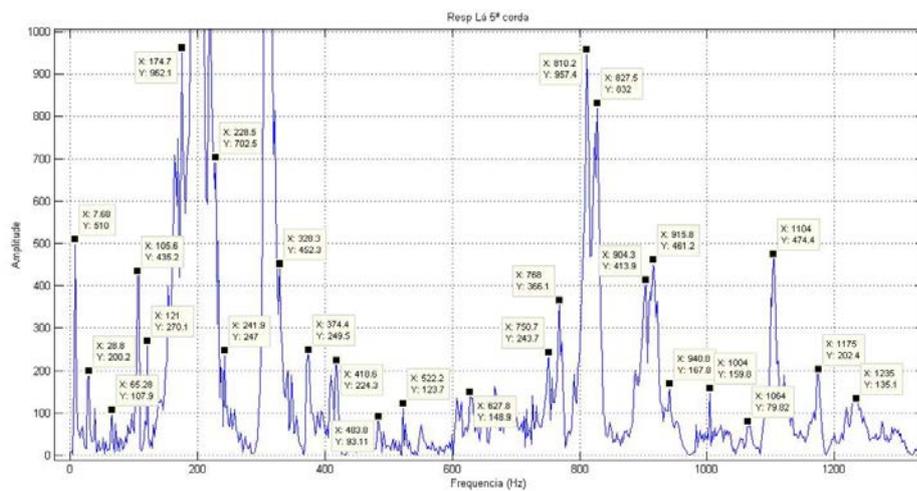
Para a excitação na posição referente à quinta corda (“Lá”) tem-se a relação de amplitudes um pouco diferente. A Figura 8.21 (a) mostra o gráfico do sinal referente à resposta do instrumento no domínio do tempo, a Figura 8.21 (b) evidencia duas frequências com amplitudes mais elevadas em relação às demais (201,6 Hertz e 309,1 Hertz) e a Figura

8.21 (c) mostra também um conjunto grande de respostas em frequências naturais com amplitudes menores com relação à anterior destacando-se as frequências 810,2 Hertz e 827,5 Hertz.



(a)

(b)



(c)

Figura 8.21 - Sintetização do sinal Impulso na posição da quinta corda do violão. (a) No domínio do tempo; (b) Frequência de maior amplitude; (c) Frequências de baixas amplitudes. (Fonte: Autor, 2020)

E, por último, tem-se a análise do impulso na posição referente à sexta corda (“Mf”) que mostra na Figura 8.22 (a) o gráfico do sinal referente à resposta do instrumento no domínio do tempo. A Figura 8.22 (b) evidencia a frequência com amplitude mais elevada em relação às demais (201,6 Hertz) e a Figura 8.22 (c) mostra também um conjunto grande de

respostas em frequências naturais com amplitudes menores com relação à anterior destacando-se as frequências 311,0 Hertz; 902,4 Hertz e 915,8 Hertz.

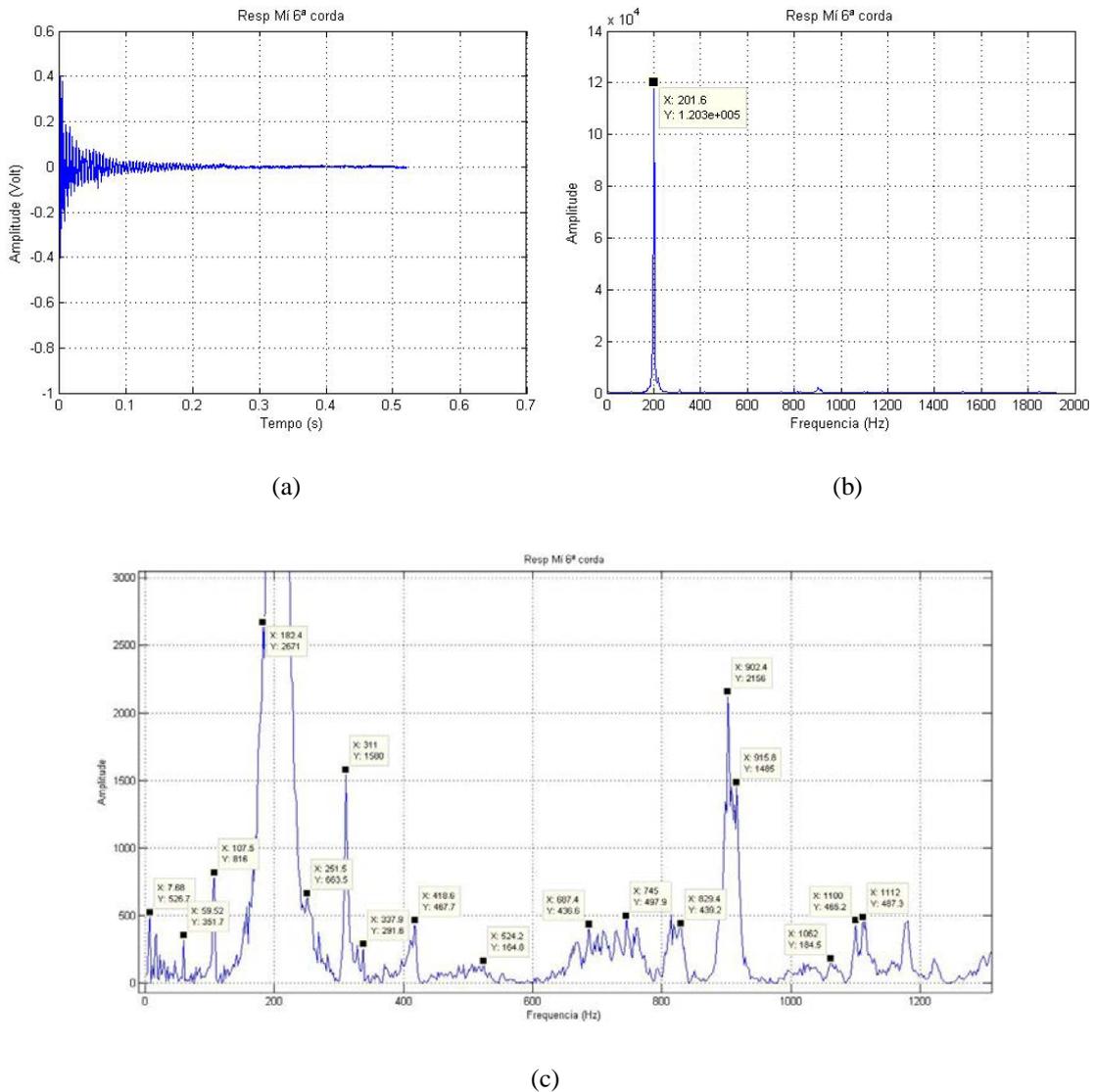


Figura 8.22 - Sintetização do sinal Impulso na posição da sexta corda do violão. (a) No domínio do tempo; (b) Frequência de maior amplitude; (c) Frequências de baixas amplitudes. (Fonte: Autor, 2020)

De modo geral, percebe-se que a excitação por impulso no cavalete é capaz de excitar várias frequências naturais no modelo mostrando que esta parte do instrumento é o responsável direto por irradiar a vibração das cordas para todas as partes do instrumento, que disciplinada pelos leques harmônicos resultam no som produzido pelo instrumento, ao promover deslocamento de ar pela boca.

O que não se pode afirmar é que todas as possíveis frequências naturais são atingidas com a excitação da maneira que foi feita neste trabalho, pelo fato de ter sido feita manualmente, embora tenha se tentado manter o mesmo ritmo de batida na tentativa de não alterar a força emitida.

Um dado relevante que se constata é que a frequência de maior amplitude (201,6 Hertz) se repetiu nas seis análises, com poucas diferenças de amplitudes. Esta frequência, provavelmente, é da vibração principal referente à batida no cavalete que provoca todas as demais da maneira que foi feita.

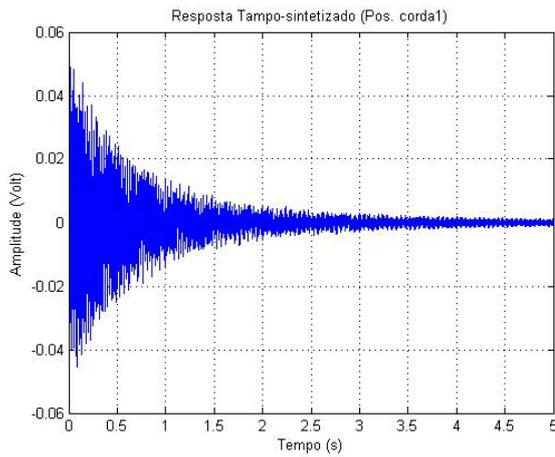
Ao transportar os dados para o software Matlab foi possível a sintetização matemática de sinais sonoros audíveis salvos em arquivos, anexo nesta tese. Tais sinais servirão para se fazer comparações com outros sintetizados a partir da análise harmônica.

8.8 - Sintetização de Sinais Sonoros Obtidos Através da Análise Harmônica

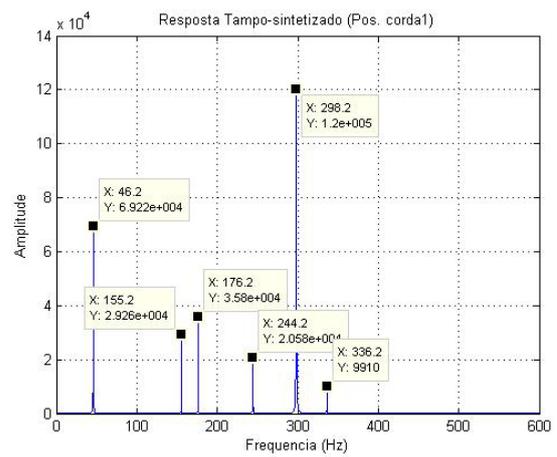
A análise harmônica é usada para determinar as respostas da estrutura do modelo a pequenas cargas inseridas no cavalete que simulem um pequeno pulso provocado pela onda vibratória da corda. E os resultados são analisados em termos de amplitude versus frequência através de algumas operações matemáticas elaboradas com auxílio do *software Matlab*. E utilizando a equação característica de um sinal via transformada de Fourier (FFT) (equação 6.6), foi possível desenvolver sinais com respostas nos domínios do tempo e frequência, sintetizando também o sinal sonoro que é salvo em arquivos anexos a esta tese.

Foram elaborados ou sintetizados seis sinais sonoros com as devidas respostas no domínio do tempo e frequência em simulações matemáticas utilizando a Equação 6.6.

A primeira resposta sonora sintetizada é referente à resposta obtida com uma carga impulsiva feita no cavalete na posição da corda 1 (“Mí”) onde tem-se na Figura 8.23 (a) a resposta no domínio do tempo e na Figura 8.23 (b) a resposta no domínio da frequência.



(a)



(b)

Figura 8.23 -Sintetização da Resposta no tempo de excitação na posição da Primeira corda do violão (Mí). (a)

No domínio do tempo; (b) No domínio da frequência. (Fonte: Autor, 2020)

A segunda resposta sonora sintetizada é referente à resposta obtida com uma carga impulsiva feita no cavalete na posição da corda 2 (“Sí”) onde tem-se na Figura 8.24 (a) a resposta no domínio do tempo e na Figura 8.24 (b) a resposta no domínio da frequência.

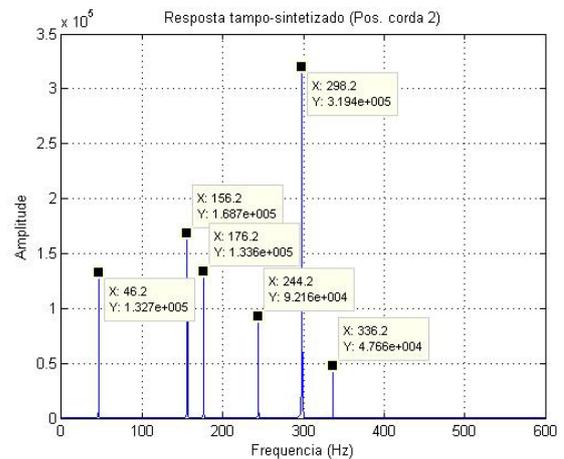
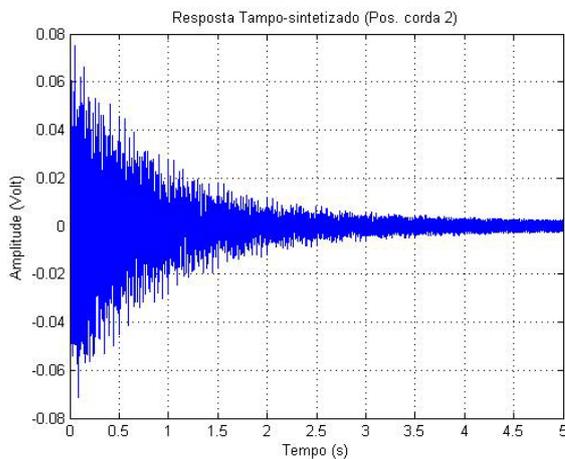


Figura 8.24 -Sintetização da Resposta no tempo de excitação na posição da Segunda corda do violão (Sí). (a) No

domínio do tempo; (b) No domínio da frequência. (Fonte: Autor, 2020)

A terceira resposta sonora sintetizada é referente à resposta obtida com uma carga impulsiva feita no cavalete na posição da corda 3 (“Sol”) onde se tem na Figura 8.25 (a) a resposta no domínio do tempo, e na Figura 8.25 (b) a resposta no domínio da frequência.

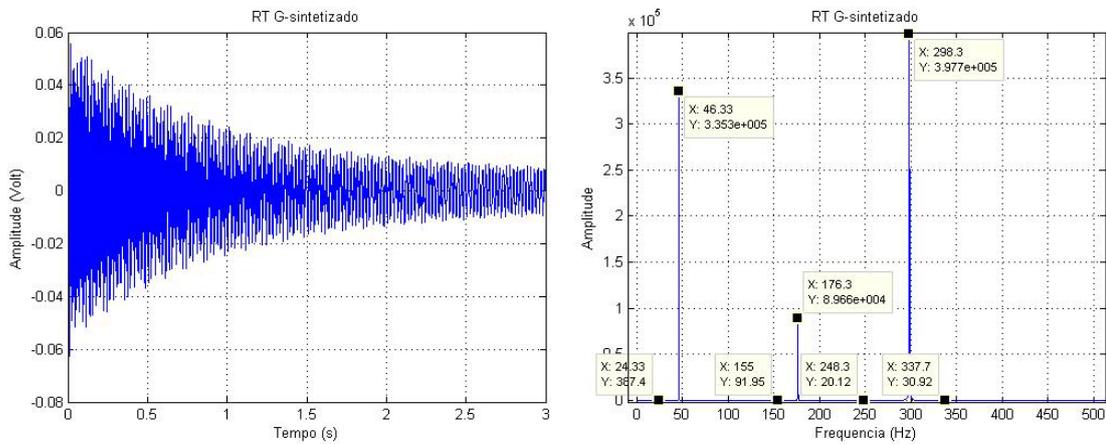


Figura 8.25 -Sintetização da Resposta no tempo de excitação na posição da terceira corda do violão (Sol). (a) No domínio do tempo; (b) No domínio da frequência. (Fonte: Autor, 2020)

A quarta resposta sonora sintetizada é referente à resposta obtida com uma carga impulsiva feita no cavalete na posição da corda 4 (“Ré”) onde se tem na Figura 8.26 (a) a resposta no domínio do tempo, e na Figura 8.26 (b) a resposta no domínio da frequência.

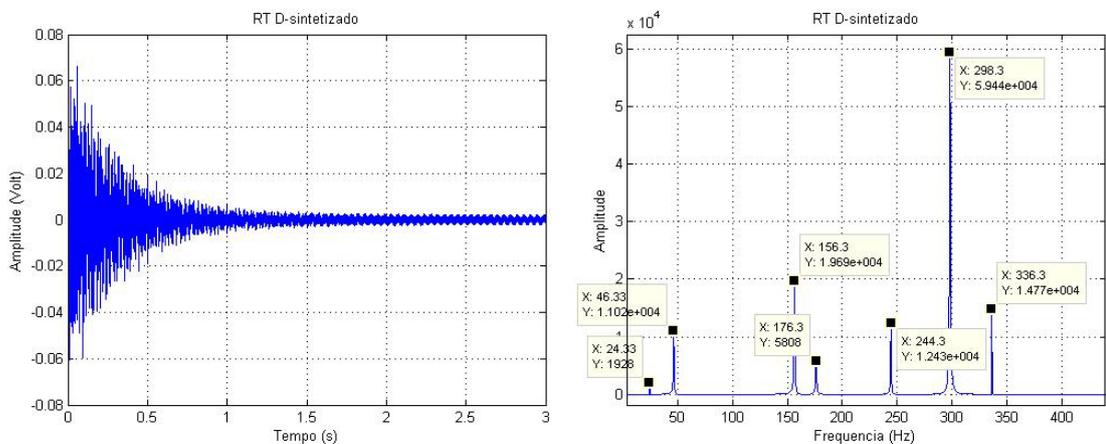


Figura 8.26 - Sintetização da Resposta no tempo de excitação na posição da quarta corda do violão (Ré). (a) No domínio do tempo; (b) No domínio da frequência. (Fonte: Autor, 2020)

A quinta resposta sonora sintetizada é referente à resposta obtida com uma carga impulsiva feita no cavalete na posição da corda 4 (“Lá”) onde se tem na Figura 8.27 (a) a resposta no domínio do tempo, e na Figura 8.27 (b) a resposta no domínio da frequência.

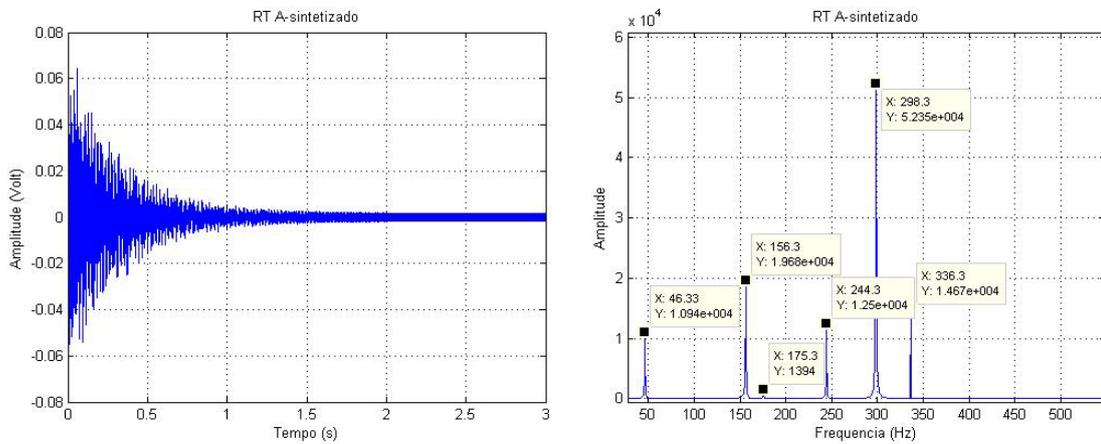


Figura 8.27 -Sintetização da Resposta no tempo de excitação na posição da quinta corda do violão (Lá). (a) No domínio do tempo; (b) No domínio da frequência. (Fonte: Autor, 2020)

E a última resposta sonora sintetizada é referente à resposta obtida na posição da corda 6 (“Mí”) com uma carga impulsiva feita no cavalete onde se tem na Figura 8.28 (a) a resposta no domínio do tempo, e na Figura 8.28 (b) a resposta no domínio da frequência.

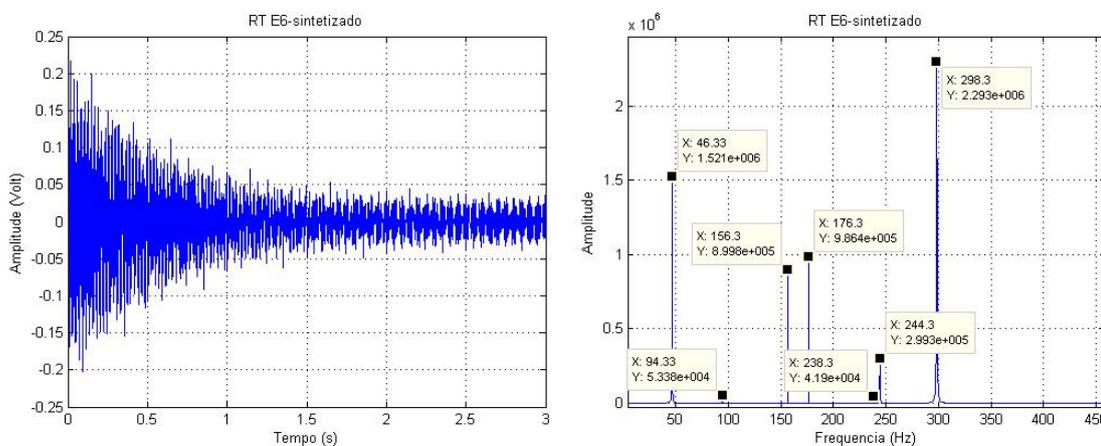


Figura 8.28 - Sintetização da Resposta no tempo de excitação na posição da sexta corda do violão (Mí). (a) No domínio do tempo; (b) No domínio da frequência. (Fonte: Autor, 2020)

Ao analisar o som emitido percebe-se que este tem um volume muito baixo devido, provavelmente à carga impulsiva pequena imposta no modelo pelo cavalete. Resolveu-se então multiplicar em cinquenta vezes o sinal sonoro na rotina em Matlab para se ter um sinal audível. Assim pode-se fazer a comparação pela emissão sonora, que embora seja uma análise de caráter subjetivo, pode-se perceber o sinal sonoro parecido com o som de uma batida semelhante aos sinais obtidos na caracterização experimental pela excitação por impulso.

8.9 - Caracterização e Sintetização da Resposta Através da Deconvolução

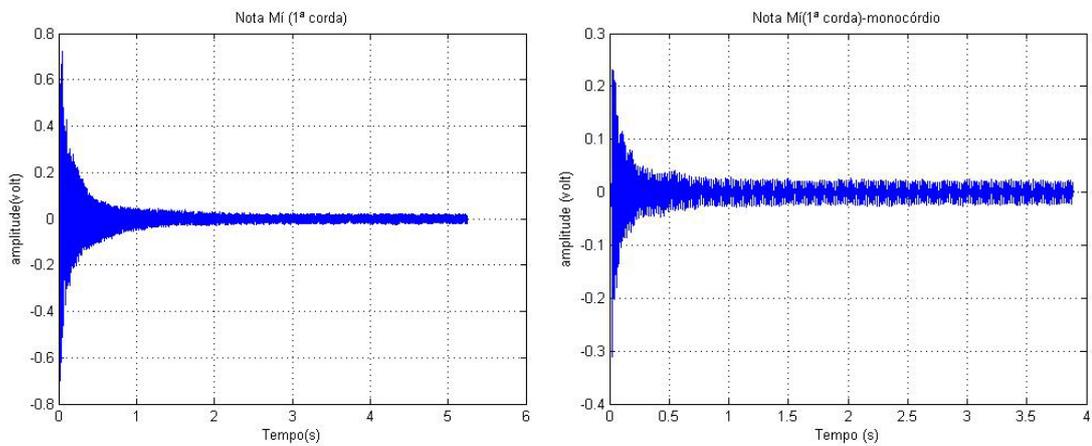
Esta parte do estudo visa obter as respostas em termos de amplitude versus frequência, separando do sinal sonoro emitido por uma corda do instrumento e o sinal referente à mesma corda gravada separadamente ao ser excitado no dispositivo auxiliar que simula o braço denominado “monocórdio”, através da deconvolução.

Os resultados são exibidos a seguir para as seis cordas do instrumento em gráficos no domínio do tempo e frequência e sinais sonoros anexos à tese.

A Figura 8.29 (a) apresenta os resultados no domínio do tempo para excitação da primeira corda denominada “M1” no violão, e a Figura 8.30, apresenta após aplicação da transformada rápida de Fourier (FFT), os resultados no domínio da frequência onde pode-se identificar um pico em 329 Hertz que é a frequência média característica de vibração dessa corda com a devida tensão de afinação.

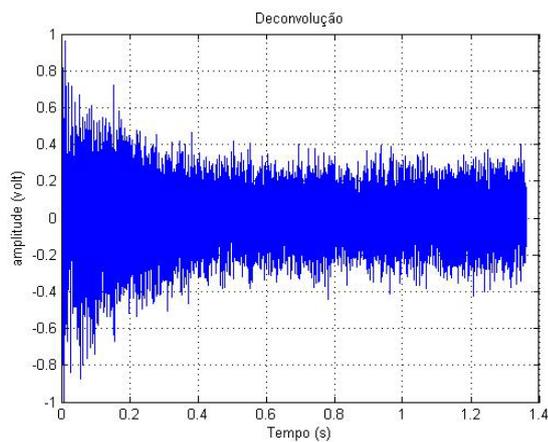
Já na Figura 8.29 (b), observa-se sinal no domínio do tempo para a mesma corda excitada separadamente no dispositivo auxiliar, e na Figura 8.31 a resposta no domínio da frequência pós FFT. E após a aplicação da operação de deconvolução, obtém-se o sinal resposta do instrumento no domínio do tempo na Figura 8.29 (c), e no domínio da frequência na Figura 8.32.

Neste primeiro resultado, referente à primeira corda, pode-se perceber a grande quantidade de frequências excitadas, algumas com picos de amplitude maiores, mais evidentes, mas há também várias frequências com amplitudes menores compondo a resposta.



(a)

(b)



(c)

Figura 8.29- Sinal da primeira corda no domínio do tempo. (a) No violão; (b) No monocórdio; (c) Deconvolução

Primeira corda no domínio do tempo. (Fonte: Autor, 2020)

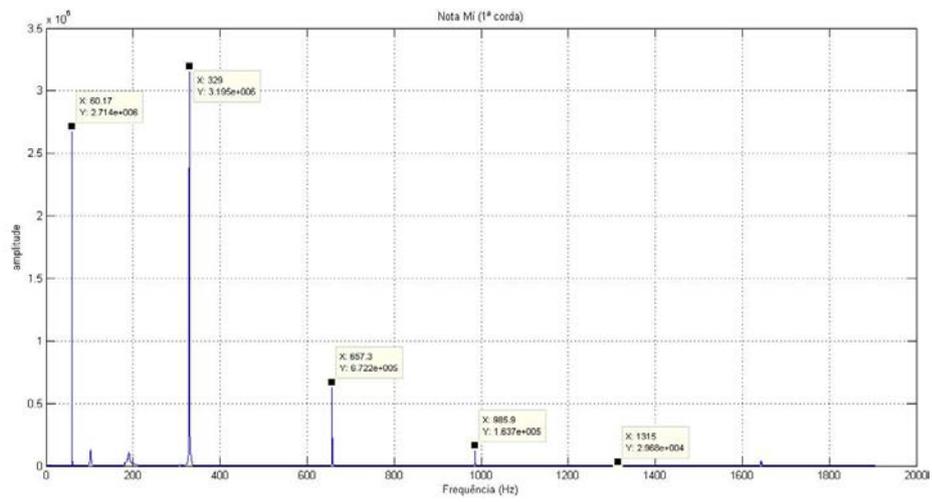


Figura 8.30 - Sinal da primeira corda no domínio da frequência no violão. (Fonte: Autor, 2020)

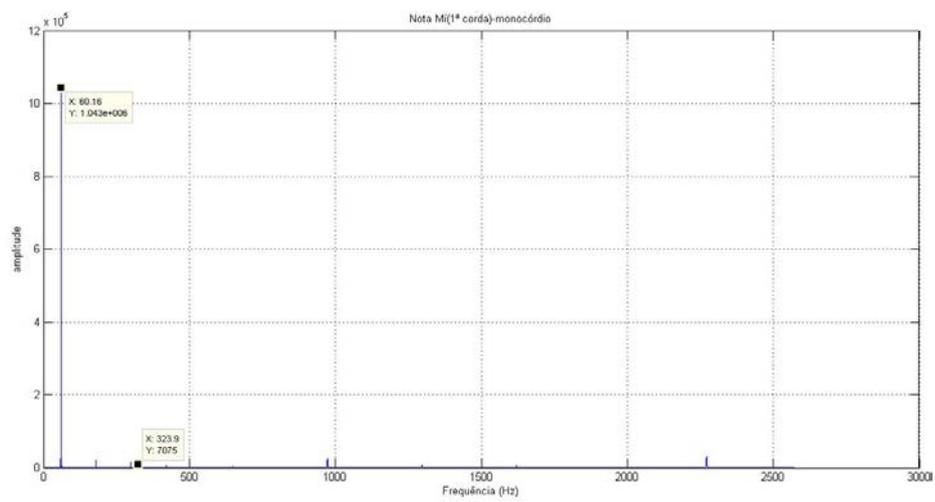


Figura 8.31 - Sinal da primeira corda no domínio da frequência no monocórdio. (Fonte: Autor, 2020)

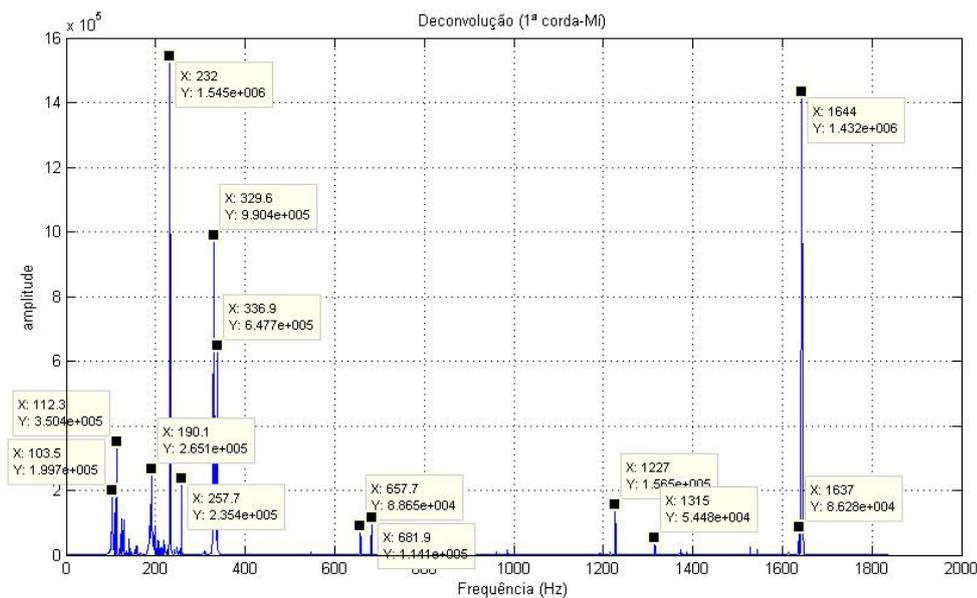
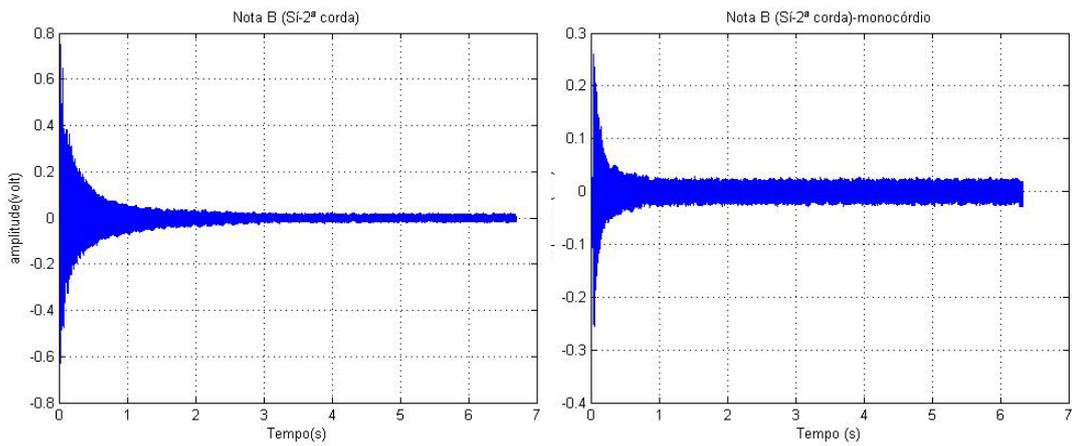


Figura 8.32 - Deconvolução da primeira corda no domínio da frequência. (Fonte: Autor, 2020)

A Figura 8.33 (a) apresenta os resultados no domínio do tempo para excitação da segunda corda denominada “Sí” no violão e a Figura 8.34 apresenta, após aplicação da transformada rápida de Fourier (FFT), os resultados no domínio da frequência onde pode-se identificar um pico em 246 Hertz que é a frequência média característica de vibração dessa corda com a devida tensão de afinação.

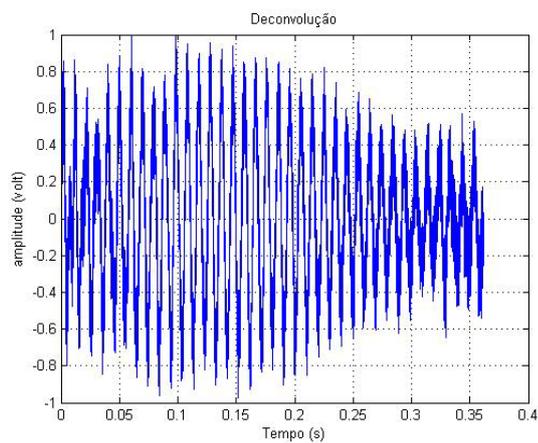
Já na Figura 8.33 (b), observa-se sinal no domínio do tempo para a mesma corda excitada separadamente no dispositivo auxiliar, e na Figura 8.35 a resposta no domínio da frequência pós FFT. E após a aplicação da operação de deconvolução, obtém-se o sinal resposta do instrumento no domínio do tempo na Figura 8.33 (c), e no domínio da frequência na Figura 8.36.

Neste segundo resultado, referente à segunda corda, pode-se perceber várias frequências excitadas, algumas com picos de amplitude maiores, mais evidentes, e outras de amplitudes menores em menor quantidade em relação à resposta da primeira corda.



(a)

(b)



(c)

Figura 8.33- Sinal da segunda corda no domínio do tempo. (a) No violão; (b) No monócordio; (c) Deconvolução segunda corda no domínio do tempo. (Fonte: Autor, 2020)

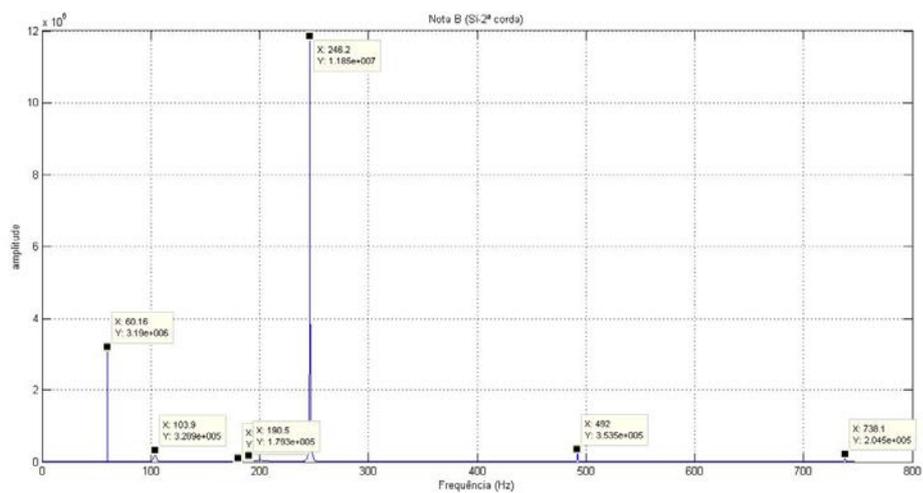


Figura 8.34 - Sinal da segunda corda no domínio da frequência no violão. (Fonte: Autor, 2020)

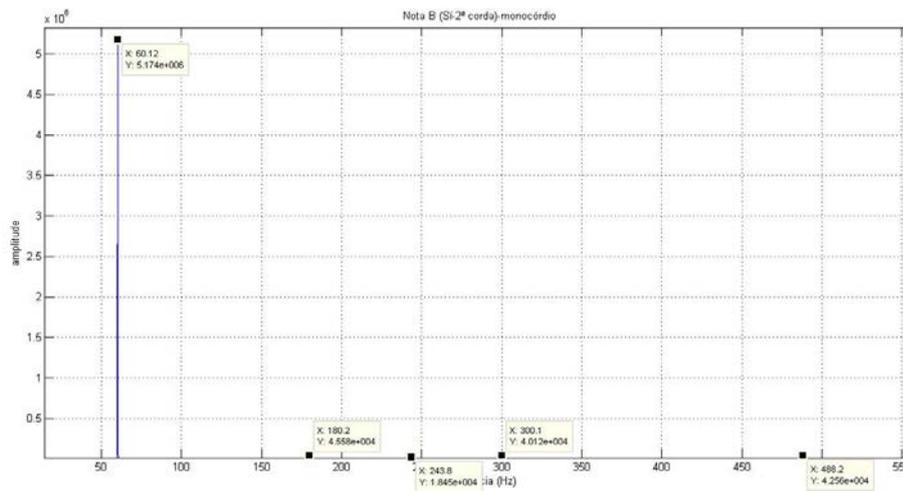


Figura 8.35 - Sinal da segunda corda no domínio da frequência no monocórdio. (Fonte: Autor, 2020)

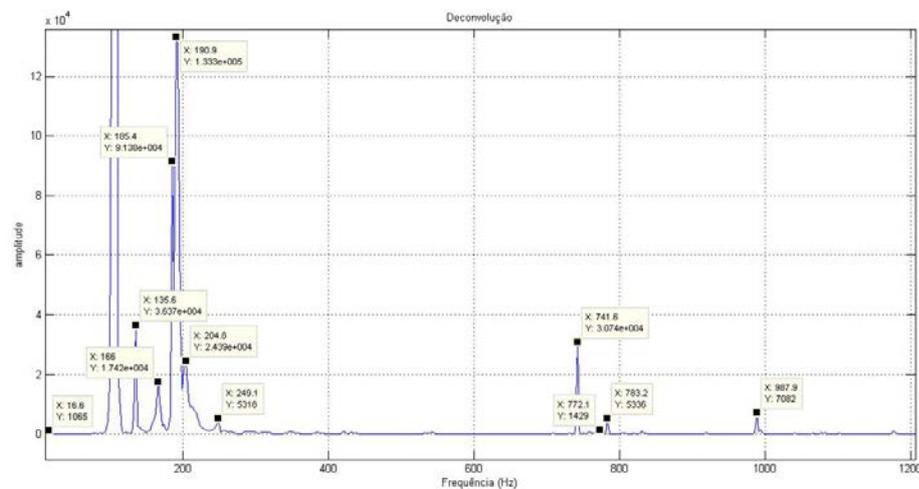


Figura 8.36 - Deconvolução da segunda corda no domínio da frequência. (Fonte: Autor, 2020)

A Figura 8.37 (a) apresenta os resultados no domínio do tempo para excitação da terceira corda denominada “Sol” no violão e a Figura 8.38 apresenta, após aplicação da transformada rápida de Fourier (FFT), os resultados no domínio da frequência onde pode-se identificar um pico em 196 Hertz que é a frequência média característica de vibração dessa corda com a devida tensão de afinação.

Já na Figura 8.37 (b), observa-se sinal no domínio do tempo para a mesma corda excitada separadamente no dispositivo auxiliar, e na Figura 8.39 a resposta no domínio da frequência pós FFT. E após a aplicação da operação de deconvolução, obtém-se o sinal

resposta do instrumento no domínio do tempo na Figura 8.37 (c), e no domínio da frequência na Figura 8.40.

Neste terceiro resultado, referente à terceira corda, pode-se perceber três frequências com picos de amplitude maiores, mais evidentes (103,7 Hz; 176,3 Hz; 191,1 Hz), e outras de amplitudes menores em menor quantidade em relação às respostas das cordas anteriores.

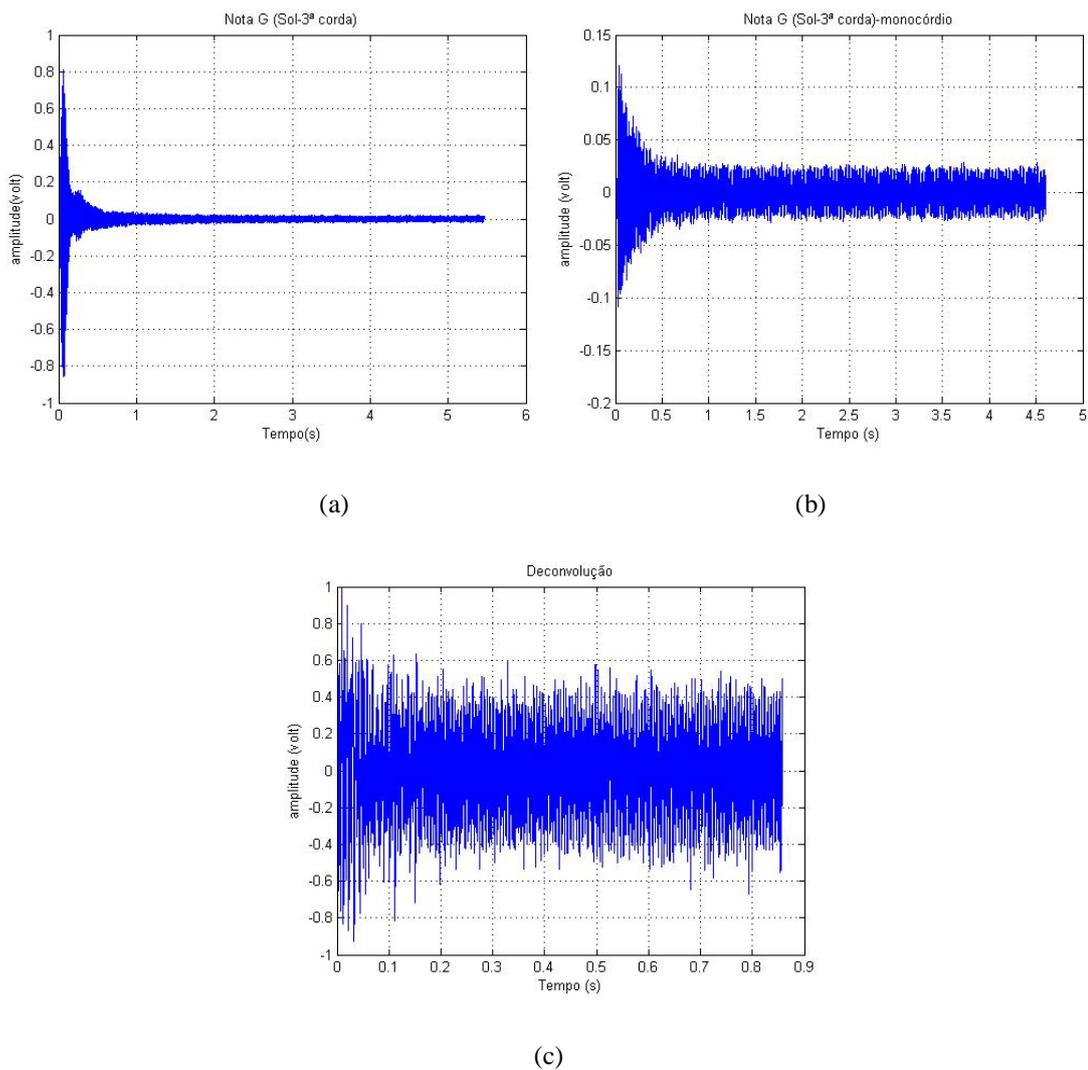


Figura 8.37- Sinal da terceira corda no domínio do tempo. (a) No violão; (b) No monocórdio; (c) Deconvolução terceira corda no domínio do tempo. (Fonte: Autor, 2020)

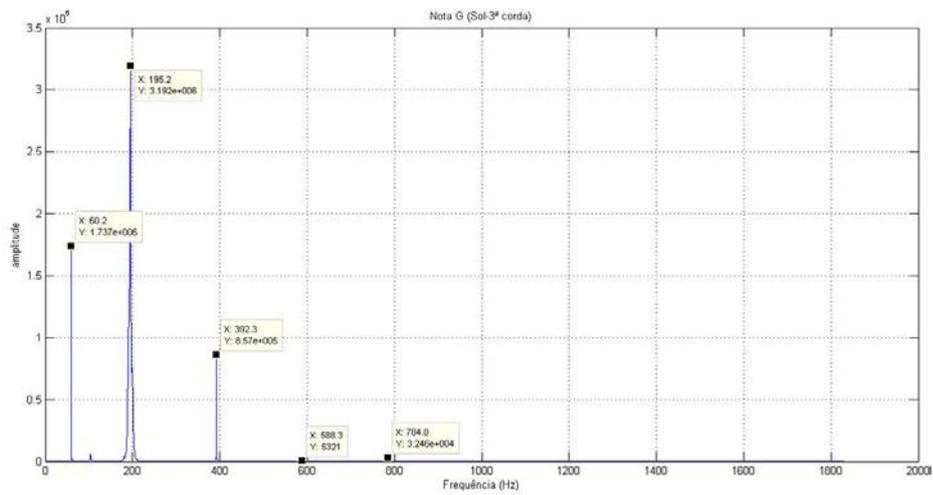


Figura 8.38 - Sinal da terceira corda no domínio da frequência no violão. (Fonte: Autor, 2020)

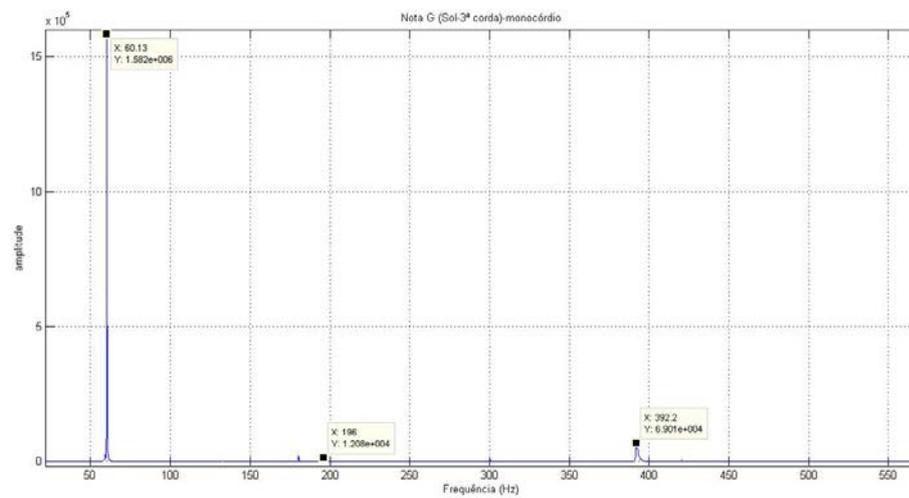


Figura 8.39 - Sinal da terceira corda no domínio da frequência no monocórdio. (Fonte: Autor, 2020)

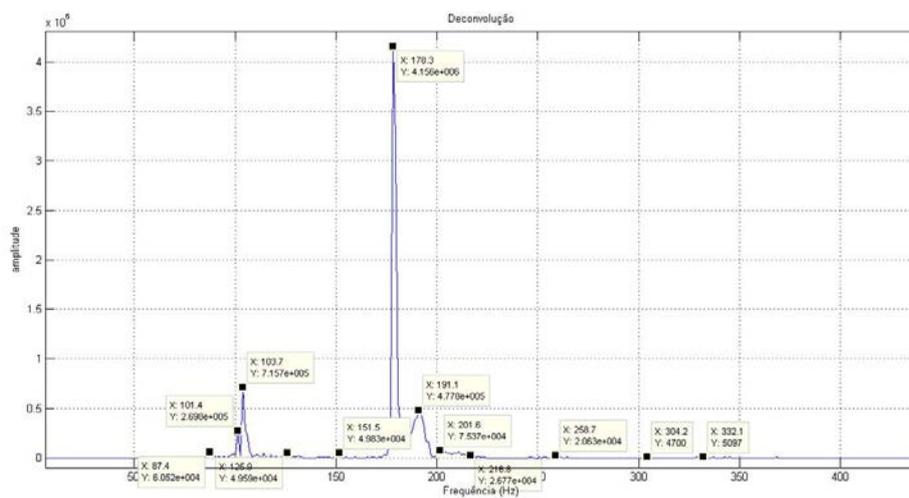
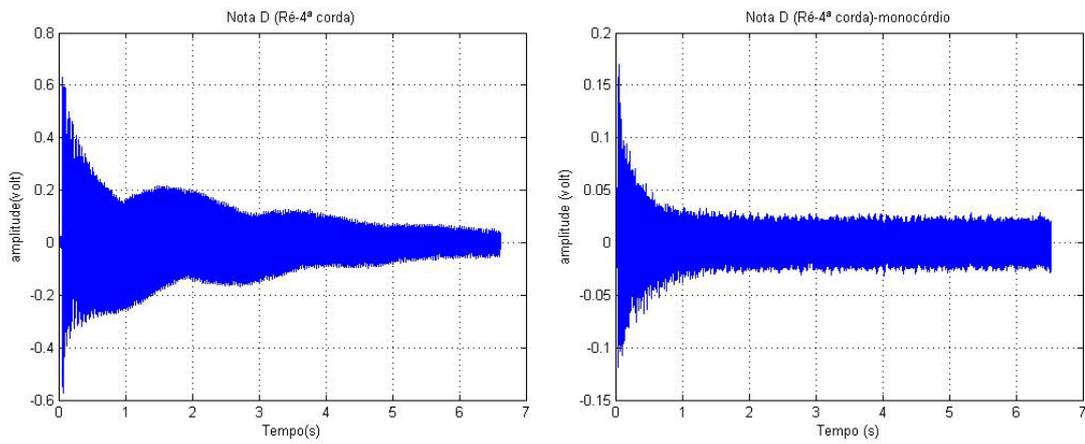


Figura 8.40 - Deconvolução da terceira corda no domínio da frequência. (Fonte: Autor, 2020)

A Figura 8.41 (a) apresenta os resultados no domínio do tempo para excitação da quarta corda denominada “Ré” no violão, e a Figura 8.42 apresenta, após aplicação da transformada rápida de Fourier (FFT), os resultados no domínio da frequência onde pode-se identificar um pico em 147 Hertz que é a frequência média característica de vibração dessa corda com a devida tensão de afinação.

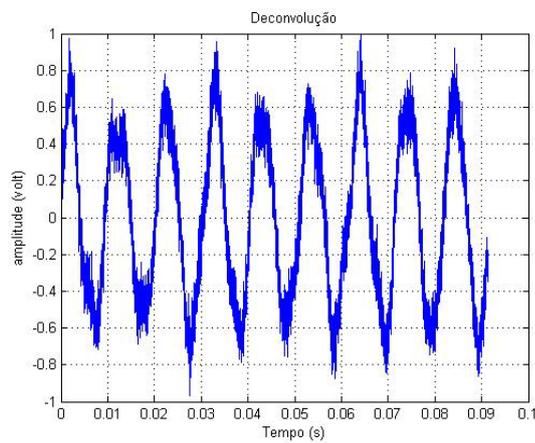
Já na Figura 8.41 (b) observa-se sinal no domínio do tempo para a mesma corda excitada separadamente no dispositivo auxiliar, e na Figura 8.43 a resposta no domínio da frequência pós FFT. E após a aplicação da operação de deconvolução, obtém-se o sinal resposta do instrumento no domínio do tempo na Figura 8.41 (c), e no domínio da frequência na Figura 8.44.

Neste quarto resultado, referente à quarta corda, pode se perceber a ocorrência de apenas uma frequência com pico de amplitude maior, mais evidente (109,5 Hz) e também outras de amplitudes menores em menor quantidade em relação às respostas das duas cordas anteriores.



(a)

(b)



(c)

Figura 8.41 - Sinal da quarta corda no domínio do tempo. (a) No violão; (b) No monocórdio; (c) Deconvolução quarta corda no domínio do tempo. (Fonte: Autor, 2020)

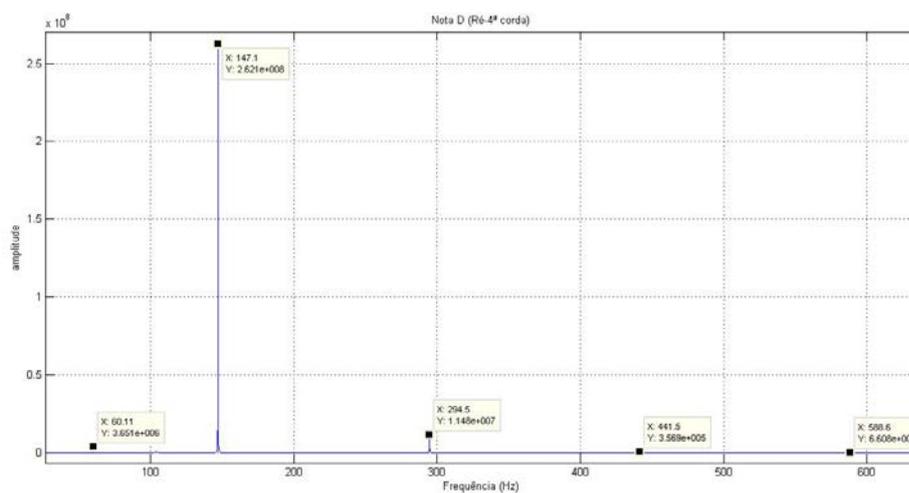


Figura 8.42 - Sinal da quarta corda no domínio da frequência no violão. (Fonte: Autor, 2020)

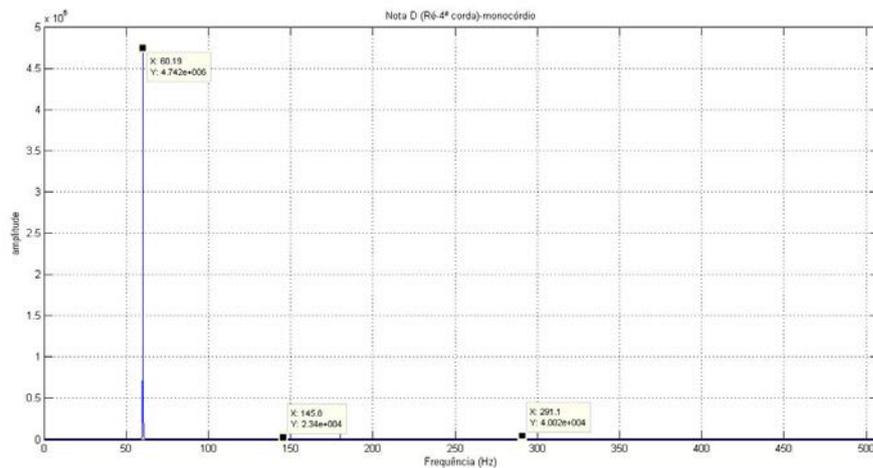


Figura 8.43 - Sinal da quarta corda no domínio da frequência no monocórdio. (Fonte: Autor, 2020)

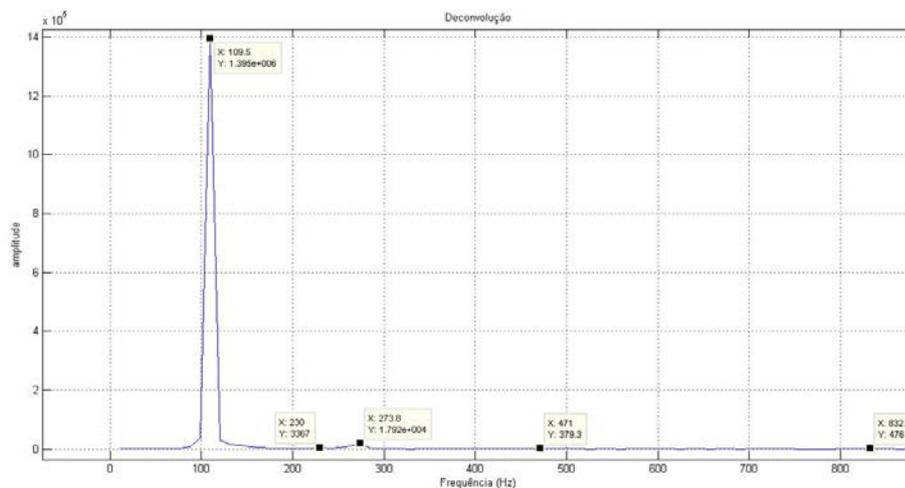


Figura 8.44 - Deconvolução da quarta corda no domínio da frequência. (Fonte: Autor, 2020)

A Figura 8.45 (a) apresenta os resultados no domínio do tempo para excitação da quinta corda denominada “Lá” no violão, e a Figura 8.46 apresenta, após aplicação da transformada rápida de Fourier (FFT), os resultados no domínio da frequência onde pode-se identificar um pico em 110 Hertz que é a frequência média característica de vibração dessa corda com a devida tensão de afinação.

Já na Figura 8.45 (b), observa-se sinal no domínio do tempo para a mesma corda excitada separadamente no dispositivo auxiliar, e na Figura 8.47 a resposta no domínio da frequência pós FFT. E após a aplicação da operação de deconvolução, obtém-se o sinal

resposta do instrumento no domínio do tempo na Figura 8.45 (c), e no domínio da frequência na Figura 8.48.

O quinto resultado, referente à quinta corda, assemelha-se aos resultados da primeira corda onde pode-se perceber a ocorrência de grande quantidade de frequências excitadas, algumas com picos de amplitude maiores, mais evidente, mas há também várias frequências com amplitudes menores compondo a resposta.

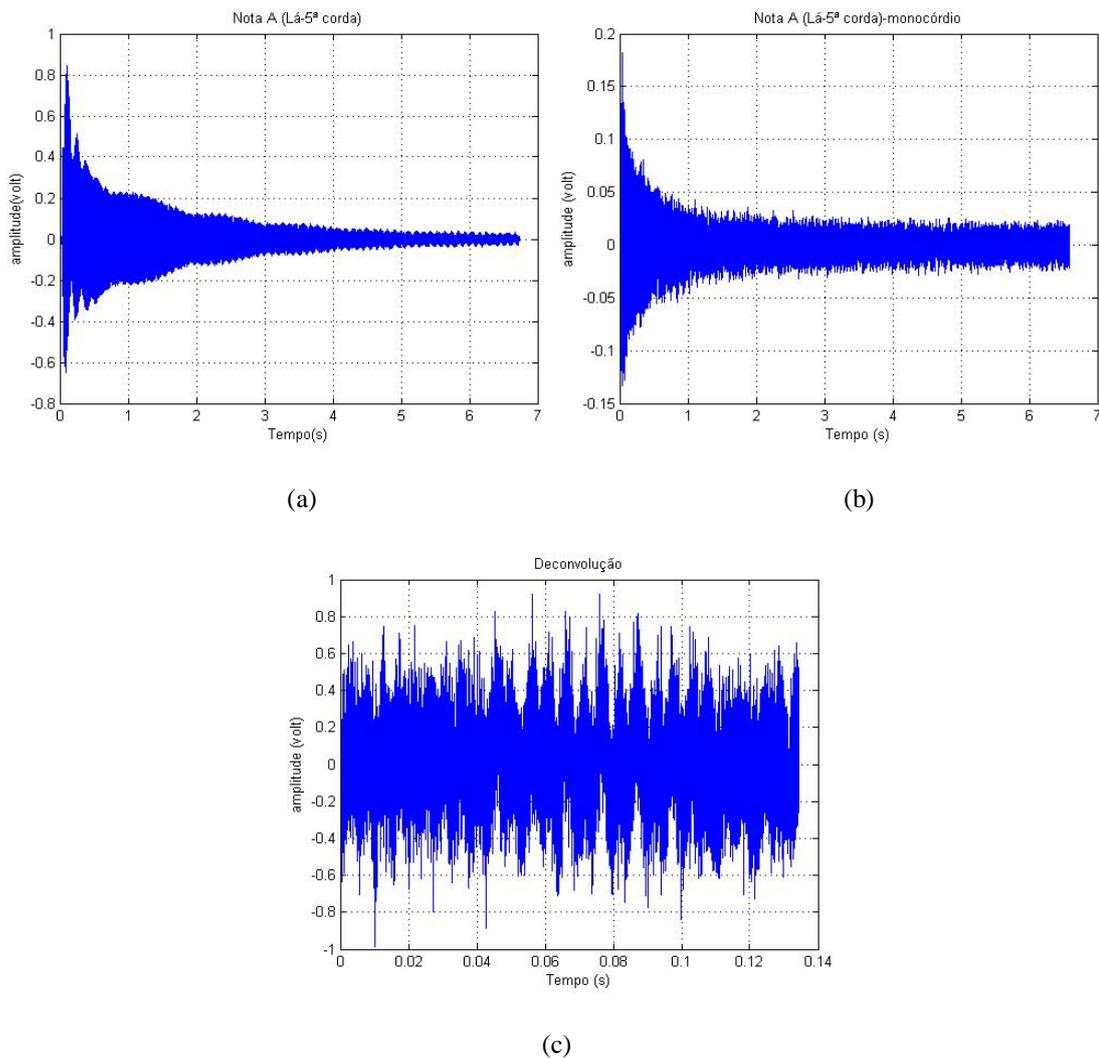


Figura 8.45 - Sinal da quinta corda no domínio do tempo. (a) No violão; (b) No monocórdio; (c) Deconvolução quinta corda no domínio do tempo. (Fonte: Autor, 2020)

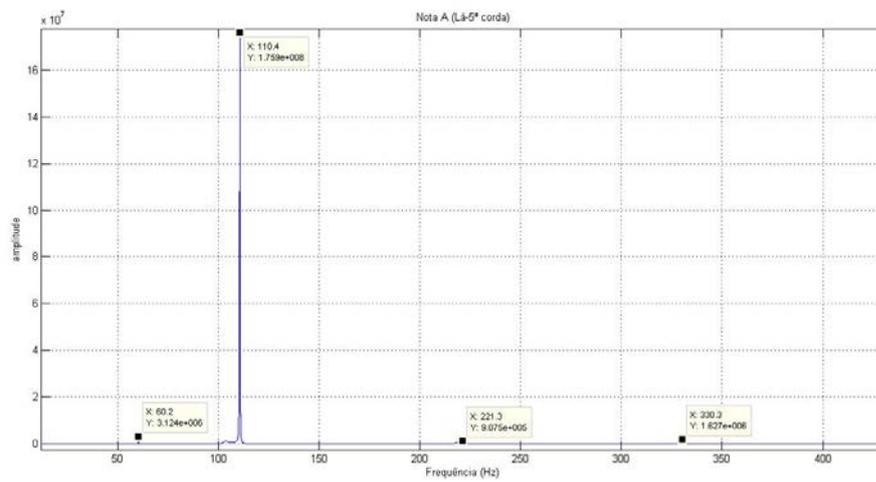


Figura 8.46 - Sinal da quinta corda no domínio da frequência no violão. (Fonte: Autor, 2020)

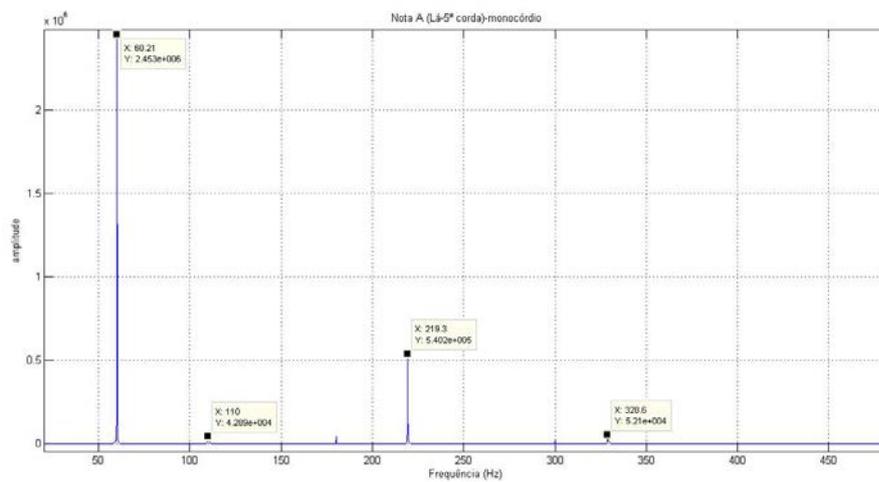


Figura 8.47 - Sinal da quinta corda no domínio da frequência no monocórdio. (Fonte: Autor, 2020)

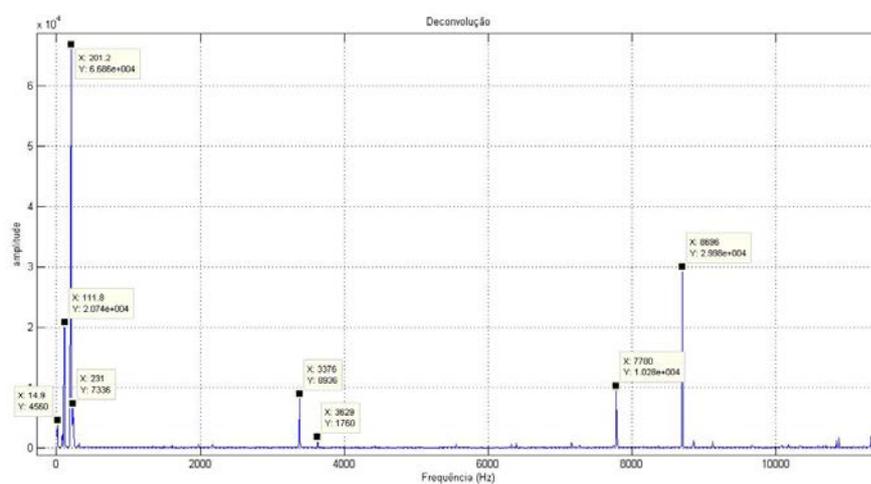
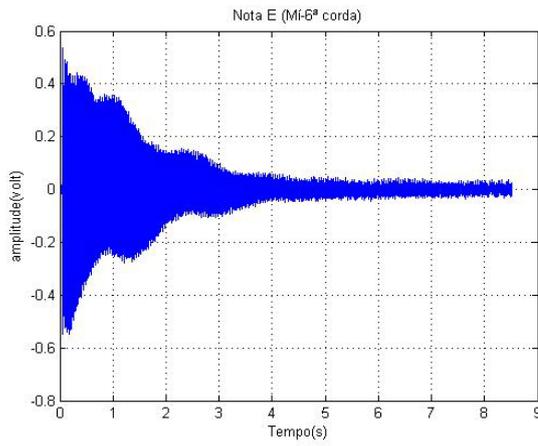


Figura 8.48 - Deconvolução da quinta corda no domínio da frequência. (Fonte: Autor, 2020)

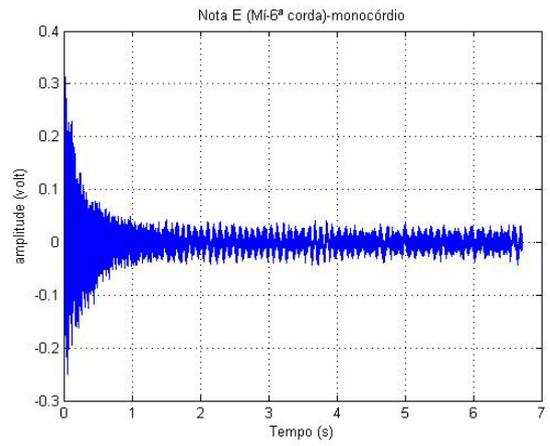
A Figura 8.49 (a) apresenta os resultados no domínio do tempo para excitação da sexta corda denominada “Mí” no violão, e a Figura 8.50 apresenta, após aplicação da transformada rápida de Fourier (FFT), os resultados no domínio da frequência onde pode-se identificar um pico em 82 Hertz que é a frequência média característica de vibração dessa corda com a devida tensão de afinação.

Já na Figura 8.49 (b), observa-se sinal no domínio do tempo para a mesma corda excitada separadamente no dispositivo auxiliar, e na Figura 8.51 a resposta no domínio da frequência pós FFT. E após a aplicação da operação de deconvolução, obtém-se o sinal resposta do instrumento no domínio do tempo na Figura 8.49 (c), e no domínio da frequência na Figura 8.52.

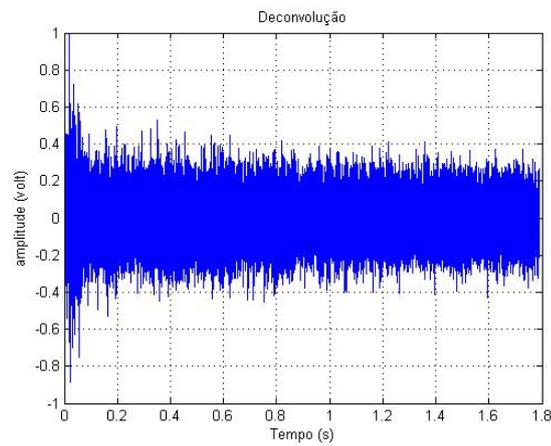
Neste sexto resultado, referente à sexta corda, os resultados são semelhantes aos da primeira e quinta cordas. Pode se perceber também a ocorrência de grande quantidade de frequências excitadas ou ressonantes, algumas com picos de amplitude maiores, mais evidentes, mas há também várias frequências com amplitudes menores compondo a resposta.



(a)



(b)



(c)

Figura 8.49 - Sinal da sexta corda no domínio do tempo. (a) No violão; (b) No monocórdio; (c) Deconvolução sexta corda no domínio do tempo. (Fonte: Autor, 2020)

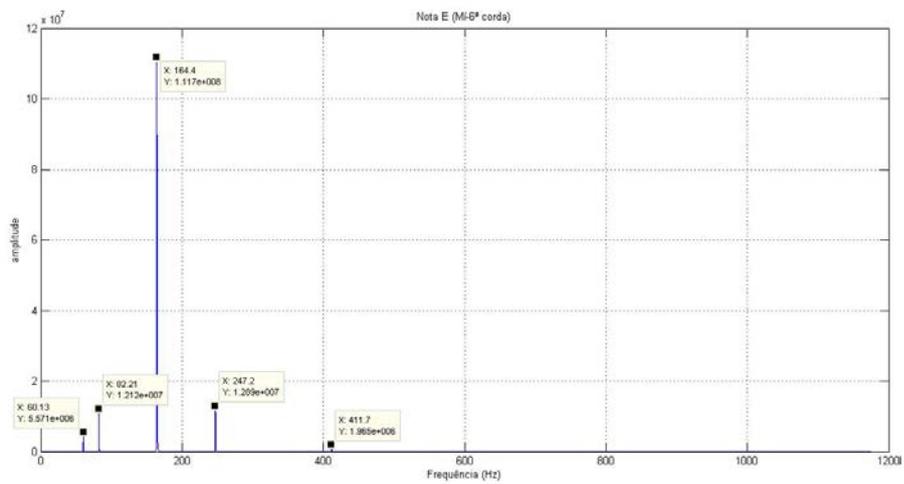


Figura 8.50 - Sinal da sexta corda no domínio da frequência no violão. (Fonte: Autor, 2020)

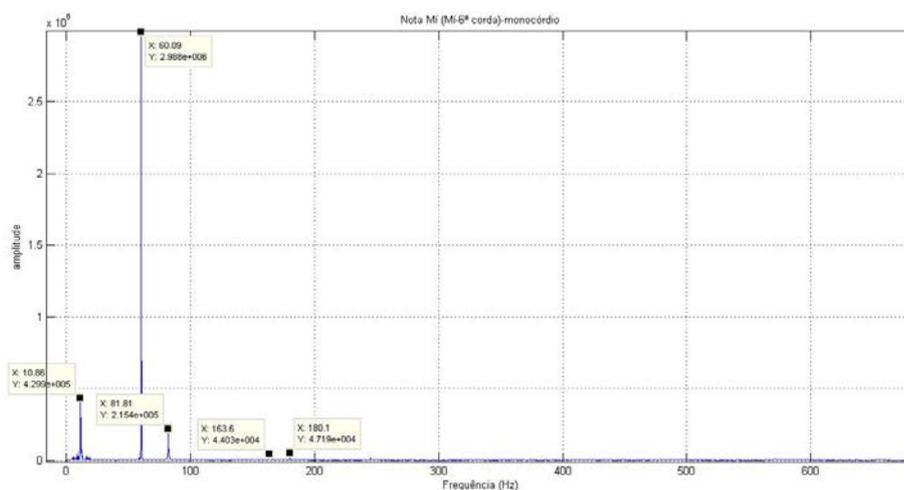


Figura 8.51 - Sinal da sexta corda no domínio da frequência no monocórdio. (Fonte: Autor, 2020)

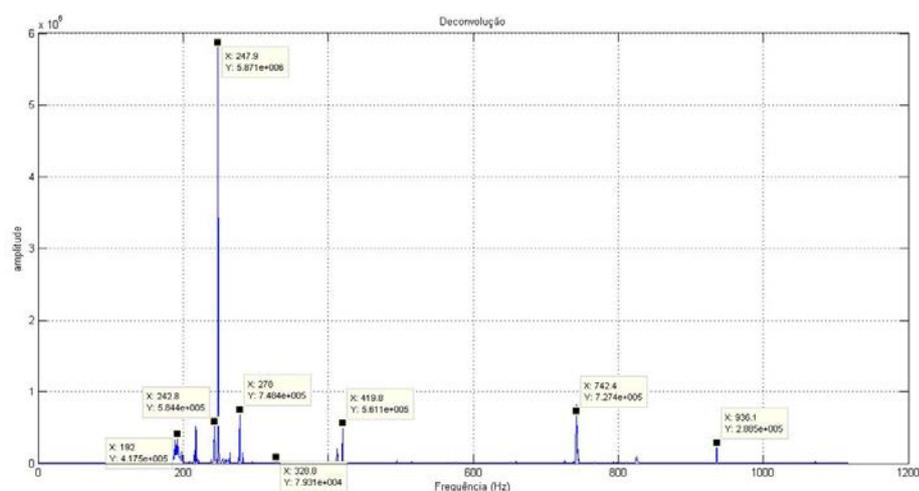


Figura 8.52 - Deconvolução da sexta corda no domínio da frequência. (Fonte: Autor, 2020)

De modo geral a deconvolução apresenta alguns resultados interessantes. A expectativa era que, ao se deconvoluir o sinal de uma corda gravada separadamente de um sinal sonoro gravado de um instrumento, o resultado seria a resposta em frequências naturais de vibração do modelo semelhante às encontradas no processo experimental de excitação por impulso. De certa forma, isso se evidencia na primeira, quinta e sexta cordas nesta análise.

Na análise do sinal sonoro emitido e do gráfico no domínio do tempo de todos os sinais deconvolvidos mostra um decaimento muito rápido, ou seja, o som emitido é de pouca duração e comparando com a excitação por impulso, assemelha-se a uma batida, mas apresenta-se de maneira ruidosa.

Ao se analisar a FFT de todos os sinais das cordas no violão e no dispositivo auxiliar se observa-se que sempre aparece a frequência de 60 Hertz. E ela é mais evidente no sinal da corda gravada fora do instrumento. Essa frequência provavelmente é a frequência da rede elétrica já que os sons foram gravados e processados digitalmente e ela acabou aparecendo no gráfico. Mas, aparentemente, ela não exerce nenhuma interferência no resultado final da deconvolução, sendo suprimida matematicamente por aparecer nos dois sinais deconvolvidos.

8.10 - Comparação das Respostas em Frequência pela Excitação por Impulso e Deconvolução

Para essa avaliação são usados dados referentes à deconvolução do sinal da primeira corda do instrumento e comparação com resultados obtidos da excitação por impulso na posição relativa também da primeira corda no cavalete do violão.

Para a excitação por impulso são observadas as frequências obtidas diretamente no software (Figura 8.53) e através do processamento dos sinais em Matlab como mostrado anteriormente na Figura 8.18 (b) e (c).

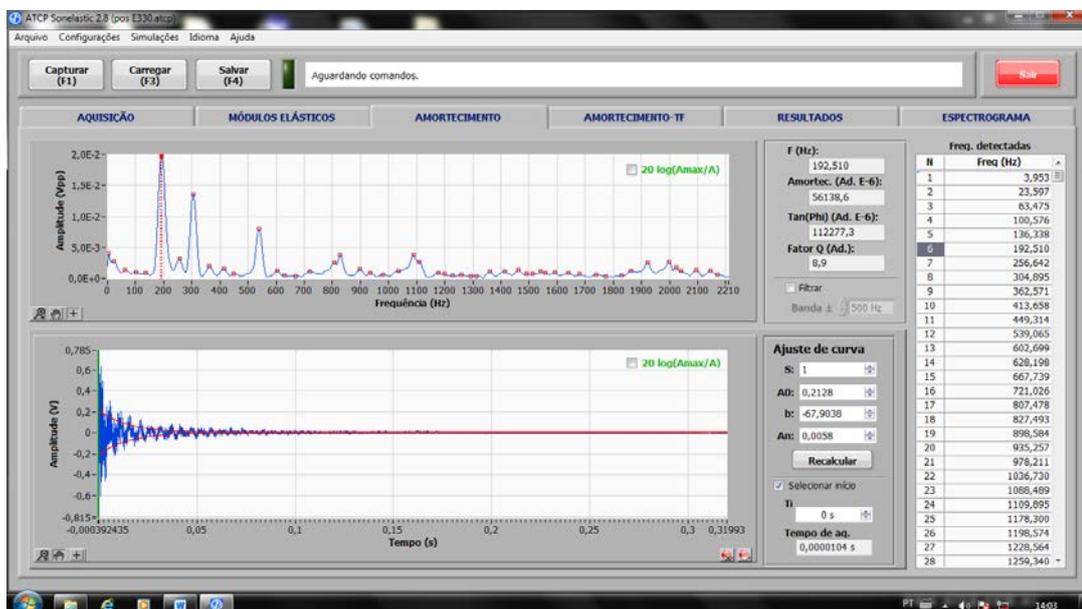


Figura 8.53 - Resultados em frequências naturais detectadas para a excitação por impulso no cavalete na posição da primeira corda. (Fonte: Autor, 2020)

As respostas em frequências lidas diretamente no software sonelastic são extremamente importantes, pois se referem aos resultados de frequências de vibração com maiores amplitudes, mas o processamento dos sinais no matlab permite que se possa relacionar um número maior de frequências, pois através de recursos do programa é possível observar até mesmo as frequências de baixa amplitude.

Para se ter comparação mais concreta dos resultados obtidos pela deconvolução resolveu-se mudar a escala gráfica para observação das frequências excitadas de amplitudes maiores (Figura 8.54) e menores (Figura 8.55). Os resultados referentes às frequências naturais observadas tanto na deconvolução quanto na excitação por impulso foram listadas na Tabela 8.5. Em seguida buscou-se encontrar valores de frequências naturais com valores aproximados obtidos pela excitação por impulso para se fazer a comparação das duas técnicas.

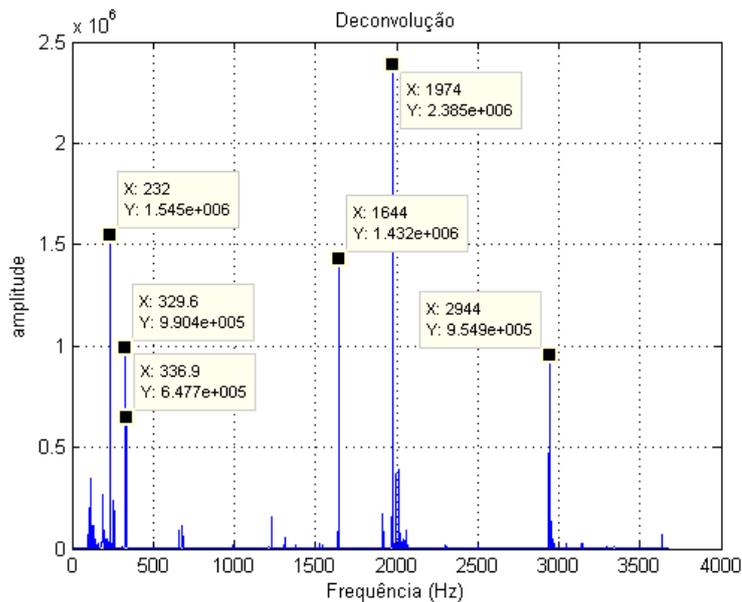


Figura 8.54 - Frequências com amplitudes maiores na deconvolução da primeira corda do violão. (Fonte: Autor, 2020)

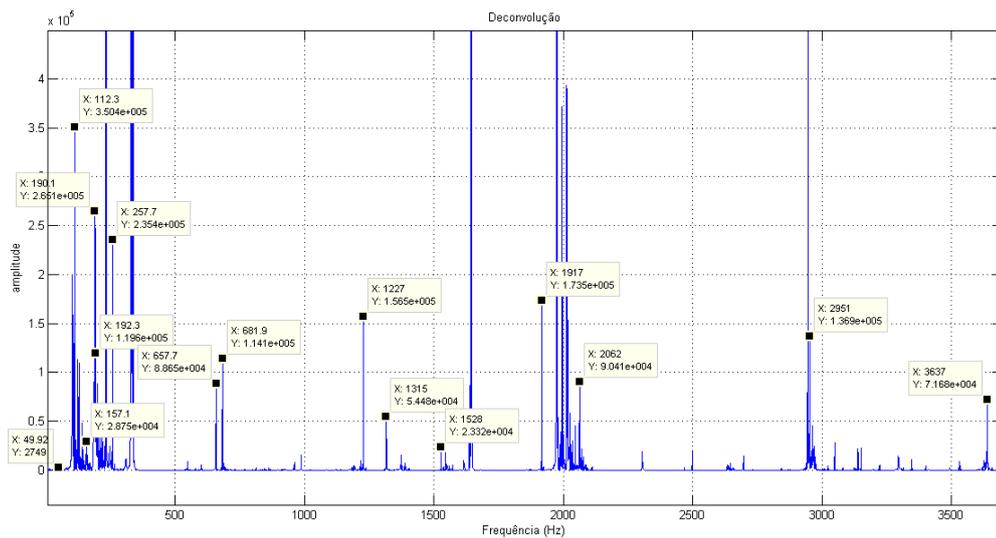


Figura 8.55 - Frequências com amplitudes menores no resultado da deconvolução da primeira corda do violão.

(Fonte: Autor, 2020)

O processamento de sinais proporciona uma avaliação mais precisa das respostas em frequências com menor amplitude, ou seja, de baixa ressonância, mas que fazem parte do conjunto de frequências naturais do objeto analisado. Assim se faz possível obter um número maior de frequências nessa análise.

A Tabela 8.5 mostra várias frequências naturais do modelo de violão listadas em ordem crescente. Na primeira coluna estão relacionadas respostas decorrentes da excitação por impulso na posição referente à primeira corda no cavalete obtidas diretamente no Software Sonelastic e também processadas no Software Matlab na segunda coluna, onde foi possível relacionar número maior de frequências. Ainda na mesma Tabela, na terceira coluna, estão as respostas obtidas pelo processo de deconvolução do sinal sonoro do instrumento obtido ao tocar a primeira corda (Mí) pelo sinal da mesma corda tocada em instrumento auxiliar que simula o braço do violão.

Tabela 8.5 - Respostas em frequências obtidas por excitação por impulso e deconvolução (1ª corda).

Respostas em Frequências (Hz)										
Excitação por impulso					Deconvolução					
<i>Sonelastic</i>	<i>Matlab</i>									
3,9	3,84	268,8	954,2	1455,0	8,75	157,1	535,9	862,5	1192,0	
23,6	7,68	282,2	967,7	1490,0	13,95	187,2	541,0	866,9	1216,0	
63,5	11,52	311,0	996,5	1503,0	20,55	190,1	543,9	958,7	1227,0	
100,5	17,28	328,3	1014,0	1509,0	46,98	191,6	547,6	960,9	1236,0	
136,3	23,04	337,9	1020,0	1523,0	49,92	197,5	550,5	986,9	1311,0	
192,5	34,56	370,6	1037,0	1542,0	69,73	199,7	553,5	1015,0	1315,0	
219,1	46,08	397,4	1062,0	1555,0	74,14	203,3	560,1	1021,0	1374,0	
256,6	59,52	418,6	1077,0	1755,0	80,75	208,5	576,2	1092,0	1528,0	
304,9	78,72	485,8	1100,0	1791,0	94,69	212,1	577,7	1106,0	1544,0	
449,3	84,48	524,2	1106,0	1809,0	97,63	218,0	588,7	1122,0	1637,0	
539,0	107,5	666,2	1112,0	1830,0	102,0	227,6	591,6	1182,0	1644,0	
602,7	117,1	687,4	1116,0	1849,0	103,5	232,0	600,4	1216,0	1917,0	
667,7	122,9	700,8	1129,0	1868,0	105,7	241,5	603,4	1220,0	1974,0	
721,0	136,3	708,5	1142,0	1874,0	109,4	247,4	657,7	1227,0	1995,0	
807,5	142,1	729,6	1156,0	1885,0	112,3	254,7	676,8	721,0	2013,0	
827,5	153,6	745,0	1165,0	1903,0	118,9	257,7	681,9	807,5	2013,0	
898,5	157,4	762,2	1181,0		121,1	265,0	685,6	827,5	2014,0	
935,2	167,0	814,1	1221,0		123,3	309,8	688,5	898,5	2018,0	
978,2	170,9	829,1	1261,0		126,3	329,6	693,7	935,2	2024,0	
1036,7	182,4	850,6	1298,0		129,2	332,5	733,3	978,2	2046,0	
1088,5	201,6	898,6	1309,0		132,1	334,7	773,0	1036,7	2062,0	
1109,9	218,9	902,4	1327,0		134,3	336,9	795,7	1088,5		
1178,3	240,0	908,2	1348,0		140,2	462,4	811,1	1109,		
1198,57	243,8	915,8	1361,0		143,9	480,8	832,4	1178,3		
1228,5	251,5	929,3	1394,0		146,8	530,0	844,9	1188,0		

A Tabela 8.6 relaciona frequências com valores próximos da excitação por impulso lidas no software sonelastic e pelo método de deconvolução para comparar valores que possivelmente possam pertencer a um mesmo modo de vibração em uma região do instrumento. O modo de vibração de uma estrutura ou região da mesma se caracteriza por uma vibração em frequência natural ou característica (Wright, 1996 e Santos et al., 2013).

Tabela 8.6 - Comparação de Frequências com valores próximos obtidos pela Excitação por impulso no sonelastic e deconvolução usando Matlab. (Fonte: Autor, 2020)

Freq.	Impulso Sonelastic	Deconvolução	Erro (%)
1	63,5	69,73	8,93
2	100,5	102,0	1,47
3	136,3	134,3	1,49
4	192,5	191,6	0,47
5	256,6	257,7	0,43
6	304,9	309,8	1,58
7	449,3	462,4	2,83
8	539,0	541,0	0,37
9	602,7	603,4	0,12
10	667,7	676,8	1,34
11	721,0	733,3	1,68
12	807,5	811,1	0,44
13	827,5	832,4	0,59
14	898,5	866,9	3,64
15	935,2	958,7	2,45
16	978,2	986,9	0,88
17	1036,7	1021,0	1,53
18	1088,5	1092,0	0,32
19	1109,9	1106,0	0,35
20	1178,3	1182,0	0,31
21	1198,57	1216,0	1,43
22	1228,5	1227,0	0,12

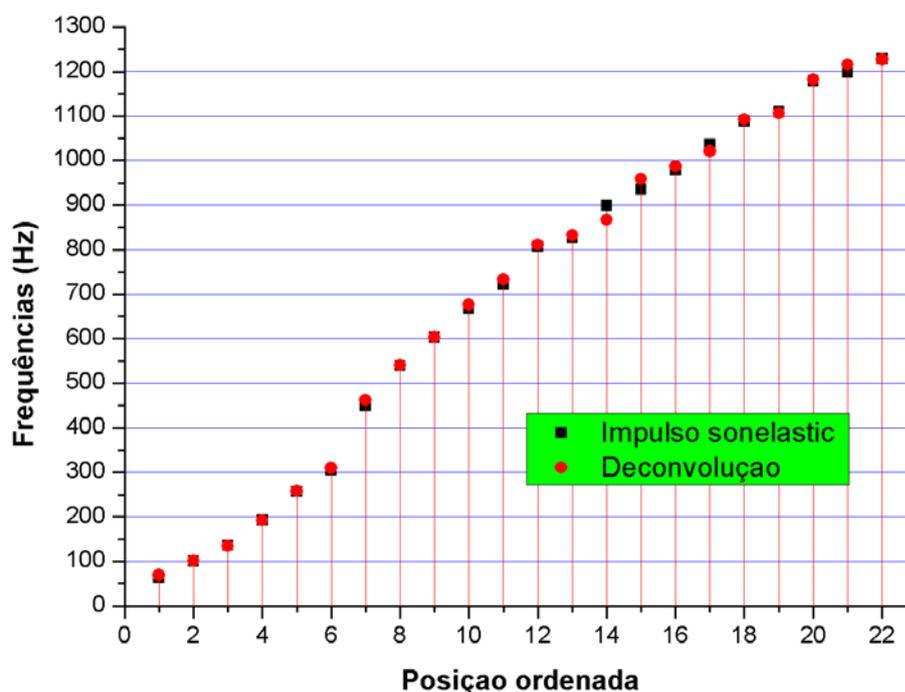


Figura 8.56 - Plotagem dos pares de frequências homólogas, obtidas pelo método de excitação por impulso e deconvolução. (Fonte: Autor, 2021)

Vinte e duas faixas de valores são relacionadas, dos quais dezoito apresentam erro de no máximo 2%, outros três em torno de 3% evidenciando que possivelmente possam ser de mesmo modo de vibração ou de mesma região do instrumento. E a figura 8.56 indica grande correlação entre os conjuntos de frequências obtidas pelo método de excitação por impulso e deconvolução.

Já a Tabela 8.7 faz a comparação de frequências com valores próximos obtidos pela Excitação por impulso e deconvolução processando todos os sinais no Matlab. Assim se faz possível a observação de uma quantidade maior de respostas com frequências naturais de vibração. São encontrados quarenta e quatro faixas com valores próximos em intervalo entre zero e dois mil Hertz, dos quais trinta e nove apresentam erros menores que 2% sendo que algumas dessas faixas apresentam resultados menores ainda que 0,5%, o que pode evidenciar serem de mesmo modo de vibração ou de mesma região no instrumento.

Tabela 8.7 - Comparação de Frequências com valores próximos obtidos pela Excitação por impulso e deconvolução usando *Matlab*. (Fonte: Autor, 2020)

Freq.	Impulso	Deconvolução	Erro (%)	Freq.	Impulso	Deconvolução	Erro (%)
1	7,68	8,75	13,91	23	687,4	688,5	0,16
2	11,52	13,95	21,09	24	687,4	688,5	0,16
3	17,28	20,55	18,92	25	729,6	733,3	0,51
4	46,08	46,98	1,95	26	762,2	773,0	1,41
5	78,72	80,75	2,57	27	814,1	811,1	0,36
6	107,5	105,7	1,67	28	829,1	832,4	0,40
7	117,1	118,9	1,53	29	898,6	898,5	0,01
8	122,9	123,3	0,32	30	954,2	958,7	0,47
9	136,3	134,3	1,46	31	967,7	960,9	0,70
10	142,1	143,9	1,26	32	996,5	986,9	0,96
11	157,4	157,1	0,19	33	1014,0	1015,0	0,09
12	182,4	187,2	2,63	34	1020,0	1021,0	0,10
13	201,6	203,3	0,84	35	1100	1092	0,72
14	218,9	218,0	0,41	36	1106	1106	0
15	240,0	241,5	0,62	37	1116	1122	0,54
16	243,8	247,4	1,47	38	1181	1182	0,08
17	251,5	254,7	1,27	39	1221	1220	0,08
18	268,8	265,0	1,41	40	1309	1311	0,15
19	311,0	309,8	0,38	41	1361	1374	0,95
20	337,9	336,9	0,29	42	1523	1528	0,33
21	485,8	480,8	1,02	43	1542	1544	0,13
22	524,2	530,0	1,10	44	1903	1917	0,74

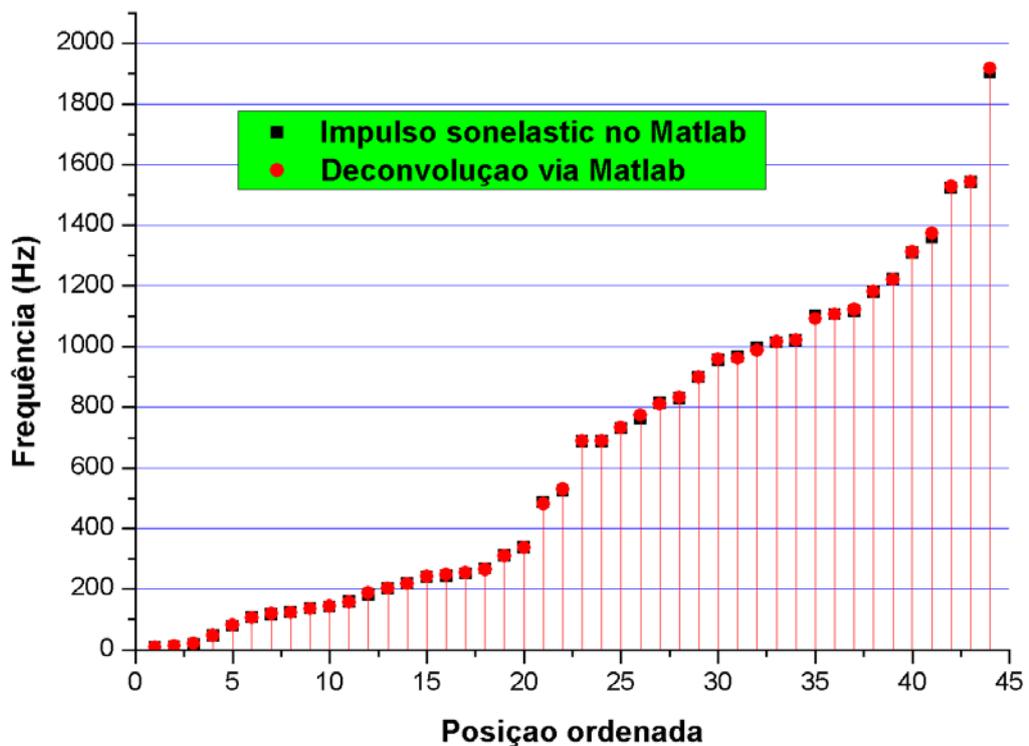


Figura 8.57 - Plotagem dos pares de frequências homólogas, obtidas pelo método de excitação por impulso e deconvolução, ambos processados digitalmente em *Matlab*. (Fonte: Autor, 2021)

O grande número de frequências com valores muito próximos na comparação entre o método de excitação por impulso e deconvolução, com erros que não ultrapassam 2%, principalmente nas comparações acima de vinte Hertz, evidenciam que os dois métodos podem ser utilizados em possíveis caracterizações de materiais ou de instrumentos musicais de corda. E a figura 8.57 mostra essa grande correlação entre os conjuntos de frequências obtidas pelo método de excitação por impulso e deconvolução processados digitalmente em *Matlab*.

A comparação das duas técnicas mostra que através da deconvolução pode-se obter uma grande quantidade de frequências naturais com amplitudes variadas, mas isso não acontece igualmente para todas as cordas, é mais evidente na primeira, quinta e sexta corda. Na excitação por impulso há a possibilidade de se obter também várias frequências naturais de vibração, mas depende muito da calibração da sensibilidade do microfone do software *sonelastic*.

A grande quantidade de respostas em frequências naturais encontradas na técnica de deconvolução em algumas cordas e poucas em outras relativamente pode significar, possivelmente, que as regiões do instrumento reagem de maneira diferente à excitação provocada pela vibração da corda, ou que a resposta do instrumento depende da frequência inicial de vibração que cada corda possui.

Além disso, o músico pode provocar grandes variações ao tocar uma música ao pressionar a corda próxima aos trastes, o que faz variar a frequência de vibração da mesma, tocando notas musicais diferentes em uma mesma corda. Além disso, várias músicas se utilizam de acordes, que é o ato do músico apertar ao mesmo tempo várias cordas em posições de trastes diferentes em cada uma e tocá-las ao mesmo tempo.

Todas as possibilidades de variação provocam respostas em frequências naturais de vibração nos componentes do violão, feito essencialmente de madeira. Em seguida, essa vibração é transmitida ao ar enclausurado provocando deslocamentos do mesmo através da boca do instrumento e o resultado disso é a produção de sons variados.

9.0 - Conclusões

9.1 - Análise modal

A análise modal que serve para analisar o comportamento dinâmico de uma estrutura, neste caso o modelo de violão, em um campo de frequências, mostra que a combinação de várias partes com propriedades de madeiras diferentes fazem surgir vários modos de vibração dependendo da frequência de excitação e das condições de contorno.

A análise sem a aplicação das condições de contorno proposta faz surgir quarenta modos de vibração no intervalo proposto, de zero a setecentos Hertz. Já quando se analisa com tais condições, diminui significativamente a quantidade de modos vibracionais no intervalo citado, conseqüentemente os graus de liberdade. Surgem agora apenas doze.

A análise estática, neste caso, serve como uma pré análise para a análise modal. Ela garante as condições preestabelecidas. A Figura 8.2 mostra que a restrição de movimento das laterais e bordas do tampo superior, indicadas pela cor azul e efeito de arqueamento do modelo, provoca certa distorção na forma do instrumento, mais evidente no cavalete e braço, provocada pela tensão imposta pelas cordas, assemelhando-se às condições reais do instrumento.

A segunda análise modal com aplicação de condições de contorno mostrou resultados que podem ser avaliados como mais próximos de um comportamento dinâmico do instrumento se comparados com a técnica de excitação por impulso.

A restrição de movimento diminuiu significativamente a movimentação do modelo e, conseqüentemente, as suas frequências naturais que caracterizam cada modo vibracional. Avaliando os doze primeiros modos de vibração percebe-se que a cor azul, que indica menor movimentação ou vibração, é predominante. E isso provavelmente se deve às condições de contorno impostas de restrição de movimento nas laterais e tensão das cordas.

No contexto geral, a técnica de excitação por impulso deve fazer com que se encontrem todas as possíveis frequências ressonantes do material e a Tabela 8.2 nos mostra conjuntos relevantes de frequências para cada ponto excitado. Embora parte da energia possa ser perdida no caminho dessa vibração ao variar o ponto inicial, é possível encontrar várias frequências ressonantes com valores bem próximos, que possivelmente possam ser de uma mesma região do instrumento ou do mesmo modo de vibração na comparação com a análise modal.

A técnica de excitação por impulso se mostra bastante eficiente, pois permite observar um número grande de frequências naturais que são encontradas no instrumento (Tabela 8.2) que podem ser associadas às informações da análise modal e permitir assim uma investigação dos possíveis modos de vibração do sistema. Tais modos podem indicar as regiões do instrumento que vibram a determinadas frequências e isso é importante, pois mostram o comportamento dinâmico, principalmente dos tampos, superior e inferior que promovem os deslocamentos de ar dentro da caixa acústica que resulta no som produzido.

O mapeamento dessas regiões pode ajudar no aperfeiçoamento das técnicas quase sempre artesanais, ou na escolha dos materiais para fabricação dos instrumentos.

Para se ter uma melhor confirmação os resultados podem ser comparados com outras técnicas de visualização de modos de vibração, por exemplo, placas de Chladni ou Vibrometria a laser.

9.2 - Análise Harmônica

A análise harmônica, que tem o objetivo de analisar e determinar a resposta de um sistema ou estrutura a cargas harmônicas variáveis no tempo, se mostra com resultados que servem para corroborar aqueles encontrados na análise modal sem condições de contorno.

Ao se variar a força impulsiva colocada indicando o primeiro pulso vibracional de uma corda, foram encontradas basicamente as mesmas frequências ressonantes para onze nós analisados no tampo, boca e braço do modelo computacional.

Ao se comparar com a análise modal sem condições de contorno observa-se que dependendo da localização do nó analisado, se ele estiver numa região coincidente a um modo de vibração, a sua amplitude aumenta consideravelmente.

Foram encontradas nessa análise com maior evidência em relação à amplitude cinco frequências (46 Hz, 156 Hz, 176 Hz, 244 Hz e 298 Hz) que se referem, respectivamente, ao primeiro, quarto, quinto, sétimo e nono modo de vibração na análise modal sem as condições de contorno restritivas de movimento.

Não foi possível a realização de análise harmônica com as condições de contorno estabelecidas, pois aumentou significativamente o número de equações demandando grande esforço computacional.

9.3 - Sintetização de Sinais Sonoros Obtidos Através da Caracterização Experimental

De modo geral percebe-se que a excitação por impulso no cavalete é capaz de excitar várias frequências naturais no modelo mostrando que esta parte do instrumento é o responsável direto por irradiar a vibração das cordas para todas as partes do instrumento que disciplinada pelos leques harmônicos resultam no som produzido pelo instrumento ao promover deslocamento de ar pela boca. Mas o software usado pode não captar algumas frequências de baixa amplitude dependendo da regulagem dos parâmetros de aquisição. A análise dos sinais usando o software Matlab permitiu observar que há muitas outras frequências excitadas com amplitudes menores com relação à lista gerada pelo software usado na excitação por impulso, sonelastic. Com isso, foi possível também reproduzir ou sintetizar o som impulsivo (“batida”) que gera todo o efeito restante.

9.4 - Sintetização de Sinais Sonoros Obtidos Através da Análise Harmônica

Os sinais sonoros obtidos através da sintetização com base nas informações observadas na análise harmônica mostraram semelhanças gráficas com relação às frequências naturais excitadas. Não foi possível a reprodução fiel com relação às amplitudes, apenas aproximações, pois precisou estipular valores de amortecimento, pois na análise harmônica feita no software Ansys, não se obtém tais informações. As amplitudes também foram aproximadas com base nos gráficos obtidos na análise harmônica. O som gerado, que é uma combinação de várias frequências sobrepostas tem curta duração e apresenta-se muito parecido como os sinais obtidos na técnica de excitação por impulso assemelhando-se também ao som de uma “batida” ou “pancada”, mas apresentam algum nível de ruído.

9.5 - Caracterização e Sintetização da Resposta Através da Deconvolução

O grande interesse nessa parte da pesquisa é de obter informações deconvoluindo o sinal de uma corda gravada separadamente de um sinal sonoro gravado de um instrumento obtendo como resultado a resposta em frequências naturais de vibração do modelo semelhante às encontradas no processo experimental de excitação por impulso. E os resultados mostram que isso se evidencia mais claramente na primeira, quinta e sexta corda nesta análise.

Após a aplicação da transformada rápida de Fourier (FFT) observam-se graficamente várias frequências naturais excitadas com baixas e altas amplitudes. Percebeu-se isso mais evidente na análise da primeira corda que tem a maior frequência de vibração, cerca de trezentos e trinta Hertz com a devida tensão característica de afinação. Não se pode dizer com certeza que a frequência de vibração maior possa ser o fator primordial para uma maior resposta em frequências naturais observadas neste método, pois a quinta e a sexta corda também apresentam bastantes frequências ressonantes. Todos esses fatores podem variar para

materiais diferentes, pois cada um traz consigo propriedades que fazem com que tenha comportamentos diferentes com relação às frequências naturais de vibração.

Na análise do sinal sonoro emitido e do gráfico no domínio do tempo de todos os sinais deconvolvidos mostra um decaimento muito rápido, ou seja, o som emitido é de pouca duração e comparando com a excitação por impulso, assemelha-se igualmente ao som de uma “batida”, mas apresenta-se de maneira ruidosa.

9.6 – Respostas em frequência pela Deconvolução e Excitação por Impulso

A comparação dos dois métodos usando como exemplo as respostas obtidas pela primeira corda mostra que o método de análise pela excitação por impulso pode ser um bom recurso na obtenção de respostas em frequências naturais de um violão ou outro qualquer outro instrumento de corda. Se faz necessário alguns ajustes iniciais de configuração do software tais como: sensibilidade do microfone, tempo de aquisição e processamento de informações para que se consiga o maior número possível de respostas dentro de um intervalo de frequências. Para uma melhor apuração dos resultados este trabalho sugere que se transfira em planilhas as informações para um software que faça processamento de sinais, como o Matlab, por exemplo, pois assim é possível observar algumas frequências de baixas amplitudes que as vezes não são detectadas ou listadas pelo software do método de excitação por impulso, mas que podem ser relevantes na caracterização.

Para o presente trabalho foi possível a observação e análise de um número muito maior de frequências do modelo de violão estudado, pois tomando-se como referência um intervalo entre zero e mil Hertz, observa-se dezenove frequências ressonantes, enquanto que ao processar os sinais foi possível encontrar cinquenta e três.

A deconvolução dos sinais sonoros emitidos pelo instrumento ao tocar uma de suas cordas pelo sinal gravado de mesma corda separadamente, feita também por processamento

de sinais, se mostra também bastante eficaz, pois foi possível a análise de oitenta frequências naturais ou ressonantes no intervalo anteriormente mencionado.

A avaliação com relação à frequências homônimas, que são de valores próximos, mostra que os dois métodos podem ser aplicados na caracterização de respostas em frequências naturais de vibração de instrumentos de corda, como o violão, por exemplo. Ressalva-se que os resultados obtidos pelo método excitação por impulso podem ser melhor avaliados usando processamento de sinais para se conseguir avaliar frequências de menores amplitudes.

No presente trabalho a maioria das faixas de frequências homônimas de vibração analisadas nos dois métodos apresentam erros abaixo de dois por cento evidenciando serem de mesmo modo de vibração ou de mesma região no instrumento.

O conjunto de frequências que aparecem nos resultados, tanto pela excitação por impulso, quanto pela deconvolução são resultantes de uma vibração provocada externamente que irradia para todo o instrumento indo de encontro aos microconstituintes do material do violão. Essencialmente feito de madeira e por sua condição anisotrópica, o violão responde a esse estímulo com diferentes frequências de vibração para cada uma de suas partes ou regiões que finalmente interage com o ar contido na caixa acústica deslocando-o e, assim produzindo o som.

A escolha de bons materiais influencia diretamente na qualidade do instrumento, pois esse conjunto de respostas em frequências naturais de vibração é o que diferencia cada tipo de violão ou outro instrumento de corda dando lhes diferentes timbres.

9.6 – Sugestões para Trabalhos Futuros

As sugestões para trabalhos futuros podem se concentrar em técnicas de caracterização experimental do modelo físico de violão, por exemplo, a técnica de Chladni ou através de uma

importante técnica experimental que já vem sendo utilizada em alguns trabalhos na área de acústica, trata-se da caracterização das frequências naturais e referidos modos de vibração através da vibrometria a laser. Um dos objetivos iniciais do presente trabalho se concentrava no uso desta importante técnica, mas devido a problemas relacionados à pandemia de Covid-19 do presente ano não foi possível. Pode-se também trabalhar o aprimoramento da técnica de deconvolução dos sinais sonoros do violão que se mostrou bastante eficiente na obtenção de respostas em frequências naturais expandindo para outros tipos de instrumentos de corda tais como: cavaquinho, banjo, viola caipira, viola de arco, ou até mesmo violino, desde que se consiga desenvolver um dispositivo semelhante ao utilizado no presente trabalho para obter os sinais sonoros da corda separadamente do instrumento.

Referências

- ALMEIDA, R. N. *O Uso Do Tonoscópio Como Estímulo Sinestésico Áudio Visual Na Estratégia De Desenvolvimento Da Percepção Musical: Fundamentação Teórica Para Sua Implementação*. Tese (Doutorado em Música). Programa de Pós-Graduação em Música. Centro de Letras e Artes, Universidade federal do Estado do Rio de Janeiro, 2017
- ANDRADE, E. *O leque harmônico*. 2011. Luthier. Disponível em: <<http://ealuthier.blogspot.com.br/2011/03/o-leque-harmonico.html>>. Acesso em: 28 nov. 2016.
- ANSYS Inc., Design Exploration User Guide, 2012 .
- ASTM International. *Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration*; ASTM E 1876, pp 15, 2007.
- AVITABILE, P. *Experimental modal analysis*. Sound and Vibration, vol. 35, pp. 20–31, 2001.
- BADER, R. *Computational Mechanics of the Classical Guitar*. Springer; 1st ed., pp. 30-80, 2005.
- BASSALO, J. M. F.; CATTANI, M. S. D. *Elementos de Física Matemática*. Editora Livraria da Física Maluhy & Co, 2010, p. 96-100, São Paulo.
- BAQERSAD, J.; POOZESH, P.; NIEZRECKI, C.; AVITABILE, P. *Comparison of modal parameters extracted using MIMO, SIMO, and impact hammer tests on a three-bladed wind Turbine*, *Topics in Modal Analysis II*, Volume 8, Springer, 2014, pp. 185-197.
- BÉCACHE, E., CHAIGNE, A., DERVEAUX, G., JOLY, P. *Numerical simulation of a guitar*, in *Computers and Structures*, Vol 83, 2005, pp. 107–126.
- BESSA, F. M. S. *Caracterização Anatômica, Física, Química e Acústica de Madeiras de*

Várias Espécies para a Construção de Instrumentos Musicais. Uma Aplicação à Viola Dedilhada". (Tese de Doutorado em engenharia de materiais lenhosos) - Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de LISBOA, 2000.

BUCUR, V. *Acoustics of wood*, 2^a ed. Springer Series in Wood Science, Springer, Berlin, Germany, 2006.

CALDERSMITH, G. W., *Designing a Guitar Family*. Applied Acoustics V. 46, pp 3-17, 1995.

CARCAGNO, S.; BUCKNALL, R.; WOODHOUSE, J.; FRITZ, C.; PLACK, C. J. *Effect of back wood choice on the perceived quality of steel-string acoustic guitars*. The Journal of the Acoustical Society of America 144, 3533, (2018). [https://doi: 10.1121/1.5084735](https://doi.org/10.1121/1.5084735)

CARILLO, S. *Fourier Series*. In: Hetnarski R.B. (eds) Encyclopedia of Thermal Stresses. Springer, Dordrecht. 2014. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2739-7_23

CATELLI, F.; MUSSATO, G. A. *Tensão, calibre e frequência das cordas de instrumentos*. Revista Brasileira de Ensino De Física v. 36, n. 1, 1306. *Caxias do Sul, RS, Brasil. 2014*

CHANAUD, R. *Effects Of Geometry On The Resonance Frequency Of Helmholtz Resonators*. Journal of Sound and Vibration. V.178, pp. 337-348, 1994.

CHAPPELL, J.; PHILLIPS, M.; AUSTIN, D.; BICKFORD, M. E.; DAY, H.; JARRET, S.; PETERIK, J.; PILHOLFER, M. *Guitar All-in-One For Dummies*. Wiley Publishing, Inc. Indiana, EUA, 2009.

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

CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. *Dynamics of Structures*. McGraw-Hill, 2nd Ed., 1993.

COSSOLINO L. C.; PEREIRA A. H. A. *Amortecimento: classificação e métodos de determinação* (Informativo Técnico Científico). Universidade de São Carlos, 2010.

COURTNALL, R. *Making Master Guitars*. New Era Printing, Hong Kong, 1993.

- COUTO, A. L. M. *Física Do Violão: Análise Qualitativa do Som de Violões*. TCC (Graduação). Curso de Física. Universidade Católica de Brasília. Brasília. 2006.
- CURTU, I; STANCIU, M. D.; CRETU, N. C.; ROSCA, I. C. *Modal Analysis of Different Types of Classical Guitar Bodies*. Proceedings of WSEAS International Conference on Acoustics & Music: Theory & Applications, 10., Prague, Czech Republic - AMTA09 (ISTP/ISI Proceeding of Thomson Scientific-Institute for Scientific Information), 23-25. March 2009, Prague, Czech Republic, 30-34. ISBN 978-960-474-061-1, ISSN: 1790-5095, 2009.
- CURTU, I., STANCIU, MARIANA, Itu, C., GRIMBERG, R., Numerical Modeling of the Acoustic Plates as Constituents of Stringed Instruments, in Proc. of the 6th International Conference of DAAAM Baltic Industrial Engineering, ISBN 978-9985-59-783-5, Tallinn, Estonia. 24-26th April 2008, p. 53-58.
- D'ADDÁRIO CORDAS. *Catálogo*. 2018. Disponível em:
http://www2.musicaexpress.com.br/beta/wp-content/themes/musicalxpress/downloads/catalogos/catalogo_D%C2%B4Addario-Cordas.pdf. Acesso: 05 de dezembro de 2018.
- DA PENHA, R. M. L. *Análise de Sinais em Regime Transiente Aplicando a Técnica de Wavelet*. 1999. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 1999.
- DE SILVA, C. *Vibration Damping, control and design*. CRC Press, 2007.
- DODGE, C.; JERSE, T. A. - *Computer music synthesis, composition, and performance*. 2. ed. New York: Charmer Books, 1997.
- DONOSO, J. P.; TANNUS, A.; GUIMARÃES, F.; FREITAS, T. C. *A física do Violino*. Revista Brasileira de Ensino De Física v. 30, n. 2, 2305. Curitiba, PR, Brasil, 2008.

- DUARTE, M. *A História do Violão*. Disponível em:
<https://www.infoescola.com/musica/historia-do-violao/>. Acesso: 16 de Março 2021.
- ELEJABARRIETA, M. J.; EZCURRA, A.; SANTAMARÍA, C. *Evolution of the vibrational behavior of a guitar soundboard along successive construction phases by means of the modal analysis technique*. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 108, n. 1, p. 369-378, 2000.
- ELLIS, A.; SAUFLEY, C.; TEJA, G. *The future of tonewood*. Acoustic Guitar 18(8), 80–86, 2008.
- FEITEIRA, J. M.; FONSECA, G. S.; CAMPOS, M. F. *Série e Transformada de Fourier na Análise Cristalográfica por Difração de Raio X*. 7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Penedo, 2013.
- FILHO, J. C. P. *Classificação de Instrumentos Musicais em ConFigurações Monofônicas e Polifônicas*. COPPE/UFRJ, 2009.
- FIRTH, I. M. *Physics of the guitar at the Helmholtz and first top plate resonances*. J. Acoustical Society of America, 61 (2), pp. 588-593, 1977.
- FLORES, A. L. *Análise de Diferentes Madeiras Brasileiras em Substituição às Espécies Tradicionais no Violão Clássico*. Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.
- FLORES, A. L.; SYDENSTRICKER, F. T.; SARDÁ, A. P. *Análise De Madeiras No Sistema Mecânico Vibracional (Smv) Da Caixa Acústica Do Violão: Análise Do Fundo*. XXVIII Encontro Da Sociedade Brasileira De Acústica, Porto Alegre, Brasil, 2018.
- FRENCH, R. M. *Engineering the Guitar: Theory and Practice*. Springer, pp 180-181, 2009.
- FRENCH, M.; LEWIS, K. *Modal Analysis of an Acoustic Guitar*. researchgate, 2460. 808, 1995.

- GOMES, L.; LAGE, R.; MOURÃO, A. *Manual de Lutheria: curso básico*. Manaus: unicef, 2004.
- GORE, T. *Wood for guitar*. J. Acoust. Soc. Am. 129(4), 2519–2519, 2011.
- GORROSTIETA-HURTADO, E.; PEDRAZA-ORTEGA J. C., RAMOS-ARREGUIN, J. M.; SOTOMAYOR-OLMEDO A.; PEREZ-MENESES, J. *Vibration Analysis in the design and construction of an acoustic guitar*. International Journal of Physical Sciences, 7(13), pp. 1986-1997, 2012.
- HAINES, D. *On musical instrument wood*. Catgut Acoust. Soc. Newsletter 31, 23–32, 1979.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R. e WALKER, J. *Fundamentos de Física 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica*. 8. Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC. 2009.
- HATCH, R. M. *Transfer function analysis In Vibration Simulation Using MATLAB and ANSYS*. (Chapman & Hall, USA, 2001).
- HAYKIN, S. S.; VAN VEEN, B. *Sinais e sistemas*. Bookman, 2001.
- JANSSON, E. V. *A study of acoustical and hologram interferometric measurements of the top plate vibrations of a guitar*. Acustica, 25, pp. 95-100, 1971.
- JANSSON, V. *Acoustics for Violin and Guitar Makers*, 4th ed. Royal Institute of Technology, Stockholm, 2002.
- JAROSLAV M. *Finite element analyses in wood research*. Wood Sci. Technol., Springer-Verlag, 39: 579-600, 2005.
- JOVICIC, J.; JOVICIC, O. *The Big Red Book of American Lutherie*. Thomson-Shore, Dexter, pp 402-415, 2000.
- JOHNSTON, R. *Forest of sound*. Acoustic Guitar 16(9), 80–82, 2006.
- JOHNSTON, R. *Brazilian rosewood*. Acoustic Guitar 22(2), 61–66, 2011.
- JOHNSTON, R. *Back and side Woods*. Acoustic Guitar 23(7), 52–56, 2013.

- KANEKO T. *Relation Between Flexional Resonant Frequency Equations for the Flexional Vibration of Cylindrical Rods*. J. Res. Natl. Bur. Stand., v. 64B, pp. 237, 1960.
- KATZNELSON, Y. *An introduction to Harmonic Analysis*. 2. ed. Dover, 1976.
- LAI, J. C. S., BURGESS M. A. *Radiation efficiency of acoustic guitars*. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 88, No. 3, pp.1222-1227, 1990.
- LACERDA, O. *Compêndio de teoria elementar da música*. 9^a ed., Ricordi Brasileira S.A., 1996.
- LATHI, B. P. *Sinais e Sistemas Lineares-2*. Bookman, 2006.
- LAUGESSEN, R. S. *Harmonic Analysis Lecture Notes*. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2009.
- LAZZARINI, V. E. P. *Elementos de acústica*. Music Department - National University of Ireland, Maynooth, 1998.
- LEE, M. K.; FOULADI, M. H.;NAMASIV, S. N. *Mathematical Modelling and Acoustical Analysis of Classical Guitars and Their Soundboards*. Advances in Acoustics and Vibration. Vol. 2016, Article ID 6084230, 2018. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/6084230>
- LEINBACH, J. *Wiener spiking deconvolution and minimum-phase wavelets: A tutorial*. The Leading Edge.14(3):189, 1995. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1437110>
- LÖW, A. M. *Identificação Experimental Modal da Caixa Acústica de Um Violão Clássico*. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.
- LUDWIGSEN, D. *Spectral character of the resonator guitar*. The Journal of the Acoustical Society of America, 134, 2013.
- MACIEL, A.; ORSELLI, M. I. V.; MACHADO, R. E. G.; FILHO, Z. O. G. *Cordas vibrantes no violão*. Instituto de Física da Universidade de São Paulo, 2001.
- MEYER, J.; JANSSON, E. V. *Construction and Quality of the Guitar*. Royal Swedish Academy of Music, Estolcomo, 1983.

NETO, F. M.; PLATT G.; BASTOS, I.; ROCHA, M.; HENDERSON, N. *Modelagem Computacional em Materiais*. editora ciência moderna, 2010.

MUSSOLINO, B. C.; MACIEL, C. D.; ENDO, W. *Algoritmo de determinação do coeficiente de amortecimento de materiais pela técnica de excitação por impulso*. (Dissertação de Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, 2011.

NETO, F. M.; PLATT, G.; BASTOS, I.; ROCHA, M.; HENDERSON, N. *Modelagem Computacional em Materiais*. Editora ciência moderna, 2010.

O'HAVER, T. *A Pragmatic Introduction to Signal Processing*. Department of Chemistry and Biochemistry, University of Maryland at College Park, 2008. Acesso em 30 de maio, 2020.

Disponível em: <https://terpconnect.umd.edu/~toh/spectrum/> ONO, T. *Frequency responses of wood for musical instruments in relation to the vibrational properties*. Department of Physics, Faculty of Engineering, Gifu University, Yanagido, Gifu, 501-11 Japan, 1995.

ONO, T. *Frequency responses of wood for musical instruments in relation to the vibrational properties*. J. Acoust. Soc. Jpn.(E). 17, 4, 1996.

OTANI, L.B.; SEGUNDINHO, P.G.A.; MORALES, E. A. M.; PEREIRA, A.H.A. *Caracterização dos módulos elásticos de madeiras e derivados utilizando a Técnica de Excitação por Impulso* (ITC-05 /ATCP). ATCP Engenharia Física, 2017.

PAIVA, G. O. *Análise Modal Vibroacústica da Caixa de Ressonância de um a Viola Caipira*. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2013.

PATIL K, BAQERSAD J, LUDWIGSEN D, DONG Y. *Extracting vibration characteristics of a guitar using finite element, modal analysis, and digital image correlation techniques*. The Journal of the Acoustical Society of America 140, 3211, 2016.

PICKETT G. *Equations for Computing Elastic Constants from Flexional and Torsional Resonant Frequencies of Vibration of Prisms and Cylinders*. Am. Soc. Test. Mater. v. 45, pp. 846-865, 1945.

- PINTO, A. A. *Processamento de Sinais Sonoros para Identificação de Notas Musicais Utilizando o Raspberry Pi*. CEFET-MG, Divinópolis, 2018.
- PORTELA, M. S. *Estudo das Propriedades Acústicas da Madeira Amazônica Marupá para Tampo de Violão*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.
- PRATT, R. L.; DOAK, P. E. A Subjective Rating Scale for Timbre. *Journal of Sound and Vibration*, 45:317–328, 1976.
- PURRINGTON, R., D. *The First Professional Scientist: Robert Hooke and the Royal Society of London*. Ed. Springer Science & Business Media. ISBN: 3-034-60037-2. London, 2009.
- RAMALHO JUNIOR, F.; FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. T. *Os fundamentos da Física*. 10ª Edição. Ed. Moderna Plus, 2009.
- RECEP, K, SAMI, M. D. *Investigation of using ANSYS software in the determination of stress behaviors of masonry walls under out of plane cycling load*. *Int. J. Phys. Sci.*, 5(2): 097-108, 2010.
- RIBEIRO, R. F. S. *Análise Experimental e Simulação Numérica da Caixa Acústica de um Violão Clássico e seus Componentes com o Método de Elementos Finitos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia Industrial e Metalúrgica de Volta Redonda, 2014.
- RICHARDSON, B. E.; WALKER, G. P.; BROOKE, M. *Synthesis of guitar tones from fundamental parameters relating to construction*, *Proc. Inst. Acoustics* 12. pp 757-764, 1990.
- RICHARDSON, B. E. *The art and science of classical guitar construction*. In: *Proceedings of the International symposium on musical acoustics*. Dourdan, França, 1995.
- RICHARDSON, B. E. *The classical guitar: Tone by design*. *Proceedings of the International Symposium on Musical Acoustics*, The Acoustical Society of America, Woodbury, 1998.

- RICHARDSON, B. E. *Mode Studies of Plucked Stringed Instruments: Application of Holographic Interferometry*. Proceedings of the Second Vienna Talk, University of Music and Performing Arts Vienna, Austria, 2010.
- ROBERTS, M. J. *Fundamentos de sinais e sistemas*. AMGH Editora, 2009.
- ROEBBEN, G.; BOLLEN, B.; VAN HUMBEECK, J.; VAN DER BIEST, O. *Impulse excitation apparatus to measure resonant frequencies, elastic moduli, and internal friction at room and high temperature*. *Review of Scientific Instruments* 68, 4511 (1997); <https://doi.org/10.1063/1.1148422>
- ROGERS, W. F. *Physics of Music: Science and Art*. Westmont College, Santa Barbara, 2013.
- ROSSING, T. D. *The Science of String Instruments*. Springer, 2010.
- RUSSEL, D.; PEDERSEN, P. *Modal Analyses of an Electric Guitar*. Kettering University January 29, 1999. Disponível em: <https://www.acs.psu.edu/drussell/guitars/electric.html>. Acesso: 18 de agosto, 2019.
- SANDBERG, L. *The Acoustic Guitar*. A Cappella Books, Chicago, 2000.
- SANDIFER, E. *Some Facets of Euler's Work on Series, Studies in the History and Philosophy of Mathematics*. Volume 5, Pages 279-302C, 2007.
- SANTOS, E. M.; MOLINA, C.; TUFÁILE, A. P. B. *Violão e guitarra como ferramentas para o ensino de física*. v. 35, n. 2, 2507. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 2013.
- SEDIK, Y.; HAMDAN, S.; JUSOH, I. *Acoustic Properties of Selected Tropical Wood Species*. *Journal of Nondestructive Evaluation* 29, 38–42 (2010). <https://doi.org/10.1007/s10921-010-0063-7>
- SHEPHERD, M. R.; HAMBRIC, S. A.; WESS, D. B. *The effects of wood variability on the free vibration of an acoustic guitar top plate*. *The Journal of the Acoustical Society of America* 136, EL357, 2014. <https://doi.org/10.1121/1.4898740>
- SLOANE, I. *Classic Guitar Construction*. Omnibus Press, Londres, 1976.
- SNIEDER, R. *A Guided Tour of Mathematical Physics*. Samizdat Press. Utrecht, 1994.

- SOUZA, M. H. *Madeiras Utilizadas para a Fabricação de Instrumentos Musicais*. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2009.
- STANCIU, M.; CURTU, I.; ITU, C.; GRIMBERG, R., *Dynamical Analysis with Finite Element Method of the Acoustic Plates as Constituents of the Guitar*, ProLigno, Vol. 4, No. 1, March 2008, pp. 41-52.
- TEIXEIRA, P. S.; SILVA, A. J.; FEITEIRA, J. F.. *Avaliação e comparação de aracterísticas de amortecimento de sinais gerados de diferentes violões*. Cadernos UniFOA, 2014.
- TEIXEIRA, P. S. *Análise e Síntese de Sinais de Instrumentos Dedilhados. Em exemplo: O Violão*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e Materiais). Universidade Federal Fluminense. Brasil, 2015.
- TEIXEIRA, P. S.; QUEIROZ, A. V.; FERNANDES, M. T.; SILVA, A. J.; FEITEIRA, J. F. *Simulação Matemática de Sintetização de um Sinal Sonoro Obtido Através de um Violão Gianini*. Cadernos UniFOA, Volta Redonda, n. 39, p. 41-51, abril 2019.
- YILMAZ, O. *Seismic data processing*. SEG Investigations in Geophysics, 1987.
- YNOGUTI, C. A. *Síntese de sons musicais baseada na transformada Karhunen-Loève*. São Carlos. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 1995.
- YOSHIKAWA, S. *Acoustical classification of woods for string instruments*. J. Acoust. Soc. Am. 122(1), 568–573, 2007.
- WEGST, U. G. K. *Wood for sound*. Am. J. Bot. 93(10), 1439–1448, 2006.
- WILLIS, A. *Step-By-Step Guitar Making*. Guild of Master Craftsman, Lewes, 2010.
- WOOD HANDBOOK: WOOD AS AN ENGINEERING MATERIAL. Wisconsin: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. p. 508, 2010.
- WRIGHT, H. *The Acoustics and Psychoacoustics of the Guitar*. Ph.D.Thesis, Department of Physics and Astronomy. University of Wales. 1996.

WUENSCHÉ, Carlos A. *Física da Música*. inpe/mct - Divisão de Astrofísica, 2009.

ZACZÉSKI, M. E., BECKERT, C. H., BARROS, T.G., FERREIRA, A. L., FREITAS, T. C.

2018. *Guitar: Acoustic, Structural and Historical Aspects*. Revista Brasileira de Ensino de

Física. vol. 40. nº 1. 2018 . Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0192>.

Anexo I - Artigo publicado na Revista RESEARCH, SOCIETY AND DEVELOPMENT

Research, Society and Development, v. 10, n. 2, e24410212491, 2021

(CC BY 4.0) | ISSN 2525-3409 | DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i2.12491>

Análise modal de modelo computacional de violão usando elementos finitos e método de excitação por impulso

Modal analysis of computational guitar model using finite elements and impulse excitation method

Análisis modal del modelo computacional de guitarra usando elementos finitos y método de excitación por impulso

Recebido: 29/01/2021 | Revisado: 04/02/2021 | Aceito: 06/02/2021 | Publicado: 14/02/2021

Paulo Sérgio Teixeira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2581-7047>
Universidade Federal Fluminense, Brasil
E-mail: paulost39@gmail.com

José Flávio Silveira Feiteira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6358-9049>
Universidade Federal Fluminense, Brasil
E-mail: zeflavio@gmail.com

Rangel de Paula Almeida

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9467-3446>
Universidade Federal Fluminense, Brasil
E-mail: almeida.rangel95@gmail.com

Alexandre Furtado Ferreira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7397-7344>
Universidade Federal Fluminense, Brasil
E-mail: alexandrefurtado@id.uff.br

Resumo

Um violão é construído essencialmente de madeira. Porém, cada madeira traz consigo algumas características específicas. O seu comportamento acústico está relacionado às propriedades elásticas dos materiais que o compõem. Sabe-se que as propriedades elásticas dos materiais interferem não apenas em sua resistência mecânica, mas também em seu comportamento dinâmico; uma estrutura pode vibrar de forma mais ou menos intensa dependendo do material que a compõe e de suas propriedades elásticas. O presente trabalho analisa o comportamento dinâmico de um modelo computacional de violão através de análises modais calculadas pelo método de elementos finitos (MEF) aplicando condições de contorno que simulam a rigidez das faixas laterais e a tensão das cordas no cavalete e braço obtendo respostas em termos de frequências naturais e as correspondentes formas dos modos de vibração. E assim, comparar com respostas em frequência obtidas experimentalmente através do método de excitação por impulso. Os resultados mostram que as respostas em frequências naturais numéricas se assemelham com os valores obtidos experimentalmente, indicativo de pertencerem a um mesmo modo de vibração.

Palavras-chave: Violão; Elementos finitos; Frequências naturais; Impulso; Modo de vibração.

Abstract

A guitar is constructed essentially of wood. However, each wood brings with it some specific characteristics. Its acoustic behavior is related to the elastic properties of the materials that compose it. It is known that the elastic properties of materials interfere not only in their mechanical resistance, but also in their dynamic behavior; a structure can vibrate more or less intensely depending on the material that composes it and its elastic properties. The present work analyzes the dynamic behavior of a computational guitar model through modal analysis calculated by the finite element method (MEF)

applying boundary conditions that simulate the stiffness of the lateral bands and the tension of the strings on the easel and neck, obtaining answers in terms of natural frequencies and the corresponding forms of vibration modes. And so, compare with frequency responses obtained experimentally through the method of pulse excitation. The results show that the responses in numerical natural frequencies are similar to the values obtained experimentally, indicative of belonging to the same mode of vibration.

Keywords: Guitar; Finite elements; Natural frequencies; Impulse; Vibration mode.

Resumen

Una guitarra está construida esencialmente de madera. Sin embargo, cada madera trae consigo algunas características específicas. Su comportamiento acústico está relacionado con las propiedades elásticas de los materiales que lo componen. Se sabe que las propiedades elásticas de los materiales interfieren no solo en su resistencia mecánica, sino también en su comportamiento dinámico; una estructura puede vibrar de forma más o menos intensa según el material que la componga y sus propiedades elásticas. El presente trabajo analiza el comportamiento dinámico de un modelo computacional de guitarra mediante análisis modal calculado por el método de elementos finitos (MEF) aplicando condiciones de contorno que simulan la rigidez de las bandas laterales y la tensión de las cuerdas en el caballete y el mástil, obteniendo respuestas en términos de frecuencias naturales y las correspondientes formas de modos de vibración. Y así, compare con las respuestas de frecuencia obtenidas experimentalmente mediante el método de excitación de pulsos. Los resultados muestran que las respuestas en frecuencias naturales numéricas son similares a los valores obtenidos experimentalmente, indicativos de pertenencia a un mismo modo de vibración.

Palabras clave: Guitarra; Elementos finitos; Frecuencias naturales; Impulso; Modo de vibración.

1. Introdução

O violão é um instrumento musical da família dos cordofones dedilhados que são aqueles em que o som é produzido pela vibração de cordas tensionadas. Estes instrumentos podem ser tocados ou posto em movimento usando dedos, unhas, ou palhetas (Filho, 2009).

A origem do violão é incerta, tendo duas hipóteses prováveis para o seu surgimento. A primeira sugere que o referido instrumento musical seja uma derivação de um instrumento Egípcio, chamado Alaúde. A segunda sugere que o violão é uma variação de um instrumento grego, denominado Assíria. O violão foi modificado sucessivamente pelos Luthiers, responsáveis pela produção e reparo do violão até alcançarem o seu formato clássico, cujos registros de produção datam do século dezoito. Com mais de 150 anos, este projeto é utilizado por muitos construtores (Sloane, 1976). As primeiras plantas foram desenhadas por Antônio de Torres que é conhecido nos dias de hoje como idealizador deste instrumento. Este Luthier espanhol que começou a sua carreira em 1840 foi um dos principais responsáveis pela determinação das formas e dimensões definitivas do violão. Ainda que tenha sido influenciado por instrumentos de corda antigos ele se popularizou substituindo ao longo do tempo o alaúde, instrumento de cordas muito utilizado na época do Renascimento ao Barroco. Em francês era chamado de Luth, daí o nome de Luthier. Desde então não sofreu alterações drásticas ao seu projeto (Löw, 2012).

O violão tradicional possui seis cordas com comprimento acústico de 65,0 centímetros medidos entre o rastilho e a pestana. Usando como referência o diapásão de 440 Hertz (Hz) essas cordas são afinadas em frequências características: 82 Hz, 110 Hz, 147 Hz, 196 Hz, 247 Hz e 330 Hz referente, respectivamente, da sexta à primeira corda de notas mi_2 , $lá_2$, $ré_3$, sol_3 , si_3 e mi_4 (Zaczéski, 2018). Em nomenclatura inglesa: E, A, D, G, B e E, nesta ordem. E, além disso, todas as partes que compõem o violão são feitas dos mais variados materiais, essencialmente madeira, para atender as necessidades referentes a cada componente conforme suas funções a serem desempenhadas no instrumento.

Por mais que o desenvolvimento do design clássico do violão tenha sido um processo basicamente empírico, o entendimento das características vibroacústicas desse instrumento é de grande importância, pois, a qualidade sonora do mesmo está diretamente ligada a essas características (Patil, 2017). Uma das partes deste instrumento que mais sofreu alterações foi o tampo harmônico com várias configurações do leque harmônico, usado para dar rigidez ao tampo e ao mesmo tempo disciplinar a vibração do mesmo (Zaczéski, 2018).

Um fato relevante no aspecto construtivo do violão é a possibilidade de deformação do tampo devido à tensão das cordas no acoplamento das mesmas com o cavalete. O tampo por ser feito de placas de madeira de espessura muito fina e apresenta uma tendência a um encurvamento ou flexão para fora do instrumento. Este tampo deve suportar a tensão exercida pelas cordas e minimizar as eventuais deformações devido a variações climáticas (Sloane, 1976). Para isso, na sua parte interna é colado um conjunto de barras chamadas de leques harmônicos que servem também para dar maior rigidez, atenuando este efeito. Além disso, essa estrutura tem a função também de acoplar os movimentos desta superfície, de forma que o tampo possua modos de vibração com certas características (Jovicic, 2000).

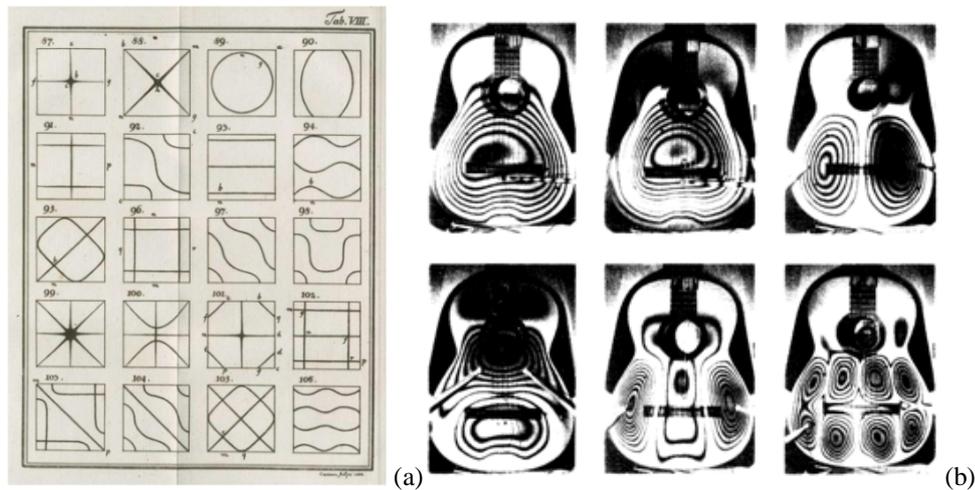
Um dos importantes aspectos da pesquisa atual em acústica musical consiste na conexão das propriedades físicas mensuráveis de um instrumento musical e sua qualidade sonora. Um melhor entendimento das relações entre qualidade do som e a resposta vibro acústica do instrumento permitirá aos fabricantes de instrumentos o ajuste das características tonais do mesmo alterando seus materiais, geometrias e padrões de construção usados (Wright, 1996). Um dos métodos promissores na solução de problemas acústica musical tem sido o uso de modelos computacionais que simulem o comportamento de instrumentos reais utilizando elementos finitos.

Segundo Gorrostieta-Hurtado (2012) as vibrações presentes no violão em geral pode ser descrita em termos de modos de vibração produzidos por elementos estruturais. Os modos normais de vibração são formas independentes provocadas por um estímulo externo. Eles são caracterizados por nós e anti-nós, bem como a frequência modal e amortecimento. A análise modal é um método estabelecido para a identificação de parâmetros modais de uma estrutura, como frequências naturais, formas modais e amortecimento. Este método foi definido e aplicado na construção de violinos e usado por muitos construtores para determinar certas características do seu instrumento. E também estendido para o violão e relatado em alguns estudos (Curtu, et al., 2008; Bader, 2005). Houve vários estudos e comparações que analisam os modos de vibração aplicados ao violão, e um exemplo foi a publicação de Curtu et al. (2008), que se concentra em uma tabela comparativa da análise modal de obras de diferentes autores.

A análise modal é usada para calcular as frequências naturais e as formas dos modos de vibração de uma estrutura. A dinâmica de estruturas estuda as modificações ocorridas na quantidade de movimento dos sistemas elásticos. alguns exemplos são: ação de um motor sobre sua base, ação dos ventos ou das ondas do mar em estruturas, ação de terremotos ou explosões, sempre usada para sistemas oscilantes ou vibrantes ocasionados por uma carga provocadora de tal efeito, como por exemplo também, um violão ou outro instrumento de corda, em que sob a ação de uma pequena força faz com que a corda vibre e transmita essa vibração para todo o instrumento (Gorrostieta-Hurtado, 2012).

As propriedades dos modos de vibração estão relacionadas com muitos processos físicos que ocorrem no instrumento. Interferometria holográfica e técnicas mecânicas (técnica de Chladni) têm sido usadas para visualizar as formas dos modos de placas e de instrumentos completos.

Figura 1: (a) Padrões de vibração representados em figuras de Chladni; **(b)** Modos de vibração visualizados usando interferometria holográfica. As frequências de modo são (da esquerda para a direita, de cima para baixo) 106 Hz, 216 Hz, 268 Hz, 431 Hz, 553 Hz, 1010 Hz.



Fonte: (a) Chladni, (1787); (b) Jansson (1971)

Ernst Chladni (1756 - 1827) se utilizou de placas circulares e retangulares (figura 1 a) em sua pesquisa incluindo, além disso, observações sobre as variantes produzidas pela diferença de intensidade e velocidade com que o arco de violino era percutido, agregado a porção fracionada da placa. Suas experiências produziram imagens variadas que o autor classificou e documentou a fim de determinar a ocorrência das similaridades ou disparidades dos padrões imagéticos apresentados (Almeida, 2017). Variações desta técnica são ainda comumente usadas na projeção e construção de instrumentos musicais acústicos como o violino, violão e violoncelo.

Jansson (1971) foi o primeiro a publicar interferogramas (figura 1 b) de alguns modos do tampo de um violão. Ele usa nesse artigo dados holográficos a fim de interpretar os picos observados nas medidas de resposta de pressão sonora, que foram tomadas variando o ponto de excitação no tampo e variando a posição do microfone. Observou-se que o campo de radiação em alguns modos não foi detectado por microfones posicionados diretamente à frente do tampo do instrumento

Wright (1996), fundamentou a sua pesquisa na observação da qualidade do instrumento através do estudo da análise modal das partes que compõem o violão, principalmente o tampo superior, que segundo ele, é a parte mais importante no que diz respeito a resposta acústica do instrumento.

Muitos dos processos físicos importantes que ocorrem em um instrumento musical estão relacionados com a as propriedades dos modos de vibração do instrumento. E o comportamento da caixa de ressonância do violão utilizando medidas eletromecânicas de entrada e saída em alguns pontos do tampo e suas correlações com a eficiência de radiação acústica (Lai e Burgess, 1990).

Gorrostieta-Hurtado e Colaboradores (2012) investigaram o comportamento dinâmico de um violão clássico (violão de Torres) ao longo de diferentes estágios de construção por meio de análise modal experimental e numérica, empregando elementos finitos, simulação computacional, medidas de frequências naturais e modos de vibrar (técnica de Chladni) da caixa de ressonância por meio de excitação mecânica.

O emprego da modelagem computacional é focado na resolução de problemas em várias áreas da ciência tais como: social, ambiental, engenharia,climática, etc. Nessa abordagem é possível antecipar desempenhos, eventualmente detectar falhas, enfim prever o comportamento em condições mais abrangentes que

aquelas possíveis de serem realizadas em laboratórios (Curtu et al., 2008; Lee et al., 2018). O método de elementos finitos, assim como diversas outras soluções matemáticas, é uma ferramenta numérica que permite prevê problemas de contorno (Lotti et al., 2006 apud Melo et al., 2020).

Curtu e Colaboradores (2009) utilizaram procedimentos similares para investigar o comportamento dinâmico do tampo, como estrutura isolada, e de caixas de ressonância com diferentes tipos de leque harmônico.

Outro método usado para caracterização de materiais submetidos à vibração é a técnica de excitação por impulso que consiste promover um leve impacto ao espécime, neste caso, no tampo do violão, que, após um curto período transitório, irá vibrar em uma ou mais de suas frequências ressonantes. A técnica de excitação por impulso é essencialmente não destrutivo e não requer nenhum formato especial para o objeto testado. E têm tido grande aceitação mundial tanto na indústria e na pesquisa (Roebben, 1997).

Os modos de vibração de um espécime analisado dependem de sua forma, o local do impacto e o tipo de suporte. O local do impacto é próximo a um antinodo da vibração. O impacto pode ser fornecido manualmente, com uma ferramenta simples com uma ponta metálica ou através de dispositivo automático de impacto. A vibração da amostra é registrada por um cristal piezoelétrico ou por um microfone. Um cristal piezoelétrico requer contato com o objeto analisado e para se ter uma boa medição deve se estabelecer o lugar de contato o mais próximo possível do nó de vibração (Roebben, 1997).

A Técnica de Excitação por Impulso usada no presente trabalho foi desenvolvida pela empresa Sonelastic (Otani, 2017) de acordo com a Norma ASTM E1876 (2007) que consiste essencialmente na determinação dos módulos elásticos de um material a partir das frequências naturais de vibração. Estas frequências são excitadas por meio de um impacto mecânico de curta duração, seguido da captação da resposta acústica por um sensor. Um tratamento matemático é feito no sinal para a obtenção do espectro de frequências (Transformada Rápida de Fourier). Para a excitação dos modos de vibração desejados é necessário impor determinadas condições de contorno.

O presente trabalho objetiva desenvolver um modelo computacional de violão inserindo a maioria das partes que compõem o instrumento tais como: braço, tróculo, culatra, cavalete, caixa acústica com leques harmônicos e reforços, além do ar enclausurado. A construção deste modelo se baseia em dados obtidos a partir de uma pesquisa desenvolvida por Ribeiro (2014), que acompanhou todo o processo de fabricação de um instrumento analisando cada peça separadamente. Este mesmo instrumento é usado para as análises experimentais deste trabalho.

Pretende-se ainda realizar análises modais calculadas pelo método de elementos finitos (MEF) para determinar o comportamento dinâmico aplicando condições de contorno que simulam a rigidez das faixas laterais e a tensão das cordas no cavalete e braço obtendo respostas em termos de frequências naturais e as correspondentes formas dos modos de vibração. E assim, comparar com respostas em frequência obtidas experimentalmente através do método de excitação por impulso.

2. Metodologia

A análise de caso de aspecto quantitativo (Pereira et al., 2018) se refere a análise modal com suas frequências características relativas a cada modo de vibração de um modelo computacional de violão desenvolvido a partir de medidas de um violão construído artesanalmente por um luthier colaborador do projeto com as respostas em frequência obtidas a partir técnica de excitação por impulso.

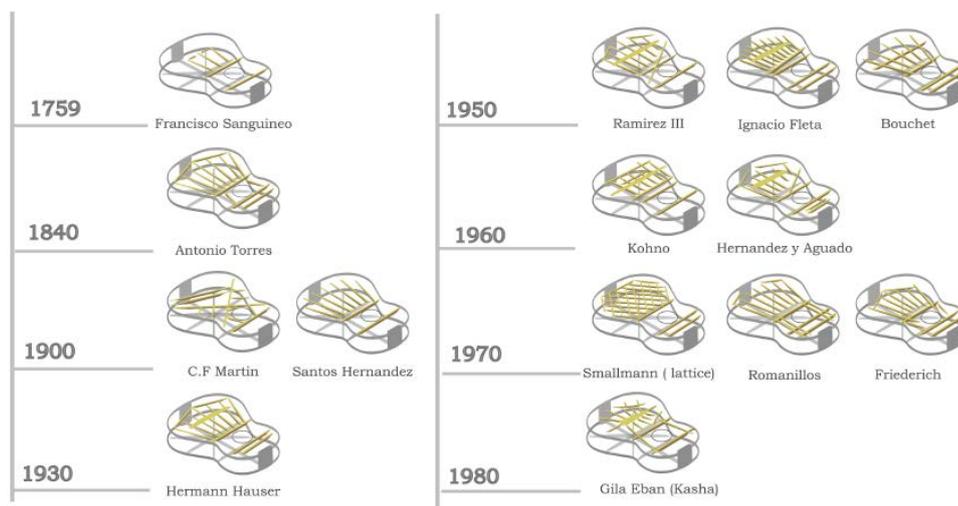
2.1 Construção do Modelo Computacional

O modelo computacional foi construído com geometria 3D usando o software ANSYS® (Mechanical APDL 14.0), onde todos os elementos foram criados como sólidos geométricos. Para a construção deste modelo foram utilizados dados da montagem da caixa acústica de um violão clássico, construído pelo luthier brasileiro Antônio Maurício Barros (Figura 3 (a)) que, por sua vez, tomou como base para o modelo do luthier alemão Hermmam Hauser, porém com uma configuração diferente de leque harmônico.

A construção da geometria também é feita com base nos dados obtidos no trabalho de Ribeiro (2014) que, através das plantas projetadas para o tampo, fundo e carcaça, obteve valores de coordenadas bidimensionais (x, y) para o contorno das placas, dos reforços, das varetas do leque harmônico, do tróculo e da culatra; com o paquímetro, foram obtidas as dimensões em z (espessuras das placas do tampo e do fundo, alturas das varetas, travessas, reforços e laterais). As medidas do braço foram obtidas diretamente da planta do modelo de violão. A geometria do tróculo foi construída não levando em consideração a geometria de aspecto arredondado, original do modelo.

As varetas à esquerda foram construídas por meio da reflexão das varetas à direita; a inclinação das varetas à direita, relativamente ao eixo x, é de 52° e das varetas à esquerda, conseqüentemente, de -52° . Além disso, foram criados sistemas de coordenadas locais para representar as diferentes direções das fibras das madeiras, de acordo com a disposição das peças no violão real.

Figura 2: Principais mudanças na disposição dos leques harmônicos feitas por alguns construtores (Luthiers) de 1759 a1980.

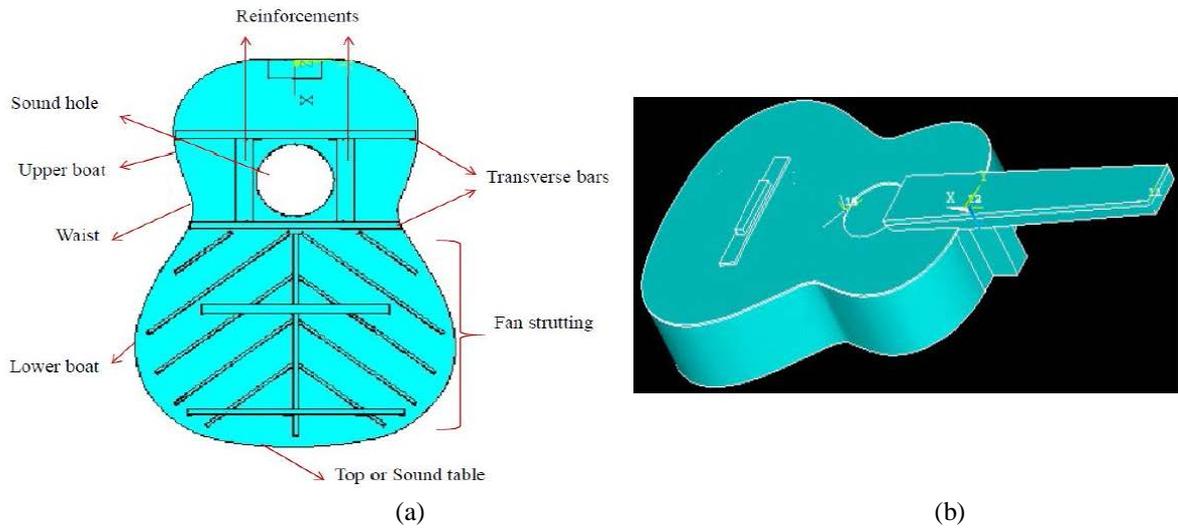


Fonte: Zaczéski (2018).

Zaczéski et al, (2018) aborda as principais mudanças na posição dos leques harmônicos feitas por alguns construtores (Luthiers) ao longo dos tempos (figura 2). Iniciado por Francisco Sanguineo em 1759, o grande precursor do modelo de violão que se conhece hoje tem suas raízes no modelo desenvolvido pelo espanhol Antônio Torres em 1840 passando por algumas modificações propostas por famosos construtores ou Luthiers.

O presente trabalho apresenta uma configuração dos leques desenvolvida pelo Luthier Antônio Maurício Barros (figura 3 (a)) inspirado no trabalho do alemão Hermann Hauser.

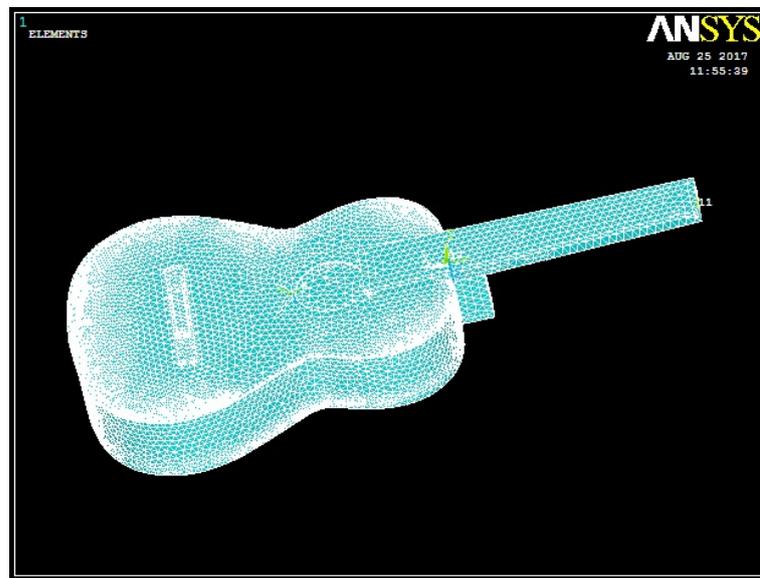
Figura 3: Esboço e definição de componentes do tampo harmônico desenvolvido pelo luthier brasileiro Antônio Maurício Barros; Modelo computacional finalizado via elementos finitos.



Fonte: Autores (2020).

A construção deste modelo Matemático é feita inicialmente pelas coordenadas do tampo superior gerando as linhas de contorno seguindo pela área da placa, criação do furo (boca do violão), geração do volume da placa (espessura de 0,0027 m), reforço da boca, varetas e travessas do leque harmônico e finalizando com as outras partes do violão tais como: fundo, laterais, leque harmônico, tróculo e braço. Na sequência é usado o comando GLUE para unir as partes finalizando o modelo (figura 3 b). A discretização é feita via comando Smart Size (comando do Ansys que permite a geração automática da malha) (Figura 4).

Figura 4: Discretização do tampo via SMART SIZE.

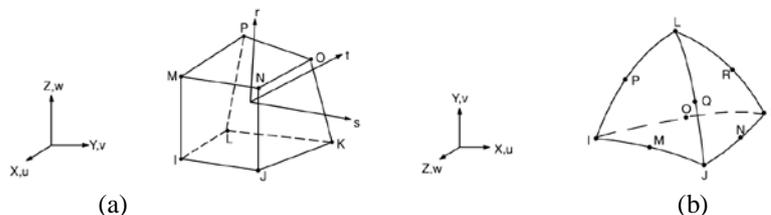


Fonte: Autores (2020).

Para a discretização, ou seja, criação da malha adotou-se do Ansys o elemento *Solid 187* (figura 5 b) para os volumes correspondentes ao braço, tróculo e culatra, tampo e fundo e o *Solid 185*(figura 5 a), para o

volume de ar da caixa acústica, adequados a modelos com malha irregular e análises com materiais ortotrópicos e anisotrópicos (Ansys, 2012).

Figura 5: (a) Elemento Solid 185; (b) Elemento Solid 187.



Fonte: Ansys (2012).

2.2 Propriedades dos Materiais

Para a simulação do comportamento do modelo são usados neste trabalho dados referentes às propriedades de diversas madeiras, tais como, coeficiente de Poisson, módulo de elasticidade e massa específica.

Para o tampo e reforço da boca são usados Abeto Alemão e nas vigas, Pinho de Riga. Nas partes de baixo do braço, culatra, tróculos interno e externo, travessas e reforço do fundo são usados Mogno. No tampo do fundo e lateral, Jacarandá da Bahia. Escala e ponte, o Ébano, além das propriedades do Ar que são consideradas para a parte interna. Na tabela 1 estão as propriedades dos materiais usados na construção do modelo computacional.

Tabela 1: Propriedades dos materiais usados na construção do modelo computacional.

	Pinho de Abeto alemão	Mogno	Pinho de Riga	Jacarandá da Bahia	Ébano	Ar
EL (GPa)	10,4705	11,74	17	14,83	19,5	-
ER (GPa)	1,3402	1,303	1,921	0,742	2,12	-
ET (GPa)	0,618	0,587	1,326	0,463	1,51	-
GLR (GPa)	1,298	1,033	1,394	1,059	1,65	-
GLT (GPa)	1,256	0,693	1,377	0,1059	1,535	-
GRT (GPa)	0,106	0,247	0,221	0,0113	0,1572	-
μLR	0,42	0,34	0,33	0,37	0,38	-
μLT	0,46	0,32	0,29	0,5	0,42	-
μRT	0,53	0,41	0,38	0,67	0,45	-
Massa específica (kg/m³)	380	500	630	900	1140	1,204

Fonte: Ribeiro (2014).

As propriedades dos materiais usados no presente trabalho são baseadas na tabela 1 de Ribeiro, 2014. Onde **E** é o módulo de Elasticidade, **G** o módulo de cisalhamento e **μ** o coeficiente de Poisson. As constantes **L**, **R** e **T**, indicam as direções longitudinal, radial e transversal, respectivamente.

2.3 Análise Modal

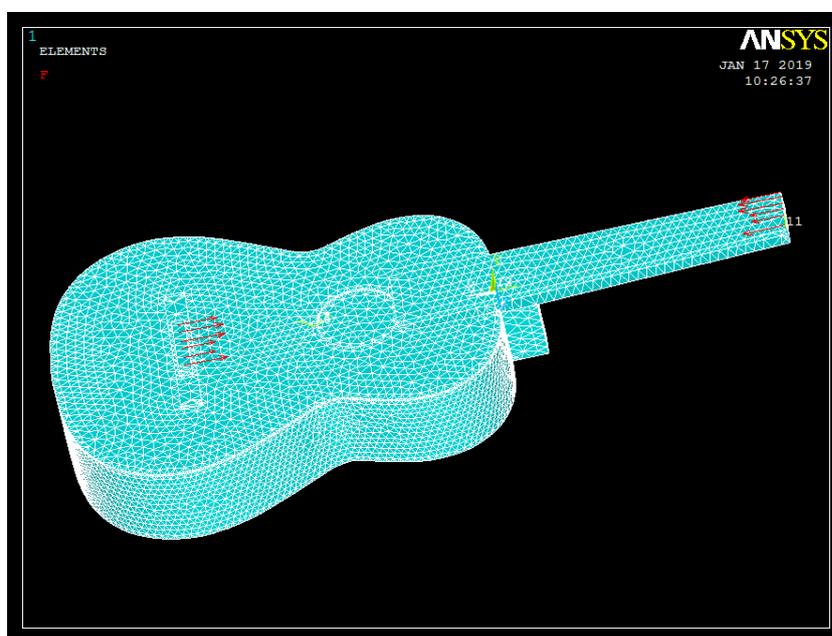
Para o presente trabalho são desenvolvidas duas análises. A primeira se trata de uma análise modal com as condições que sugerem o instrumento sem a tensão que supostamente seriam impostas pelas cordas quando o instrumento está afinado, termo utilizado no meio musical, mas que se trata do ajuste da tensão estabelecida para a corda em ela seria capaz produzir a vibração com a frequência característica.

Não é colocada também nenhuma restrição de deslocamento em nenhuma região do modelo, somente as propriedades dos materiais.

Após a escolha do tipo de análise escolhe-se o método *Block Lanczos* que é um dos métodos de extração de modos de vibração padrão pra análise modal no *Ansys*. Este método apresentou a vantagem de diminuir consideravelmente o tempo de análise (Ribeiro, 2014). Escolhem-se também quarenta modos de vibração a extrair com as devidas frequências características ou naturais, mas para as análises de visualização dos modos utilizam-se apenas os doze primeiros. As frequências que caracterizam os demais modos são usadas em comparações adiante no método experimental. O intervalo de frequências escolhido para o presente trabalho é entre zero e setecentos Hertz.

A segunda análise modal é feita após inserir no modelo algumas condições que se acredita ser as que fazem o modelo computacional ter comportamento dinâmico semelhante ao modelo físico. Tais condições são a restrição de movimento nas laterais para simular a possível rigidez imposta pelo posicionamento das fibras da madeira e do processo de montagem dessa parte do instrumento. Para isso é aplicado deslocamento igual a zero.

Figura 6: Modelo finalizado Discretizado via comando *Smart Size* com Condições de contorno no braço e cavalete.



Fonte: Autores (2020).

A segunda é a aplicação de tensão em nós do cavalete e braço do modelo em posições onde ficariam as cordas. São inseridos vetores força paralelos ao tampo direcionados para a região central nas mesmas posições relativas às cordas com o objetivo de simular os efeitos da tração das cordas no instrumento quando está afinado (figura 6).

Para isso são utilizados valores catalogados de um fabricante de cordas de nylon para violões (D'Addário Cordas, 2018). Tal catálogo fornece as medidas e tensões de afinação das cordas (figura 7). É usado o modelo EJ27H D'Addário Classic Nylon. Observando que as mesmas cordas são usadas no procedimento experimental.

Figura 7: Medidas e tensões para jogo de cordas EJ27H D’Addário Classic Nylon.

Código	nota	Diâmetro		tração	
		pol	mm	lbs.	kg
J2701	MI	.028	0.71	15.3	6.94
J2702	SI	.032	0.81	11.6	5.26
J2703	SOL	.040	1.02	12.1	5.49
J2704	RE	.029	0.74	15.6	7.08
J2705	LA	.035	0.89	15.0	6.80
J2706	MI	.043	1.09	14.0	6.35

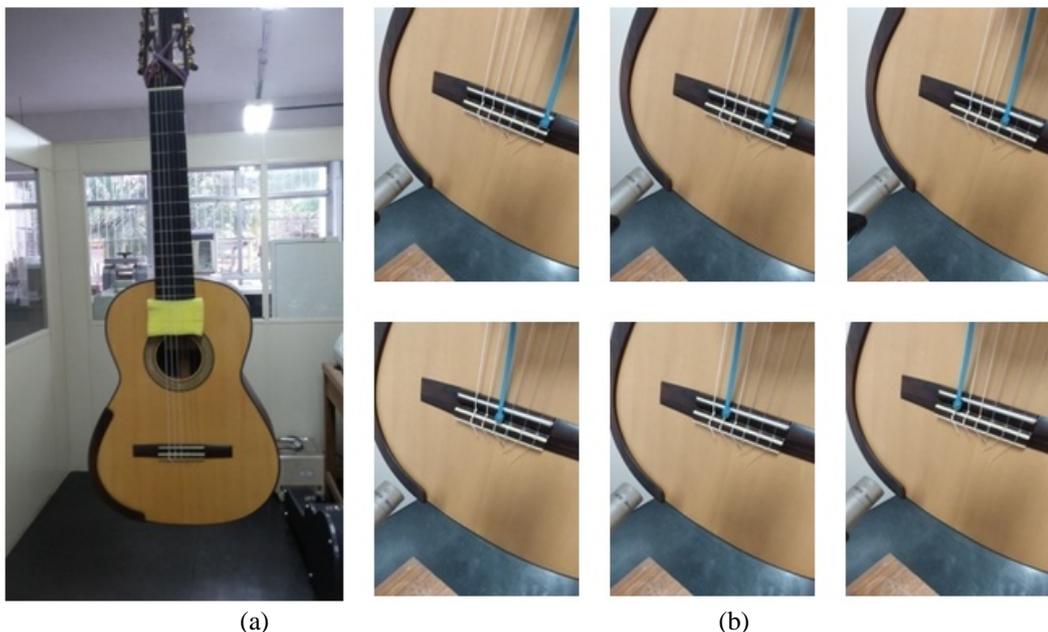
11029
EJ27H Hard/Prata / Náilon Transparente

Fonte: Catálogo D’Addário – Cordas (2018).

2.4 Caracterização Experimental

O presente trabalho utiliza-se da técnica de excitação por impulso através do software sonelastic (Otani, 2017), que consiste neste caso, em promover um leve impacto na ponte do violão ao lado posição de cada corda do instrumento captando as respostas em frequências naturais através de microfone (Figura 8 b).

Figura 8: (a) Violão pendurado no suporte; (b) Excitação por impulso na ponte nas posições da primeira a sexta corda (da esquerda para a direita, de cima para baixo).

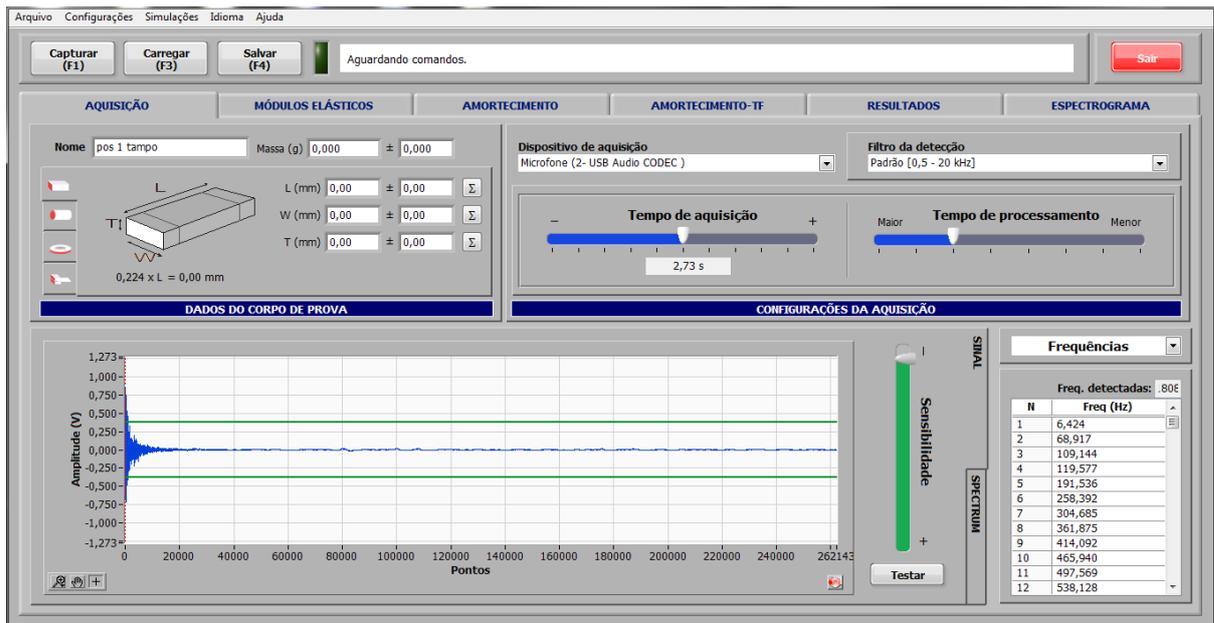


Fonte: Autores (2020).

Para isso o instrumento foi pendurado pela cabeça por cordas elásticas em um suporte (Figura 8 a). Nas cordas do violão foi inserida a tensão de afinação e em seguida abafadas com auxílio de espuma para que não haja interferência de vibração das mesmas (Cossolino e Pereira 2010).

Antes do início da experiência são necessários alguns ajustes de configuração para se obter um maior número de frequências possíveis em intervalo frequências considerado. Em análises preliminares percebeu-se que tais ajustes são necessários, mas que podem variar de acordo com o material ensaiado.

Figura 9: Tela de aquisição de dados no software Sonelastic.



Fonte: Autores (2020).

A figura 9 mostra os ajustes usados para essa pesquisa. São ajustados o tempo de aquisição, tempo de processamento e sensibilidade do microfone, além do filtro de detecção para melhor aquisição de dados no software Sonelastic de acordo com o material ensaiado. Os dados obtidos foram listados em tabelas para análises no próximo capítulo.

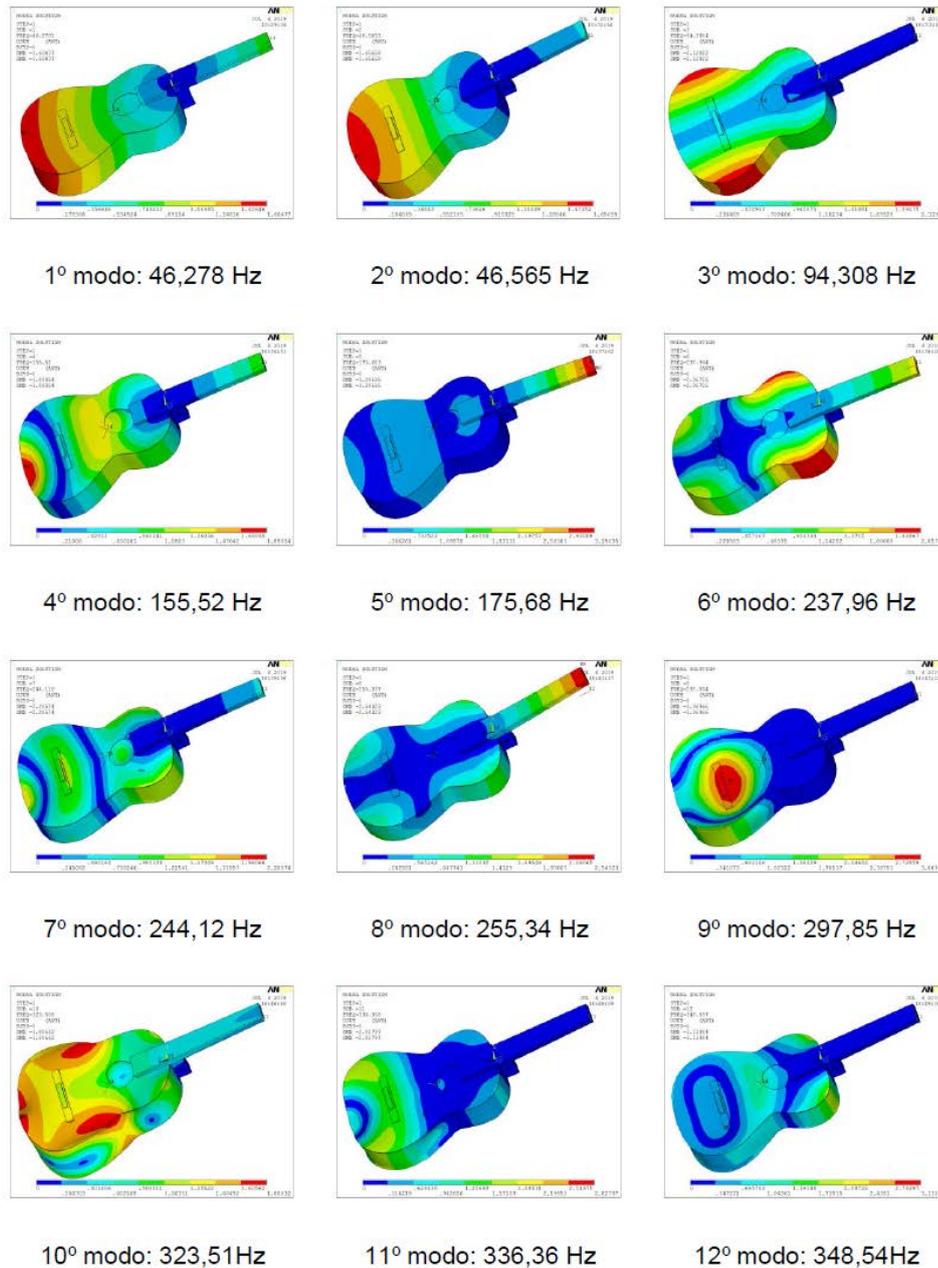
3. Resultados e Discussão

Os resultados a seguir são referentes às análises do modelo computacional desenvolvido através de medidas e características dos materiais usados na fabricação do modelo físico.

Inicialmente é feita análise modal para o modelo sem restrições de movimento (Figura 10) e obtidos os vários modos de vibração com suas frequências características.

O intervalo de frequência escolhido para ser observado, neste caso, foi entre zero e mil Hertz e quarenta é a quantidade de modos a extrair (tabela 2), mas para as análises comparativas são usados os doze primeiros modos e as respostas em frequência até setecentos Hertz.

Figura 10: Doze primeiros modos de vibração com respectivas frequências para o modelo sem as condições de contorno.



Fonte: Autores (2020).

Os doze primeiros modos de vibração do modelo (figura 10) com suas frequências características sem aplicação de condições de contorno mostram que a combinação das várias partes do modelo com madeiras diferentes fazem surgir vários modos de vibração com seus nós, região de menor movimentação vibracional, indicados pela cor azul e antinós, região de movimentação vibracional máxima, indicado pela cor vermelha. Havendo ainda, outras cores indicando movimentações intermediárias como indicado na escala em cada figura gerada no *Software Ansys*. Como não há condições restritivas de movimento surgem quarenta modos de vibração com suas respectivas frequências naturais tomando como referência um intervalo entre zero e setecentos Hertz (tabela 2).

Tabela 2: Modos e respectivas frequências de vibração para o modelo sem condições de contorno.

Modos	Frequências (Hz)	Modos	Frequências Hz)
1	46,278	21	488,47
2	46,565	22	489,50
3	94,308	23	505,99
4	155,52	24	528,59
5	175,68	25	551,68
6	237,96	26	562,35
7	244,12	27	568,40
8	255,34	28	586,23
9	297,85	29	591,51
10	323,51	30	609,00
11	336,36	31	614,72
12	348,54	32	615,96
13	388,89	33	622,70
14	404,67	34	636,36
15	421,42	35	639,07
16	422,45	36	646,76
17	440,26	37	659,13
18	455,52	38	680,69
19	461,76	39	691,47
20	474,65	40	699,81

Fonte: Autores (2020).

A tabela 2 mostra resultados relevantes, tendo em vista que somente foram inseridas no modelo as propriedades dos materiais e não foi colocada nenhuma condição restritiva de movimento, que poderia diminuir sensivelmente os graus de liberdade, ou, nesse caso, a possibilidade de vibrar com mais intensidade. O modelo apresenta muitas frequências naturais que estão relacionadas ao respectivo modo vibracional.

Para uma nova análise modal aplicam-se algumas condições ao modelo anteriormente mencionadas ao modelo na tentativa de assemelhar as condições dinâmicas do mesmo. A primeira consiste em não movimentação da lateral do instrumento para indicar a rigidez dessa região no modelo e a segunda na aplicação de tensão imposta pelas cordas no ato de afinar o violão.

3.1 Segunda Análise Modal

Inseridas as condições de contorno preestabelecidas, faz-se nova análise modal onde se constatou certa diminuição da quantidade de modos de vibração no intervalo de zero a setecentos Hertz, onde antes, sem condições de contorno, apresentava quarenta modos de vibração (Tabela 2), agora apenas doze (Figura 11).

Figura 11: Doze primeiros modos de vibração com respectivas respostas em frequências para as condições de contorno de restrição de movimento nas laterais e tensão das cordas.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados pela técnica de excitação por impulso através do software sonelastic. Foram feitos ensaios com aplicação de força impulsiva manual (batida) da primeira a sexta corda com auxílio de um instrumento feito de plástico com ponta metálica capaz de promover o impulso necessário para provocar a resposta do modelo de violão.

Tabela 3: Respostas em frequências naturais (em Hertz) à excitação por impulso no cavalete em posições relativas às cordas do modelo numeradas em ordem crescente.

Frequências	1ª corda (E)	2ª corda (B)	3ª corda (G)	4ª corda (D)	5ª corda (A)	6ª corda (E)
1	3,953	9,784	4,646	9,442	4,338	20,172
2	23,597	70,338	69,901	89,060	56,640	70,941
3	63,475	102,766	92,571	147,851	105,550	99,651
4	100,576	137,289	192,634	191,068	118,220	132,679
5	136,338	190,890	257,160	219,137	164,239	193,288
6	192,510	249,427	302,668	258,686	197,861	219,093
7	256,642	305,012	360,474	306,623	215,133	260,380
8	304,895	350,563	413,173	332,531	250,561	305,133
9	362,571	413,471	477,488	361,347	307,605	361,749
10	413,658	455,628	539,333	411,469	363,989	416,135
11	449,314	482,771	602,500	475,511	402,221	449,04
12	539,065	540,706	629,093	540,667	417,720	471,173
13	602,699	604,030	644,547	592,609	445,073	493,196
14	628,198	631,524	664,226	630,063	492,568	539,018
15	667,739	679,142	708,599	654,407	503,426	604,286
16	721,026	724,237	736,791	680,473	540,275	626,075
17	807,478	764,435	774,462	712,892	618,211	653,653
18	827,493	806,217	825,948	750,803	651,910	666,648
19	898,584	822,854	908,166	777,706	676,688	736,516
20	935,257	846,262	951,433	800,172	713,284	779,070

Fonte: Autores (2020).

Tal procedimento foi feito nas posições referentes às cordas fazendo excitação no cavalete e variando o grau de sensibilidade do microfone para obtenção do máximo de frequências ressonantes. E assim foram enumeradas as vinte primeiras frequências relacionadas pelo software para cada ponto de excitação e os resultados mostram que a sequência de frequências naturais listadas em ordem crescente são diferentes para cada ponto impulsionado. Embora a vibração se propague para o todo o instrumento, quando se muda a posição provavelmente o caminho de propagação possa mudar, pois a madeira como é um material essencialmente anisotrópico e a direção do alinhamento das fibras pode fazer com que essa vibração encontre regiões com taxas de amortecimentos diferentes, fator que pode influenciar a ressonância dessas frequências.

Outro fato que se deve considerar é que a excitação para provocar a vibração foi feita manualmente, já que o pulsador automático do Sistema Sonelastic poderia causar danos a estrutura do instrumento e isto pode fazer variar os resultados em função da força aplicada.

No contexto geral, essa técnica deve fazer com que se encontrem todas as possíveis frequências ressonantes do material e a tabela 3 nos mostra conjuntos relevantes de frequências para cada ponto excitado. Embora parte da energia possa ser perdida no caminho dessa vibração ao variar o ponto inicial, é possível encontrar varias frequências ressonantes com valores bem próximos, que possivelmente possa ser de uma mesma região do instrumento ou do mesmo modo de vibração.

Para melhor análise as respostas em frequência foram separadas em faixas com valores próximos. Em seguida foi calculada a média e feita a comparação com frequências numéricas homônimas (próximas) (Tabela

4) para investigação dos possíveis modos de vibração a qual pertencem comparando com os resultados numéricos.

Tabela 4: Frequências homônimas experimental/numérico.

Frequências	Experimental						Numérico	
	1ª corda	2ª corda	3ª corda	4ª corda	5ª corda	6ª corda	Média	
1		70,338	69,901			70,941	70,39	
2	100,576	102,766			105,550	99,651	102,13	
3	136,338	137,289				132,679	135,43	
4	192,510	190,890	192,634	191,068		193,288	192,07	189,32
5								239,19
6	304,895	305,012	302,668	306,623	307,605	305,133	305,32	300,05
7		350,563		332,531			341,54	342,46
8	362,571		360,474	361,347	363,989	361,749	362,02	368,00
9	413,658	413,471	413,173	411,469	417,720	416,135	414,27	418,96
10	449,314	455,628			445,073	449,04	449,76	443,44
11	539,065	540,706	539,333	540,667	540,275	539,018	539,84	535,32
12								549,96
13	602,699	604,030	602,500	592,609		604,286	601,22	602,96
14			644,547	654,407	651,910	653,653	651,12	649,30
15	667,739	679,142	664,226	680,473	676,688	666,648	672,48	665,30

Fonte: Autores (2020).

No intervalo de frequências proposto pelo presente trabalho foram observadas 13 faixas de valores com frequências homônimas observadas em cada excitação referente à posição das seis cordas no cavalete. Qualquer impulso faz com que todo o instrumento vibre e a coincidência pode significar que sejam referentes a uma mesma frequência natural de vibração de uma mesma região. Então decidiu-se fazer a média de tais valores por faixas e inseri-los na penúltima coluna da tabela 4.

Na ultima coluna da tabela 4 estão listados em ordem crescente valores de frequências naturais referentes aos modos vibracionais encontrados na análise modal levando em consideração as condições de contorno já discutidas anteriormente que acredita-se ser a que mais se aproxime do comportamento dinâmico do instrumento. Estas frequências são usadas como referência para a comparação com o conjunto de frequências obtidas experimentalmente pelo método de excitação por impulso.

Inicialmente é feito a separação das frequências por valores que se aproximam obtidas experimentalmente onde foram encontrados quinze faixas de acordo com o ponto de excitação. Calculou-se então a média desses valores de acordo com a quantidade observada.

Comparando esses valores médios de frequência percebeu-se que em dez faixas havia valor correspondente próximo nos dados numéricos calculados pelo modelo pelo método de elementos finitos.

Tabela 5: Comparação entre os valores médios de frequências experimentais e numéricas pela diferença percentual.

Modos	Média experimental (Hertz)	Numérico (Hertz)	Erro (%)
1	192,07	189,32	1,45%
2	-	239,19	-
3	305,32	300,05	1,75%
4	341,54	342,46	0,26%
5	362,02	368,00	1,62%
6	414,27	418,96	1,11%
7	449,76	443,44	1,42%
8	539,84	535,32	0,84%
9	-	549,96	-

10	601,22	602,96	0,28%
11	651,12	649,30	0,28%
12	672,48	665,30	1,07%

Fonte: Autores (2020).

A tabela 5 faz a comparação dos resultados obtidos pela média experimental ou pela excitação por impulso com os valores numéricos de freqüências naturais de vibração através da diferença percentual em que se percebeu que a maior diferença não ultrapassa dois por cento. E isto pode ser indicativo de tais freqüências obtidas experimentalmente possam pertencer aos mesmos modos de vibração encontrada na análise modal via elementos finitos.

4. Conclusão

O modelo computacional depois de inseridas as condições de contorno se mostrou com resultados relevantes com relação às freqüências naturais de vibração. Tais condições diminuem consideravelmente o número de modos de vibração no intervalo considerado. As comparações com a técnica de excitação por impulso mostram alguns valores de freqüência com erros menores que 2%, o que pode ser o indicativo de pertencerem a um mesmo modo de vibração assemelhando-se as condições reais do instrumento.

A técnica de excitação por impulso se mostra bastante eficiente, pois permite observar um número grande de freqüências naturais que são encontradas no instrumento (Tabela 3), permitindo a investigação dos possíveis modos de vibração do sistema através da análise modal. Tais modos podem indicar as regiões do instrumento que vibram a determinadas freqüências e isso é importante, pois mostram o comportamento dinâmico, principalmente do tampo, que promovem os deslocamentos de ar dentro da caixa acústica que resulta no som produzido.

O mapeamento dessas regiões pode ajudar no aperfeiçoamento das técnicas construtivas quase sempre artesanais, ou na escolha dos materiais para fabricação dos instrumentos.

Além disso, essa técnica vem de encontro ao método utilizado pelos Luthiers experientes para classificação da qualidade de madeiras para instrumentos de corda. Eles promovem manualmente uma batida na amostra de material e, através da experiência, conseguem fazer uma avaliação da qualidade pelo som emitido. Essa informação foi fornecida pelo Luhier Antônio Maurício Barros, colaborador desse projeto.

As sugestões para trabalhos futuros podem se concentrar em técnicas de caracterização experimental do modelo físico de violão, por exemplo, a técnica de Chladni ou através de uma importante técnica experimental que já vem sendo utilizada em alguns trabalhos na área de acústica, trata-se da caracterização das freqüências naturais e referidos modos de vibração através da vibrometria a laser.

Referências

- Almeida, R. N. (2017). *O Uso do Tonoscópio como Estímulo Sinestésico Áudio Visual na Estratégia de Desenvolvimento da Percepção Musical: Fundamentação Teórica Para Sua Implementação*. Tese de Doutorado em Música. Programa de Pós-Graduação em Música. Centro de Letras e Artes, Universidade federal do Estado do Rio de Janeiro.
- Ansys. (2012). Design Exploration User Guide. *Ansys Inc*.
- ASTM International. (2007). *Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration*; ASTM E 1876, pp 15.
- Bader, R. (2005). Computational Mechanics of the Classical Guitar. *Springer*; 1st ed., pp. 30-80.
- Chladni, E. F. F. (1787). Entdeckungen über die Theorie des Klanges. v. 1, p. 107, *Weidmanns Erben und Reich*, Leipzig.

- Cossolino L. C. & Pereira A. H. A. (2010). *Amortecimento: classificação e métodos de determinação* (Informativo Técnico Científico). Universidade de São Carlos.
- Curtu, I., Stanciu, M. D., Itu, C. & Grimberg, R. (2008). Numerical Modeling of the Acoustic Plates as Constituents of Stringed Instruments, in *Proc. of the 6th International Conference of DAAAM Baltic Industrial Engineering*, ISBN 978-9985-59-783-5, Tallinn, Estonia. 24-26th April 2008, p. 53-58.
- D'Addário Cordas. (2018). *Catálogo*. Recuperado de: http://www2.musicaexpress.com.br/beta/wp-content/themes/musicalxpress/downloads/catalogos/catalogo_D%C2%B4Addario-Cordas.pdf. em: 05 de dezembro de 2018.
- Filho, J. C. P. (2009) *Classificação de Instrumentos Musicais em Configurações Monofônicas e Polifônicas*. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ.
- Gorrostieta-Hurtado, E., Pedraza-Ortega, J. C., Ramos-Arreguin, J. M., Sotomayor-Olmedo A. & Perez-Meneses, J. (2012). Vibration Analysis in the design and construction of an acoustic guitar. *International Journal of Physical Sciences*, 7(13), pp. 1986-1997.
- Jansson, E. V. (1971). A study of acoustical and hologram interferometric measurements of the top plate vibrations of a guitar. *Acustica*, 25, pp. 95-100.
- Jovicic, J. & Jovicic, O. (2000). The Big Red Book of American Lutherie. *Thomson-Shore, Dexter*, pp 402-415.
- Lai, J. C. S. & Burgess M. A. (1990). Radiation efficiency of acoustic guitars. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 88, No. 3, pp.1222-1227.
- Lee, M. K., Fouladi, M. H. & Namasiv, S. N. (2018). Mathematical Modelling and Acoustical Analysis of Classical Guitars and Their Soundboards. *Advances in Acoustics and Vibration*. Vol. 2016, Article ID 6084230. Doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/6084230>
- Löw, A. M. (2012). *Identificação Experimental Modal da Caixa Acústica de Um Violão Clássico*. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
- Melo, R. L. F., Souza, I. C. C., Maia, A. S., Silva, F. M., Queiroz, P. R., Rocha Jr., D., Carvalho, A. C. B., Fernandes, J. P. C., Lima, J. F. V. & Queiroz, L. P. O. (2020). Numerical acquisition of the strain-deformation profile during the passage of heat source in AISI 410, 304L and 430 materials. *Research, Society and Development*, 9(7):1-22, e286974224.
- Otani, L.B., Segundinho, P. G. A., Morales, E. A. M. & Pereira, A. H. A. (2017). Caracterização dos módulos elásticos de madeiras e derivados utilizando a Técnica de Excitação por Impulso (ITC-05 /ATCP). *ATCP Engenharia Física*.
- Patil, K., Baqersad J., Ludwigsen D. & Dong Y. (2016). Extracting vibration characteristics of a guitar using finite element, modal analysis, and digital image correlation techniques. *The Journal of the Acoustical Society of America* 140, 3211.
- Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*: UFSM, NTE.
- Ribeiro, R. F. S. (2014). *Análise Experimental e Simulação Numérica da Caixa Acústica de um Violão Clássico e seus Componentes com o Método de Elementos Finitos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia Metalúrgica de Volta Redonda, Rio de Janeiro, Brasil.
- Roebben, G., Bollen, B., Van Humbeeck, J. & Van Der Biest, O. (1997). Impulse excitation apparatus to measure resonant frequencies, elastic moduli, and internal friction at room and high temperature. *Review of Scientific Instruments* 68, 4511. Doi: <https://doi.org/10.1063/1.1148422>
- Sloane, I. (1976). *Classic Guitar Construction*. *Omnibus Press*, Londres.
- Wright, H. (1996). *The Acoustics and Psychoacoustics of the Guitar*. (Ph.D.Thesis) Department of Physics and Astronomy. University of Wales.
- Zaczéski, M. E., Beckert, C. H., Barros, T. G., Ferreira, A. L. & Freitas, T. C. (2018). Guitar: Acoustic, Structural and Historical Aspects. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. vol. 40. nº 1. 2018 . Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0192>.

Anexo II - Artigo publicado na Revista RESEARCH, SOCIETY AND DEVELOPMENT

Research, Society and Development, v. 10, n. 1, e59810112179, 2021
(CC BY 4.0) | ISSN 2525-3409 | DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i1.12179>

Avaliação das respostas em frequências naturais de um violão pelo método de excitação por impulso e deconvolução de sinais.

Evaluation of the natural frequency responses of a guitar by the method of Impulse excitation and signal deconvolution.

Evaluación de las respuestas en frecuencias naturales de una guitarra por el método de excitación por impulso y desconvolución de señales.

Recebido: 19/01/2020 | Revisado: 23/01/2021 | Aceito: 25/01/2021 | Publicado: 31/01/2021

Paulo Sérgio Teixeira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2581-7047>
Universidade Federal Fluminense, Brasil
E-mail: paulost39@gmail.com

Alexandre Furtado Ferreira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7397-7344>
Universidade Federal Fluminense, Brasil
E-mail: alexandrefurtado@id.uff.br

José Flávio Silveira Feiteira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6358-9049>
Universidade Federal Fluminense, Brasil
E-mail: zeflavio@gmail.com

Resumo

As partes que compõem o violão são feitas dos mais variados materiais para atender as necessidades referentes a cada componente, conforme suas funções específicas a serem desempenhadas no instrumento. Um dos importantes aspectos da pesquisa atual em acústica musical consiste na conexão das propriedades físicas mensuráveis de um instrumento musical e sua qualidade sonora ou tonal. O processamento de sinais acústicos de um instrumento de corda, por exemplo, pode correlacionar os sinais ou sons do violão com uma operação matemática de convolução ou deconvolução estabelecendo relações com suas propriedades físicas. Outra técnica utilizada é a obtenção de respostas em termos de frequência de vibração ou domínio do tempo e a técnica de excitação por impulso. No presente trabalho objetiva-se avaliar através da separação do sinal referente à resposta em frequência do violão através da deconvolução do sinal sonoro gerado ao tocar o instrumento pelo sinal das cordas gravado separadamente. Busca-se também estabelecer as relações com as respostas obtidas através da técnica de excitação por impulso. E os resultados mostram que essas duas técnicas podem representar importantes técnicas de caracterização de materiais usados em instrumentos de corda como o violão.

Palavras-Chave: Violão; Deconvolução; Excitação por Impulso; Frequências; Materiais.

Abstract

The parts that make up the guitar are made of the most varied materials to meet the needs related to each component, according to their specific functions to be performed on the instrument. One of the important aspects of current research in musical acoustics is the connection of the measurable physical properties of a musical instrument and its sound or tonal quality. The processing of acoustic signals from a string instrument, for example, can correlate the acoustic signals or sounds of the guitar with a mathematical operation of convolution or deconvolution by establishing relationships with its physical properties. Another technique used is to obtain responses in terms of frequency of vibration or time domain and the impulse excitation technique. The present work aims to evaluate through the separation of the signal referring to the frequency response of the guitar through the deconvolution of the sound signal generated when playing the instrument by the string signal recorded separately. It also seeks to establish the relationships with the responses obtained through the impulse excitation technique. And

the results show that these two techniques can represent important techniques for characterizing materials used in string instruments such as the guitar.

Keywords: Guitar; Deconvolution; Impulse Excitation; Frequencies; Materials.

Resumen

Las partes que componen la guitarra están fabricadas con los más variados materiales para cubrir las necesidades relacionadas con cada componente, de acuerdo con sus funciones específicas a realizar en el instrumento. Uno de los aspectos importantes de la investigación actual en acústica musical es la conexión de las propiedades físicas mensurables de un instrumento musical y su sonido o calidad tonal. El procesamiento de señales acústicas de un instrumento de cuerda, por ejemplo, puede correlacionar las señales acústicas o sonidos de la guitarra con una operación matemática de convolución o deconvolución estableciendo relaciones con sus propiedades físicas. Otra técnica utilizada es la obtención de respuestas en términos de frecuencia de vibración o dominio del tiempo y la técnica de excitación por impulsos. El presente trabajo tiene como objetivo evaluar a través de la separación de la señal referente a la respuesta en frecuencia de la guitarra mediante la deconvolución de la señal sonora generada al tocar el instrumento por la señal de cuerda grabada por separado. También busca establecer las relaciones con las respuestas obtenidas mediante la técnica de excitación por impulso. Y los resultados muestran que estas dos técnicas pueden representar técnicas importantes para caracterizar materiales utilizados en instrumentos de cuerda como la guitarra.

Palabras clave: Guitarra; Deconvolución; Excitación por Impulso; Frecuencias; Materiales.

1. Introdução

As partes que compõem o violão são feitas dos mais variados materiais para atender as necessidades referentes a cada componente, conforme suas funções específicas a serem desempenhadas no instrumento. (Wright, 1996; Portela, 2014)

A pesquisa em acústica musical tem abrangido diversas áreas do conhecimento. São encontrados trabalhos que discorrem desde as propriedades físicas de materiais usados na construção de instrumentos de corda (Carcagno et al., 2018), até complexas análises psicoacústicas (Wright, 1996). Com isso, muitas técnicas inovadoras têm sido desenvolvidas e, aliadas ao poder de processamento dos computadores atuais, alcançando resultados surpreendentes. Elejabarrieta et al. (2000) estudou a evolução do comportamento vibracional de uma caixa acústica ou de ressonância do violão ao longo de sucessivas fases de construção por meio da técnica de análise modal. Ludwigsen (2013) comparou o som de emitido por vários violões através de características espectrais. As validações de alguns trabalhos se deram através do uso de sensores acelerômetros (Baqersad, 2014 e Avitabile, 2014) para a análise modal experimental da caixa acústica.

Um dos importantes aspectos da pesquisa atual em acústica musical consiste na conexão das propriedades físicas mensuráveis de um instrumento musical e sua qualidade sonora ou tonal. Um melhor entendimento das relações entre qualidade tonal e a resposta vibroacústica do instrumento permitirá aos fabricantes de instrumentos o ajuste das características tonais do mesmo alterando seus materiais, geometrias e padrões de construção usados.

Algumas técnicas têm sido empregadas no estudo das respostas sonoras de instrumentos de corda, entre elas, o processamento de sinais acústicos onde se pode, por exemplo, correlacionar os sinais ou sons do violão com uma operação matemática de convolução ou deconvolução estabelecendo relações com suas propriedades físicas. Outra técnica utilizada é a obtenção de respostas em termos de frequência de vibração a partir de sinais no domínio do tempo e a técnica de excitação por impulso.

Um sinal pode ser formalmente definido como uma função de uma ou mais variáveis, a qual carrega informações sobre a natureza de um fenômeno físico. Para a geração, extração de informação ou recepção de

cada sinal há sempre um sistema envolvido, isto é, uma entidade capaz de manipular um ou mais sinais para realizar uma função. Por exemplo, quando alguém fala, o sistema para emissão da voz são as cordas vocais, e o ouvido é o sistema para recepção do sinal (Haykin, 2001). Assim, pode-se dizer que um sistema é capaz alterar as características de um sinal, caso desejado.

O sinal sonoro ou som resulta da vibração de um meio ou perturbação mecânica que se propaga através de ondas quando é produzido algum tipo de mecanismo que altere de forma periódica da pressão do ar em nossa volta. (Wuensche, 2009).

De acordo com Roederer (1998 apud Mendes et al., 2020) para que haja som, é necessário fazer vibrar um meio. A vibração se espalha pelo ar através das partículas que o formam, gerando áreas de maior e menor pressão, respectivamente áreas de compressão e rarefação, em movimento recíproco, uma vez que o meio é elástico. Portanto, as partículas do meio não são transmitidas junto com o som através do ambiente, que é propagada é a energia vibracional que deu origem ao som.

Para Lazzarini (1998), o som é uma qualidade perceptiva que é o resultado da percepção de distúrbios das moléculas de um meio em certo espaço de tempo. Esses distúrbios, por sua vez, apresentam-se em forma de ondas em sua propagação pelo meio.

Segundo Lacerda (1996), o som pode ser representado por uma soma de diversas ondas individuais chamadas de componentes de Fourier e cada uma corresponde a uma determinada frequência múltipla da componente inicial.

Essas componentes formam uma série conhecida como série harmônica, onde o harmônico de ordem zero é chamado de frequência natural ou fundamental, o segundo é denominado harmônico de primeira ordem ou primeiro harmônico, o terceiro é chamado segundo harmônico e assim sucessivamente.

Para analisar os sinais acústicos de instrumentos, neste caso, o violão, é necessário considerá-lo com um sistema vibrante. Os sistemas de vibração podem vibrar em vários modos diferentes. Cada modo é relacionado a uma frequência diferente e, portanto, um modo de vibração pode ser excitado individualmente por algum tipo de perturbação relacionado a certa frequência (Santos et al., 2013).

A descrição deste movimento vibracional é bastante difícil, pois é necessário saber a amplitude (ou intensidade), a frequência de cada modo de vibração perturbado e a taxa de amortecimento no meio material em que se propaga.

O espectro de uma vibração indica quais frequências estão sendo excitadas e com que intensidade. Esta análise espectral, também conhecida com análise no domínio da frequência, é obtida através da análise de Fourier do sinal sonoro, especificamente pela aplicação da transformada de Fourier ao sinal temporal representativo da vibração estudada (Teixeira et al., 2014).

A convolução é um operador linear que, a partir de duas funções dadas, resulta numa terceira que mede a área subentendida pela superposição das mesmas em função do deslocamento existente entre elas (Katznelson, 1976). Neste contexto, a idéia é que a excitação da corda seja o sinal de entrada, a resposta do instrumento o segundo sinal e o sinal sonoro emitido o terceiro, que neste caso, seria o produto da convolução dos dois primeiros (Teixeira et al., 2019).

A convolução é um processo útil porque descreve com precisão alguns efeitos que ocorrem amplamente em medições científicas. Um exemplo é a influência de um filtro de frequência em um sinal elétrico ou da

passagem de banda espectral de um espectrômetro na forma de um espectro óptico registrado, que causa o sinal a ser espalhado no tempo e reduzido na amplitude do pico (O'Haver, 2008).

Segundo Katznelson (1976), convolução é um operador linear que, a partir de duas funções dadas f e g , resulta numa terceira $h(x)$ que mede a área subentendida pela superposição das mesmas em função do deslocamento existente entre elas (eq. 1). O teorema da convolução estabelece que a transformada de Fourier de uma convolução de duas funções é igual ao produto ponto a ponto das transformadas de Fourier de cada função. Em outras palavras, convolução em um domínio (no domínio do tempo) equivale à multiplicação ponto a ponto no outro domínio (no domínio da frequência).

Dadas as funções f e g cujo produto $h(x) = f(x)g(x)$, a convolução entre f e g , denotada por $f * g$, é definida por qualquer uma das integrais (eq. 1):

$$h(x) = (f * g)(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x - \omega)g(\omega)d\omega = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\omega)g(x - \omega)d\omega \quad (1)$$

Muito usada na geologia, a deconvolução busca a melhoria da resolução temporal do dado sísmico por meio da diminuição da contribuição do pulso enviado pela fonte. Na prática, a deconvolução retira o efeito borrado do dado sísmico e torna as reflexões na subsuperfície muito mais evidentes na imagem da seção geológica gerada (Yilmaz, 1987).

Em matemática, deconvolução é um algoritmo baseado no processo usado para reverter os efeitos da convolução nos dados registrados. O conceito de deconvolução é amplamente utilizado em técnicas de processamento de sinais e de processamento de imagem. Estas técnicas são amplamente utilizadas em muitas aplicações de engenharia. Em geral, o objetivo da deconvolução é encontrar a solução de uma equação de convolução da forma, de acordo com O'Haver, 2008:

$$(f * g) = h \quad (2)$$

Normalmente, h (eq. 2) é algum sinal gravado, e f é algum sinal que queremos recuperar, mas foi convoluido com algum outro g sinal. A função g pode representar a função de transferência de um instrumento ou a força motriz que foi aplicada a um sistema físico. Se soubermos g , ou pelo menos saber a forma de g , então pode realizar a deconvolução. No entanto, se não sabemos g de antecedência, precisamos estimá-lo. Isso geralmente é feito através de métodos de estimativa estatística. Em medições físicas, a situação é geralmente próxima.

$$(f * g) + \varepsilon = h \quad (3)$$

Neste caso, ε é o ruído (eq. 3) que entrou nosso sinal gravado. Se assumirmos que um sinal ruidoso ou imagem é silencioso quando tentamos fazer uma estimativa estatística de g , a nossa estimativa será incorreta. Por sua vez, a nossa estimativa de f também será incorreta. Quanto menor for a relação sinal ruído, pior será a estimativa do sinal deconvoluido, (O'Haver, 2008).

A técnica de excitação por impulso consiste em produzir um leve impacto ao espécime, neste caso, no tampo do violão, mais precisamente no cavalete, que após um curto período transitório, irá vibrar em uma ou mais de suas frequências ressonantes. A técnica de excitação por impulso é essencialmente não destrutivo e não requer nenhum formato especial para o objeto testado. E têm tido grande aceitação mundial tanto na indústria e na pesquisa (Roebben et al., 1997).

Os modos de vibração de um espécime analisado dependem de sua forma, o local do impacto e o tipo de suporte. O local do impacto é próximo a um antinodo da vibração. O impacto pode ser fornecido manualmente, com uma ferramenta simples com uma ponta metálica ou através de dispositivo automático de impacto. A vibração da amostra é registrada por um cristal piezoelétrico ou por um microfone. Um cristal piezoelétrico requer contato com o objeto analisado e para se ter uma boa medição deve se estabelecer o lugar de contato o mais próximo possível do nó de vibração (Roebben et al., 1997).

A Técnica de Excitação por Impulso usada no presente trabalho foi desenvolvida pela empresa Sonelastic de acordo com a Norma Astm E1876 (2007). As frequências são excitadas por meio de um impacto mecânico de curta duração, seguido da captação da resposta acústica por um sensor. Um tratamento matemático é feito no sinal para a obtenção do espectro de frequências (Transformada Rápida de Fourier).

No presente trabalho objetiva-se avaliar através da separação do sinal referente à resposta em frequência do violão através da deconvolução do sinal sonoro gerado ao tocar o instrumento pelo sinal das cordas gravado separadamente. Busca-se também estabelecer as relações com as respostas obtidas através da técnica de excitação por impulso.

2. Metodologia

2.1 Caracterização da Resposta em Frequência pela Excitação por impulso

O violão analisado neste trabalho é da marca *Barros* que segue o modelo clássico, desenvolvido pelo luthier brasileiro Antônio Maurício Barros (Figura 1 a) que tomou como base para o modelo clássico do luthier alemão Hermmam Hauser com uma configuração diferente de leque harmônico.

A análise de caso de aspecto quantitativo (Pereira et al., 2018) no presente trabalho utiliza-se da técnica de excitação por impulso através do software sonelastic (Otani et al., 2017), que consiste neste caso, em promover um leve impacto no cavalete do violão ao lado posição de cada corda do instrumento captando as respostas em frequências naturais através de microfone (Figura 1 b).

Figura 1 - (a) Violão pendurado no suporte; (b) Excitação por impulso na ponte nas posições da primeira a sexta corda (da esquerda para a direita, de cima para baixo).



(a)

(b)

Fonte: Autores (2020)

Para isso o instrumento foi pendurado pela cabeça por cordas elásticas em um suporte (Figura 1 a). Nas cordas do violão foi inserida a tensão de afinação e em seguida abafadas com auxílio de espuma para que não haja interferência de vibração das mesmas, como proposto por Cossolino e Pereira (2010). Como o violão funciona com todas as suas partes acopladas, qualquer impulso faz com que todo o sistema vibre em conjunto, daí a necessidade de se colocar um elemento que absorva a vibração da corda, mas que mantenha a tensão de afinação no instrumento. E a posição deste elemento é colocado estrategicamente no braço, pois como ele é feito de material mais rígido, possivelmente irá afetar minimamente a resposta da caixa acústica.

Faz-se também uso da transformada rápida de Fourier para obtenção de gráficos do sinal no domínio da frequência observando quais entram em ressonância, até mesmo algumas que não são listadas no software do sistema sonelastic. A sequência de rotinas em matlab para obtenção dos sinais está exposta no quadro 1.

Quadro 1 - Sequência de Rotinas em *Matlab* para a Resposta em frequência pela Análise Experimental via Técnica de Excitação por Impulso.

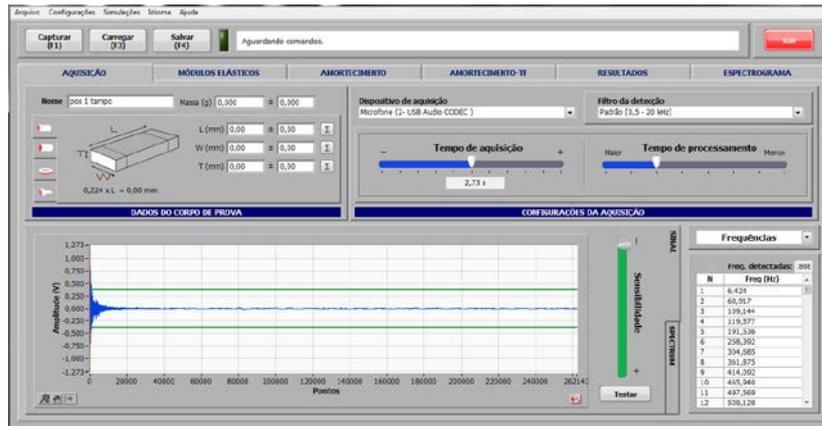
```
clear,clc
%h=xlsread('Atempo1_2.xls');
%h=xlsread('Dtempo1_2.xls');
h=xlsread('E330tempo1_2.xls');
%h=xlsread('E82tempo3_2.xls');
%h=xlsread('Gtempo1_2.xls');
%h=xlsread('Btempo1_2.xls');
%break
h2=h(1:50000,2);
t=(0:length(h2)-1)/96000;
figure(1);plot(t,h2);grid
fa=96000;
sound(h2,fa)
%sound(h2,fa)

fh = fft(h2);
fh = fh.*conj(fh);
f = 1:floor(length(h2)/2);
f = f/max(f);
f = f*fa/2;
figure(2); plot(f(1:1000),fh(1:1000));grid
title 'h2 takamine frequencia';
wavwrite(h2,fa,16,'h2.wav');
```

Fonte: Autores (2020)

As informações podem ser lidas na tela do software (figura 2) ou exportadas para o Matlab em arquivos de planilha de dados em formato Excel. A rotina de comandos do quadro 1 faz inicialmente a leitura dos dados gerando um sinal sonoro de extensão *wav* e um gráfico no domínio do tempo seguindo para o segundo gráfico no domínio da frequência através da transformada rápida de Fourier (FFT).

Figura 2 – Tela de aquisição de dados no software Sonelastic.



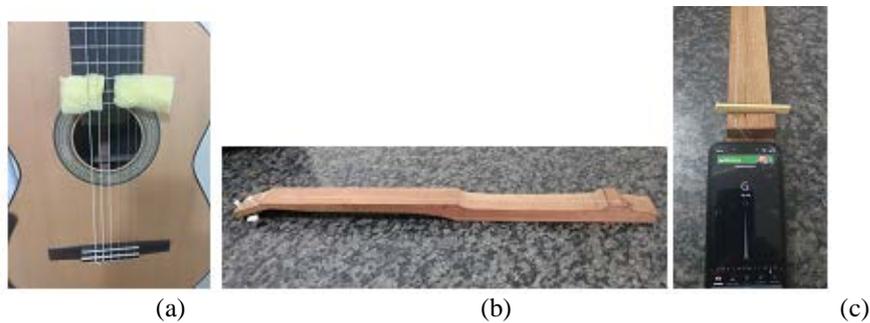
Fonte: Autores (2020)

A tela de aquisição de dados inicial do software sonelastic mostra alguns parâmetros que podem ser ajustados para uma melhor apuração dos resultados tais como tempo de aquisição, tempo de processamento, sensibilidade do microfone e o filtro de detecção. No presente trabalho são usados os ajustes como mostrado na figura 2. Com isso, conseguiu-se uma quantidade maior de frequências de vibração para o intervalo adotado.

2.2 Caracterização da Resposta em Frequência Através da Deconvolução

O objetivo desse método é fazer a deconvolução dos sinais sonoros do violão pelo sinal das cordas para obter a resposta em termos de frequência do instrumento com auxílio do *software Matlab*. Para tal, foram gravadas respostas sonoras do violão utilizando o mesmo jogo de cordas usadas na caracterização experimental pela técnica de excitação por impulso.

Figura 3 - (a) Cordas abafadas com espuma; (b) Dispositivo para Simular braço do Violão; (c) Ajuste da corda no dispositivo.



Fonte: Autores (2020)

O método consiste, inicialmente, em produzir respostas sonoras do violão a partir de dedilhamento de notas musicais com base na escala musical para instrumentos de afinação temperada. Para isso, cada corda foi tocada separadamente, abafando-se as demais com auxílio de pequenos pedaços de espuma para não haver interferência de vibração das demais (figura 3 a).

Foi elaborado também um dispositivo com as medidas referentes ao braço do instrumento prolongando-se até o cavalete para obtenção das respostas sonoras das cordas sem a presença da caixa acústica denominado “monocórdio” (figura 3 b). Neste instrumento são montadas as mesmas cordas, uma de cada vez, usadas no violão com a mesma tensão de afinação usada (figura 3 c).

Para captação das respostas sonoras foi usado *microfone condensador Rohs SF-910* e, para a gravação foi usado o *software Cool Edit 2000* gerando sinais com extensão *wav*.

A primeira etapa depois da gravação é a transferência dos sinais sonoros para serem lidos no *software Matlab*, gerando-se gráficos de amplitude *versus* tempo. Em seguida é elaborada uma série de rotinas de comandos para processar os sinais do violão e da corda para a obtenção do sinal resposta através da operação de deconvolução.

A primeira rotina elaborada é para a leitura do sinal *wav* da corda no violão e com a transformada rápida de Fourier (FFT) obtêm-se os sinais sonoros no domínio do tempo e frequência respectivamente (Quadro 2). Em exemplo, está demonstrado a aplicação para a corda Mí (E) ou primeira corda.

Quadro 2 - Rotinas *Matlab* para sinal de extensão *wav* e *FFT* do sinal sonoro da corda no violão.

```

%% Nota gravada do violão
[yvio,fa,nbits]=wavread('E1.wav');
sound(yvio,fa);
t1=(1:length(yvio))/fa;
figure(1);plot(t1,(yvio));grid
xlabel('Tempo(s)');
ylabel('amplitude(volt)');
title('Nota Mí (1ª corda)');
%% FFT nota gravada violão
fh = fft(yvio);
fh = fh.*conj(fh);
f = 1:floor(length(yvio)/2);
f = f/max(f);
f = f*fa/2;
figure(2); plot(f(1:10000),fh(1:10000));grid
xlabel('Frequência (Hz)');
ylabel('amplitude');
title('Nota Mí (1ª corda)');

```

Fonte: Autores (2020)

A primeira parte da rotina de comandos do quadro 2 se refere à leitura no *Matlab* do sinal gravado da primeira corda (Mí) no violão usando o software *Cool Edit 2000*, de extensão *wav* obtendo a seguir a resposta no domínio do tempo e no domínio da frequência através da FFT. Com isso, obtêm-se gráficos nos respectivos domínios para as posteriores análises.

Em seguida é repetido o mesmo procedimento para a mesma corda no dispositivo que simula o braço do violão sem a caixa acústica obtendo-se também os sinais sonoros nos domínios do tempo e frequência (Quadro 3 a).

A etapa final consiste na rotina para obter o resultado da deconvolução do sinal da corda no violão pelo sinal gerado no dispositivo que simula o braço obtendo-se assim a resposta do instrumento no domínio do tempo e frequência através da FFT (Quadro 3 b).

Quadro 3 - Rotinas *Matlab* para sinal de extensão *wav* e *FFT* do: (a) Para a corda no dispositivo que simula o braço do violão sem a caixa acústica; (b) Para obtenção da resposta do violão nos domínios do tempo e frequência pela Deconvolução.

(a)	(b)
<pre> %% Corda no monocórdio [ymono,fa,nbits]=wavread('E1_mono.wav'); sound(ymono,fa); t2=(1:length(ymono))/fa; figure(3);plot(t2,(ymono));grid </pre>	<pre> %% Deconvolução [h]=fdeconv(yvio,ymono); t3=(1:length(h))/fa; figure(5);plot(t3,(h));grid xlabel('Tempo (s)'); </pre>

<pre> xlabel('Tempo (s)'); ylabel('amplitude (volt)'); title('Nota Mí (1ª corda)-monocórdio'); %break %%% FFT corda monocórdio%%% fh = fft(ymono); fh = fh.*conj(fh); f = 1:floor(length(ymono)/2); f = f/max(f); f = f*fa/2; figure(4); plot(f(1:10000),fh(1:10000));grid xlabel('Frequência (Hz)'); ylabel('amplitude'); title('Nota Mí (1ª corda)-monocórdio'); </pre>	<pre> ylabel('amplitude (volt)'); title('Deconvolução'); sound(h,fa) %break %%% FFT da deconvolução %%%% fh = fft(h); fh = fh.*conj(fh); f = 1:floor(length(h)/2); f = f/max(f); f = f*fa/2; figure(6); plot(f(1:5000),fh(1:5000));grid xlabel('Frequência (Hz)'); ylabel('amplitude'); title('Deconvolução'); </pre>
---	---

Fonte: Autores (2020)

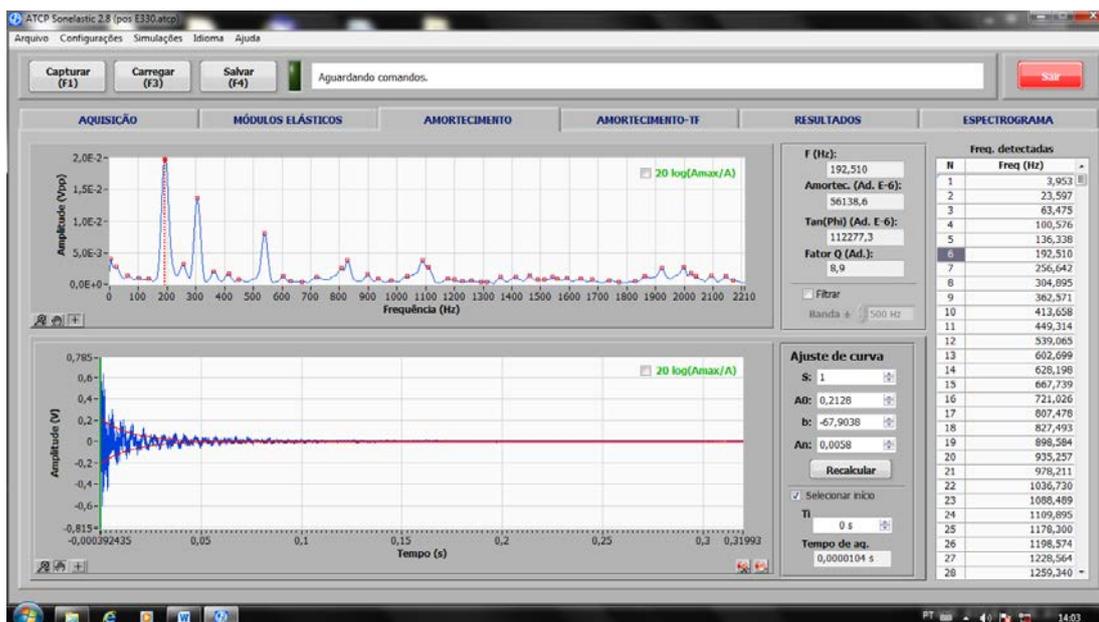
A primeira parte da rotina de comandos do quadro 3 (a) se refere à leitura no *Matlab* do sinal gravado da primeira corda (Mí) no dispositivo auxiliar (monocórdio) usando o software *Cool Edit 2000*, de extensão *wav* obtendo a seguir a resposta no domínio do tempo e no domínio da frequência através da FFT. Já no quadro 3 (b) segue uma sequência de rotinas para obtenção das respostas no domínio do tempo e frequência através de uma função característica do matlab para realização da operação de deconvolução, a *fdeconv*. Com isso, obtém-se também gráficos nos respectivos domínios para as posteriores análises.

3. Resultados e Discussão

Na Tabela 1 são apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados pela técnica de excitação por impulso através do software sonelastic. Foram feitos ensaios com aplicação de força impulsiva manual (batida) da primeira a sexta corda com auxílio de um instrumento feito de plástico com ponta metálica capaz de promover o impulso necessário para provocar a resposta do modelo de violão.

Tal procedimento foi feito nas posições referentes às cordas fazendo excitação no cavalete e variando o grau de sensibilidade do microfone para obtenção do máximo de frequências ressonantes. E assim foram enumeradas as vinte primeiras frequências relacionadas pelo software (figura 4) para cada ponto de excitação e os resultados mostram que a sequência de frequências naturais listadas em ordem crescente são diferentes para cada ponto impulsionado.

Figura 4 - Tela do software sonelastic com resultados referentes a posição da primeira corda do violão (“Mí”).



Fonte: Autores (2020)

Para cada excitação feita buscou-se variar a posição no cavalete de acordo com posição das seis cordas do violão. Com isso foram obtidas respostas no domínio do tempo e frequência através do software do sistema *Sonelastic* como demonstrado na figura 4, mas para uma melhor observação dos resultados, as informações foram salvas em formato de planilha de dados do Excel e transferidas para o *Software Matlab* para serem processados possibilitando melhores análises dos sinais gerados. E assim pode-se analisar melhor, por exemplo, as frequências de baixas amplitudes que podem não ser captadas pelo software *Sonelastic*, tempo de duração do sinal gerado pelo impulso.

A vibração tende a se propagar para o todo o instrumento, mas quando se muda a posição da força impulsiva inicial provavelmente o caminho de propagação possa mudar. E isso, provavelmente se deve ao fato de a madeira ser um material essencialmente anisotrópico com variações de direção do alinhamento das fibras podendo fazer com que essa vibração encontre regiões com taxas de amortecimentos diferentes e isso pode representar um fator de influência na ressonância dessas frequências.

Outro fato que se deve considerar é que a excitação para provocar a vibração foi feita manualmente, já que o pulsador automático do Sistema *Sonelastic* poderia causar danos a estrutura do instrumento e isto pode fazer variar os resultados em função da força aplicada.

Tabela 1 - Respostas em frequências naturais (em Hertz) à excitação por impulso no cavalete em posições relativas às cordas do modelo numeradas em ordem crescente.

Frequências	1ª corda (E)	2ª corda (B)	3ª corda (G)	4ª corda (D)	5ª corda (A)	6ª corda (E)
1	3,953	9,784	4,646	9,442	4,338	20,172
2	23,597	70,338	69,901	89,060	56,640	70,941
3	63,475	102,766	92,571	147,851	105,550	99,651
4	100,576	137,289	192,634	191,068	118,220	132,679
5	136,338	190,890	257,160	219,137	164,239	193,288
6	192,510	249,427	302,668	258,686	197,861	219,093
7	256,642	305,012	360,474	306,623	215,133	260,380
8	304,895	350,563	413,173	332,531	250,561	305,133
9	362,571	413,471	477,488	361,347	307,605	361,749
10	413,658	455,628	539,333	411,469	363,989	416,135
11	449,314	482,771	602,500	475,511	402,221	449,04

12	539,065	540,706	629,093	540,667	417,720	471,173
13	602,699	604,030	644,547	592,609	445,073	493,196
14	628,198	631,524	664,226	630,063	492,568	539,018
15	667,739	679,142	708,599	654,407	503,426	604,286
16	721,026	724,237	736,791	680,473	540,275	626,075
17	807,478	764,435	774,462	712,892	618,211	653,653
18	827,493	806,217	825,948	750,803	651,910	666,648
19	898,584	822,854	908,166	777,706	676,688	736,516
20	935,257	846,262	951,433	800,172	713,284	779,070

Fonte: Autores (2020)

Na tabela 1 estão listadas em colunas as vinte primeiras frequências de vibração (respostas) em ordem crescente listadas pelo software sonelastic geradas a partir do impulso feito de maneira manual no cavalete nas posições relativas da primeira à sexta corda do violão.

No contexto geral, essa técnica deve fazer com que se encontrem todas as possíveis frequências ressonantes do material e a tabela 1 nos mostra conjuntos relevantes de frequências para cada ponto excitado. Embora parte da energia possa ser perdida no caminho dessa vibração ao variar o ponto inicial, é possível encontrar varias frequências ressonantes com valores bem próximos, que possivelmente possa ser de uma mesma região do instrumento ou do mesmo modo de vibração.

Para melhor análise as respostas em frequência foram separadas em faixas com valores próximos para cada corda e em seguida foi calculada a média e feita a comparação com frequências homônimas (próximas) (Tabela 2).

Tabela 8.3 - Frequências homônimas experimental

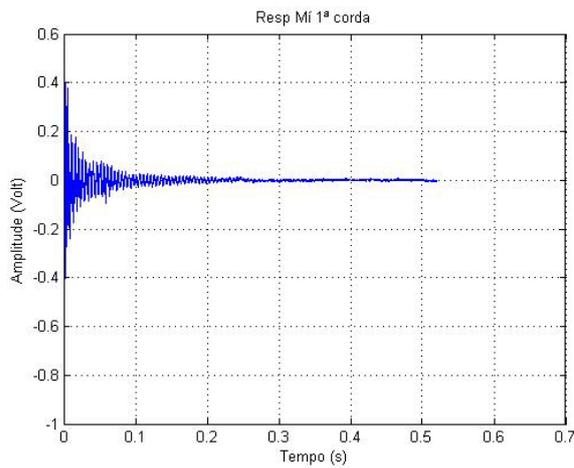
Frequências	1ª corda	2ª corda	3ª corda	4ª corda	5ª corda	6ª corda	Média
1		70,338	69,901			70,941	70,39
2	100,576	102,766			105,550	99,651	102,13
3	136,338	137,289				132,679	135,43
4	192,510	190,890	192,634	191,068		193,288	192,07
5	304,895	305,012	302,668	306,623	307,605	305,133	305,32
6		350,563		332,531			341,54
7	362,571		360,474	361,347	363,989	361,749	362,02
8	413,658	413,471	413,173	411,469	417,720	416,135	414,27
9	449,314	455,628			445,073	449,04	449,76
10	539,065	540,706	539,333	540,667	540,275	539,018	539,84
11	602,699	604,030	602,500	592,609		604,286	601,22
12			644,547	654,407	651,910	653,653	651,12
13	667,739	679,142	664,226	680,473	676,688	666,648	672,48

Fonte: Autores (2020)

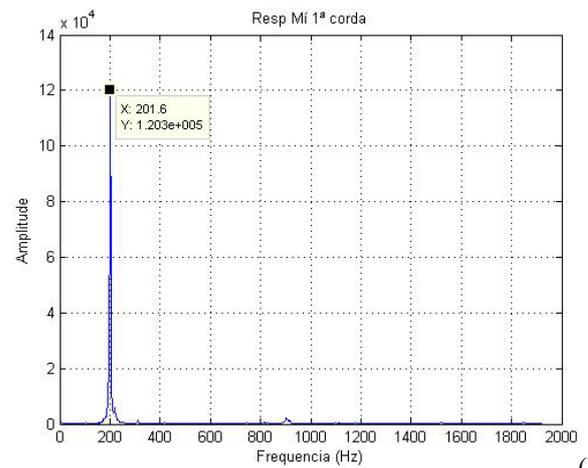
A tabela 2 agrupa várias frequências com valores coincidentes ou próximos de cada corda extraindo-se a média. E assim, pode-se avaliar que a coincidência de valores próximos pode ser o indicativo de que independente do ponto inicial onde é inserida a força impulsiva, as demais regiões do instrumento podem ser afetadas pela irradiação dessa vibração e responder na sua frequência natural característica.

Para as avaliações a seguir é utilizado como exemplo as informações referente à resposta à excitação da primeira corda do violão (Mí) posta à vibrar com sua tensão característica de afinação ou por impulso na posição de mesma corda no cavalete.

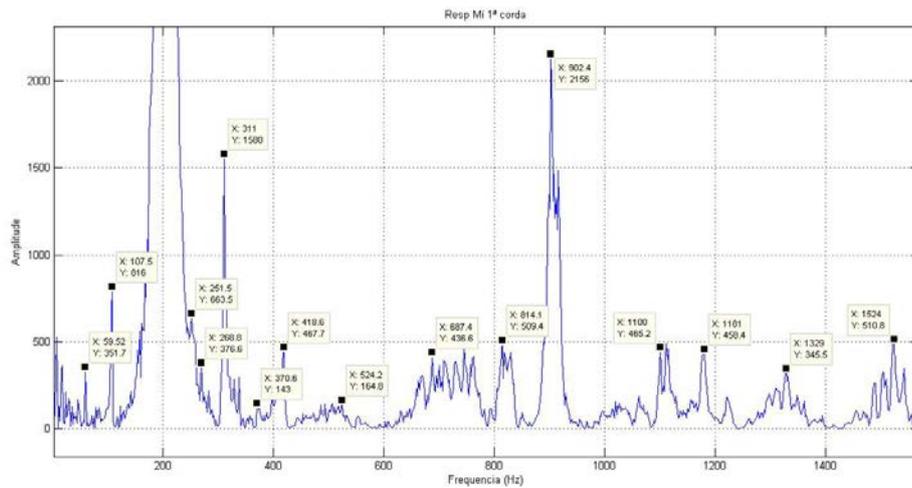
Figura 5 - Sintetização do sinal Impulso na posição da primeira corda do violão. (a) No domínio do tempo; (b) Frequência de maior amplitude; (c) Algumas frequências de baixas amplitudes.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autores (2020)

Em exemplo, a figura 5 (a) mostra o gráfico do sinal referente à excitação impulsiva na posição da primeira corda do violão (“Mí”) no domínio do tempo. A seguir tem-se a figura 5 (b) evidenciando a frequência de maior amplitude (201,6 Hertz) que provavelmente possa ser da vibração inicial do impulso que irradiou gerando as demais e a figura 5 (c) nos permite observar um conjunto maior de respostas em frequências naturais com amplitudes menores com relação à anterior com duas em maior evidência, 311 Hertz e 902,4 Hertz. Esta observação é possível devido a recursos melhores do software matlab.

As respostas em frequências lidas diretamente no software sonelastic são extremamente importantes, pois se refere aos resultados de frequências de vibração com maiores amplitudes, mas o processamento dos sinais no matlab permite que se possa relacionar um número maior de frequências, pois através de recursos do programa é possível observar até mesmo as frequências de baixa amplitude.

Tabela 3 - Respostas em frequências obtidas por excitação por impulso e deconvolução
Respostas em Frequências (Hz)

Sonelastic	Excitação por impulso				Deconvolução				
	Matlab								
3,9	3,84	268,8	954,2	1455,0	8,75	157,1	535,9	862,5	1192,0

23,6	7,68	282,2	967,7	1490,0	13,95	187,2	541,0	866,9	1216,0
63,5	11,52	311,0	996,5	1503,0	20,55	190,1	543,9	958,7	1227,0
100,5	17,28	328,3	1014,0	1509,0	46,98	191,6	547,6	960,9	1236,0
136,3	23,04	337,9	1020,0	1523,0	49,92	197,5	550,5	986,9	1311,0
192,5	34,56	370,6	1037,0	1542,0	69,73	199,7	553,5	1015,0	1315,0
219,1	46,08	397,4	1062,0	1555,0	74,14	203,3	560,1	1021,0	1374,0
256,6	59,52	418,6	1077,0	1755,0	80,75	208,5	576,2	1092,0	1528,0
304,9	78,72	485,8	1100,0	1791,0	94,69	212,1	577,7	1106,0	1544,0
449,3	84,48	524,2	1106,0	1809,0	97,63	218,0	588,7	1122,0	1637,0
539,0	107,5	666,2	1112,0	1830,0	102,0	227,6	591,6	1182,0	1644,0
602,7	117,1	687,4	1116,0	1849,0	103,5	232,0	600,4	1216,0	1917,0
667,7	122,9	700,8	1129,0	1868,0	105,7	241,5	603,4	1220,0	1974,0
721,0	136,3	708,5	1142,0	1874,0	109,4	247,4	657,7	1227,0	1995,0
807,5	142,1	729,6	1156,0	1885,0	112,3	254,7	676,8	721,0	2013,0
827,5	153,6	745,0	1165,0	1903,0	118,9	257,7	681,9	807,5	2013,0
898,5	157,4	762,2	1181,0		121,1	265,0	685,6	827,5	2014,0
935,2	167,0	814,1	1221,0		123,3	309,8	688,5	898,5	2018,0
978,2	170,9	829,1	1261,0		126,3	329,6	693,7	935,2	2024,0
1036,7	182,4	850,6	1298,0		129,2	332,5	733,3	978,2	2046,0
1088,5	201,6	898,6	1309,0		132,1	334,7	773,0	1036,7	2062,0
1109,9	218,9	902,4	1327,0		134,3	336,9	795,7	1088,5	
1178,3	240,0	908,2	1348,0		140,2	462,4	811,1	1109,	
1198,57	243,8	915,8	1361,0		143,9	480,8	832,4	1178,3	
1228,5	251,5	929,3	1394,0		146,8	530,0	844,9	1188,0	

Fonte: Autores (2020)

A tabela 3 mostra várias frequências naturais do modelo de violão listadas em ordem crescente. Na primeira coluna estão relacionadas respostas decorrentes da excitação por impulso na posição referente à primeira corda no cavalete obtidas diretamente no Software Sonelastic e também processados no Software Matlab na segunda coluna, onde foi possível relacionar número maior de frequências. Ainda na mesma tabela, na terceira coluna, estão as respostas obtidas pelo processo de deconvolução do sinal sonoro do instrumento obtido ao tocar a primeira corda (Mí) pelo sinal da mesma corda tocada em instrumento auxiliar que simula o braço do violão.

Tabela 4 - Comparação de Frequências com valores próximos obtidos pela Excitação por impulso no Sonelastic e deconvolução usando Matlab.

Freq.	Impulso Sonelastic	Deconvolução	Erro (%)
1	63,5	69,73	8,93
2	100,5	102,0	1,47
3	136,3	134,3	1,49
4	192,5	191,6	0,47
5	256,6	257,7	0,43
6	304,9	309,8	1,58
7	449,3	462,4	2,83
8	539,0	541,0	0,37
9	602,7	603,4	0,12
10	667,7	676,8	1,34
11	721,0	733,3	1,68
12	807,5	811,1	0,44
13	827,5	832,4	0,59
14	898,5	866,9	3,64
15	935,2	958,7	2,45
16	978,2	986,9	0,88
17	1036,7	1021,0	1,53
18	1088,5	1092,0	0,32
19	1109,9	1106,0	0,35
20	1178,3	1182,0	0,31
21	1198,57	1216,0	1,43
22	1228,5	1227,0	0,12

Fonte: Autores (2020)

A tabela 4 relaciona frequências com valores próximos da excitação por impulso lidas no software sonelastic e pelo método de deconvolução para comparar valores que possivelmente possa pertencer a um mesmo modo de vibração em uma região do instrumento. O modo de vibração de uma estrutura ou região da mesma se caracteriza por uma vibração em frequência natural ou característica (Wright, 1996 e Santos et al., 2013).

Vinte e duas faixas de valores são relacionadas, dos quais dezoito apresentam erro de no máximo 2%, outros três em torno de 3% evidenciando que possivelmente possam ser de mesmo modo de vibração ou de mesma região do instrumento.

Já a tabela 5 faz a comparação de frequências com valores próximos obtidos pela Excitação por impulso e deconvolução processando todos os sinais no Matlab. Assim se faz possível a observação de uma quantidade maior de respostas frequências naturais de vibração.

Tabela 5 - Comparação de Frequências com valores próximos obtidos pela Excitação por impulso e deconvolução usando Matlab.

Freq.	Impulso	Deconvolução	Erro (%)	Freq.	Impulso	Deconvolução	Erro (%)
1	7,68	8,75	13,91	23	687,4	688,5	0,16
2	11,52	13,95	21,09	24	687,4	688,5	0,16
3	17,28	20,55	18,92	25	729,6	733,3	0,51
4	46,08	46,98	1,95	26	762,2	773,0	1,41
5	78,72	80,75	2,57	27	814,1	811,1	0,36
6	107,5	105,7	1,67	28	829,1	832,4	0,40
7	117,1	118,9	1,53	29	898,6	898,5	0,01
8	122,9	123,3	0,32	30	954,2	958,7	0,47
9	136,3	134,3	1,46	31	967,7	960,9	0,70
10	142,1	143,9	1,26	32	996,5	986,9	0,96
11	157,4	157,1	0,19	33	1014,0	1015,0	0,09
12	182,4	187,2	2,63	34	1020,0	1021,0	0,10
13	201,6	203,3	0,84	35	1100	1092	0,72
14	218,9	218,0	0,41	36	1106	1106	0
15	240,0	241,5	0,62	37	1116	1122	0,54
16	243,8	247,4	1,47	38	1181	1182	0,08
17	251,5	254,7	1,27	39	1221	1220	0,08
18	268,8	265,0	1,41	40	1309	1311	0,15
19	311,0	309,8	0,38	41	1361	1374	0,95
20	337,9	336,9	0,29	42	1523	1528	0,33
21	485,8	480,8	1,02	43	1542	1544	0,13
22	524,2	530,0	1,10	44	1903	1917	0,74

Fonte: Autores (2020)

Na tabela 5 são encontrados quarenta e quatro faixas com valores próximos em intervalo entre zero e dois mil Hertz, dos quais trinta e nove apresentam erros menores que 2% sendo que algumas dessas faixas apresentam resultados menores ainda que 0,5%, o que pode evidenciar serem de mesmo modo de vibração ou de mesma região no instrumento.

O grande número de frequências com valores muito próximos na comparação entre o método de excitação por impulso e deconvolução, com erros que não ultrapassam dois por cento, principalmente nas comparações acima de vinte Hertz, evidenciam que os dois métodos podem ser utilizados em possíveis caracterizações de materiais ou de instrumentos musicais de corda.

4. Conclusão

O método de análise pela excitação por impulso pode ser um bom recurso na obtenção de respostas em frequências naturais de um violão ou outro qualquer outro instrumento de corda. Se faz necessário alguns ajustes iniciais de configuração do software tais como: sensibilidade do microfone, tempo de aquisição e processamento de informações para que se consiga o maior número possível de respostas dentro de um intervalo de frequências. Para uma melhor apuração dos resultados este trabalho sugere que se transfira em planilhas as informações para um software que faça processamento de sinais, como o Matlab, por exemplo, pois assim é possível observar algumas frequências de baixas amplitudes que as vezes não são detectadas ou listadas pelo software do método de excitação por impulso, mas que podem ser relevantes na caracterização.

Para o presente trabalho foi possível a observação e análise de um número muito maior de frequências do modelo de violão estudado, pois tomando-se como referência um intervalo entre zero e mil Hertz, observa-se dezenove frequências ressonantes, enquanto que ao processar os sinais foi possível encontrar cinquenta e três.

A deconvolução dos sinais sonoros emitidos pelo instrumento ao tocar uma de suas cordas pelo sinal gravado de mesma corda separadamente, feita também por processamento de sinais, se mostra também bastante eficaz, pois foi possível a análise de oitenta frequências naturais ou ressonantes no intervalo anteriormente mencionado.

A avaliação com relação à frequências homônimas, que são de valores próximos, mostra que os dois métodos podem ser aplicados na caracterização de respostas em frequências naturais de vibração de instrumentos de corda, como o violão, por exemplo. Ressalva-se que os resultados obtidos pelo método excitação por impulso podem ser melhor avaliados usando processamento de sinais para se conseguir avaliar frequências de menores amplitudes.

No presente trabalho a maioria das faixas de frequências homônimas de vibração analisadas nos dois métodos apresentam erros abaixo de dois por cento evidenciando serem de mesmo modo de vibração ou de mesma região no instrumento.

O conjunto de frequências que aparecem nos resultados, tanto pela excitação por impulso, quanto pela deconvolução são resultantes de uma vibração provocada externamente que irradia para todo o instrumento indo de encontro aos microconstituintes do material do violão. Essencialmente feito de madeira e por sua condição anisotrópica, o violão responde a esse estímulo com diferentes frequências de vibração para cada uma de suas partes ou regiões que finalmente interage com o ar contido na caixa acústica deslocando-o e, assim produzindo o som.

A escolha de bons materiais influencia diretamente na qualidade do instrumento, pois esse conjunto de respostas em frequências naturais de vibração é o que diferencia cada tipo de violão ou outro instrumento de corda dando lhes diferentes timbres.

A utilização da técnica de deconvolução pode ser sugerida para trabalhos futuros em outros tipos de instrumentos de corda tais como: cavaquinho, viola caipira, banjo, ou até mesmo violino, desde que se consiga desenvolver um dispositivo semelhante ao utilizado no presente trabalho para obter os sinais sonoros da corda separadamente do instrumento. Outra sugestão é usar o instrumento auxiliar para obtenção do sinal da corda, a excitação por impulso para obter o sinal resposta em frequências de vibração do instrumento e através de processamento de sinais fazer a convolução dos dois sinais para se obter o sinal sonoro de mesma corda tocada no violão.

Referências

- Astm International (2007). *Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration*. ASTM E 1876, pp 15.
- Avitabile, P. (2001). Experimental modal analysis. *Sound and Vibration*, vol. 35, pp. 20–31.
- Baqersad, J.; Poozesh, P.; Niezrecki, C. & Avitabile, P. (2014). Comparison of modal parameters extracted using MIMO, SIMO, and impact hammer tests on a three-bladed wind Turbine, Topics in Modal Analysis II, Volume 8, *Springer*, pp. 185-197.
- Carcagno, S.; Bucknall, R.; Woodhouse, J.; Fritz, C. & Plack, C. J. (2018). Effect of back wood choice on the perceived quality of steel-string acoustic guitars. *The Journal of the Acoustical Society of America* 144, 3533 (2018); doi: 10.1121/1.5084735
- Cossolino L. C. & Pereira A. H. A. (2010). Amortecimento: classificação e métodos de determinação (Informativo Técnico Científico). *Universidade de São Carlos*.
- Elejabarrieta, M. J.; Ezcurra, A. & Santamaría, C. (2000). Evolution of the vibrational behavior of a guitar soundboard along successive construction phases by means of the modal analysis technique. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 108, n. 1, p. 369-378.
- Haykin, S. S. & Van Veen, B. (2003). Sinais e sistemas. *Bookman*.
- Katznelson, Y. (1976). An introduction to Harmonic Analysis. 2. ed. *Dover*.
- Lacerda, O. (1996). Compêndio de teoria elementar da música. 9ª ed., *Ricordi Brasileira S.A.*
- Lazzarini, V. E. P. (1998). Elementos de acústica. *Music Department - National University of Ireland, Maynooth*.
- Ludwigsen, D. (2013). Spectral character of the resonator guitar. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134.
- Mendes, H. M. D., Senra, R. E. F., Junior, J. G. M., Lima, S. S., & Mello, G. J. (2020). Sound waves in science education: as a learning facilitator. *Research, Society and Development*, 9(3), e03932261. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i3.2261>
- O'Haver, T. (2008). *A Pragmatic Introduction to Signal Processing*. Department of Chemistry and Biochemistry, University of Maryland at College Park. Recuperado de: <https://terpconnect.umd.edu/~toh/spectrum/> . em: 30 de maio, 2020.
- Otani, L.B.; Segundinho, P.G.A.; Morales, E. A. M. & Pereira, A.H.A. (2017). Caracterização dos módulos elásticos de madeiras e derivados utilizando a Técnica de Excitação por Impulso (ITC-05 /ATCP). *ATCP Engenharia Física*.
- Pereira, A.S. et al. (2018). Metodologia da pesquisa científica. [e-book]. Santa Maria. *Ed. UAB/NTE/UFSM*.
- Portela, M. S. (2014). *Estudo das Propriedades Acústicas da Madeira Amazônica Marupá para Tempo de Violão*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.
- Roebben, G.; Bollen, B.; Van Humbeeck, J. & Van Der Biest, O. (1997). O. Impulse excitation apparatus to measure resonant frequencies, elastic moduli, and internal friction at room and high temperature. *Review of Scientific Instruments*, 68, 4511. <https://doi.org/10.1063/1.1148422>
- Santos, E. M.; Molina, C. & Tufaile, A. P. B. (2013). Violão e guitarra como ferramentas para o ensino de física. v. 35, n. 2, 2507. *Revista Brasileira de Ensino de Física*.

Teixeira, P. S.; Silva, A. J. & Feiteira, J. F. S. (2014). Avaliação e comparação de características de amortecimento de sinais gerados de diferentes violões *Cadernos UniFoa*, v. 9, n. 26, p. 17-30.

Teixeira, P. S.; Silva, A. J. & Feiteira, J. F. S. (2015). *Análise e síntese de sinais de instrumentos dedilhados. Em estudo: O Violão*. (Dissertação de Mestrado). EEIMVR, Universidade Federal Fluminense.

Yilmaz, O. (1987) Seismic data processing. *SEG Investigations in Geophysics*.

Wright, H. (1996). *The Acoustics and Psychoacoustics of the Guitar* (Ph.D.Thesis). Department of Physics and Astronomy. University of Wales.

Wuensch, C. A. (2009). *Física da Música*. inpe/MCT. Divisão de Astrofísica.

Recuperado de: http://www.das.inpe.br/~alex/FisicadaMusica/fismus_indice.htm. em: 05 de novembro, 2020.

Simulação matemática de sintetização de um sinal sonoro obtido através de um violão Gianini

Mathematical simulation of synthesizing a beep obtained through a Gianini guitar

¹ Paulo Sérgio Teixeira paulost39@gmail.com

¹ Anderson Virgílio de Queiroz

¹ Márcio Teodoro Fernandes

² Alexandre José da Silva

² José Flávio Silveira Feiteira

¹ Doutorando em Engenharia Metalúrgica e Materiais - UFF.

² Doutor em Engenharia Mecânica - UFF.

Resumo

A sintetização de sinais sonoros se torna cada vez mais um recurso utilizado no meio musical através de modelos matemáticos com o objetivo de prever o comportamento com relação às frequências geradas e produzir maior variedade de sons sintetizados computacionalmente. Um sinal acústico pode ser sintetizado a partir da transformada de Fourier. Os sinais podem ser escritos por uma soma de senos e cossenos combinados com características das frequências naturais de vibração, amortecimento, amplitudes, além da variação do fator tempo, ainda considerando que tais sinais sejam defasados $\pi/2$ radianos, conforme estudado. Este trabalho apresenta uma abordagem metodológica para obter sinais sintetizados a partir de parâmetros medidos de sinais gerados por instrumentos musicais, objetivo central deste estudo. Os sinais acústicos originais foram obtidos através de gravação e editados no software Cool Edit 2000 com extensão wave, em seguida, para simulação dos sinais, foi utilizado o software Matlab para aplicação da transformada rápida de Fourier, e assim, obtendo-se os parâmetros de amortecimento, amplitudes, frequências naturais e amortecidas, gerando os sinais reconstruídos. Os sinais sintetizados obtidos como resultados no domínio da frequência, em comparação aos sinais medidos, apresentaram boas relações proporcionais de amplitude, mas com valores menores de amplitudes nos vários harmônicos.

Palavras-chave:

Sintetização. Sinais sonoros. Fourier. Ruído branco.

Abstract

The synthesis of sound signals is increasingly used in the musical environment through mathematical models to predict the behavior with respect to the generated frequencies and to produce a greater variety of synthesized sounds. An acoustic signal can be synthesized from the Fast Fourier Transform. The signals can be written by a sum of sines and cosines combined with characteristics of the natural frequencies of vibration, damping, amplitudes, in addition to the variation of the time factor, even considering that such signals are outdated $\pi/2$ radians as studied (. This work presents a methodological approach to obtain signals synthesized from measured parameters of signals generated by musical instruments, the main objective of this study. The original acoustic signals were obtained through recording and edited in the software Cool Edit 2000 with wave extension, then for the simulation of the signals the Matlab software was used to apply the Fast Fourier Transform, thus obtaining the parameters of damping, amplitudes, natural and damped frequencies generating the reconstructed signals. The synthesized signals obtained as results in the frequency domain compared to the measured signals showed good proportional amplitude ratios but with lower amplitude values in the various harmonics.

Keywords:

Synthesizing. Sound signals. Fourier. White noise.

Como você deve citar?

TEIXEIRA, Paulo Sérgio et al.. Simulação matemática de sintetização de um sinal sonoro obtido através de um violão Gianini. Cadernos UniFOA, Volta Redonda, n. 39, p. 41-51, abril 2019.

1 INTRODUÇÃO

Segundo Ynoguti (1995), existem várias razões para que, cada vez mais, músicos se utilizem da sintetização de sons ou sinais sonoros para o seu trabalho. Uma delas é a maior variedade de sons gerados pelo computador, que não são limitados àqueles disponíveis pelos instrumentos já existentes: pode-se gerar uma infinidade de novos sons através de processamentos digitais. Outra razão é a precisão com que o computador trata os sinais: é capaz de analisar e processar a forma de onda do som até o nível da amostra individual.

Um sinal acústico pode ser sintetizado a partir da transformada de Fourier. Os sinais podem ser escritos por uma soma de senos e cossenos combinados com características das frequências naturais de vibração, amortecimento, amplitudes, além da variação do fator tempo. Essas características podem ser obtidas através da análise das características do sinal no domínio do tempo e frequência com o objetivo de se separar as frequências excitadas para posterior filtragem e, por conseguinte, determinar as características de amortecimento.

A Série de Fourier, desenvolvida por Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830), matemático da corte de Napoleão, que teve seu nome imortalizado pelas séries trigonométricas introduzidas em 1807 e que, até hoje, são admiradas por matemáticos, físicos, estatísticos e engenheiros, são valiosas para quem precisa descrever uma função relativamente complexa, de uma forma simples de se visualizar e de se manipular. Ele mostrou que qualquer função, por mais complicada que seja, pode ser expressa como uma soma de senos e cossenos (BASSALO, 2009).

Há muito tempo, são estudadas as funções seno e cosseno, aprendendo-se que suas amplitudes originais são unitárias e que ambas estão defasadas entre si de $\pi/2$ radianos, conforme Equação 1 (FEITEIRA, FONSECA e CAMPOS, 2013).

$$\cos(x) = \text{sen}\left(x + \frac{\pi}{2}\right) \quad (1)$$

Onde x é o valor de um ângulo em radianos.

A série de Fourier é a representação de uma função periódica como uma soma de funções periódicas da forma de harmônicas de e^{ix} . De acordo com a fórmula de Euler, as séries podem ser expressas equivalentemente em termos de funções seno e cosseno (SANDIFER, E., 2007).

Fourier descobriu que funções periódicas de período fundamental T podem ser expressas como uma série infinita de funções trigonométricas na forma, conforme Equação 2 e, em sua forma mais compacta, na Equação 3:

$$\frac{a_0}{2} + a_1 \cos(x) + b_1 \text{sen}(x) + a_2 \cos(2x) + b_2 \text{sen}(2x) + \dots + a_n \cos(nx) + b_n \text{sen}(nx) \quad (2)$$

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(nx) + b_n \text{sen}(nx)) \quad (3)$$

Onde x é o valor de um ângulo em radianos, a é amplitude, n número de termos da equação.

O objetivo geral do presente trabalho é a sintetização de sinais a partir da transformada de Fourier. E, para isso, foi realizado estudo de características relevantes à resposta dada por um instrumento de corda.

1.1 Transformada de Fourier

Após a teoria de Fourier, que se propunha decompor funções periódicas em somas de funções senoidais, surgiu a transformada de Fourier e depois a transformada rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*).

Uma função pode ser convertida do domínio do tempo para o da frequência através de um operador matemático chamado genericamente de transformada integral. Transformada de Fourier decompõe uma função na soma de um (potencialmente infinito) número de componentes senoidais, produzindo um espectro de frequências. A transformada inversa correspondente converte esse espectro de volta para o domínio do tempo, ou seja, para a função original.

Ao aplicar-se a transformada de Fourier, passa-se do domínio do tempo para o domínio da frequência e a informação a respeito de deslocamentos de fase do sinal em função da frequência desaparece.

Em acústica e música, a fundamental é a mais baixa frequência e a de maior amplitude das componentes da série harmônica de um som. Tecnicamente, a fundamental corresponde ao primeiro harmônico. Na realidade, o som é composto de várias frequências, mas as que se destacam são as que entram em ressonância, fenômeno que acontece quando a vibração atinge a chamada frequência natural de vibração do meio. A frequência fundamental ou a primeira que entra em ressonância é responsável pela percepção da altura de uma nota, enquanto que as demais, chamadas de harmônicos, participam da composição da forma de onda do som.

1.2 Análise Sonora de Instrumentos Musicais

Para Lazzarini (1998), o som é uma qualidade perceptiva que é o resultado da percepção de distúrbios das moléculas de um meio em certo espaço de tempo. Esses distúrbios, por sua vez, apresentam-se em forma de ondas em sua propagação pelo meio.

O som é produzido ao criarmos algum tipo de mecanismo que altere de forma periódica a pressão do ar em nossa volta (WUENSCHÉ, 2009).

Segundo Lacerda (1996), o som pode ser representado por uma soma de diversas ondas individuais chamadas de componentes de Fourier e cada uma corresponde a uma determinada frequência múltipla da componente inicial. Essas componentes formam uma série conhecida como série harmônica, onde o harmônico de ordem zero é chamado de frequência natural ou fundamental, o segundo é denominado harmônico de primeira ordem ou primeiro harmônico, o terceiro é chamado segundo harmônico e assim sucessivamente.

As amplitudes e o tempo de duração de cada um dos harmônicos presentes no som resultante podem variar independentemente. A combinação dessas duas propriedades tem o nome de timbre.

A síntese sonora de timbres de instrumentos musicais depende, basicamente, do conjunto de harmônicos utilizados (DODGE; JERSE, 1997).

Para analisar os sinais acústicos de instrumentos, nesse caso, o violão, é necessário considerá-lo com um sistema vibrante.

Os sistemas de vibração podem vibrar em vários modos diferentes. Cada modo é relacionado a uma frequência diferente e, portanto, um modo de vibração pode ser excitado individualmente por algum tipo de perturbação relacionado à certa frequência.

A descrição desse movimento vibracional é bastante difícil, pois é necessário saber a amplitude (ou intensidade) e a frequência de cada modo de vibração perturbado.

O espectro de uma vibração indica quais frequências estão sendo excitadas e com que intensidade. Essa análise espectral, também conhecida como análise no domínio da frequência, é obtida através da análise de Fourier do sinal sonoro, especificamente pela aplicação da transformada de Fourier ao sinal temporal representativo da vibração estudada.

1.3 Amortecimento de Sinais

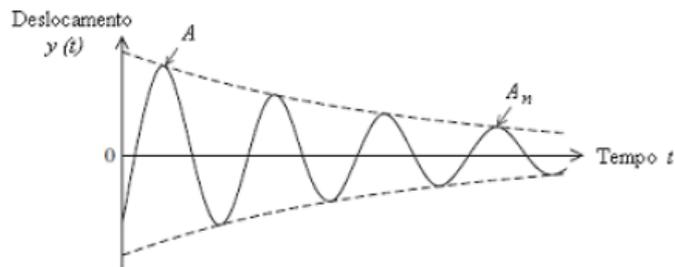
Segundo Cossolino e Pereira (2010), o amortecimento, ou atrito interno, é uma das propriedades mais sensíveis de materiais e estruturas, tanto em escala macro quanto microscópica. É o fenômeno pelo qual a energia mecânica de um sistema é dissipada (principalmente pela geração de calor e/ou energia). O amortecimento determina a amplitude de vibração na ressonância e o tempo de persistência da vibração depois de cessada a excitação. Em sistemas dinâmicos, o amortecimento é fenômeno pelo qual a energia mecânica é dissipada (DE SILVA, 2007).

O amortecimento de um sistema ou material pode ser classificado de três formas principais: interno, estrutural e fluídico. O interno está associado aos defeitos na microestrutura, granularidade, impurezas do material e a efeitos termo elásticos causados por gradientes locais de temperatura. Já o estrutural, está associado a perdas de energia por atrito em juntas, parafusos e articulações semirrígidas. Por último, o fluídico ocorre por resistência ao arraste em meio fluídico, por exemplo, a conversão de energia cinética de um pêndulo em energia térmica para o ar.

Existem diversos métodos para determinação do amortecimento, os quais podem ser obtidos basicamente por dois caminhos: mediante a duração da resposta do sistema a uma excitação transitória (exemplo: método do decremento logarítmico) e em função da resposta do sistema em função da frequência (exemplo: método da largura de meia banda de potência). O método do decremento logarítmico calcula o amortecimento a partir da atenuação da resposta acústica do material ou estrutura após uma excitação por impulso. A importância de se calcular o amortecimento está no fato de que esse parâmetro pode indicar como a energia de vibração é absorvida pelo meio material onde se propaga. E esses valores podem também ser utilizados na sintetização de sinais através das Equações 4 e 5. O decremento logarítmico é calculado a partir de um simples impulso provocado no sistema (em vibração livre) através da razão entre duas amplitudes sucessivas do sinal. O termo decremento logarítmico refere-se à taxa de redução logarítmica, relacionada com a redução do movimento após o impulso, pois a energia é transferida para outras partes do sistema ou é absorvida pelo próprio elemento.

Quando um sistema oscilatório com um grau de liberdade com amortecimento viscoso é excitado por um impulso, sua resposta vem na forma de decaimento no tempo conforme figura 1.

Figura 1 – Resposta ao Impulso



Fonte: Cossolino e Pereira, 2010.

$$y(t) = ye^{-\zeta w_0 t} \text{sen}(w_d t) \quad (4)$$

Onde y é a amplitude, ζ é o amortecimento, w_0 é a frequência natural e w_d frequência natural amortecida.

Para isso, define-se ζ :

$$\zeta = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{n} \ln\left(\frac{A_1}{A_n}\right) = \frac{\delta}{2\pi} \quad \text{para } \zeta < 0,1 \quad (5)$$

onde n é números de amplitudes, A_1 é a amplitude do primeiro ciclo é , A_n é a amplitude de n ciclos, δ é o decremento logarítmico.

Após n períodos, o amortecimento pode ser calculado em função da razão de outra amplitude.

A Equação 5 foi usada para análise de sinais para determinação do amortecimento dos sinais captados de cordas.

Para a solução $0 \leq \zeta < 1$, o sistema subamortecido utiliza a Equação 6:

$$x(t) = A_0 e^{-\zeta \omega_0 t} \cos(\omega_d t + \varphi) \quad (6)$$

Onde A_0 é a amplitude inicial de vibração, φ é a fase inicial de vibração e ω_d é chamada de frequência natural amortecida e é descrita na Equação 7.

$$\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (7)$$

A Equação 7 é válida para um modelo conhecido como sistema linear amortecido com um grau de liberdade. Dessa forma, assume-se que a ressonância de materiais pode ser vista como uma associação de vários sistemas de um grau de liberdade. O modelo de vibração pode ser observado na Equação 8:

$$x(t) = \left[\sum_{i=1}^N A_i e^{-\zeta_i \omega_{ni} t} \cos(\omega_{di} t + \varphi_i) \right] + R_{wn} \quad (8)$$

Em que $A_i, \zeta_i, \omega_{ni}, \omega_{di}, \varphi_i$, são, respectivamente, amplitude inicial, amortecimento, frequência natural de vibração, frequência natural amortecida e fase inicial do i -ésimo modo de vibração. O termo R_{wn} é um ruído branco descorrelacionado do sinal.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, busca-se caracterizar qualidades relacionadas ao amortecimento das vibrações a partir de respostas sonoras gravadas e analisadas nos domínios de tempo e frequência. Para tal, foram gravadas respostas sonoras do violão da marca Gianini, sete cordas, tampo de cedro e corda Gianini ginga.

2.1 Obtenção de Sinais a Serem Sintetizados

O método consiste em produzir respostas sonoras a partir de dedilhamento de notas musicais com base na escala musical para instrumentos de afinação temperada. Para isso, cada nota foi tocada separadamente, abafando-se as demais para não haver interferência de vibração.

Para captação da resposta sonora, foi usado microfone e, para a gravação dos sinais, foi usado o software *Cool Edit 2000*.

A primeira etapa depois da gravação é a transferência dos sinais para serem lidos no software *Matlab*, gerando-se gráficos de amplitude versus tempo. Em seguida, é feita a conversão para o domínio da frequência através da transformada rápida de Fourier (FFT), separando-se em uma primeira análise a frequência fundamental. A terceira etapa consiste em filtrar essa frequência pelo método de largura de banda, gerando um sinal no domínio do tempo. Logo depois, se faz necessário a aplicação da FFT para

verificar a filtragem do sinal. Para tal, deverá aparecer no gráfico amplitude *versus* frequência, somente um pico com grande amplitude, o da frequência filtrada. Por último, deve-se retornar o sinal para o domínio do tempo através da transformada inversa de Fourier, separando-se os valores de primeiro pico de maior amplitude e o décimo para, posteriormente, serem usados no cálculo do amortecimento dessa frequência através do método do decremento logarítmico (TEIXEIRA, SILVA; FEITEIRA, 2014).

E, assim, utilizando-se da transformada de Fourier juntamente com as equações de Euler, é feita a reprodução ou sintetização de sinal escrito por uma soma de senos ou cossenos, nesse caso, cossenos, combinados com características das frequências naturais de vibração, amortecimento, amplitudes, além da variação do fator tempo (Equações 6 e 7).

Para obtenção desses dados a partir de um sinal gravado, se faz necessário repetir o procedimento adotado para obtenção dos valores de amortecimento, separando-se cada frequência natural do sinal juntamente com a amplitude inicial, taxa de amortecimento, frequência natural amortecida, ângulo de defasagem do sinal. Todos esses valores se repetem para cada frequência natural ou componente harmônica. Isso é repetido várias vezes, fazendo-se um somatório que será o resultado final do sinal sintetizado (Equação 8).

2.2 Sintetização de Sinais

O sinal utilizado para a demonstração da sintetização é a nota La_4 ou A_4 do violão Gianini que tem como frequência fundamental 440 hertz. Além dessa, no novo sinal, deverá conter a representação de mais oito harmônicos.

Para compor o sinal, inicialmente, deve-se calcular o amortecimento da frequência harmônica que compõe o sinal. E, para isso, deverá ser extraído a amplitude inicial e a amplitude após dez ciclos. Depois se calcula a frequência natural amortecida, de acordo com Equação 7 que, juntamente com a amplitude inicial e a frequência natural excitada, monta-se cada componente do sinal através da Equação 6. Somando todas as componentes (Equação 8), tem-se a representação do sinal.

Quanto mais componentes harmônicas forem somadas, mesmo aquelas com intensidades iniciais baixas, mais completo será o sinal e mais próximo do real será.

Durante a captação do sinal que será reproduzido, pode surgir um componente do sinal chamado de ruído branco (R_{wb}), que deverá ser analisado para se verificar se este fará ou não parte do novo sinal. Em alguns casos, esses ruídos são indesejáveis e difíceis de serem controlados e podem ser suprimidos durante a sintetização.

A seguir foi desenvolvida, no Matlab, uma sequência de rotinas a partir da equação 8, que produz a sintetização desses sinais.

Na composição do novo sinal, não foram adicionadas as frequências ruidosas (ruídos brancos) que aparecem nos sinais originais.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 1, estão os valores medidos de frequências naturais ou harmônicos, as frequências de corte utilizadas para filtrar o sinal, as amplitudes iniciais e após dez ciclos, assim como os valores calculados de amortecimento.

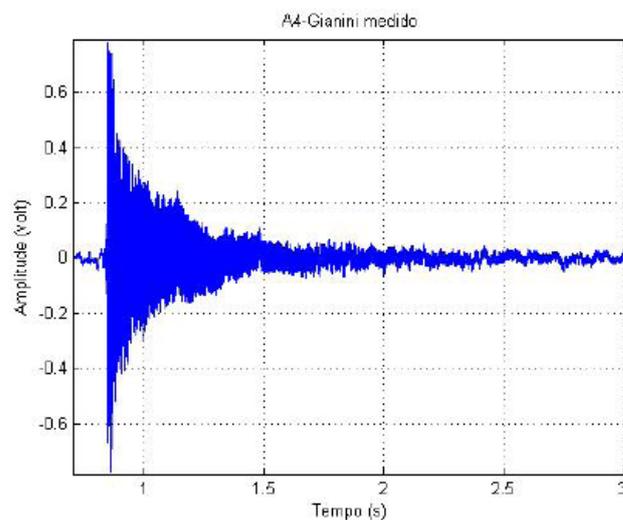
Tabela 1 – Dados para cálculo das taxas de amortecimento da frequência fundamental e harmônicos da nota A4 do violão Gianini para sintetização.

Frequência (hertz)	Frequência de corte (hertz)		Amplitude 1	Amplitude 10	Amortecimento (10 ciclos)
	Inferior	Superior			
439,6	400	460	0,3174	0,293	1,273084E-03
876	865	890	0,1123	0,1088	5,03925E-04
1319	1313	1328	0,1095	0,109	7,28399E-05
1758	1740	1770	0,02083	0,02075	6,1243E-05
2175	2214	2199	0,01328	0,01321	8,41138E-05
2638	2632	2646	0,03563	0,03505	2,61211E-04
3079	3072	3090	0,01374	0,0137	4,64009E-05
3520	3505	3535	0,02411	0,02383	1,85915E-04
3963	3960	3975	0,009202	0,009182	3,4629E-05

Fonte: próprios autores, 2019.

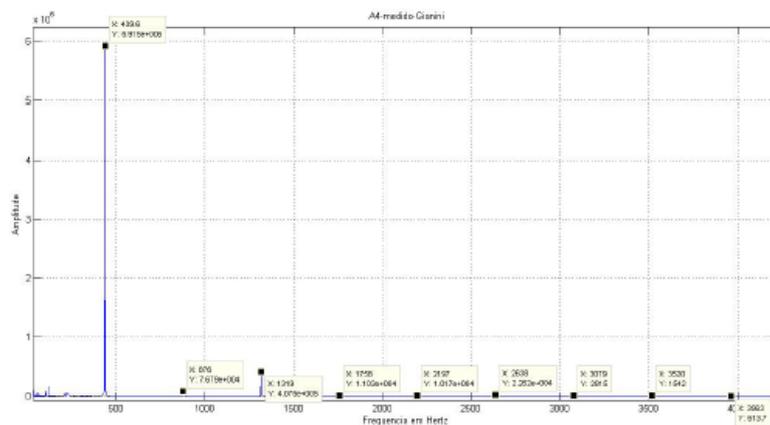
Nas figuras 2 e 3, respectivamente, estão os sinais gravados no domínio do tempo e, após transformada rápida de Fourier (FFT), no domínio da frequência.

Figura 2 – Nota Lá (A₄) do violão Gianini no domínio do tempo.



Fonte: próprios autores, 2019.

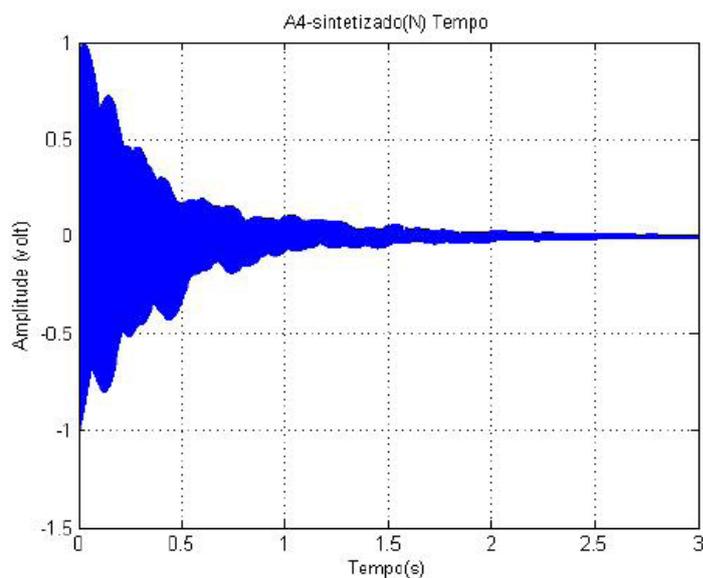
Figura 3 – Nota Lá (A₄) do violão Gianini no domínio da frequência.



Fonte: próprios autores, 2019.

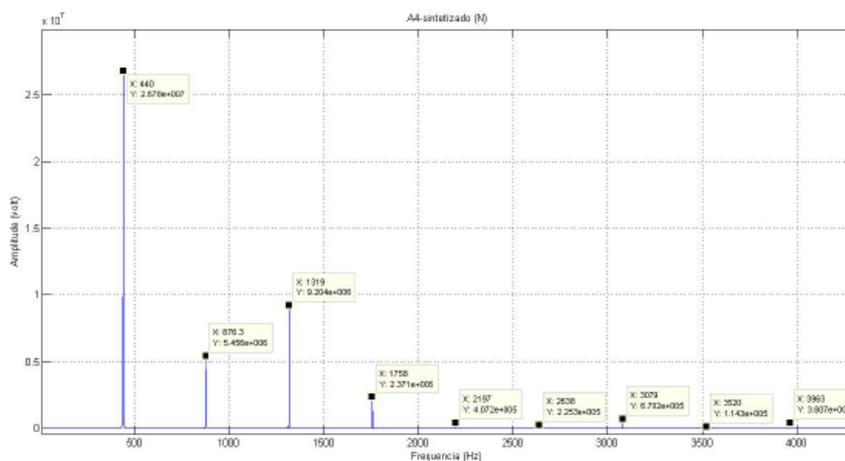
Nas Figuras 4 e 5, está demonstrado o resultado do sinal sintetizado no domínio do tempo, mostrando uma densidade espectral parecida com a do sinal medido e desaparecendo alguns picos provenientes, provavelmente de ruídos brancos e, na figura 5, os resultados no domínio da frequência, onde estão demonstrados a frequência fundamental e mais oito harmônicos.

Figura 4 - Nota A4 do violão Gianini sintetizada no domínio do tempo.



Fonte: próprios autores, 2019.

Figura 5 - Nota A4 do violão Gianini sintetizada no domínio da frequência.



Fonte: próprios autores, 2019.

Os sinais sintetizados no domínio da frequência, em comparação aos sinais medidos, mostram relações proporcionais de amplitude, mas com valores menores de amplitudes nos vários harmônicos. Isso pode se dar pelo fato de que o sinal perde energia quando é filtrado e que algumas frequências de pequenas amplitudes são suprimidas. São os chamados ruídos brancos que poderão, ou não, fazer parte do sinal sintetizado.

Os resultados da sintetização apresentaram uma boa correlação com o medido, tanto no domínio do tempo, quanto no domínio da frequência. Mas um dos principais parâmetros usados deve ser muito bem controlado, o amortecimento. Foi percebido durante a pesquisa que ele influencia diretamente na amplitude de frequência, tanto que é um fator que pode sofrer ajustes para melhorar o resultado do sinal sintetizado. O amortecimento por ser calculado através de uma média logarítmica de dez amplitudes sucessivas, mas nem sempre reproduz a taxa de amortecimento do sinal como todo.

4 CONCLUSÃO

O método de sintetização apresentado neste trabalho se mostra bastante eficiente no que diz respeito à apuração de sinais acústicos, com relação a ruídos indesejáveis (ruído branco), que, muitas vezes, são difíceis de serem controlados no processo de medição. Dessa forma, o método apresentado é uma ferramenta útil para a melhoria do sinal.

Uma das limitações desse método é que a soma de senoides de todas as frequências, incluindo as de pequenas amplitudes, podendo exigir um esforço computacional grande.

Quanto ao ruído branco, nem sempre há a necessidade de eliminá-lo, pois ele faz parte da composição sonora de vários sinais acústicos e isso poderia representar, em uma análise mais subjetiva, a perda de qualidade do som.

REFERÊNCIAS

- BASSALO, J.M. **As Séries de Fourier**. Seara da Ciência. Disponível em: <http://www.seara.ufc.br/tintim/matematica/fourier/fourier1.htm>. Acesso em: 05 ago. 2015.
- COSSOLINO L.C.; PEREIRA A.H.A. **Amortecimento: classificação e métodos de determinação** (informativo técnico científico) – Universidade de São Carlos, 2010.
- DE SILVA, C. **Vibration Damping, control and design**. CRC Press, 2007.
- DODGE, C.; JERSE, T. A. - **Computer music synthesis, composition, and performance**. 2. ed. New York: Charmer Books, 1997.
- FEITEIRA, J. F.; FONSECA, G. S.; CAMPOS, M. F. " Série e Transformada de Fourier na Análise Cristalográfica por Difração de Raio X". **7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Penedo, 2013**.
- LACERDA, O.. **Compêndio de teoria elementar da música**. 9. ed. Ricordi Brasileira S.A., 1996.
- LAZZARINI, Victor E. P. **Elementos de acústica**. Music Department - National University of Ireland, Maynooth, 1998.
- SANDIFER, E. **Some Facets of Euler's Work on Series, Studies in the History and Philosophy of Mathematics**. Volume 5, Pages 279-302C, 2007.
- TEIXEIRA, P. S.; SILVA, A. J.; FEITEIRA, J. F. **Avaliação e comparação de características de amortecimento de sinais gerados de diferentes violões**. Caderno UniFOA, 2014.
- YNOGUTI, Carlos Alberto. **Síntese de sons musicais baseada na transformada Karhunen-Loève**. São Carlos. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 1995.
- WUENSCHÉ, Carlos A. **Física da Música**. inpe/mct – Divisão de Astrofísica, 2009.