

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**

**ANDRE LUIS LIMA FLORES**

**ANÁLISE DE DIFERENTES MADEIRAS BRASILEIRAS EM  
SUBSTITUIÇÃO ÀS ESPÉCIES TRADICIONAIS NO VIOLÃO CLÁSSICO.**

**Curitiba  
2015**

**ANDRE LUIS LIMA FLORES**

**ANÁLISE DE DIFERENTES MADEIRAS BRASILEIRAS EM  
SUBSTITUIÇÃO ÀS ESPÉCIES TRADICIONAIS NO VIOLÃO CLÁSSICO.**

**Dissertação apresentada como requisito parcial à  
obtenção de grau de Mestre. Área de concentração:  
Engenharia e Ciência dos Materiais, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais -  
PIPE. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do  
Paraná.**

**Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Thais Helena Sydenstricker Flores-Sahagun.  
Co-orientador: Prof. Alexandre Augusto Pescador Sardá.**

**Curitiba  
2015**

---

F634a

Flores, André Luis Lima

Análise de diferentes madeiras brasileiras em substituição às espécies tradicionais no violão clássico/ André Luis Lima Flores. – Curitiba, 2015.  
123 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE, 2015.

Orientador: Thais Helena Sydenstricker Flores-Sahagun – Co-orientador: Alexandre Augusto Pescador Sardá.

Bibliografia: p. 81-89.

1. Violão - Construção. 2. Instrumentos musicais - Madeira. 3. Madeira - Propriedades acústicas. I. Universidade Federal do Paraná. II. Flores-Sahagun, Thais Helena Sydenstricker. III. Sardá, Alexandre Augusto Pescador. IV. Título.

CDD: 620.12

---

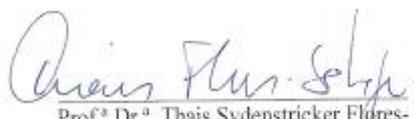


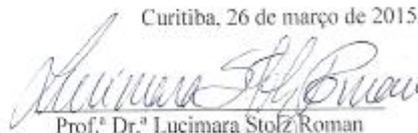
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais- PIPE  
Setor de Tecnologia

### RELATÓRIO DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Aos vinte e seis dias do mês de março de 2015, na Sala de defesas do PGMEC 02 - no Centro Politécnico - UFPR, foi instalada pela Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Sofia C. M. de Oliveira, coordenadora do PIPE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, a Banca Examinadora para a ducentésima nonagésima quinta defesa de dissertação de mestrado na área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais. Estiveram presentes no ato, além do coordenador do Curso de Pós-Graduação, professores, alunos e visitantes. A Banca Examinadora, atendendo a determinação do colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais, foi constituída pelos professores doutores: Prof.<sup>o</sup> Dr.<sup>o</sup> Thais Sydenstricker Flores-Sahagun (UFPR), Lucimara Stolz Roman (UFPR), Arcanjo Lenzi (UFSC). Às 13:30 horas, a banca iniciou os trabalhos, convidando o candidato **ANDRE LUIS LIMA FLORES** a fazer a apresentação da dissertação de mestrado intitulada “ANÁLISE DE DIFERENTES MADEIRAS BRASILEIRAS EM SUBSTITUIÇÃO ÀS ESPÉCIES TRADICIONAIS NO VIOLÃO CLÁSSICO”. O referido trabalho teve a co-orientação da Prof. Alexandre Augusto Pescador Sardá. Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de arguição pelos membros participantes. Tendo em vista a dissertação e a arguição, a banca decidiu pela aprovação do candidato. (de acordo com a determinação dos artigos 68 e 69 da resolução 65/09 de 09.11.2009).

Curitiba, 26 de março de 2015.

  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Thais Sydenstricker Flores-  
Sahagun  
Orientador

  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Lucimara Stolz Roman  
Examinador

  
Prof. Dr Arcanjo Lenzi  
Examinador

  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Sofia C. M. de Oliveira  
Coordenadora do PIPE

## **AGRADECIMENTOS**

Ao misterioso ser supremo por toda proteção, colocando as pessoas certas em todos os momentos. E nesse momento aproveito para pedir desculpas por não lembrar de todos que direta ou indiretamente contribuíram, ajudaram e fizeram parte desse estudo.

A minha família por todo apoio durante as etapas da vida, em especial a meu pai pelo exemplo de pessoa, engenheiro e ambientalista, minha mãe por saber conciliar as atividades profissionais e de pesquisa com atribuições familiares e maternas.

A minha orientadora professora Thais por acreditar no projeto e orientar de forma objetiva, meu Co-orientador professor Alexandre Pescador pela especial atenção no desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros da Banca de defesa de mestrado professores Arcanjo Lenzi e Lucimara Roman, agradeço também ao professor Leandro Mombach pela orientação, aos colegas Eliana, Seu Vitor, Márcia, Edson, Sueli, Osmar, Mari, Bruno, Claudia, Catarina, Gina, Helena, Tatiana, Gisele, Anes, Pedro, Simone, Victor Cremonez, aos colegas dos cursos de Luteria e do PIPE.

A todos os servidores da UFRB, em especial ao professor Anacleto, um dos maiores incentivadores da Pós-graduação. Aos membros da messiânica muito bem representada pela Min. Benedita Bulhões.

Aos mestres da asseba, e tantos outros que podem ter influenciado e direcionado este trabalho como Gilberto Gil. Ao Lucas da ATCP Engenharia Física, aos colaboradores da LMS, e ao colega Alexandre Boiago pelos cálculos e desenhos do Virtual.Lab.

Aos professores da UEFS, FTC, UFSC, UTFPR, UFBA e UFRB e dos cursos da UFPR de Engenharia Mecânica, Física, Tecnologia em Luteria, Engenharia Industrial da Madeira, Música e Produção Musical da UFPR. Em especial aos professores Jorge Monteiro, Ghislaine Bonduelle, Silvio Brunatto, Ricardo Klitzke, Silvana Nisgoski, Thiago Freitas, Rodrigo Pereira, Igor Fomin, João Morais, William Barbosa, Marcio Gomes e o professor Heraldo Cambraia.

## RESUMO

Neste trabalho foram analisadas algumas espécies florestais brasileiras com potencial para serem utilizadas na fabricação artesanal ou industrial da caixa acústica de violões de boa qualidade. O violão foi escolhido como modelo dessa pesquisa devido ao formato e dimensões da caixa acústica que pode proporcionar frequências baixas, médias e altas. Foram utilizadas madeiras com densidades baixas para serem analisadas no tampo da caixa acústica e madeiras mais densas para a lateral e o fundo. As madeiras conhecidas popularmente como Abeto Alemão (*Picea abies*) e Jacarandá da Bahia (*Dalbergia nigra*) foram consideradas como padrões para comparação respectivamente do tampo harmônico e fundo/laterais do violão. Foram analisados o marupá (*Simarouba amara*), a araucária (*Araucária angustifolia*) e o compensado flexível para o tampo e a andiroba (*Carapa guianensis*), o jenipapo (*Genipa americana*) e o compensado flexível para o fundo. Com o uso de uma lateral fixa, foram testadas 04 espécies no tampo e 04 no fundo da caixa acústica do violão. Foi desenvolvida uma metodologia onde uma análise comparativa das madeiras foi realizada em amostras no formato do violão clássico através de medidas de velocidade de propagação da onda e análise modal. Foram feitos testes através de excitação por impulso onde se obtiveram resultados como módulo de elasticidade, módulo de cisalhamento, impedância sonora, coeficiente de irradiação sonora e amortecimento. O teor de umidade e a densidade das madeiras estudadas foram também comparadas. Graficamente ou através do método das diferenças absolutas entre as propriedades das madeiras ou características estudadas, em relação ao abeto ou ao jacarandá, foi verificado que o marupá foi a madeira mais semelhante ao abeto e a andiroba a madeira mais similar ao jacarandá. Através da análise modal numérica realizada no tampo do violão, foi simulado o comportamento modal e as frequências naturais de materiais isotrópicos ou ortotrópicos e, comparado com a análise modal experimental, os resultados do material ortotrópico se mostrou mais próximo ao do comportamento do abeto. Finalmente, foi concluído que com a utilização da metodologia desenvolvida, outras madeiras ou materiais (compósitos poliméricos, por exemplo), podem ter seus desempenhos comparados ao do abeto e do jacarandá na produção de violões de boa qualidade.

## ABSTRACT

In this work some Brazilian woods with potential for the use in handmade or industrial acoustical body of good quality guitars were analyzed. The guitar was chosen as a model for this research because of its shape and dimensions of the acoustical body that may produce high, medium and low frequencies. Woods with low densities were used for the analysis of the soundboard and woods with higher densities were used in the back and side sets. The so called Norway spruce (*Picea abies*) and Brazilian Rosewood (*Dalbergia nigra*) were considered as standards for comparison of the soundboard and back and side sets, respectively. Marupá (*Araucária angustifolia*), Araucária (*Araucária angustifolia*) and a flexible laminar wood were analyzed to be used in the soundboard and carapa (*Carapa guianensi*), Genipa Americana and a flexible laminar wood were analyzed to be used in the back of the guitar. Through the use of a fixed side, 4 wood species were used in the soundboard and 4 were used in the back of the guitar. It was developed a methodology where a comparative analysis of the woods was performed in samples with the classic guitar shape and through measures of the wave speed and modal analysis. Impulse excitation tests were performed and elasticity modulus, shear modulus, sonorous impedance, sound radiation coefficient and damping were obtained. The moisture content and densities of the studied woods were also compared. Graphically or through the use of the method of the absolute differences between wood properties or characteristics in relation to Norway spruce or Brazilian Rosewood, it was verified that marupá was the most similar wood compared to Norway spruce and carapa showed more similarities with Brazilian Rosewood. Through a modal analysis performed on the guitar soundboard, it was simulated the modal behavior and natural frequencies of isotropic or orthotropic materials and compared to the experimental modal analysis, the results of the orthotropic materials were closer to the Norway spruce behavior. Finally, it was concluded that using the developed methodology, other woods or material (polymeric composites, for example) may have their performance compared to Norway spruce and to that of Brazilian Rosewood in the production of good quality guitars.

## Lista de Figuras:

Figura 1: Modelo do violão clássico de Antonio Torres.....	3
Figura 2: Interior do tampo com leque harmônico.....	8
Figura 3: Diagrama esquemático de transmissão de energia e radiação sonora em baixas e altas frequências.....	9
Figura 4: Mapa mundi com as principais influências da acústica e de instrumentos musicais.....	10
Figura 5: Onda fundamental e harmônicos.....	13
Figura 6: Variação da amplitude da onda em relação ao tempo.....	14
Figura 7 - Desmatamento da Mata Atlântica no sul da Bahia de 1945 a 1990.....	22
Figura 8: Estrutura química da celulose.....	26
Figura 9: Molécula de água ligada à celulose.....	26
Figura 10: Lateral do violão (gabarito) e tampo e fundo das madeiras analisadas.....	29
Figura 11: Lâminas de diversas espécies com espessura de 3 mm.....	30
Figura 12: Molde do leque harmônico.....	30
Figura 13: Amostras para teste de umidade.....	31
Figura 14: Amostras para teste no Sonelastic.....	32
Figura 15: Equipamento sonelastic.....	33
Figura 16. Tela principal do Software Sonelastic.....	34
Figura 17: Stress Wave Timer.....	35
Figura 18: Madeiras no formato do violão em análise no stress wave.....	35
Figura 19: Amostras de madeira em análise de MEV com EDS.....	36
Figura 20: Representação gráfica de onda no domínio do tempo e da frequência.....	39
Figura 21: Amostra do sinal no domínio do tempo e as respectivas linhas espectrais..	40
Figura 22: Onda sonora discretizada.....	40
Figura 23: Forma de onda discretizada em janelas.....	41
Figura 24: Frequências da escala do violão clássico.....	41

Figura 25: Malha estrutural no Test.Lab do violão clássico.....	42
Figura 26: Configuração dos canais de entrada e saída do Test.Lab.....	42
Figura 27: Figura 27: Calibração de sinal no Test.Lab.....	43
Figura 28: Calibração da força. ....	43
Figura 29: Tela de medições experimentais no Test.Lab.....	44
Figura 30: caixa acústica sendo excitada pelo martelo durante a análise modal experimental.....	44
Figura 31: Malha estrutural do tampo e do fundo da caixa acústica.....	45
Figura 32: Martelo ponteiros e acelerômetro.....	46
Figura 33: Tampo harmônico no solidworks da caixa acústica do violão Torres.....	47
Figura 34: Malha estrutural e força excitadora no LMS Virtual.Lab.....	48
Figura 35: Malha estrutural em deformação no formato magnitude no LMS Virtual.Lab.....	48
Figura 36: Imagens em microscopia óptica das espécies do tampo harmônico.....	50
Figura 37: Imagens em microscopia óptica das espécies do fundo da caixa acústica..	63
Figura 38: Tela do LMS Virtual.Lab sendo configurada na banda de frequência de 70 a 700 Hz.....	74
Figura 39: Frequências naturais do tampo de abeto solto.....	74
Figura 40: Malha estrutural no Virtual.Lab com espaçamento entre nós, número de nós e elementos.....	75
Figura 41: Dados do material ortotrópico e isotrópico.....	76

### **Lista de Tabelas:**

Tabela 1: Espécies florestais analisadas.....	5
Tabela 2: Características de componentes arbóreas de estágios seriais em florestas úmidas tropicais americanas.....	16
Tabela 3: Espécies classificadas para utilização em instrumentos musicais.....	19
Tabela 4: Densidade.....	51

Tabela 5: Teor de elementos químicos encontrados em amostras de abeto, araucária e marupá.....	52
Tabela 6: Resultados das análises feitas através da técnica de excitação por impulso nas madeiras do tampo.....	57
Tabela 7: Frequências naturais do tampo com mesma espessura.....	58
Tabela 8: Frequências naturais do tampo com mesmo peso.....	59
Tabela 9: Tabela de aproximação com o abeto.....	60
Tabela 10: Umidade e densidade das amostras do fundo da caixa acústica.....	63
Tabela 11: Teor de elementos químicos encontrados em amostras de jacarandá, andiroba e jenipapo.....	64
Tabela 12: Resultados das análises feitas através da técnica de excitação por impulso nas madeiras da caixa acústica. ....	69
Tabela 13: Frequências naturais do fundo da caixa acústica com mesmo peso.....	70
Tabela 14: Tabela de aproximação com o jacarandá.....	71
Tabela 15: Propriedades do abeto ortotrópico.....	77
Tabela 16: Resultados comparativos do virtual.Lab x Test.Lab.....	78

### **Lista de Equações:**

Equação 1: Equação da velocidade de propagação da onda na madeira.....	33
Equação 2: Equação do calculo de impedância sonora .....	33
Equação 3: Equação do calculo de coeficiente de irradiação sonora.....	33
Equação 4: Equação do calculo de amortecimento.....	33
Equação 5: Equação da transformada de Fourier.....	39
Equação 6: Equação da diferença absoluta entre as propriedades da madeira do tampo do violão.....	60
Equação 7: Equação da diferença absoluta entre as propriedades da madeira da caixa acústica.....	71

### **Lista de Gráficos:**

Gráfico 1: velocidade do som no sentido paralelo as fibras (Sonelastic).....	53
--	----

Gráfico 2: velocidade do som no sentido paralelo as fibras (stress wave) .....	53
Gráfico 3: velocidade do som no sentido perpendicular das fibras (stress wave) .....	53
Gráfico 4: Modulo elástico de madeiras do tampo (Sonelastic).....	54
Gráfico 5: Modulo de cisalhamento de madeiras do tampo (Sonelastic) .....	54
Gráfico 6: Amortecimento das madeiras do tampo (Sonelastic).....	55
Gráfico 7: Impedância sonora das madeiras do tampo (Sonelastic) .....	55
Gráfico 8: Coeficiente de irradiação sonora (Sonelastic) .....	56
Gráfico 9: Comparação entre os resultados da frequência natural de madeiras de mesma espessura.....	58
Gráfico de Barras 10 - Comparação entre os resultados da frequência natural de madeiras de mesma espessura.....	59
Gráfico 11: velocidade do som no sentido paralelo as fibras das espécies do fundo da caixa acústica (Sonelastic).....	65
Gráfico 12: velocidade do som no sentido paralelo as fibras das espécies do fundo da caixa acústica (stress wave).....	66
Gráfico 13: velocidade do som no sentido perpendicular das fibras das espécies do fundo da caixa acústica (stress wave).....	66
Gráfico 14: Modulo elástico das espécies do fundo da caixa acústica (Sonelastic).....	67
Gráfico 15: Modulo de cisalhamento das espécies do fundo da caixa acústica (Sonelastic).....	67
Gráfico 16: Amortecimento das espécies do fundo da caixa acústica (Sonelastic).....	67
Gráfico 17: Impedância sonora das espécies do fundo da caixa acústica (Sonelastic).	68
Gráfico 18: Coeficiente de radiação sonora das espécies do fundo da caixa acústica (Sonelastic).....	69
Gráfico 19: Comparação entre os resultados da frequência natural de madeiras da caixa acústica com mesmo peso.....	70
Gráfico 20: comparação de frequências naturais obtidos no Virtual.Lab e no Test.Lab.....	78
Gráfico radar 01.....	61
Gráfico radar 02.....	72

## SUMÁRIO

<b>1 - Introdução e Justificativa.....</b>	<b>2</b>
1.1 - Instrumentos musicais.....	5
1.2 - Contexto histórico geográfico .....	10
1.3 - Som .....	12
1.4 - Justificativa .....	15
<b>2 - Revisão bibliográfica.....</b>	<b>15</b>
2.1 - Química da madeira .....	25
<b>3 - Objetivos gerais.....</b>	<b>28</b>
3.1 - Objetivos específicos.....	28
<b>4 - Metodologia.....</b>	<b>29</b>
4.1 - Materiais .....	29
4.2 - Umidade das madeiras.....	30
4.3 - Técnica de excitação por impulso.....	31
4.3.1 - Sonelastic.....	31
4.3.2 - Stress Wave Timer.....	34
4.4 - Análise química e morfológica.....	35
4.5 - Análise modal .....	36
<b>5 - Resultados e discussão.....</b>	<b>49</b>
5.1 - Análise da madeira no tampo da caixa acústica do violão.....	49
5.2 - Análise de madeiras no sistema mecânico vibracional da caixa acústica do violão.....	62
5.3 - Análise modal numérica no tampo do violão.....	72
<b>6 - Conclusão.....</b>	<b>79</b>
<b>7 - Sugestões para trabalhos futuros.....</b>	<b>80</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>81</b>
<b>Apêndice</b>	
Apêndice 1: Imagem de microscopia eletrônica de varredura das espécies analisadas.....	90
Apêndice 2: Frequências do tampo na malha com 336 pontos e amostras com mesma espessura.....	93
Apêndice 3: Frequências do tampo na malha com 79 pontos e amostras com mesmo peso.....	95
Apêndice 4: Frequências do fundo com malha de 82 pontos e amostras com mesmo peso.....	98

Apêndice 5: Frequências naturais no material ortotrópico.....	100
Apêndice 6: Frequências naturais no material isotrópico.....	106
Apêndice 7: Deformação correspondente ao modo de vibração.....	109
Cd 01:	

**Anexos.**

Anexo 1: Características do acelerômetro.....	113
Anexo 2: Erro do equipamento Sonelastic.....	114
Anexo 3: Aplicação do Método de Elementos Finitos.....	114
Anexo 4: Método de análise modal – domínio da frequência.....	120

**Palavras chaves: Luteria, instrumentos musicais, acústica, vibração, violão, sonoridade das madeiras, timbre.**

## APRESENTAÇÃO

Nesta dissertação foi abordado um conteúdo histórico e temas de variadas áreas do conhecimento como Engenharia mecânica, Botânica, Física, Luteria, Química, Acústica e Música, relacionando estas áreas de conhecimento com a madeira e seu comportamento nos instrumentos musicais. Devido à interdisciplinaridade desta pesquisa, foi necessário o desenvolvimento de uma metodologia capaz de avaliar quantitativamente violões construídos com diferentes madeiras. Um dos desafios deste trabalho foi quantificar e qualificar madeiras para instrumentos musicais considerados bons pelo método comparativo.

No tampo harmônico do violão foi discutido o comportamento das madeiras selecionadas com madeiras de baixa densidade, comparando a espécie *Picea abies* (Abeto), que é considerada padrão de qualidade, com as espécies brasileiras *Araucária angustifolia* (*Araucária*) e *Simarouba amara* (*Marupá*).

Para o fundo e laterais da caixa acústica a espécie *Dalbergia nigra* (*Jacarandá*) foi comparada com outras espécies menos tradicionais como *Carapa guianensis* (*Andiroba*) e *Genipa americana* (*Jenipapo*), porém com potencial para utilização no fundo da caixa acústica. No tampo e no fundo da caixa acústica foram feitas análise modal experimental através do Test.Lab interface LMS Plataforma Siemens.

Na análise modal numérica foi analisado o comportamento da caixa acústica do violão através do software Virtua.Lab interface LMS Plataforma Siemens, simulando o comportamento isotrópico e ortotrópico de um material no tampo do violão, avaliando a relevância do material anisotrópico em instrumentos musicais.

Todas as amostras de madeira apresentaram características mais próximas do padrão adotado do que do compensado. O que revela o amortecimento do material como característica importante na acústica musical.

## 1 - Introdução

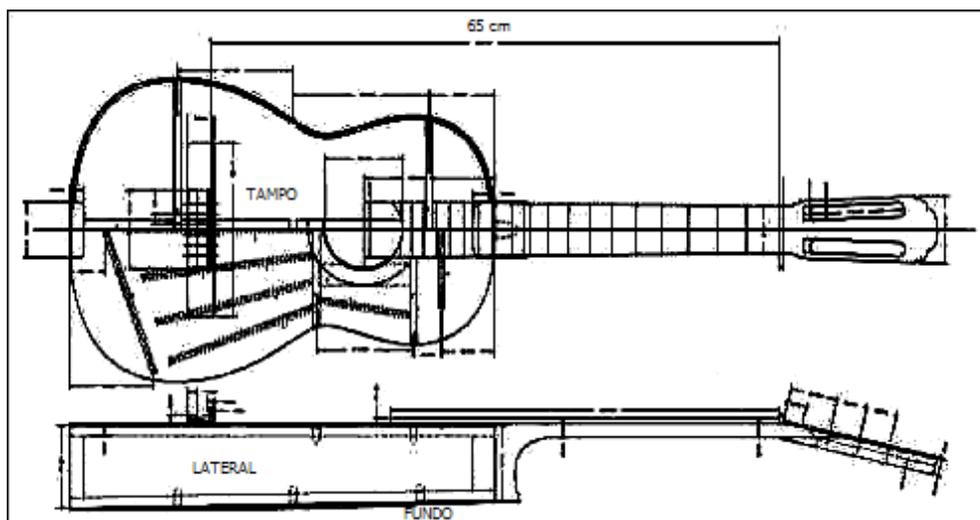
Tocar um instrumento musical é considerado por muitas pessoas essencial na educação de crianças e jovens por desenvolver a sensibilidade e ser uma fonte de prazer e forma de expressão de sentimentos. Independentemente da profissão que exerce, se um trabalhador toca um instrumento musical, a criatividade e a sensibilidade desta pessoa invariavelmente afeta de forma positiva o seu trabalho. A Lei número 11.769/08 parece concordar com esse pensamento, pois determina que num período até três anos letivos de sua publicação, as escolas tenham como disciplina obrigatória a música nos níveis de ensino fundamental e médio, algumas escolas estão em conformidade com a legislação.

Os instrumentos musicais, a exemplo dos tambores orientais e africanos entre outros, historicamente eram usados desde tempos remotos, como meio de comunicação. Mais tarde foram surgindo outros instrumentos em que seus ritmos, harmonias, melodias e timbres variavam de acordo com diferentes culturas. No Brasil e no mundo os instrumentos cordofones, família do violão, são muito populares. A escolha do violão para análise de madeiras para instrumentos musicais se justifica pelo fato deste instrumento dispor de muitos recursos, e principalmente, por produzir frequências, baixas, médias e altas, além de ser o instrumento mais popular do nosso tempo.

No Brasil o violão ganhou uma nova batida, o povo brasileiro recebeu esse instrumento através dos europeus que tinham inicialmente a proposta de aproximação ou inclusão da religião (TABORDA, 2004). Aqui o instrumento ganhou um formato inovador onde se destacaram entre outros grandes mestres: Dilermano Reis, João Gilberto, Nelson Cavaquinho, Baden Powell, Elomar Mello, Horondino da Silva, Raphael Rabello e Gilberto Gil. Dessa forma, os recursos do violão passaram a ser explorados de forma ampla, não só na amplitude de suas frequências, como numa nova forma estética de tocar esse instrumento utilizando principalmente, recursos rítmicos associados a também inovadoras modulações.

O violão, nome brasileiro dado ao instrumento conhecido como guitarra acústica clássica, faz parte da família dos instrumentos cordofones conforme classificação da organolgia é conhecido por seu braço onde são moduladas as frequências ou notas musicais através de uma escala musical e seu corpo, conhecido como caixa acústica. Esse instrumento será citado de agora em diante como sistema mecânico vibracional – SMV. Nesse estudo do SMV não será incluído o braço por

razões técnicas e de cronograma. Por se tratar de uma complexidade maior em estudar o sistema inteiro, optou-se por dar ênfase ao corpo, ou caixa acústica. Esta se subdivide em: tampo, faixas laterais e fundo. A Figura 1 mostra o modelo do violão clássico do Luthier espanhol Antônio Jurado Torres que foi usado nesse trabalho e disponibilizado pelo curso de tecnologia em construção de instrumentos musicais da UFPR.



**Figura 1:** Modelo do violão clássico de Antonio Torres.

O estudo da caixa acústica do violão clássico foi realizado através do uso de seis espécies de madeira, avaliadas e caracterizadas de forma numérica visando destacar a importância das três partes que compõem a caixa acústica: tampo harmônico, faixas laterais e fundo.

Luthier, palavra de origem francesa que remete ao Alaúde (luth), se refere ao profissional que constrói e restaura instrumentos musicais. Em geral o luthier utiliza madeiras diferentes para cada parte de um instrumento, visando um bom desempenho, beleza, durabilidade e buscando o melhor timbre. Neste estudo não serão abordadas as diferentes técnicas de construção e as diversas variáveis que podem interferir no desempenho do instrumento.

A fim de comparar as configurações dos diferentes violões construídos neste trabalho, foi utilizado o abeto no tampo e o jacarandá da Bahia na lateral e no fundo, conjunto considerado ideal pela maioria dos luthiers e músicos. A caracterização do comportamento das partes da caixa acústica do violão partiu de informações empíricas adquiridas através de entrevistas e de dados da literatura, onde muitos construtores afirmam que em termos de qualidade, o tampo harmônico é responsável por mais da metade do som produzido pela caixa acústica. Em 1862 Antônio Jurado Torres

construiu um violão com o tampo de abeto e laterais e fundo de papel marchê, tentando indicar que o timbre era mesmo protagonizado pelo tampo harmônico, este violão encontra-se no Museu De La Musica em Barcelona e foi catalogado por Jose Romanillos como FE14. Neste trabalho foi substituído o Abeto no tampo por madeiras nacionais com bom potencial tais como Araucária e Marupá e no fundo da caixa acústica, em lugar do Jacarandá foi utilizada a Andiroba e Jenipapo. Foi utilizado também o compensado flexível de 3 mm, material mais utilizado em fábricas de instrumentos musicais devido ao baixo custo e facilidade de manuseio. A madeira de Virola foi identificada nas duas faces do compensado flexível utilizado neste trabalho, o compensado é amplamente utilizado mesmo sendo um material que tem amortecimento e eficiência diferente da madeira maciça, o que limita a reflexão e a propagação das ondas sonoras para fora, através da boca do instrumento que fica localizada no tampo. Por outro lado o compensado não varia tanto a umidade com o clima, é um material padronizado que pode definir o estilo de uma marca.

Segundo BELLA, 2002 não foi encontrada relação direta entre as características físicas (representadas pela distância média entre anéis de crescimento e um índice analítico de sua irregularidade) e propriedades acústicas de abeto vermelho (*Picea abies*). Em outras palavras, irregularidade óptica e dimensão do anel de crescimento não fornecem informações sobre características mecânicas ou densidade de madeiras e de qualquer forma, não há na literatura dados que mostrem que determinada densidade ou módulo elástico de uma madeira sejam requisitos para um bom instrumento musical. A partir de resultados desta pesquisa, será feito um esforço para avaliar se é possível relacionar matematicamente a subjetividade do que é considerado um bom violão por músicos e luthiers, com resultados experimentais que mostrem quais madeiras alternativas estudadas têm características mais próximas do abeto e do jacarandá, madeiras consideradas ideais para o tampo e fundo do violão, respectivamente.

Devido ao estudo da caixa de acústica ser muito complexo e possuir inúmeras variáveis, a divisão desta pesquisa pode ser melhor compreendida quando se divide as espécies de madeira para cada parte da caixa acústica. No tampo foi utilizada madeiras com baixa densidade e nas laterais e fundo da caixa acústica madeiras mais densas foram usadas. A Tabela 1 mostra as espécies de madeira analisadas neste trabalho.

TAMPO DA CAIXA ACÚSTICA			
Nome popular	ABETO / SPRUCE	MARUPÁ	ARAUCÁRIA
Família:	<u>Pinaceae</u>	Simaroubaceae	Araucariaceae
Espécie:	<i>Picea abies</i> (L) Karst.	<i>Simarouba amara</i> Aublet	<i>Araucária angustifolia</i> (Bertoloni) Otto Kuntze
FUNDO E LATERAIS DA CAIXA ACÚSTICA			
Nome popular	JACARANDÁ DA BAHIA	ANDIROBA	JENIPAPO
Família:	Fabaceae (Leguminosae Papilionoideae)	<u>Meliaceae</u>	Rubiaceae
Espécie:	<i>Dalbergia nigra</i> (Vellozo) Freire Allemão	<u>Carapa guianensis</u> Aubl.	<i>Genipa americana</i> Linnaeus

**Tabela 1:** Espécies florestais analisadas.

A preocupação com os impactos ambientais decorrentes das atividades humanas faz parte da história recente da sociedade, é essencial que madeiras que apresentem velocidade de crescimento compatível com a demanda sejam conhecidas. Assim, foram utilizadas madeiras abundantes, de rápido crescimento ou de reflorestamento, ainda não avaliadas para o uso em violões.

### 1.1- Instrumentos musicais.

No Brasil, encontram-se registros da utilização de violas desde o século XVI, quando em 1583, por exemplo, o padre Fernão Cardim registra a ocasião em que se realizou na aldeia do Espírito Santo uma encenação ao ar livre de um auto pastoril, durante a festa de recepção do padre Cristovão de Gouveia (TINHORÃO, 1998).

Auxiliar do homem desde o início dos tempos, a madeira é utilizada para fabricações de instrumentos musicais há mais de 10.000 anos. Para a construção dos instrumentos musicais, como aliás nas múltiplas utilizações da madeira, é indispensável o conhecimento das propriedades deste material. O mestre artífice escolhe a madeira que lhe parece a mais apta à utilização que pretende lhe dar, tentando penetrar no segredo de cada prancha onde tenta ler a história individual da árvore que lhe deu origem (BESSA, 2000).

Atualmente, os luthiers baseiam a sua escolha de madeira para o tampo harmônico, em geral o abeto, pelo aspecto visual de madeira e qualidade dos harmônicos. Esses profissionais avaliam a distância do anel de crescimento, a linearidade de trigo (ambos no plano tangencial e radial) e a ausência de defeitos como a presença resina bolsos, nós etc. Outros tipos de madeira macia foram utilizadas para estes fins (abeto Sikta, cedro vermelho...), mas instrumentos de reconhecida boa qualidade são do abeto (*Picea abies*) (BELLA, 2002).

Desde a antiguidade utiliza-se principalmente a madeira como matéria prima para a construção de instrumentos musicais. O grande desafio de um luthier é conseguir extrair o máximo potencial que uma madeira pode ter no sistema mecânico vibracional - SMV em determinada parte do conjunto do instrumento musical. No violão, o Abeto europeu (*Picea abies*) usado no tampo harmônico é quase a escolha unânime quando se trata da construção de um instrumento de qualidade superior. Outras madeiras podem atingir um desempenho similar a depender da técnica do luthier que construiu o instrumento e da musicalidade e da virtuosidade do músico que toca o instrumento.

A classificação da qualidade de uma madeira na luteria é feita desde a antiguidade por formas empíricas de audição e flexão da madeira e visualmente, fatores como número de anéis de crescimento por polegada, uniformidade dos anéis e variação de cor são levados em consideração na seleção de madeiras de corte radial. As madeiras coníferas importadas, como é o caso do *Picea abies*, possuem classificação A, B ou C, por apresentarem padrões uniformes dos anéis de crescimento e idade avançada ou foram submetidas ao envelhecimento induzido da madeira após o corte.

O tampo harmônico na caixa acústica funciona como um sistema de osciladores acoplados. O tampo recebe o impulso das cordas/cavelete que irradia pela caixa de ressonância transmitindo determinada frequência, que 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 conseqüentemente, no timbre do instrumento.

Existe uma grande diversidade de espécies florestais brasileiras em relação às existentes no hemisfério norte, algumas foram pouco estudadas e já se encontram na lista de espécies ameaçadas de extinção. Outro aspecto que dificulta a utilização de madeiras alternativas em vez das comumente usadas em instrumentos musicais é a

falta de critérios na sua comercialização. Muitas vezes há deficiências na identificação correta da madeira e a qualidade do corte pode comprometer a sua utilização. No Brasil é raro encontrar empresas que forneçam madeira com corte radial. A grande biodiversidade de espécies brasileiras não justifica o desconhecimento e a perda genética de algumas espécies que podem e devem ter sua aplicação valorizada, como é o caso do uso em instrumentos musicais.

Atualmente, quase todos os instrumentos vendidos em lojas especializadas de instrumentos musicais são fabricados em indústrias e a matéria prima utilizada na caixa acústica é compensado flexível de 3 mm ou laminado. Algumas empresas comercializam alguns instrumentos com o tampo em madeira maciça e o fundo e laterais em compensado e laminado. Estes instrumentos têm preço mais elevado sendo direcionados para um consumidor/usuário de maior poder aquisitivo. Porém uma parte da comercialização de instrumentos é realizada diretamente entre o músico e o luthier e nesses instrumentos geralmente são utilizadas madeiras tradicionais. A literatura da indústria da madeira se refere a esse mercado como "a atividade e o uso mais nobre que se pode dar a madeira".

Muitas técnicas de construção de instrumentos musicais também se baseiam na experimentação e como se exige muito do trabalho manual, os segredos de construção e entalhe têm sido transmitidos de geração em geração nas tradicionais famílias que conseguiram dar continuidade a essas técnicas.

A partir da mecanização, o processo de fabricação em série fez com que grandes empresas inserissem no mercado instrumentos com valor muito mais atraente e boa aparência devido à padronização de seus modelos populares. Devido à crescente industrialização do processo de fabricação de instrumentos musicais populares, muitos artesãos dedicam boa parte de seus serviços à restauração ou pequenos ajustes e manutenção desses instrumentos, o que levou ao esquecimento de técnicas e práticas e até ao desuso de algumas ferramentas de uso artesanal.

Quando a corda do instrumento é tocada, a caixa de ressonância é excitada como um todo, integralmente, mas a amplitude de vibração do fundo é menor que do tampo, e menor ainda nas faixas laterais. São inúmeros os tipos de madeira utilizados para fundo e faixas laterais. No geral, preferem-se madeiras mais rígidas (PAIVA, 2013).

A sonoridade da caixa acústica (ou de ressonância) nos violões é caracterizada pelos materiais e a forma como foram moldados o tampo, as laterais e o fundo. O

tampo pode ser responsável pela maior parte do som produzido, há ainda o envolvimento e virtuosidade do músico e os diversos acessórios como as cordas. A lateral e o fundo do violão são responsáveis por refletir a vibração, logo, a caixa acústica toda vibra quando se toca um instrumento musical. A Figura 2 mostra o interior do tampo harmônico com a estrutura de reforço e o leque harmônico.

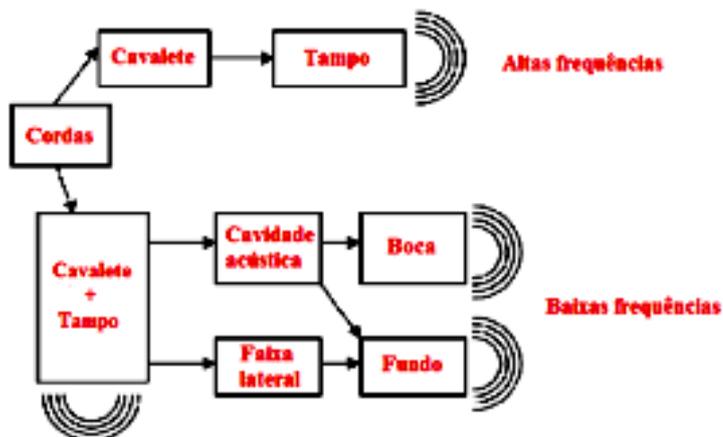


**Figura 2:** Interior do tampo com leque harmônico.

A emissão sonora ocorre essencialmente por meio do tampo superior da caixa de ressonância e pela abertura. O fundo da caixa acústica também contribui para o som em algumas frequências (SILVA, 1989). Principal referencia da luteria espanhola e mundial para violões, Antonio Jurado Torres (1817-1892) padronizou as dimensões da guitarra clássica.

O comportamento das lâminas (tampo e fundo) em instrumentos reais é inevitavelmente mais complexo do que implícito na teoria. Em particular, as vibrações induzidas do som pelas cordas vibrantes, irradiam energia para o resto do corpo, laterais e fundo que, em seguida, também vibram e irradiam. A complicação adicional é que a radiação a partir das diferentes partes do violão nem sempre estão em fase, e tem efeito considerável em resposta à pressão de ressonância. A radiação do som é uma combinação de mudanças de pressão induzidas pelo movimento do tampo harmônico e também do fluxo de volume de ar através da boca. Embora o tampo seja sem dúvida o mais importante elemento de irradiação de som, a radiação da parte traseira e o volume da caixa pode ser muito elevado, por vezes pode até mesmo

dominar em algumas frequências. A fase do movimento do tampo e da placa traseira em relação ao centro do corpo produz contração e expansão alternadas da placa do tampo e da placa traseira, podendo expandir para o exterior da cavidade e induzir uma forte alteração de volume. O movimento funciona como o modelo de osciladores acoplados, ocorrendo variação do volume líquido do conjunto (RICHARDSON, 2010). A Figura 3, mostra um diagrama esquemático de transmissão de energia e radiação sonora em baixas e altas frequências



**Figura 3:** Diagrama esquemático de transmissão de energia e radiação sonora em baixas e altas frequências, adaptado de (ROSSING, 1988).

Como acontece com todos os instrumentos de cordas, o processo de fabricação do violão é longo e difícil. Tanto em Portugal como na Espanha, existem ainda violeiros que constroem violões por processos totalmente artesanais, sendo os seus belíssimos instrumentos famosos em todo o mundo. No entanto, o aumento da procura destes instrumentos levou ao aparecimento de fábricas semi-mecanizadas, em que os métodos utilizados se encontram entre o puro artesanato e a fabricação em série, e que produzem instrumentos de qualidade por vezes aceitável e de preço acessível. A construção do violão não está normalizada, e são feitos violões em vários tamanhos, formas e com diferentes materiais. 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 conforme mostrado na figura 2 (BESSA, 2000).

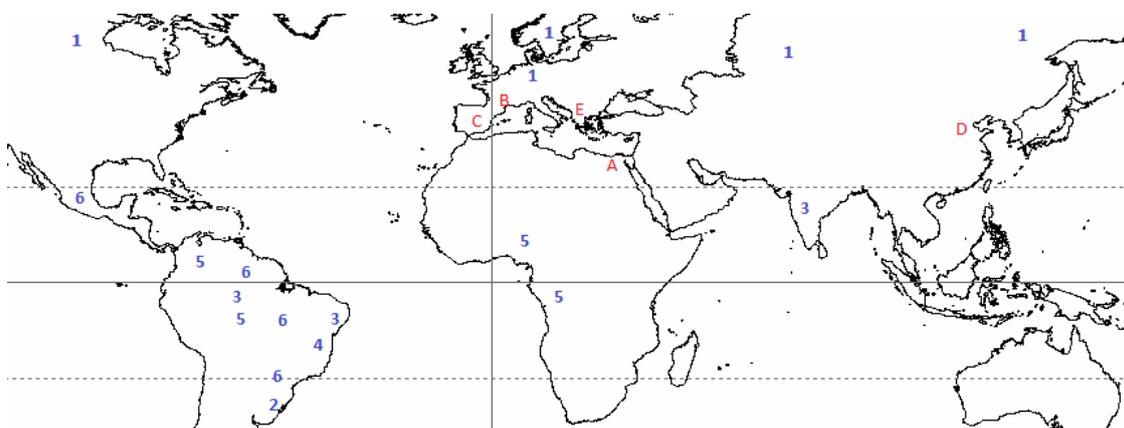
O trabalho de luteria evoluiu gradativamente desde que os primeiros luthiers chegaram ao Brasil no início do século XX, Tranquilo Giannini e Romeu Di Giorgio

deram origem às duas maiores fábricas de violão do Brasil, mas antes de se tornarem indústrias esses luthiers faziam seus instrumentos artesanalmente (PINTO, 2008).

## 1.2 - Contexto histórico geográfico

Historicamente existe em todas as atividades humanas uma evolução na qualidade dos produtos e serviços. Na acústica, na música e na luteria, também houve evoluções na busca por sons agradáveis. Podem ser citados os amplificadores valvulados, sintetizadores, processadores de efeitos, condensadores entre outros, assim como instrumentos característicos de diferentes culturas.

A Figura 4 mostra o mapa mundi com as principais influências de criação de instrumentos musicais e acústicas.



**Figura 4:** Mapa mundi com as principais influências da acústica e de instrumentos musicais. As letras representam as regiões onde foram desenvolvidas a teoria e prática musical e acústica: A: Egito(Os primeiros instrumentos musicais), B: França(Fourier), C: Espanha(violão moderno, Antonio Torres), D: China(Primeiros estudos de acústica), E: Grécia(Escala musical, Aristoxeno).

Os números representam o habitat natural das espécies analisadas: 1: Abeto, 2: Araucária, 3: Marupá, 4: Jacarandá, 5: Andiroba, 6: Jenipapo

Devido ao caráter cosmopolita dos habitantes do antigo Egito, suas manifestações culturais influenciaram grande parte das criações artísticas. A música não tinha formato cartesiano, como se conhece atualmente, porém ainda se podia perceber características livres de métrica rítmica em expressões culturais derivadas de povos orientais e africanos. No recôncavo baiano as variações rítmicas do samba de roda, em especial aquela executada com viola machete nos samba-chula dessa região

ainda apresentam variações rítmicas livre do modelo cartesiano. Essa expressão cultural no recôncavo é atualmente tombado pelo IPHAN e UNESCO.

A história da acústica iniciou na China, os sons foram classificados pelo timbre e pela altura, e se especificaram várias escalas musicais. Isso, por sua vez, exigiu uma afinação perfeita. Um sino devidamente afinado podia servir de padrão e faria com que outro sino tocasse em ressonância quando estivesse corretamente afinado. Em 270 a.C. Linlun, ministro do imperador Huangundi, foi encarregado de estabelecer um padrão de altura (pitch) para música. Linlun cortou uma haste de bambu e obteve sua nota fundamental e além disso desenhou também 20 sinos (RAICHEL, 2006).

Na França J. B. J. Fourier(1768-1830), físico-matemático foi contemporâneo de Lagrange, Laplace, Malus, Haüy, Legendre, Biot, Poisson, Carnot, Monge, Lacroix e Napoleão. Suas contribuições abrangem diversas áreas e sub-areas principalmente da engenharia em que são inúmeras suas aplicações práticas. Nesse trabalho foi utilizado a transformada de Fourier (FT), onde a conversão de um sinal de tempo para o domínio da frequência, e o seu inverso, é alcançado utilizando o algoritmo (FFT) e a equação (DFT) através de um programa de computador.

Na Grécia, as pesquisas de Pitágoras e seus discípulos em acústica se referem à natureza do som e à teoria matemática da escala. Com base nos acordes produzidos por cordas vibrantes de diferentes comprimentos, a escola pitagórica construiu a escala a partir dos números inteiros, suas frações e potências. A escala pitagórica foi reformada por Aristóximo (360 – 300 a.C.) por razões baseadas na música e na exigência do ouvido (JOHNSTON, 2002).

Os antigos Egípcios executavam e ouviam seus cantos em grande variedade e em inúmeras ocasiões, tais como: banquetes ou festas particulares, nos trabalhos do campo, nas paradas militares, nos templos e nas procissões religiosas. Aliás, a importância da música no antigo Egito pode ser facilmente confirmada através da quantidade e qualidade dos instrumentos musicais que fazem parte das coleções egípcias de museus de todo o mundo (FILIPE, 2011).

No ano 711, os Mouros invadiram a Península Ibérica e neste movimento de conquista introduziram o Rebab em Espanha e Portugal, “[...] o Rebab e o arco, em conjunto com o alaúde e a guitarra dos mouros, foram trazidos para Espanha no início do século oitavo [...] Presume-se que o alaúde tenha tido origem na Ásia central, e entrou na Europa no séc. VIII pelo norte de África (DAMAS, 2012).

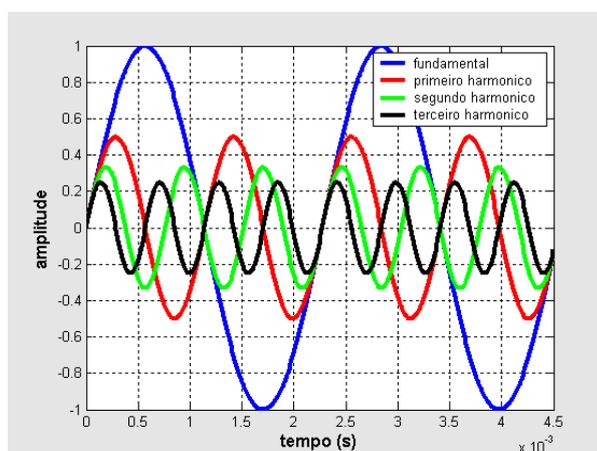
Diante do contexto histórico, o alaúde, instrumento musical mais antigo da família do violão foi encontrado no antigo Egito. Naquela época não existia o conceito de música, a palavra refere-se sobretudo ao canto, estando inserido num contexto religioso ou fúnebre e era destinado essencialmente às mulheres (TEETER, 2009).

### 1.3 - Som

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, 1998).

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, 2005).

Na natureza, a onda fundamental é acompanhada de seus harmônicos e a maneira como essa configuração de harmônicos se propaga por um meio que pode ser fluido ou sólido, diferencia um som dos demais. Os harmônicos caracterizam a identidade de um som e devido a eles existem uma diversidade de timbres na natureza. Essas ondas podem ser decompostas e identificadas conforme mostra a Figura 5.



**Figura 5:** Onda fundamental e harmônicos (TEIXEIRA e STOPPA, 2004)

Na natureza não existe uma onda sonora pura, ou seja, todo som emitido por um fenômeno natural, por um animal, por máquinas, motores, pelo homem ou pelos instrumentos musicais possuem uma onda fundamental que é acompanhada por seus harmônicos e isso diferencia um som dos demais. Cada instrumento possui um timbre, e este define a identidade, ou seja, se não fossem os harmônicos da onda sonora complexa que definem o timbre, todos os instrumentos soariam iguais e todas as vozes e demais sons também seriam iguais. Uma onda sonora natural é composta por uma onda fundamental e seus harmônicos, esta combinação de ondas é o que caracteriza o timbre e conseqüentemente, consegue-se devido a essa combinação identificar uma voz ou o tipo de instrumento. A propagação das ondas sonoras pode ocorrer de forma harmoniosa, gerando neste caso um som, ou pode ocorrer de forma incômoda, gerando desta forma um ruído, dependendo da subjetividade de cada indivíduo (OMS, 1980).

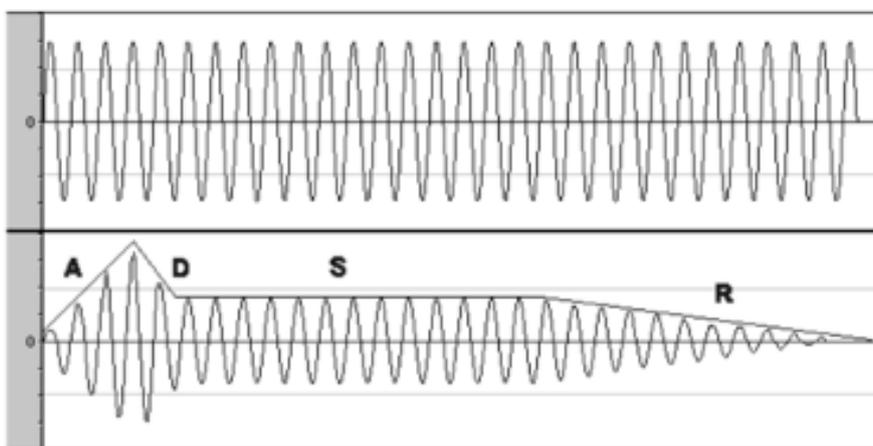
O comportamento vibracional pode ser considerado onde o som é gerado por diversas fontes como: motores, rolamentos, vigas, instrumentos musicais entre outros e por isso, a análise modal mostra o comportamento desses materiais na estrutura que se deseja investigar.

Um clarinete e uma flauta não produzem o mesmo som ao serem tocados com a mesma altura tonal e o mesmo volume. Isso se deve ao fato de haver um fator distinto a mais para o som além da altura tonal e do volume, este fator é o timbre. Observando-se sons com timbres diferentes através de um osciloscópio, nota-se que as formas de onda diferem entre si. De um modo geral, formas de ondas arredondadas produzem um timbre mais suave enquanto que as formas de ondas pontiagudas dão um timbre mais penetrante e estridente (MILETTO et. e al., 2004).

Além dos três fatores básicos do som, altura tonal, volume e timbre, há outro fator importante que determina o som. Trata-se da variação de som em um transcurso de tempo, mais precisamente, a variação de cada um dos três elementos em um transcurso de tempo que vai desde o começo do som até um ponto do tempo onde este desaparece completamente. Se um violino for tocado com arco, por exemplo, geralmente o volume do som aumenta gradualmente e também o timbre e a altura tonal trocam ligeiramente. Estas trocas em um tempo são o que determinam o timbre característico de um violino. Por outro lado, o relaxamento do som de um piano é um caimento contínuo e sem este caimento seria muito difícil distingui-lo do som de uma flauta. Estas variações de um som em um transcurso de tempo são chamadas

envolventes (envelopes ou envoltórias). Envolventes são portanto, as mudanças de altura tonal, volume e timbre em um transcurso de tempo. Ocasionalmente a mudança de volume (amplitude) em um transcurso de tempo é também chamada envolvente. No caso da envolvente de amplitude de um som, pode-se descrevê-la a partir de quatro parâmetros, conhecidos como ADSR: Ataque (A), Decaimento (D), Sustentação (S) e Relaxamento (R) (MILETTO et. e al., 2004).

A Figura 6 mostra a forma de onda original, sem variação na amplitude e pode ser observada a aplicação de um envelope na mesma onda, o que causa variações de volume no tempo (MILETTO et. e al., 2004).



**Figura 6:** Variação da amplitude da onda em relação ao tempo (MILETTO et e al., 2004)

O conceito de timbre refere-se à cor ou à qualidade do som e está normalmente dissociado dos conceitos de intensidade e altura. Timbre é definido pela ASA (American Standard Association) como “aquele atributo do sentido auditivo em termos do qual o ouvinte pode julgar que dois sons similarmente apresentados e tendo a mesma intensidade e altura, são dissimilares” (RISSET e WESSEL, 1982). Esta vaga definição está relacionada com a multidimensionalidade inerente a este atributo, o qual não pode ser escalonado por quantidades unidimensionais, tal como acontece com o volume e a altura, cujas variações podem ser descritas por escalas entre fraco-forte e grave-agudo, respectivamente. Assim, o timbre pode ser especificado quantitativamente pelo sistema tradicional de notação musical. As variações de timbre são percebidas, por exemplo, como agrupamentos de sons tocados por um mesmo instrumento musical, ou falados por uma mesma pessoa, mesmo que estes sons possam ser bem distintos entre si, de acordo com sua altura, intensidade ou duração. A busca maior de investigações do timbre está voltada para a exploração do pleno

conhecimento desta propriedade do som, ainda não totalmente caracterizada (LOUREIRO, 2000).

A propagação das ondas sonoras provoca certos fenômenos diretamente influenciados pelas características da onda e do meio material onde ela se propaga, sendo esta a principal diferença entre as ondas sonoras, as ondas elétricas ou as luminosas. Portanto, o som exige um meio material para se propagar e isto foi verificado por Boyle no séc. XVIII, depois de Kircher em 1605 ter demonstrado que o som não se propaga no vácuo (NEPOMUCENO, 1968).

A variação do amortecimento é o principal fator que caracteriza um material na acústica. Um decaimento longo ou rápido determina uma característica importante num instrumento, o padrão harmônico de frequências naturais é a propriedade que define a identidade digital do som (WOODHOUSE, 2011).

#### **1.4 - Justificativa**

O problema do uso das madeiras tradicionalmente usadas nos instrumentos musicais é justamente devido ao seu lento crescimento. Por isso é necessário o estudo de madeiras alternativas que possam ser usadas na construção de instrumentos com alta qualidade, visto a grande demanda iminente por instrumentos musicais, incentivada também pela lei que obriga as escolas públicas a oferecer aulas de música e à importância da música no desenvolvimento da sensibilidade e do ser humano de forma geral.

## **2 - Revisão bibliográfica**

Em relação à velocidade de crescimento (SWAINE e WHITMORE 1988) e (WHITMORE 1989, 1991) sugeriram uma simplificação das classificações, considerando apenas dois grupos: pioneiras e clímax. As sementes das espécies pioneiras germinam somente em clareiras nas quais há incidência de luz direta sobre o solo pelo menos parte do dia, e as plântulas não sobrevivem na sombra do sub-bosque. As sementes das espécies clímax podem germinar na sombra sob o dossel e as plântulas conseguem sobreviver nesse ambiente por vários anos. A Tabela 2 mostra a forma usual de classificação das espécies florestais que se dividem em: Pioneiras, secundárias e clímax.

	<b>Pioneiras</b>	<b>Secundária inicial</b>	<b>Secundária tardia</b>	<b>Clímax</b>
<u>Idade das comunidades observadas (anos)</u>	1 – 3	5 - 15	20 – 50	mais de 100
<u>Altura, medidores</u>	5 – 8	12 - 20	20 - 30 alguns até 50	30 - 45, alguns até 60
<u>Número de espécies lenhosas</u>	1 – 5	1- 10	30 – 60	100 ou mais
<u>Distribuição natural de dominantes</u>	muito ampla	muito ampla	largura, inclui regiões mais secas	geralmente restrito, em frequentes endemias
<u>Crescimento</u>	muito rápido	muito rápido	dominantes rápido, outros devagar	lento ou muito lento
<u>expectativa de vida, dominantes</u>	muito curto, inferior a 10 anos	curto, de 10 a 25 anos	geralmente 40 - 100 anos, alguns mais	muito longo, 100 - 1000 anos, alguns provavelmente mais
<u>tolerância à sombra, dominantes</u>	muito intolerante	muito intolerante	tolerantes na fase juvenil, depois intolerante	tolerante, exceto na fase adulta
<u>regeneração de dominantes</u>	muito escassa	praticamente ausente	ausente ou abundante, com grande mortalidade nos primeiros anos	bastante abundante
<u>disseminação de sementes de dominantes</u>	pássaros, morcegos, vento	ventos, pássaros, morcegos	principalmente ventos	gravidade, mamíferos, roedores, pássaros
<u>Densidade</u>	muito leves e pequenos diâmetros	muito leves, diâmetros de 60 cm	média, algumas muito duras e pesadas	dura e pesada, inclui grande caules
<u>tamanho de sementes ou dispersão de frutas</u>	Pequeno	pequeno	pequeno ou médio	grande

**Tabela 2:** Características de componentes arbóreas de estágios seriais em florestas úmidas tropicais americanas (BUDOWSKI, 1965).

As espécies pioneiras são de rápido crescimento e baixa expectativa de vida. As madeiras de melhor qualidade são as de crescimento lento, o que leva ao perigo de extinção dessas espécies devido à falta de interesse de plantio comercial e à exploração desordenada de algumas espécies. A maioria das madeiras atualmente utilizadas em instrumentos musicais estão na lista de espécies ameaçadas de extinção.

A escolha das espécies florestais para fabricação de instrumentos musicais passa por critérios estéticos como cor, textura e sonoridade, porém devido a questões ambientais, foi consultada a Instrução Normativa nº 06, de 23 de setembro de 2008, que define reconhecer quais espécies da flora brasileira estão ameaçadas de extinção.

Diante dessa realidade será discutido no decorrer deste trabalho cada espécie de madeira utilizada e sua função na acústica do violão.

Existe uma preocupação de profissionais da área florestal em relação ao abastecimento de madeiras para a indústria e construção civil. Hoje, o Brasil importa madeira e segundo o último relatório da FAO 2012, essa tendência tende a aumentar porque os desmatamentos realizados frequentemente por empresários rurais tem aumentado muito. As áreas desmatadas se transformam em pasto ou plantação de grãos. Empresas de plantio florestal se destacam por plantio de espécies exóticas, principalmente o eucalipto e o pinus. Há ainda uma grande demanda pela regularização fundiária, que reduz ainda mais as áreas de florestas e também há uma grande pressão para a criação de novas áreas de conservação ambiental. Além disso, se as áreas desmatadas fossem reflorestadas ou ainda deixadas ao tempo, a floresta iria se recompor, mesmo que isso demorasse muito tempo. No entanto, o que acontece frequentemente é o aproveitamento de áreas desmatadas em áreas para agropecuária o que modifica o ecossistema em grandes áreas, sem planejamento de preservação ou compensação ambiental.

Diante da tradicional utilização de madeiras nobres na construção de instrumentos, e de outras atividades principalmente moveleira e da construção civil, algumas espécies florestais estão em risco de extinção. Frequentemente a lista de espécies ameaçadas de extinção esta sendo atualizada pelo Ministério do Meio Ambiente.

No anexo I da Instrução Normativa Nº. 06, de 23 de setembro de 2008 do Ministério do Meio Ambiente constam a Araucária (Araucária Angustifolia) e Jacarandá da Bahia (Dalbergia nigra), na Lista Oficial das Espécies da Flora Brasileira Ameaçadas de Extinção.

Art. 3º Entende-se por espécies:

I - ameaçadas de extinção: aquelas com alto risco de desaparecimento na natureza em futuro próximo, assim reconhecidas pelo Ministério do Meio Ambiente, com base em documentação científica disponível;

Art. 4º As espécies consideradas ameaçadas de extinção constantes do Anexo I a esta Instrução Normativa estão sujeitas às restrições previstas na legislação em vigor e sua coleta, para quaisquer fins, será efetuada apenas mediante autorização do órgão ambiental competente.

Art. 5º Para as espécies consideradas ameaçadas de extinção constantes do Anexo I, deverão ser desenvolvidos planos de ação, com vistas à futura retirada de espécies da lista, elaborados e implementados sob a coordenação do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - Instituto Chico Mendes e do Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro-JBRJ e com a participação de órgãos governamentais, da comunidade científica e da sociedade civil organizada, em prazo máximo de cinco anos, a contar da publicação desta Instrução Normativa.

Parágrafo único. As espécies constantes do Anexo I a esta Instrução Normativa são consideradas prioritárias para efeito de concessão de apoio financeiro à conservação pelo Governo Federal e deverão receber atenção especial no contexto da expansão e gestão do Sistema Nacional de Unidades de Conservação - SNUC, inclusive nos planos de manejo das Unidades de Conservação, bem como nos planos de conservação *ex situ* conduzidos no âmbito dos jardins botânicos e bancos de germoplasma brasileiros. Foram escolhidas algumas espécies florestais brasileiras buscando características que possam substituir o jacarandá da Bahia, espécie em extinção.

A Araucária angustifólia foi escolhida por ser potencialmente comparável ao Abeto para utilização em tampos harmônicos. Assim, justifica-se o estudo da Araucária, mesmo estando essa árvore na lista de espécies ameaçadas de extinção, já que existe no mercado empresas fornecedoras da madeira de Araucária no Sul do Brasil que comercializam madeiras certificadas pelos órgãos públicos. Neste trabalho as amostras de araucária foram adquiridas em empresas certificadas.

Souza realizou um estudo no Brasil sobre espécies florestais para utilização em instrumentos musicais utilizando os métodos acústico, comparativo direto e estatístico. O resultado obtido indica que pelo menos vinte espécies de madeiras nativas brasileiras são potencialmente aptas para a fabricação de instrumentos musicais de corda e de sopro, sendo necessário realizar testes práticos em instrumentos acabados, com o propósito de se introduzir estas espécies no mercado nacional e internacional. A Tabela 3 mostra as espécies e aplicação das madeiras estudadas por (SOUZA, 1983).

<b>NOME COMUM</b>	<b>APLICAÇÃO</b>	<b>GRÃ</b>	<b>DENSIDADE BÁSICA (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Morototó	Tampo	Direita	0,39
Sorva	Tampo	Direita	0,38
Faveira tamboril	Tampo	Cruzada reversa	0,42
Castanha de arara	Tampo	Direita	0,39
Marupá	Tampo	Direita	0,38
Tachi preto folha grande	Fundo	Cruzada irregular	0,56
Andiroba	Fundo	Direita	0,59
Amapá doce	Fundo	Cruzada reversa	0,57
Jacareúba	Fundo	Irregular	0,54

**Tabela 3:** Espécies classificadas para utilização em instrumentos musicais. (SOUZA, 1983)

Neste trabalho foram escolhidas as espécies Andiroba e Marupá pelo fato dessas árvores apresentarem rápido crescimento, tolerância ao sol, se adaptarem ao manejo em recuperação de áreas degradadas e por já estarem sendo utilizadas em escala comercial de forma sustentável, será definido posteriormente a definição de grã conforme dados do IMPA.

Em madeiras há uma forte relação entre a velocidade de propagação de ondas e a umidade. A umidade afeta a velocidade de propagação de dois modos: no efeito intrínseco da rigidez e na densidade da madeira. A água livre aumenta a atenuação, resultando numa diminuição da velocidade nas direções longitudinal, radial e tangencial (OLIVEIRA, 2005). A madeira é um material higroscópico e portanto, realiza trocas de água com o meio, absorvendo ou perdendo água até atingir o equilíbrio com a vizinhança. A umidade de equilíbrio da madeira depende das condições de temperatura e umidade do meio (PANSIN e de ZEEUW, 1970). Sabe-se que em condições ambientes de 1atm, 20°C e 65% de umidade relativa, a umidade de equilíbrio da madeira é 12% (CISTERNA, 1994).

Para o tampo harmônico, as madeiras utilizadas devem ser moles porque o tampo recebe os impulsos das vibrações e, como é fino, deixa passar o som; daí dizer-se que um tampo sem abertura também produz som. Há tampos tão finos que colocando uma lâmpada no interior da caixa, se vê a transparência. Assim, a madeira mole do tampo recebe os impulsos das vibrações e transmite o som, projetando-o pela

abertura. A boca ou abertura do tampo é reforçada por dentro, tendo finas barras de madeira dispostas em leque abaixo da boca. No interior da caixa há peças de madeira para reforçar a estrutura e melhorar a qualidade do som. Cintas e travessas que subdividem igualmente o tampo servem para evitar harmônicos em excesso pois muitos harmônicos atrapalham bastante o som (BESSA, 2000).

O abeto, uma das primeiras espécies a serem conhecidas e estudadas é escolhida quase que por unanimidade para o tampo harmônico por ser uma madeira de baixa densidade e de grande resistência. O abeto consegue vibrar e produzir sons agradáveis além de ser uma madeira bela e durável. Pode-se considerar esta espécie como uma das mais valiosas e bem aceitas madeiras na luteria porque é utilizada para fabricar diversos tipos de instrumentos musicais em todo mundo.

Os materiais escolhidos para construção das diversas partes do instrumento devem ser compatíveis com a finalidade dos mesmos. A madeira do tampo, por exemplo, deve ser suficientemente rígida para resistir à força resultante no cavalete devido à tração das cordas. É importante ressaltar ainda que a rigidez do tampo, além de ser alterada pela fixação de vigas internas de reforço, dependerá do modo com que as toras de madeira foram extraídas da árvore que foi cortada (SALI, 1997).

*Araucaria angustifolia*, também conhecida como pinheiro brasileiro ou pinheiro-do-Paraná é nativa do Brasil e possui uma ampla área de distribuição. É característica e exclusiva da Floresta Ombrófila Mista (VELOSO et al. 1991). Sua madeira é de fácil trabalhabilidade sendo indicada para caixotaria, movelaria, laminados, tábuas para forro, ripas, caibros, lápis, carpintaria, palitos de fósforos, formas para concreto, marcenaria, compensados, pranchas, postes e mastros de navios (MAINIERI e CHIMELO 1989).

Atualmente, a principal fonte de madeira de *Araucária angustifolia* que se encontra no mercado são os plantios florestais. Em geral, as propriedades da madeira são alteradas como resultado das mudanças nas condições de crescimento em função de diferentes tratamentos silviculturais e de características de solo ou clima. Em vista disso, é importante que se conheça as causas dessa variação e os diferentes efeitos sobre as propriedades da madeira em uso. (ZOBEL e BUIJTENEN, 1989; ZOBEL e JETT, 1995)

A partir da década de 80 até o início do século XXI, a situação das florestas se mostrou tão crítica que a legislação ambiental incorporava instrumentos legais que orientavam o chamado "manejo sustentado das florestas" embora o mito da "mata

sem fim” demorava em se desfazer. A exploração da madeira estava associada à “Marcha ao Extremo Oeste” (BUARQUE DE HOLANDA, 1986).

A inclusão da Araucária com potencial para ser utilizada em tampos de instrumentos musicais se justifica por ser uma madeira de boa qualidade, por incentivar o correto manejo florestal e pela valorização desta madeira que pode ser usada em instrumentos musicais, agregando valor ao produto nacional na finalidade mais nobre que se pode dar a uma madeira.

O Marupá é uma espécie florestal de rápido crescimento e com grande produção de sementes, o seu papel ecológico vai além da alimentação de aves, como por exemplo, o uso medicinal. Assim, o Marupá dificilmente entrará na lista de espécies ameaçadas de extinção.

O Marupá (*Simarouba amara* Aubl.- Simaroubaceae) ocorre nas Índias Ocidentais, na Amazônia e nos Estados da Bahia, Ceará e Pernambuco. A espécie habita matas de várzeas, onde é mais frequente e atinge maior porte e é ocasional nas capoeiras e savanas de solo arenoso. A madeira é leve (densidade entre 0,435 a 0,55 g/cm<sup>3</sup>), fácil de trabalhar e muito resistente ao ataque de insetos (LOUREIRO, 1979). Esta madeira também é indicada para a confecção de tampos de instrumento musicais de corda (SLOOTEN e SOUZA 1993). Nos Estados Unidos é utilizada para tubos de órgãos e teclas de pianos (Marques et al., 2006). A árvore além de ornamental e útil para o paisagismo e é também empregada em reflorestamentos homogêneos destinados à exploração de celulose. Seus frutos são avidamente consumidos por várias espécies de pássaros. Como a planta é de rápido crescimento e tolerante à luz direta, é útil para plantios mistos em áreas degradadas de preservação permanente (LORENZI, 1992).

Para o fundo e faixas laterais, as madeiras utilizadas devem ser mais rígidas pois, segundo os construtores, produzem som agreste. O fundo funciona como refletor das vibrações e as faixas laterais refletem as ondas laterais. Assim, a madeira deve ser rígida para servir de refletora das vibrações e encaminhando-as para o tampo que, como referido, recebe as vibrações e transmite o som, projetando-o pela abertura (BESSA, 200).

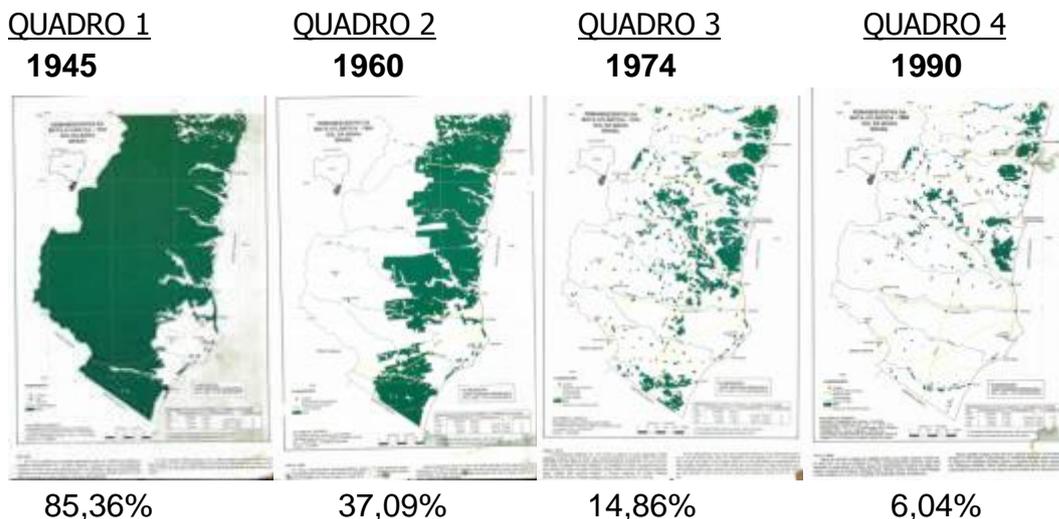
O Jacarandá da Bahia, conhecido internacionalmente como Brazilian Rosewood pertence à família das Dalbergias e possui uma coloração mais escura. Muitos construtores dizem gostar de trabalhar com o Jacarandá não somente por esta

madeira ser classificada como de grã direita mas também, por exalar um cheiro de rosas.

O jacarandá da Bahia é conhecido comercialmente há mais de 300 anos por ser uma das mais valiosas espécies madeireiras que ocorrem no Brasil. Essa espécie foi objeto de exportação através dos portos da Bahia e do Rio de Janeiro, desde os tempos coloniais. O cerne das árvores jovens desta espécie é pouco atrativo, sendo que o cerne responsável pela produção da famosa madeira provém das árvores velhas, sendo formado muito lentamente (CARVALHO, 1994). Apesar do rendimento em madeira desdobrada ser pequeno, em face das imperfeições usuais, o seu valor (cerca de US\$ 5.000/m<sup>3</sup> serrado) é altamente compensador (JESUS, et al. 1992).

Atualmente o comercio do Jacarandá da Bahia encontra-se proibido e sua diversidade genética esta comprometida devido a poucas espécies disponíveis. Existem algumas amostras oriundas de demolição de casas e prédios antigos que entram no mercado de forma descontrolada, em alguns casos dificultando a fiscalização e incentivando o desmatamento das poucas espécies vivas. Em meados do século XVIII, a madeira era abundante e permitia aplicações no mobiliário, em combinação ou não com outras madeiras.

O Jacarandá da Bahia foi explorado indiscriminadamente como mostra os mapas da Figura 7.



**Figura 7:** Desmatamento da Mata Atlântica no sul da Bahia de 1945 a 1990.

Os quadros da Figura 7 mostram que em 1945 (Quadro 1) existiam 2.235.900 ha. de Mata Atlântica considerando a área estudada de 2.724.700 ha; em 1960 (Quadro 2) registravam-se 1.010.812 ha de Mata Atlântica; em 1974 (Quadro 3)

restavam apenas 405.000 ha de Mata Atlântica na área estudada; e finalmente, em 1990 (Quadro 4) restavam somente 164.825 ha. de Mata Atlântica na área estudada. No período entre 1960 e 1974 houve o maior desmatamento (MENDONÇA, 1990).

A andiroba (*Carapa guianensis*) é uma espécie que se distribui por todo o norte da América do Sul, incluindo a Bacia Amazônica, a América Central, as Antilhas e a África Tropical. No Brasil, ocorre em toda a Bacia Amazônica, principalmente em regiões de várzeas e áreas alagáveis ao longo dos igapós. Também conhecida como andirova, angirova, carapa e purga-de-santo-inácio e pertencente à família Meliaceae (mesma do cedro e mogno), é uma árvore de grande porte, que chega a atingir 30 m de altura. Sua madeira é moderadamente pesada, comparável ao mogno (*Swietenia macrophylla* King), de cor avermelhada e praticamente inatacável por cupins. É empregada na fabricação de móveis, construção civil e na indústria naval. Quanto ao uso medicinal, consta na literatura que, pelo menos desde a época do descobrimento, o óleo de andiroba era usado pelos índios Mundurukús como ingrediente na mumificação das cabeças dos inimigos que serviam de troféus de guerra. Hoje, o óleo é usado principalmente como linimento contra pancadas e anti-inflamatório contra dores de garganta. Pode ser usado também como matéria-prima para produção de repelente a insetos. Estima-se que o Brasil consome cerca de 30 mil litros de óleo por ano. A exportação anual é de 450 mil litros de óleo, em média. O óleo exportado atinge preço entre cinco e sete dólares o quilo. Em vários países são encontrados produtos cosméticos à base de óleo de andiroba como cremes para o corpo e hidratantes (DELDUQUE, 1999).

Uma das espécies mais conhecidas da Amazônia é a andiroba que apresenta múltiplos usos. Sua madeira é de alta qualidade, resistente ao ataque de cupins e hoje substitui outras espécies extremamente valorizadas, mas em via de rarefação em virtude de super-exploração, como o mogno (*swietenia macrophylla*) e os cedros (*Cedrela odorata* e *C. fissilis*). A sua casca possui propriedades medicinais e o óleo extraído de sua sementes, um dos mais vendidos na Amazônia, é muito procurado para uso medicinal e cosmético. A exploração extrativista do óleo de certa forma preserva a árvore e assim, o risco de extinção dessa espécie é menor devido à atividade econômica que representa na Amazônia (MELLINGER, 2006; CARRUYO, 1972; SHANLEY ET AL, 1998; SAMPAIO, 2000; SILVA, 2002).

Existem dois tipos de madeira de andiroba que estão relacionadas com o hábito de ocorrência da espécie e não com a espécie propriamente dita. A madeira vermelha

vem da terra firme e é de melhor qualidade que a madeira branca que vem de áreas alagadas. As características gerais da madeira são: cerne castanho-escuro com brilho notável, distinto do alburno que é castanho-pálido; grã regular proporcionando boa trabalhabilidade, textura média um pouco grosseira, cheiro indistinto, resistente ao ataque de cupins, mas não resistente à umidade (EMBRAPA AMAZÔNIA ORIENTAL, 2004). A árvore apresenta boas características ornamentais, podendo ser usada com sucesso no paisagismo, principalmente de parques e grandes jardins. Apresenta bom desenvolvimento na região Centro-Sul, principalmente na costa atlântica. É indicada para plantios em áreas degradadas de várzeas úmidas na região norte do país (LORENZI, 1992).

No Brasil, a espécie Genipa Americana conhecida popularmente como Jenipapo, ocorre de forma natural nas regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e também na região Sul, com ocorrência apenas no extremo noroeste do Estado do Paraná. Nestas regiões, o jenipapeiro vegeta nos biomas de Floresta Amazônica, Mata Atlântica, Cerrado, Caatinga e Pantanal, preferencialmente em formações secundárias. Apresenta crescimento moderado com distribuição geográfica desde a latitude 20°N, no sul do México até a latitude 22°47' no noroeste do Estado do Paraná no Brasil (CARVALHO, 2003).

No Estado da Bahia, a ocorrência do jenipapo é ampla, sendo comum encontrá-la em várias regiões, biomas e formações florestais, com destaque para a região do Recôncavo, onde seus frutos são amplamente utilizados na forma de doce, suco, geléia e licor (SOUSA et al., 2007).

A madeira do Jenipapeiro apresenta densidade média de 0,68 g/cm<sup>3</sup>, sendo considerada moderadamente pesada, flexível, compacta, fácil de trabalhar e de longa durabilidade. Pode ser empregada na construção civil e naval, marcenaria e carpintaria em geral para a fabricação de móveis, coronha de armas de fogo, cabos de ferramentas e batentes de portas e janelas (LORENZI, 2002). A madeira do jenipapeiro é utilizada para fabricação artesanal de instrumentos de percussão como pandeiros, por sua madeira ser fácil de ser moldada e por se tratar de uma espécie de rápido crescimento.

## 2.1 – Química da madeira

Todas as espécies de madeira contêm além de celulose, hemiceluloses e lignina, quantidades variáveis de outras substâncias não estruturais, normalmente designados por materiais extrínsecos e substâncias minerais. Estas substâncias são frequentemente responsáveis por determinadas características das plantas, como por exemplo, cor, cheiro, resistência natural ao apodrecimento, sabor e propriedades abrasivas. A sua composição e quantidades relativas dependem de fatores genéticos e ecológicos, variando com a espécie, idade da planta e região de ocorrência. Concentrações relativamente altas destas substâncias são encontradas em espécies de madeiras tropicais e sub tropicais (BESSA, 2000). Portanto, é importante ressaltar que mesmo madeiras da mesma espécie não são exatamente iguais.

Na botânica, segundo a classificação de Engler para os vegetais, as árvores encontram-se na divisão das fanerógamas, plantas superiores que se subdividem em gimnospermas (apresentam sementes nuas) e angiospermas (com sementes em vasos ou frutos). As gimnospermas são árvores do grupo (ordem) das coníferas, dominam as grandes florestas do hemisfério norte, onde costumam ser chamadas de softwoods (madeiras macias). As angiospermas são consideradas mais complexas, mais organizadas, dominam as florestas brasileiras e no hemisfério norte são conhecidas como hardwood (madeiras duras) (GONZAGA, 2006).

Densidade ou massa específica aparente é um indicativo de quanto o cerne da madeira foi impregnado com resinas, óleos, cristais e outros extrativos, em sua defesa contra os xilófagos da floresta. As madeiras de mais alta densidade em geral são mais resistentes mecanicamente e à umidade (GONZAGA, 2006).

Segundo as normas do LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil Portuguesa, as madeiras podem ser classificadas como muito leve ( $q < 0,5 \text{ g/cm}^3$ ), leve ( $q$  entre 0,5 e 0,65 em  $\text{g/cm}^3$ ), medianamente pesada ( $q$  entre 0,65 e 0,80  $\text{g/cm}^3$ ), pesada ( $q$  entre 0,80 e 0,95) e muito pesada ( $q > 0,95$ ).

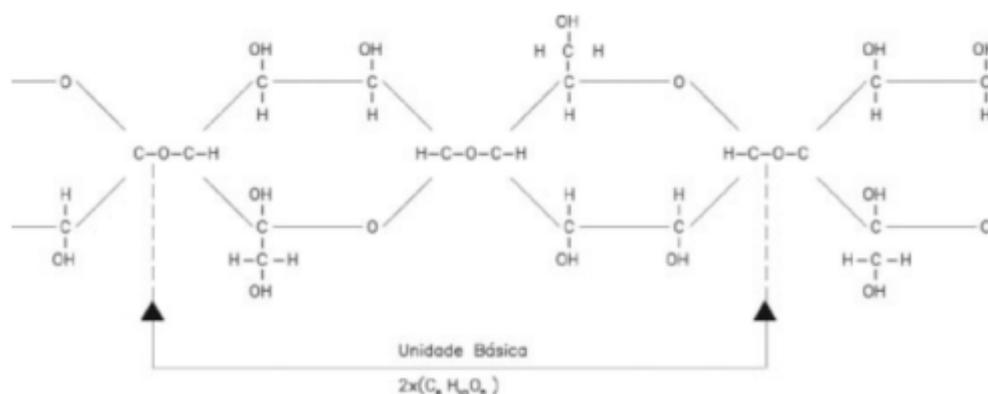
Para uso na construção do violão, utiliza-se madeiras mais densas na lateral e no fundo e as menos densas no tampo da caixa acústica. Em termos de classificação,

nesse trabalho foram analisadas as Gimnospermas Abeto e Araucária e as Angiospermas Jacarandá, Andiroba, Jenipapo e Marupá.

Destacam-se entre os elementos constitutivos da madeira a celulose, hemiceluloses e lignina.

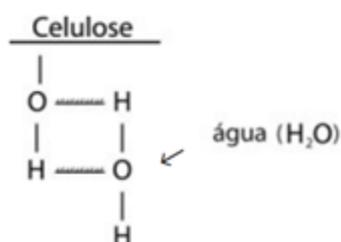
#### CELULOSE:

A celulose é um polímero constituído por centenas de glicoses (açúcares), formando cadeias muito estáveis, com a fórmula estrutural mostrada na Figura 8 (SOUZA, 1987).



**Figura 8:** Estrutura química da celulose.

As longas cadeias do polímero celulose se unem lateralmente por pontes de hidrogênio entre as hidroxilas (OH). Embora precárias, as centenas, até milhares de pontes de hidrogênio conseguem consolidar as ligações entre as cadeias de celulose. Essa ligação origina as micelas, que unidas formam fibrilas, que irão constituir as paredes dos tecidos do xilema. Além da ligação entre as celulosas, as hidroxilas (OH) podem também unir-se às moléculas de água, pelas mesmas pontes de hidrogênio como mostra a figura 9 (GONZAGA, 2006).



**Figura 9:** Molécula de água ligada à celulose.

A água que se introduz onde antes havia uma ligação de duas cadeias de celulose aumenta a micela no comprimento, o que enfraquece o tecido. Cada unidade de celulose (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>) tem três hidroxilas (OH) e poderia portanto receber três

moléculas de água (H<sub>2</sub>O). Comparando os pesos moleculares da água (3x18=54) e da celulose (162), obtém-se a porcentagem de 33% que é o máximo de água que pode ser absorvido pela celulose, é o "ponto de saturação das fibras" (PSF) (GONZAGA, 2006).

#### HEMICELULOSES:

A celulose é um polímero constituído por uma única unidade glicosídica repetida centenas de vezes. As hemiceluloses são constituídas por diversas unidades glicosídicas ligadas entre si, sendo as pentoses e as hexoses de diferentes estruturas as mais frequentes. As hemiceluloses diferem também da celulose por terem baixo grau de polimerização. As hemiceluloses não produzem fibras e não possuem regiões cristalinas, são solúveis em álcalis e sofrem forte ataque por ácidos (LEPAGE, 1989).

#### LIGNINA:

A lignina é um composto fenólico de alta densidade e exerce a função de adesivo entre os diversos tecidos da madeira, dando-lhes dureza e resistência. Corresponde a aproximadamente 25% dos tecidos do xilema (GONZAGA, 2006).

A lignina pode ser amolecida por aquecimento até a temperatura máxima de 100°C. Para o aquecimento, o melhor é usar vapor de água, que dá flexibilidade à madeira (castanheira, 1998). Na Luteria, utiliza-se ferro quente e/ou vapor de água para dobrar as laterais em formato de oito, característico da cintura do violão e também, outros instrumentos cordofones. Algumas espécies apresentam maior dificuldade em ser moldadas no formato desejado e neste trabalho, dentre as espécies analisadas no fundo e faixas laterais o Jacarandá e o Jenipapo foram moldadas com maior facilidade, não havendo necessidade de aquecimento para o compensado flexível.

#### ANATOMIA:

Segundo dados técnicos do IMPA, para a definição de grã, termo empregado para indicar a direção ou paralelismo axial dos elementos constitutivos das madeiras em relação ao eixo do tronco, foram adotados os seguintes tipos de orientação:

Grã-direita - o fendilhamento provocado ao longo do plano radial ocorre facilmente e a superfície seccionada apresenta-se no mesmo plano de corte e paralela ao eixo longitudinal.

Grã-oblíqua - o fendilhamento provocado ao longo do plano radial ocorre facilmente e a superfície seccionada apresenta uma inclinação em relação ao plano de corte inicial.

Grã-reversa - O fendilhamento provocado ao longo do plano radial não ocorre facilmente devido ao intenso entrelaçamento das fibras apresentando uma superfície irregular e com muitas farpas.

Grã-entrecruzada - O fendilhamento provocado ao longo do plano radial não ocorre facilmente e o entrelaçamento das fibras apresenta-se em feixes inclinados entre si.

Grã-ondulada - O fendilhamento provocado ao longo do plano radial ocorre facilmente e a superfície seccionada apresenta ondulações.

Nas madeiras de grã direita existe maior facilidade em acabamento final e a escolha de madeiras passa por esse critério que interfere muito no processo de construção de instrumentos musicais. Todas as madeiras usadas neste trabalho possuem classificação grã direita.

### **3 - Objetivos gerais**

Analisar as madeiras brasileiras com potencial para uso em violões de alta qualidade, comparando-as com espécies tradicionais consagradas por músicos e luthiers.

#### **3.1 - Objetivos específicos**

Realização de análise modal experimental das madeiras do tampo e do fundo da caixa acústica do violão;

Realização de análise modal numérica do abeto no formato do tampo harmônico do violão clássico.

Comparação dos resultados das análises modais com os resultados e propriedades das diferentes madeiras utilizadas neste trabalho.

## 4 - METODOLOGIA

Com o objetivo de eliminar ao máximo as variáveis existentes no complexo sistema mecânico vibracional do violão, foram investigados as madeiras do tampo harmônico e do fundo da caixa acústica do violão, sem a presença do braço e utilizando apenas uma lateral, de forma a manter o volume de ar constante dentro da caixa acústica.

Dentre as diversas variáveis existentes no conjunto da caixa acústica do violão podem ser citados o tipo da madeira, o modelo da caixa acústica, os tipos de reforço e leque, o revestimento superficial, a espessura do tampo e a umidade do material. Objetivando eliminar-se as variáveis indesejáveis nesse estudo e facilitar a análise do tipo de material utilizado, foram usadas apenas uma lateral com as travessas e reforços no formato do violão clássico do luthier Antônio Torres. A Figura 10a e 10b mostra as madeiras do tampo e fundo do violão e a lateral usada como gabarito.



Figura 10a

Figura 10b

**Figura 10a:** Lateral do violão (gabarito) e os tampos analisados; **Figura 10b:** Lateral do violão (gabarito) e fundo das madeiras analisadas.

### 4.1 - Materiais

No processo de fabricação do corpo do violão de madeira maciça, as laterais são dobradas em formato do número oito, o que requer habilidade na hora de dobrar e inserir a madeira no molde. Neste trabalho a espessura das madeiras do tampo foram de aproximadamente 2,5 mm e da lateral e do fundo foram de 2,0 mm de espessura, a largura da faixa lateral foi de 90 mm.

As amostras foram identificadas no laboratório de anatomia e identificação da madeira, foram utilizadas ferramentas dos laboratórios dos cursos de engenharia

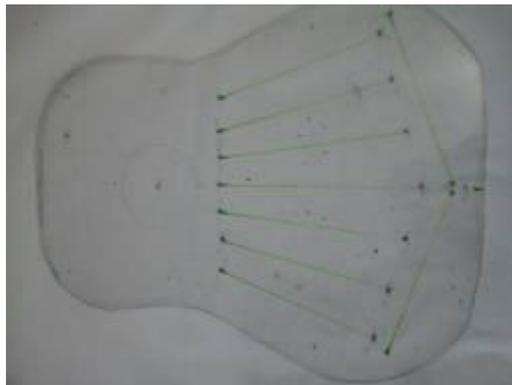
industrial da madeira e de tecnologia em construção de instrumentos musicais da UFPR. As madeiras usadas neste trabalho foram mantidas por aproximadamente 6 meses em uma câmara climática a 12% umidade constante. É importante ressaltar que a umidade do ar e sua variação na cidade de Curitiba é alta e afeta o som de instrumentos musicais.

As madeiras de jenipapo e jacarandá foram adquiridas no estado da Bahia e foram utilizadas duas árvores de cada espécie. As amostras 1 destas espécies foram doadas pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia na cidade de Cruz das Almas e as amostras 2 foram compradas no comércio de madeiras de demolição na cidade de Feira de Santana-Ba. As espécies de andiroba, cedro rosa, araucária e marupá, foram adquiridas em empresas na cidade de Curitiba-Pr. As amostras de abeto importadas foram compradas em duas lojas especializadas em instrumentos musicais na cidade de São Paulo. A Figura 11 mostra as lâminas de madeiras utilizadas neste trabalho.



**Figura 11:** Lâminas de diversas espécies com espessura de 3 mm.

Foi utilizada cola de resina alifática para na montagem da estrutura do violão e as lâminas utilizadas nesse estudo foram coladas com cola de PVA (acetato de polivinila) que facilita a troca das diferentes madeiras. Foram usadas travessas e contra faixa de cedro rosa fixa na lateral para aumentar a superfície de colagem. Neste estudo foram usados os mesmos modelos de leque harmônico padronizado por Antonio Jurado Torres (1817–1892) e foi utilizado um molde em acrílico. A Figura 12 mostra o molde de acrílico do leque harmônico:



**Figura 12:** Molde do leque harmônico.

Além da caixa acústica, neste estudo, foi utilizado um braço de cedro rosa e escala com comprimento de 65 cm e cavalete de jacarandá com furação espanhola ou furação dupla, para a montagem do violão construído com madeiras com características mais próximas à configuração ideal (tampo de abeto e fundo de jacarandá). Foi utilizado o encordoamento de nylon augustine classic/blue alta tensão.

## Metodos

### 4.2 - Umidade das madeiras

As amostras de madeiras utilizadas nesse experimento foram acondicionadas na câmara climática do laboratório de tecnologia da madeira com umidade constante de 12%. O teor de umidade das amostras de madeiras foi determinado com a estufa de secagem Heraeus de acordo com a norma Copant 460 no mês de novembro de 2014, época em que foram realizadas também as medições de excitação por impulso e análise modal. A densidade das madeiras foi realizada utilizando a balança de precisão adventurer ohaus, conforme mostram as Figuras 13a 13b e 13c.



**Figura 13a:** Estufa, **Figura 13b:** Amostras, **Figura 13c:** Balança de precisão.

### 4.3 - Técnica de Excitação por Impulso

Foram utilizados dois equipamentos para medição das propriedades da madeira por impulso. O equipamento Sonelastic foi utilizado com amostras de madeiras e o Stress Wave Timer com as madeiras em formato do violão clássico. Os resultados de velocidade de propagação da onda coincidiram nos dois equipamentos, e os demais resultados foram realizados através do Sonelastic.

#### 4.3.1 - Sonelastic:

Com o objetivo de obter as propriedades elásticas e acústicas das diferentes espécies de madeira, aplicou-se a técnica de excitação por impulso, ensaio não-destrutivo que utiliza as frequências naturais de vibração para a determinação dos módulos elásticos de amostras de geometria regular e dimensões 80 mm x 15 mm x 3 mm. Foi usado um equipamento da marca ATCP modelo Sonelastic. As amostras foram analisadas de acordo com a razão de aspecto conforme a norma ASTM E1876-09. Para cada espécie de madeira analisada foram utilizadas amostras de duas diferentes arvores. A Figura 14 mostra os pares de amostras analisadas (jacarandá, andiroba, jenipapo, marupá, abeto, araucária e compensado com e sem revestimento).

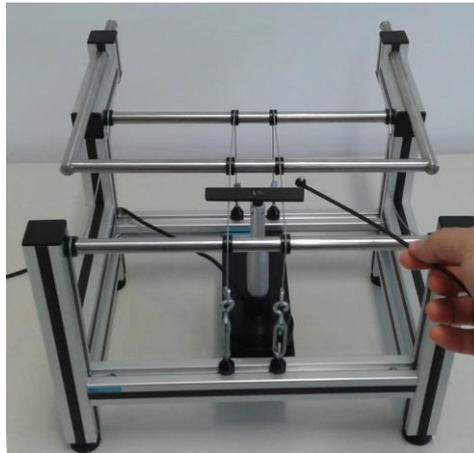


**Figura 14:** Amostras de madeiras para ensaios de excitação por impulso.

Após a medição das dimensões e da massa, as amostras foram caracterizadas pelo Sonelastic através dos modos de vibração flexional e torcional. A técnica de excitação por impulso 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 considerando a geometria, a massa, as dimensões do corpo de prova e a frequência obtida pelo equipamento.

Para a excitação dos modos de vibração desejados é necessário impor determinadas condições de contorno. Na Figura 15 esta representada a condição de contorno referente à vibração do modo flexional. As diferenças consistem no posicionamento da excitação e no posicionamento do captador acústico (microfone).



**Figura 15:** Arranjo utilizado para aplicação do modo de vibração flexional.

Após os ensaios, realizou-se o tratamento dos dados. A partir dos valores de densidade aparente e módulo de elasticidade foram obtidos os respectivos valores para a impedância sonora ( $z$ ), velocidade do som ( $v$ ), coeficiente de radiação sonora ( $R$ ) e ( $\eta$ ) amortecimento, através das equações 1, 2, 3 e 4:

$$\text{Equação 1} \quad v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

$$\text{Equação 2} \quad z = v \rho = \sqrt{E \rho}$$

$$\text{Equação 3} \quad R = \frac{v}{\rho} = \sqrt{\frac{E}{\rho^3}}$$

$$\text{Equação 4} \quad \eta = \frac{1}{Q} = \frac{\delta}{\pi} = \tan \psi$$

O desempenho acústico (volume, qualidade e timbre) depende principalmente da densidade, módulo de Young ( $E$ ) e amortecimento do material ( $\eta$ ). As principais variáveis utilizadas na seleção de materiais para instrumentos são: velocidade de

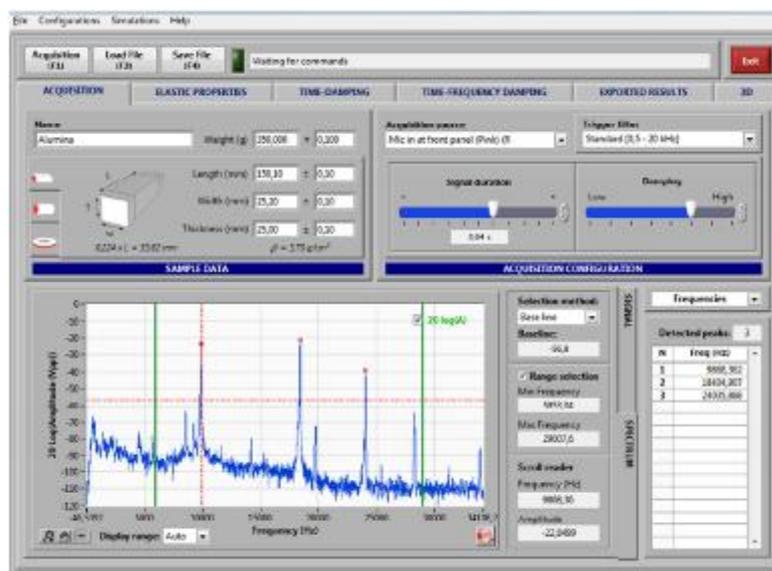
propagação do som no material ( $v$ ), Impedância ( $z$ ), coeficiente de radiação sonora ( $R$ ) e amortecimento ( $\eta$ ) (ULRIKE, WEGST, 2006).

A velocidade com que o sinal sonoro se propaga no interior do material é um importante parâmetro acústico que pode ser obtido pela expressão descrita em (1).

A impedância (2) será importante quando a energia vibracional é transmitida de um meio para outro, sendo que a partir dela é possível verificar a intensidade do som transmitido do instrumento para o ar, por exemplo.

O coeficiente de radiação sonora (3) descreve o quanto da energia vibratória é convertida em som. Caso deseje-se que o som emitido por um instrumento seja em alto volume (intensidade), é necessário que o material apresente um alto valor para este coeficiente (caso dos xilofones, por exemplo).

O amortecimento (4) caracteriza o quão rápido será o decaimento da amplitude de vibração de um corpo após sua excitação mecânica. Esta propriedade está diretamente relacionada a mecanismos internos de dissipação de energia do material como o atrito interno, por exemplo. Nas relações descritas, representa o fator de qualidade, representa o decaimento logarítmico e, por fim, representa o ângulo de perda. Com base nesse estudo obteve-se as principais características sonoras dos materiais envolvidos. O amortecimento foi calculado através da análise do decaimento do sinal a partir de uma faixa de frequência cujo centro é a frequência natural. A faixa que se adotou foi de +/- 500 Hz, ou seja, caso a frequência de ressonância tenha sido 2000 Hz, analisou-se a faixa entre 1500 Hz e 2500 Hz. A Figura 16 mostra a tela principal do programa Sonelastic.



**Figura 16.** Tela principal do Software Sonelastic

### 4.3.2 - Stress Wave timer:

O Stress Wave timer modelo 239A da marca Metriguard foi usado para medir a velocidade de propagação da onda com a utilização de um conjunto de grampos, um pêndulo e uma esfera para excitar ondas de tensão. As braçadeiras foram fixadas em uma distância de 300 mm em todas as amostras. A análise é iniciada quando a primeira onda de tensão é excitada e termina quando a onda chega ao acelerômetro. O tempo de propagação é exibido em microssegundos.

A velocidade de propagação da onda sonora em materiais pode variar de acordo com diversas propriedades. Nos polímeros e nos metais, ela varia de acordo com a proporção de elementos químicos de seus constituintes. Nas madeiras, essa propriedade varia de acordo com a espécie, o tipo de corte, teor de umidade e principalmente, pela presença de nós. A Figura 17 mostra a foto do equipamento modelo 239A da Metriguard do laboratório de tecnologia da madeira - propriedades físicas e mecânicas da engenharia industrial da madeira usado na verificação da presença de nós e partes ocas em madeira.



**Figura 17:** Stress Wave Timer do laboratório de tecnologia e utilização de produtos florestais.

As Figura 18a e 18b, mostra a medição da velocidade de propagação da onda no sentido paralelo e perpendicular às fibras das madeiras:



Figura 18a



Figura 18b

**Figura 18a:** Esquema para medição da velocidade de propagação da onda no sentido paralelo; **Figura 18b:** no sentido perpendicular às fibras da madeira.

#### 4.4 – Análise química e morfológica

Foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV) marca TESCAN VEGA3 LMU, do centro de microscopia da UFPR. Este equipamento tem resolução de 3 nm e permite magnificações de até 300kX, com pressão controlada entre 3 a 500 Pa e o equipamento possui um sistema de análise química tipo EDS (OXIFORD) com software AZ Tech (Advanced) com detetor tipo SDD de 80 mm<sup>2</sup>. A Figura 19 mostra a forma como as amostras de madeira foram colocadas no porta amostras do MEV, os resultados da microscopia encontram-se no apêndice.



**Figura 19:** Amostras de madeira em análise de MEV com EDS no centro de microscopia da UFPR.

O EDS mostrou elementos químicos presentes nas diferentes madeiras. Não foi possível realizar a análise química das madeiras em relação ao teor de celulose, lignina, hemicelulose e extrativos e apesar de ter sido feita uma tentativa para a caracterização das diferentes madeiras através da técnica de RAMAM, o resultado não foi satisfatório porque ocorreu fluorescência nas amostras.

#### 4.5- Análise modal:

A análise modal fornece um conjunto de parâmetros que caracterizam o modo do comportamento dinâmico de uma estrutura. Nas últimas décadas a análise modal se tornou uma tecnologia – para ajudar na determinação, desenvolvimento e otimização de características dinâmicas de estruturas em engenharia. Aplicações em

estruturas de edificações, estruturas espaciais, de transportes além da engenharia mecânica e aeronáutica são alguns exemplos da sua utilização.

A Análise modal é o processo de determinar as características dinâmicas de um sistema na forma de frequências naturais, fatores de amortecimento e modos de vibração naturais. Com essas informações, pode-se formular um modelo matemático para o seu comportamento dinâmico. O modelo matemático formulado é chamado de modelo modal do sistema e as informações para as características são conhecidas como parâmetros modais.

A análise modal é baseada no fato que a resposta (vibração) de um sistema linear invariante no tempo, pode ser expresso como uma combinação linear de um conjunto de movimentos harmônicos simples chamados modos naturais de vibração. Os modos de vibração são inerentes a um sistema dinâmico e são determinados completamente por suas propriedades físicas (massa, rigidez, amortecimento) e correspondentes a suas distribuições espaciais. Cada modo é descrito em termos de seus parâmetros modais: frequência natural, fator de amortecimento modal e forma modal. Cada modo corresponde a uma frequência natural. O grau de participação de cada modo na vibração total é determinado pelas propriedades de excitação e pela forma modal do sistema (LMS, 2014).

Análise modal inclui tanto as técnicas experimentais quanto numéricas. Essa técnica experimental utilizada para derivar o modulo modal de um sistema linear vibratório invariável no tempo. A base teórica desta técnica é denominada e estabelece a relação entre a resposta vibratória em uma localização e a excitação. Esta relação, que é uma função matemática complexa e é conhecida como função resposta em frequência (FRF). Combinações de excitações e respostas em diferentes localizações levam a um conjunto complexo de (FRFs) que podem ser coletivamente representadas por uma matriz FRF do sistema. A matriz é usualmente simétrica, refletindo a reciprocidade estrutural do sistema.

A prática do teste modal consiste em medir as FRFs ou respostas impulsivas da estrutura. A medição da FRF pode ser feita simplesmente medindo-se a excitação em um local da estrutura na ausência de outras excitações e medir a resposta (vibração) em um ou mais locais.

A excitação pode ser feita em uma banda de frequência, senoidal, transiente, aleatória ou ruído branco. É usualmente medida por um transdutor de força no ponto

de excitação onde a resposta é medida por um acelerômetro. Ambos os sinais entram no analisador que computa as FRFs.

A análise modal é obtida através da Função Resposta em Frequência - FRF, aplicando a transformada discreta de Fourier no sinal de resposta, com o objetivo de observar as características de um sinal em um determinado domínio, ou modificando o domínio, que nesse caso pode ser no domínio do tempo ou da frequência. O método de elementos finitos MEF, é aplicado de forma delimitada ou discretizada, em intervalo definido ou condições de contorno.

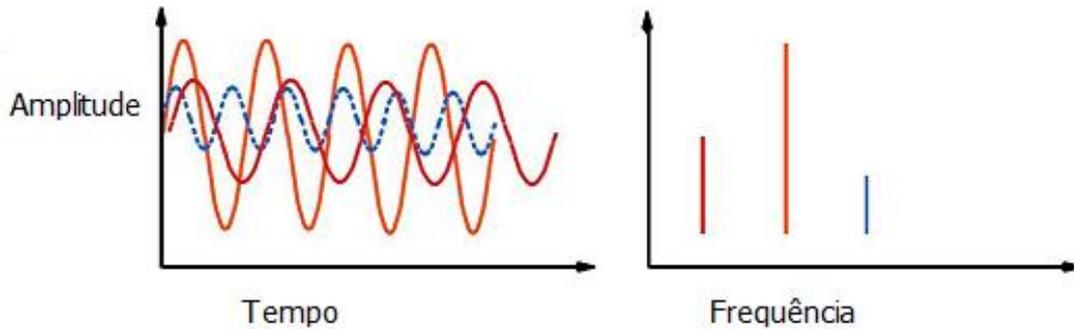
A madeira é um material anisotrópico, que apresenta propriedades mecânicas independentes nos três eixos: Longitudinal, radial e tangencial. O violão por se tratar de um sistema mecânico vibracional que produz sons através de cordas tensionadas, pode ser considerado um sistema complexo e com inúmeras variáveis que podem alterar a qualidade do seu desempenho. Para a análise modal numérica a madeira foi considerada como material ortotrópico.

Para fins de modelagem, considera-se que o tampo, o fundo, as faixas laterais e o leque harmônico (conjunto de fixadores e reforçadores) constituem o modelo estrutural. O ar contido na cavidade e a abertura da boca formam o modelo acústico (ressonador de Helmholtz); e o acoplamento dos modelos estrutural e acústico forma o modelo vibroacústico da caixa de ressonância da viola (Paiva, 2013).

A solução de um problema na mecânica dos sólidos baseia-se em princípios fundamentais os quais governam a mecânica clássica, ou seja, conservação de massa, conservação de momento, conservação de energia e nas leis da irreversibilidade termodinâmica (DESAI, 1984). Nesse estudo há de ser considerado a anatomia dos materiais analisados, sendo que foram feitas normalizações para eliminar o maior número possível de variáveis construtivas do instrumento, ficando as propriedades da madeira (parênquima, composição química, densidade) um fator diferenciador das respostas à excitação exercida no conjunto estudado.

A análise modal utiliza a transformada de Fourier e faz a conversão de um sinal de tempo para o domínio da frequência, é alcançado utilizando o algoritmo FFT e a equação DFT através do programa LMS. As formas de onda reais podem ser constituídas de um número de ondas senoidais de certas amplitudes e frequências. Ver estas ondas no domínio da frequência em vez do domínio de tempo pode ser útil na medida em que todos os componentes são mais facilmente revelados. Cada onda senoidal no domínio do tempo é representada por uma linha espectral no domínio da

frequência. A série de linhas que descrevem uma forma de onda é conhecido como o seu espectro de frequências conforme mostra a Figura 20 (LMS, 2014).



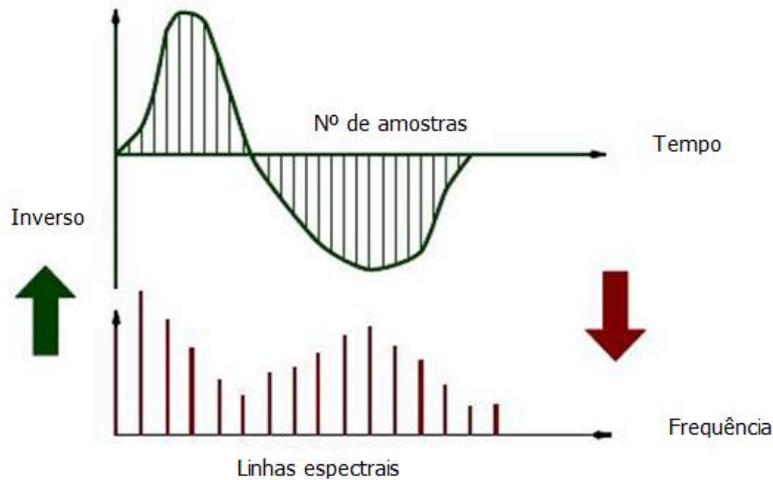
**Figura 20:** Representação gráfica no domínio do tempo e da frequência (LMS, 2014).

Através da análise de Fourier, pode-se identificar os harmônicos presentes numa onda sonora e a partir daí comparar sons e identificar padrões desejáveis ou não, de qualquer fonte sonora. Utilizando programas com as ferramentas de método de análise finita, análise modal e transformada de Fourier é possível obter o comportamento vibracional de uma material e um espectro de uma onda sonora e assim analisar as suas características. A conversão de um sinal de tempo para o domínio da frequência é realizado utilizando a transformada de Fourier como mostra a equação 5.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt$$

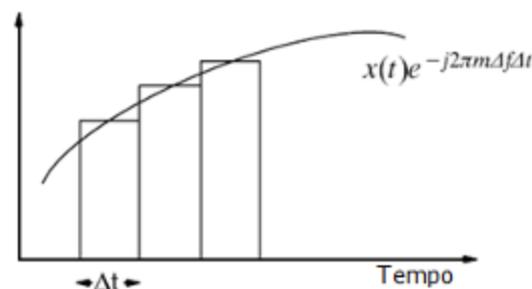
**Equação 5:** Transformada de Fourier

Na análise da onda sonora, a transformada de Fourier decompõe essa onda, em onda fundamental e harmônicos e assim pode-se analisar e comparar a identidade do som. A Transformada Rápida de Fourier é o algoritmo mais utilizado em aplicações na engenharia. Assim, determina o espectro em Hz de um sinal de tempo amostrado e discreto. O espectro resultante também é discreto. O procedimento inverso é obtido com uma FFT inversa conforme mostra a Figura 21.



**Figura 21:** Amostra do sinal no domínio do tempo e as respectivas linhas espectrais.

A discretização de  $h(t)$  ou  $h(w)$  consiste em multiplicar estas funções por uma função do tipo pente de pulsos ou delta de Dirac, um recurso matemático utilizado na descrição mecânica. Para ocorrer a discretização aplica-se operação linear conhecida como convolução que pode ser entendida como cálculo de valores em pontos discretos, realizando uma integração numérica, conforme mostra a Figura 22.



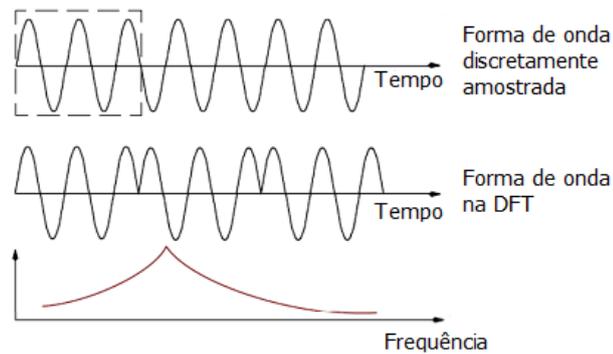
**Figura 22:** DFT: Onda sonora discretizada.

Quando se discretiza a forma de onda, esta é amostrada em intervalos discretos e no tempo de observação finita, isto dá origem erros de amostragem sendo os dois principais o (liker) que pode ser minimizado com a utilização de exponencial complexa e (aliasing) que pode ser minimizado utilizando o teorema de Nyquist. Este problema pode ser superado por implementar o que é conhecido como o critério de Nyquist, que determina que a frequência de amostragem ( $F_a$ ) deve ser maior que o dobro da maior frequência de interesse ( $F_i$ ).

$$F_a \geq 2 F_i$$

Outro problema associado com a amostragem dos dados em tempo discreto é o de vazamento (Uma vez que os sinais são medidos ao longo de um período de

amostragem  $T$ , a DFT assume que este é representante de todos os tempos. Quando a onda senoidal não é periódica em janela de tempo da amostragem, o resultado é uma consequente fuga de energia da linha espectral original, devido às descontinuidades nas bordas. É um dos mais graves problemas associados ao processamento de sinal digital. O vazamento pode ser reduzido aumentando a resolução de frequência, ou através da utilização de janelas, como mostra a Figura 23.



**Figura 23:** Forma de onda discretizada em janelas.

Foi escolhida uma banda de frequência analisada no intervalo de 70 Hz a 700 Hz, na análise modal experimental e numérica por considerar-se essa uma faixa que abrange o violão e outros instrumentos que podem ser construídos com base nesse estudo. A Figura 24 mostra que a escala do violão clássico vai de aproximadamente 82 Hz a 660 Hz.

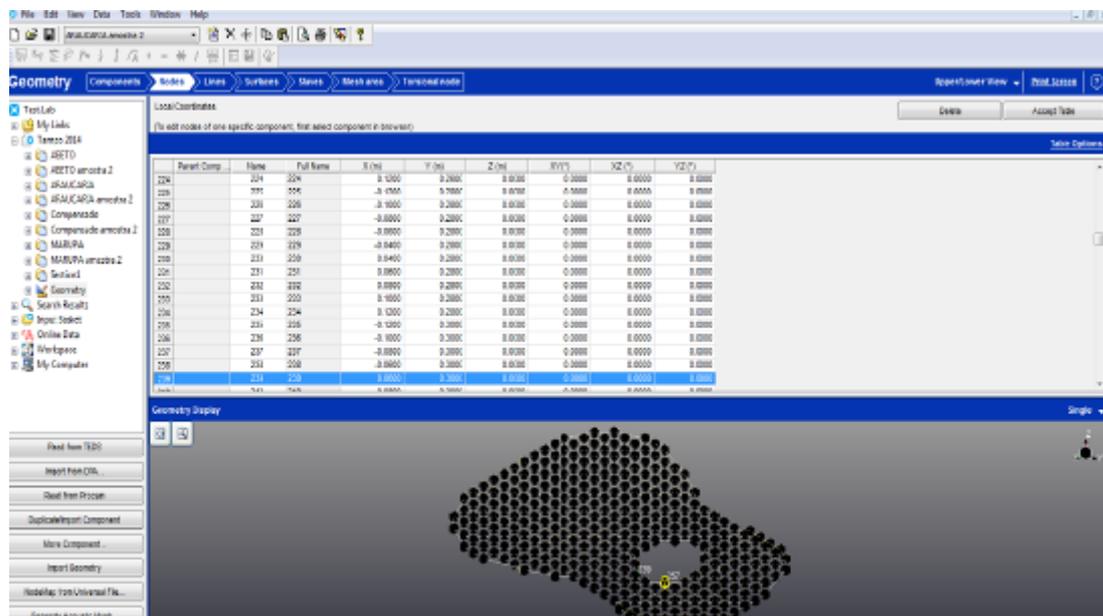
12ª casa		Trastes		Casas		5ª casa		1ª casa		cordas soltas		
164,81	155,5	146,8	138,6	130,8	123,4	116,5	110	103,8	98	92,5	87,3	82,4 Hz 6
220	207,6	196	185	174,6	164,81	155,5	146,8	138,6	130,8	123,4	116,5	110 Hz 5
293,6	277,1	261,6	247	233	220	207,6	196	185	174,6	164,81	155,5	146,8 Hz 4
392	370	349,22	329,6	311,1	293,6	277,1	261,6	247	233	220	207,6	196 Hz 3
493,8	466,1	440	415,3	392	370	349,22	329,6	311,1	293,6	277,1	261,6	247 Hz 2
659,2	622,2	587,3	554,3	523,2	493,8	466,1	440	415,3	392	370	349,22	329,6 Hz 1

**Figura 24:** Frequências da escala do violão clássico.

## LMS Test.Lab

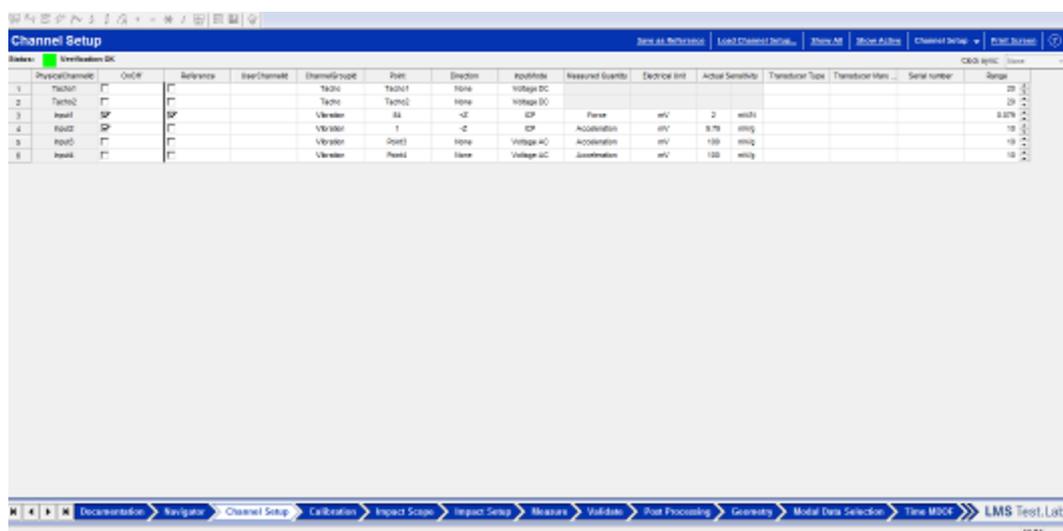
Para realizar a análise modal experimental nas madeiras estudadas e do compensado, ambas no formato do tampo harmônico e da caixa acústica do violão clássico o programa Test.Lab da LMS foi utilizado, na interface Impact test na versão 13.1 para conectar e calibrar o excitador (martelo de impacto) e o receptor (acelerômetro). Primeiramente foi construída uma malha estrutural no formato do

tampo harmônico e do fundo da caixa acústica do violão clássico, como mostra a Figura 25.



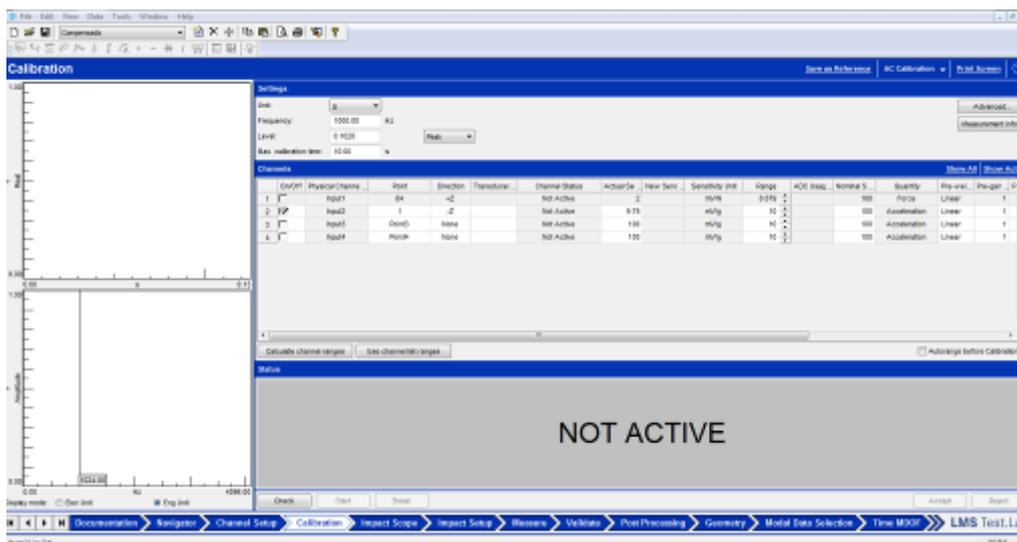
**Figura 25:** Malha estrutural no Test.Lab do violão clássico.

Posteriormente foi configurado na entrada 1 o Martelo de impacto com sensibilidade 2 mV/N e na entrada 2 o acelerômetro com sensibilidade de 9,79 mV/g, conforme norma do fabricante Brüel & Kjær, como mostra a figura 26.



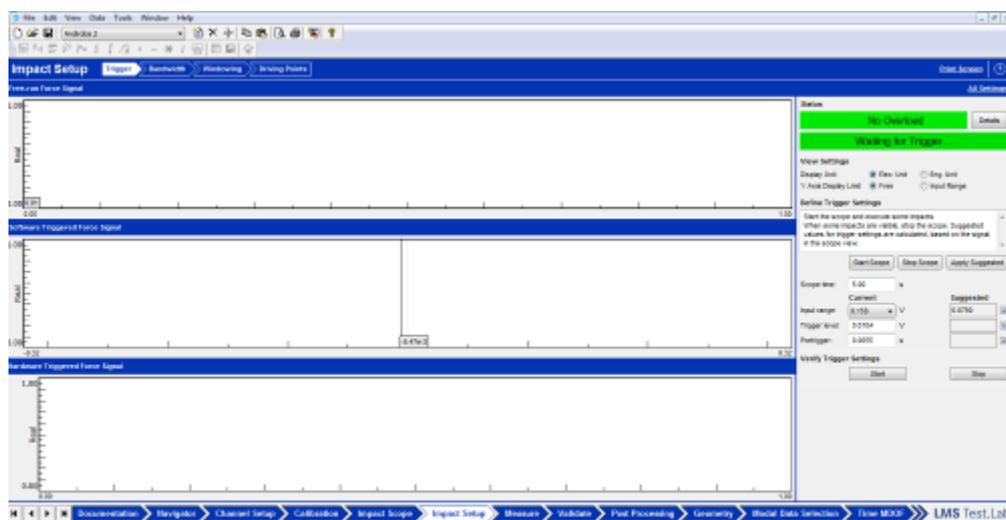
**Figura 26:** Configuração dos canais de entrada e saída do test.lab

A calibração é solicitada para definir a direção da força que será executada durante as medições, foi definida a direções +z e -z como mostra a figura 27.



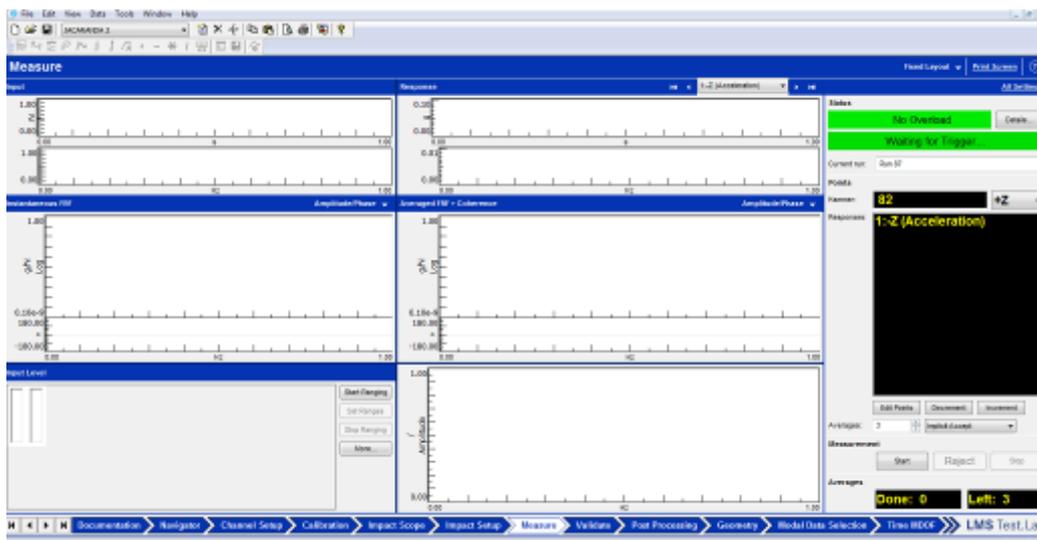
**Figura 27:** Calibração de sinal no Test.Lab.

A configuração de alcance da sensibilidade do sistema no material analisado é sugerida pelo programa que solicita o teste de impacto e calcula o Trigger. Assim foram aplicados os valores sugeridos pelo canal impact setup, toda vez que o sistema foi montado, nas medições das espécies do tempo e do fundo para não haver overload como mostra a Figura 28.



**Figura 28:** Calibração da força

As medições foram realizadas no Laboratório de Vibrações e Ruído (LVR) da UFPR – DEMEC, para cada ponto da malha foram feitas 3 medidas ou marteladas, como mostra a Figura 29.



**Figura 29:** Tela de medições experimentais no Test.Lab

Em formato cartesiano e com padrões de distanciamento geometricamente correspondentes com a malha estrutural do LMS Test.Lab, a Figura 30, mostra o tempo harmônico da caixa acústica sendo excitada pelo martelo durante a análise modal experimental:

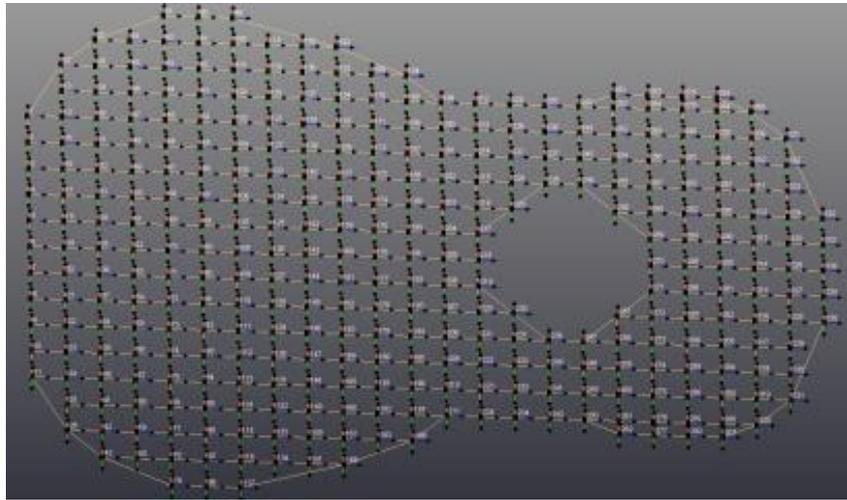


**Figura 30:** caixa acústica sendo excitada pelo martelo durante a análise modal experimental

## Malha acústica

Foram realizadas medições em uma malha estrutural com distanciamento de 20 mm entre os pontos de medição na análise vibracional, totalizando 336 pontos na malha acústica do tampo harmônico e 352 pontos na malha acústica do fundo da caixa acústica. Foram obtidos sinais de vibração devido a uma força conhecida. Estes sinais são utilizados para obter as FRFs, e posteriormente os modos naturais, frequências naturais e amortecimento para cada frequência do conjunto de madeiras nos instrumento pesquisados.

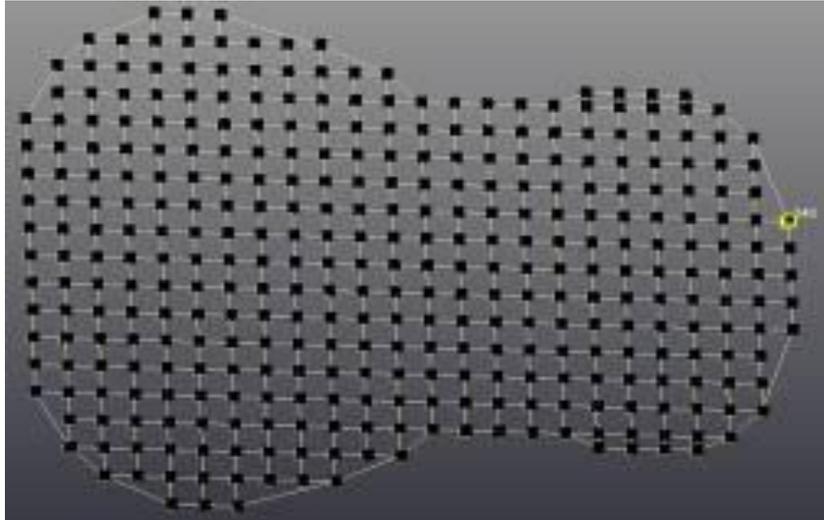
Foi criada uma malha acústica utilizando coordenadas geográficas para a análise modal do tampo e do fundo no programa LMS, afim de observar o comportamento dos diferentes materiais utilizados, conforme Figuras 31: a, b, c.



**Figura 31a:** Malha estrutural do tampo harmônico - LMS



**Figura 31b:** Malha do tampo em acrílico (molde)



**Figura 31c:** Malha estrutural do fundo das caixa - LMS

Foi criada através de coordenadas geográficas com espaçamento de 20 mm e posteriormente com espaçamento de 40 mm, uma malha estrutural para o tampo e para o fundo da caixa acústica utilizando como modelo o violão clássico de Antonio Torres.

### **Excitador (martelo) e Acelerômetro**

A Figura 32 mostra o acelerômetro e o martelo utilizado. Após testes realizados com as ponteiros de metal e de borracha foi escolhido a ponteira de nylon para excitar as amostras nas frequências no intervalo de 70 Hz a 700 Hz.

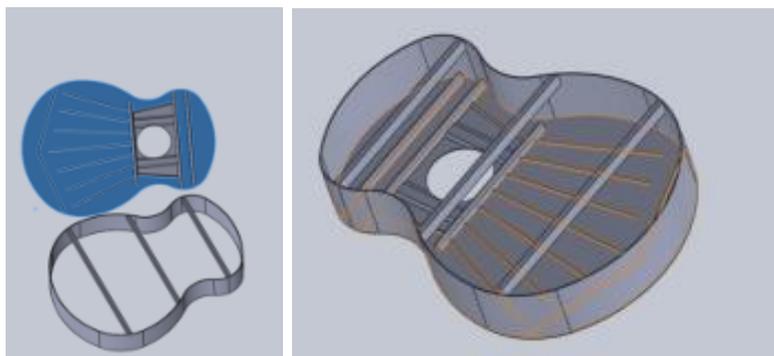


**Figura 32:** Martelo ponteiros e acelerômetro

O anexo 1 consta as especificações do acelerômetro utilizado.

### LMS Virtua.Lab

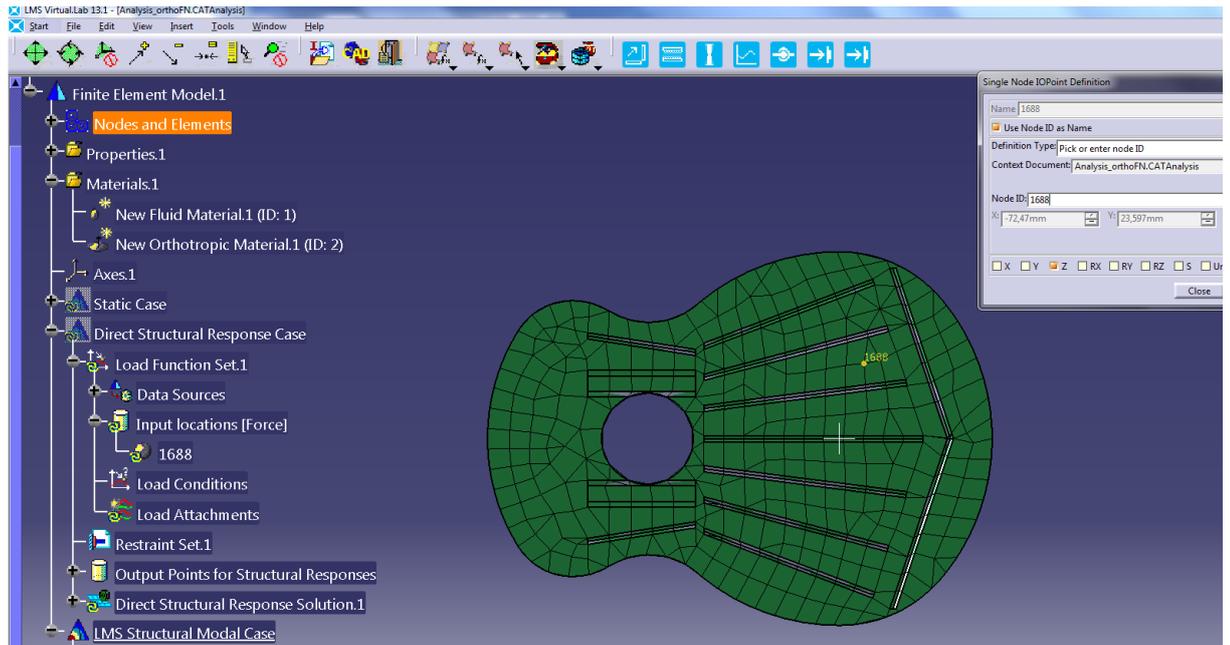
Foi utilizada a planta da caixa acústica do violão clássico do luthier Antonio Torres, disponibilizada pelo curso de tecnologia em construção de instrumentos musicais da UFPR, para criar o desenho primeiramente no Solidworks. Após a definição de simular somente o tampo harmônico da caixa acústica, o desenho foi importado para a plataforma LMS como mostra a Figura 33.



**Figura 33:** Tampo harmônico no solidworks da caixa acústica do violão Torres.

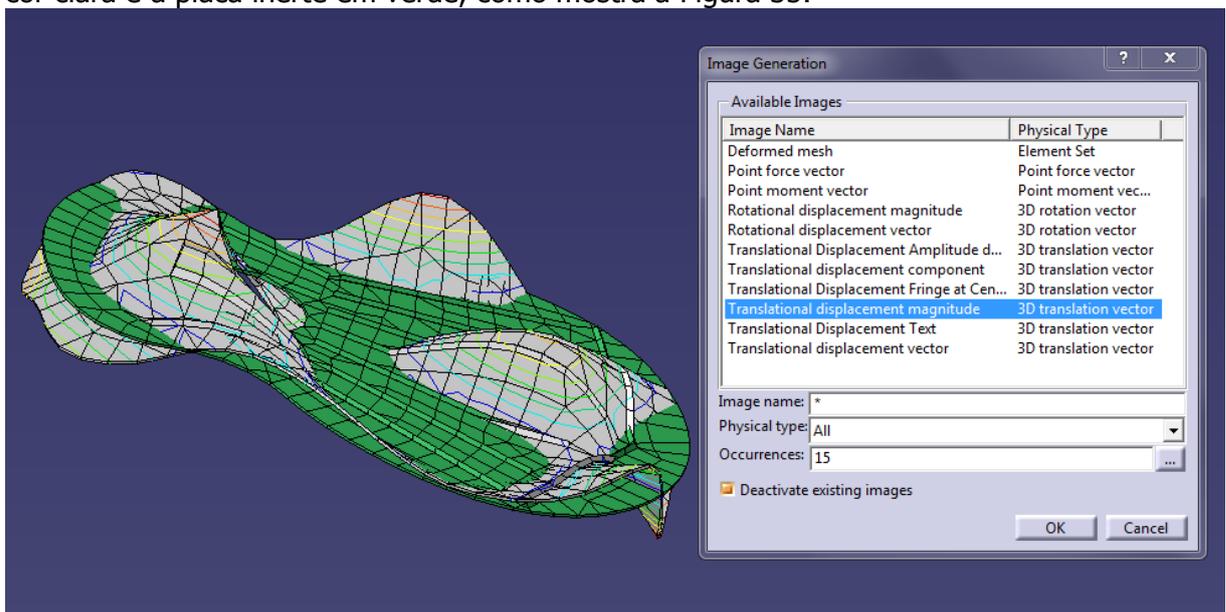
O primeiro passo é criar a malha estrutural, definindo um espaçamento de 20 mm, sendo que posteriormente essa malha foi copiada para a criação de uma malha acústica. No programa LMS Virtual.Lab pode-se escolher entre isotrópico e ortotrópico e dados como densidade do material, coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade são requeridos. Foram utilizados os dados do Abeto. Foram solicitadas as propriedades do fluido como, densidade e velocidade do som no ar, respectivamente  $1,292 \text{ kg/m}^3$  e  $340 \text{ m/s}$ , em seguida pode ser definida a forma de casca do material e a espessura da placa em 2 mm.

O programa solicita um ponto de excitação e este foi escolhido no meio da placa, local próximo onde são presas as cordas no cavalete. Nesse momento pode ser definido a direção da força na direção: Z, o intervalo de frequência de 70 Hz a 700 Hz. Foi definida também a malha estrutural 2D, e a forma de vibração (magnitude) que a força iria causar na malha, como mostra a Figura 34.



**Figura 34:** Malha estrutural e força excitadora no LMS Virtual.Lab

O modo de amostragem das imagens magnitude, mostra a malha em deformação na cor clara e a placa inerte em verde, como mostra a Figura 35.



**Figura 35:** Malha estrutural em deformação no formato magnitude no LMS Virtual.Lab.

O anexo 3 mostra a abordagem de elementos finitos para análise modal experimental.

## **5 - Resultados e discussão**

### **5.1 Análise da madeira no tampo da caixa acústica do violão**

Neste item foi avaliado o tampo de violões confeccionados com madeiras de marupá, araucária, abeto e compensado. São apresentadas características das madeiras tais como a identificação por EDS de elementos químicos presentes, densidade, teor de umidade e morfologia das madeiras vistas através de microscopia óptica. Resultados quanto à velocidade de propagação da onda (sentido paralelo e perpendicular às fibras da madeira), módulo de elasticidade, módulo de cisalhamento, amortecimento, coeficiente de irradiação sonora, impedância sonora, análise modal para amostras de mesma espessura ou mesmo peso foram também avaliados para as três madeiras. Para cada característica ou teste realizado, foi feita uma comparação com o abeto, madeira considerada ideal para o tampo do violão. Desta forma, após a análise desses resultados, poderá ser afirmado qual madeira, o marupá ou a araucária é mais parecida com o abeto no que diz respeito ao som do instrumento. No entanto, há dois aspectos a serem considerados:

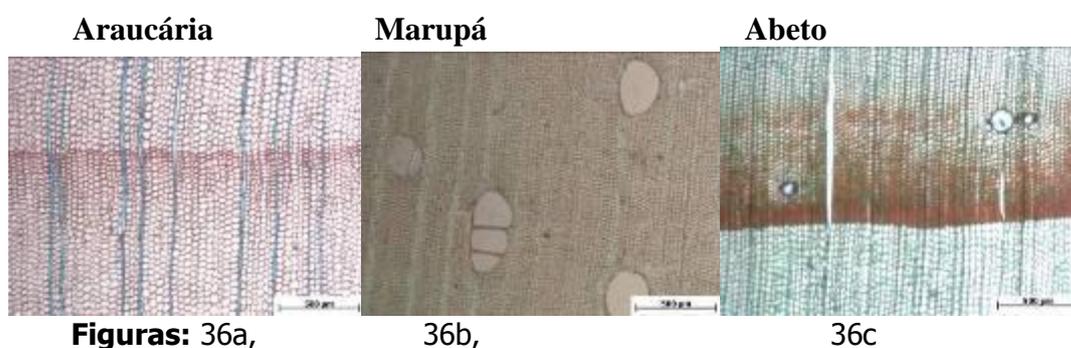
1 – Como o estudo foi realizado apenas com o marupá e com a araucária, não se pode afirmar se alguma outra madeira é mais parecida com o abeto e portanto, teoricamente, poderia representar a substituição ideal.

2 – Há um componente subjetivo muito importante a ser considerado neste estudo que é a identificação de um bom violão. Músicos e luthiers podem identificar um instrumento de boa qualidade independentemente de terem conhecimento sobre o comportamento das madeiras nos testes realizados neste estudo ou de conhecer suas propriedades. No entanto, talvez possa ser feita uma abordagem onde diferentes pesos possam ser dados às diferentes análises realizadas, dependendo de sua importância para o som do violão, segundo músicos e luthiers. Desta forma, não somente teoricamente poderia-se agradar a usuários com diferentes gostos, por exemplo, músicos que preferem instrumentos mais estridentes ou com som mais suave mas também, poderiam ser sugeridas outras análises que ao ver de musicistas ou luthiers seriam importantes para uma avaliação mais completa do considerado um violão de alta qualidade. Violões “sob medida” poderiam ser construídos a partir do uso da equação contendo o somatório de cada análise ou propriedade, considerando o peso daquele fator para a obtenção de um bom violão. No entanto, neste trabalho este

somatório não foi realizado e apenas uma comparação do desempenho das diferentes madeiras alternativas com o abeto foi realizada.

Durante muitas gerações a seleção de madeiras para utilização em instrumentos musicais era feita segundo o método de tentativa e erro. Hoje, pode-se usar uma abordagem mais científica na escolha de espécies de madeiras mais apropriadas para diferentes instrumentos musicais. O desempenho acústico (volume, qualidade e timbre) de instrumentos musicais depende principalmente da densidade, módulo de Young e amortecimento do material. As principais variáveis utilizadas na seleção de materiais para instrumentos são: velocidade de propagação do som no material, impedância, coeficiente de radiação sonora e amortecimento (WEGST, 2006).

As Figuras 36a, 36b e 36c mostram imagens de microscopia óptica das espécies analisadas numa seção transversal, com aumento de 50 vezes.



As Figuras 36a, 36b e 36c, apresentam imagens de microscopia óptica respectivamente das espécies araucária, marupá e abeto. O abeto e a araucária são árvores de clima temperado enquanto o marupá é uma espécie de clima tropical. O marupá apresenta porosidade difusa e é uma árvore considerada folhosa. A araucária e o abeto são consideradas espécies florestais resinosas e possuem a presença de canal resinífero. A Araucária é uma madeira que possui traqueóides longitudinais caracterizados pelo lenho tardio e lenho primaveril. O lenho tardio apresenta células mais espessas delimitando o anel de crescimento. O marupá é uma espécie que possui grã direita e textura fina e vasos solitários, duplos e triplos. O marupá apresenta raios estreitos e numerosos, mas ao contrário do abeto e da araucária, apresenta camada de crescimento indistinta. O abeto é uma madeira que apresenta traqueóides longitudinais caracterizados pelo lenho tardio e lenho primaveril. O lenho tardio apresenta células mais espessas delimitando o anel de crescimento e canais resiníferos axiais, pouco numerosos. Pode ser observado que a araucária apresenta porosidade mais homogênea e assim, é uma madeira de maior densidade, como mostra a tabela 4. A Tabela 4 mostra também a umidade de amostras de abeto, araucária e marupá.

Pode ser observado que o marupá apresenta teor de umidade mais próximo ao do abeto do que a araucária e que a densidade do marupá também é mais próxima à do abeto.

<b>Espécies</b>	<b>Massa específica</b> <b>g/cm<sup>3</sup></b>	<b>Umidade</b> <b>(%)</b>
<b>ABETO 1</b>	<b>0,43</b>	<b>14,423</b>
<b>ABETO 2</b>	<b>0,425</b>	<b>14,474</b>
<b>ARAUCÁRIA 1</b>	<b>0,559</b>	<b>14,491</b>
<b>ARAUCÁRIA 2</b>	<b>0,635</b>	<b>14,65</b>
<b>MARUPÁ 1</b>	<b>0,483</b>	<b>13,313</b>
<b>MARUPÁ 2</b>	<b>0,482</b>	<b>14,42</b>

**Tabela 4:** Umidade e densidade das espécies de madeira do tempo

### **Análise química**

A Tabela 5 mostra os elementos químicos obtidos por EDS de amostras de abeto, marupá e araucária. A análise química em relação ao teor de celulose, hemicelulose, lignina e teor de extrativos não foi realizada e o teor de carbono e oxigênio obtido no EDS não é relevante. No entanto, pode ser verificado que o teor de potássio e cálcio do abeto foi de 0,02% p/p e 0,03% p/p nas amostras das duas diferentes árvores analisadas e que o teor desses elementos na araucária e no marupá é bem maior. Além disso, o abeto não apresenta silício, enxofre, cloro ou ferro em sua composição como é o caso da araucária, embora o silício tenha sido encontrado em uma das amostras, o que pode sugerir que houve uma contaminação com areia, por exemplo. Amostras de marupá apresentaram também baixos teores de enxofre, cloro e ferro.

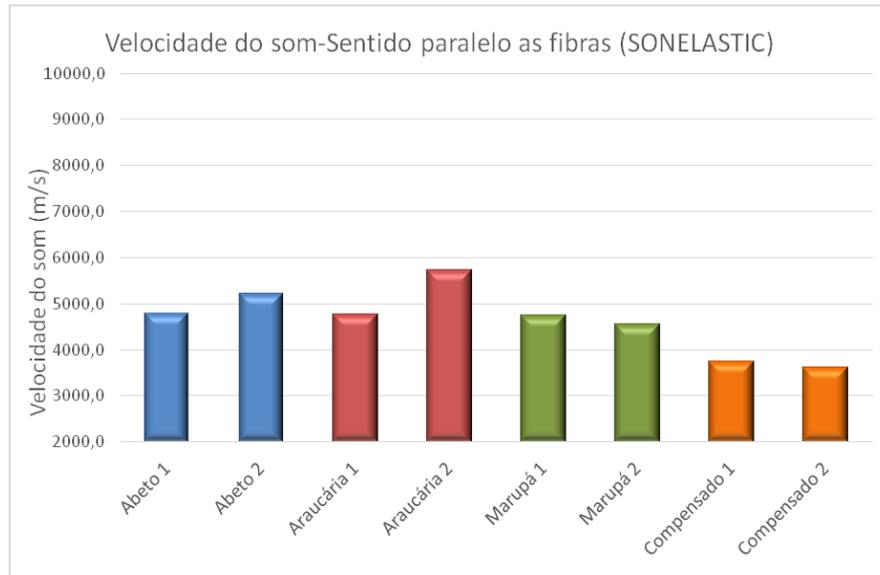
ABETO 1	Elementos	C	O	K	Ca	Total				
	% p/p	57.91	41.96	0.04	0.08	100.00				
	%Atômica	64.74	35.21	0.02	0.03	100.00				
ABETO 2	Elementos	C	O	K	Ca	Total				
	% p/p	58.52	41.33	0.06	0.09	100.00				
	%Atômica	65.32	34.63	0.02	0.03	100.00				
ARAUCÁRIA 1	Elementos	C	O	Si	S	Cl	K	Ca	Fe	Total
	% p/p	58.85	40.81	0.03	0.02	0.08	0.11	0.05	0.04	100.00
	%Atômica	65.69	34.20	0.01	0.01	0.03	0.04	0.02	0.01	100.00
ARAUCÁRIA 2	Elementos	C	O	S	Cl	K	Ca	Fe	Total	
	% p/p	59.42	40.16	0.01	0.04	0.27	0.08	0.01	100.00	
	%Atômica	66.25	33.61	0.00	0.02	0.09	0.03	0.00	100.00	
MARUPÁ 1	Elementos	C	O	S	Cl	K	Ca	Total		
	% p/p	59.15	40.53	0.02	0.07	0.16	0.08	100.00		
	%Atômica	65.96	33.93	0.01	0.02	0.06	0.03	100.00		
MARUPÁ 2	Elementos	C	O	S	Cl	K	Ca	Fe	Total	
	% p/p	58.55	41.18	0.02	0.01	0.08	0.15	0.01	100.00	
	%Atômica	65.39	34.52	0.01	0.00	0.03	0.05	0.00	100.00	

**Tabela 5** – Teor de elementos químicos encontrados em amostras de abeto, araucária e marupá.

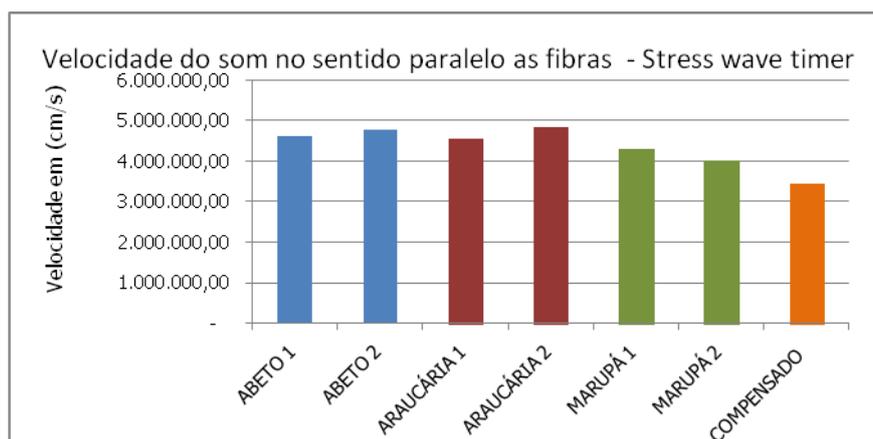
### Técnica de excitação por impulso

Os Gráficos de barras 1 e 2 mostram os resultados dos testes de velocidade de propagação em amostras de abeto, marupá, araucária e compensado no sentido paralelo às fibras das madeiras. O Gráfico de barras 3 mostra os mesmos resultados no sentido perpendicular às fibras. Pode ser observado que o marupá tem comportamento mais parecido ao do abeto em todos os testes.

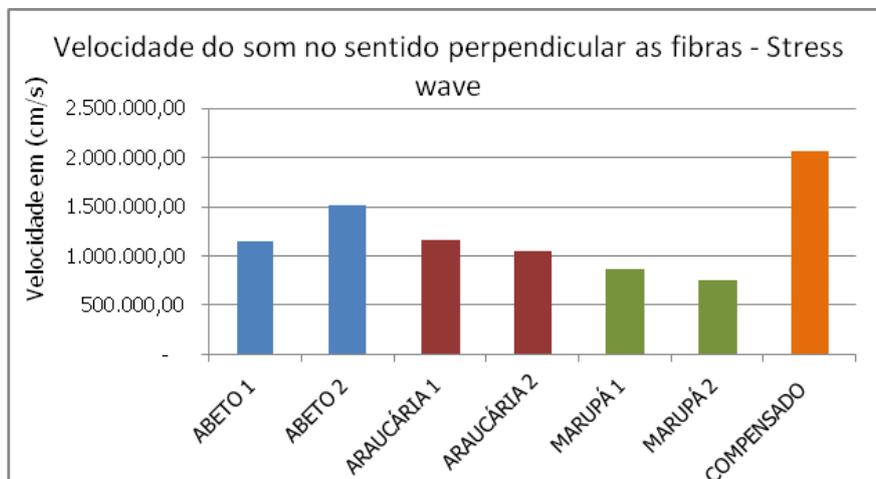
As análises foram realizadas com a utilização do equipamento Sonelastic (gráfico 1) e com o equipamento Stress Wave Timer (gráfico 2 e 3). Como o resultado foi o mesmo na comparação do teste feito no sentido paralelo, a partir daqui os testes de módulos elásticos e cisalhamento (gráficos 4 e 5), amortecimento (gráfico 6), impedância sonora (gráfico 7) e coeficiente de irradiação sonora (gráfico 8), foram realizados no equipamento Sonelastic.



**Gráfico 1:** velocidade do som no sentido paralelo as fibras

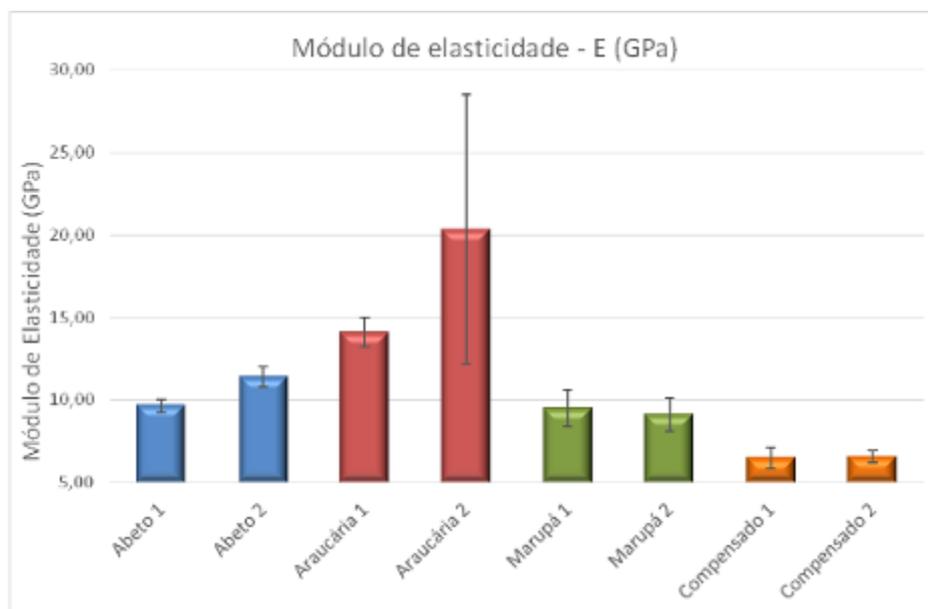


**Gráfico 2:** velocidade do som no sentido paralelo as fibras

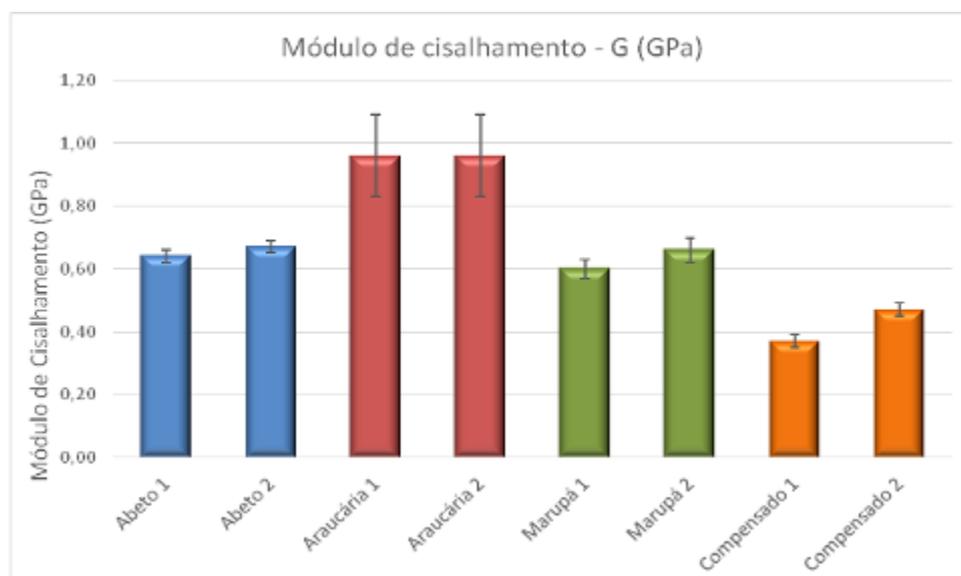


**Gráfico 3:** velocidade do som no sentido perpendicular das fibras

A velocidade com que o sinal sonoro se propaga no interior do material é um importante parâmetro acústico que pode ser obtido pela equação 1 mostrada na metodologia e relaciona o módulo de elasticidade com a densidade da madeira ( Gráfico 4).



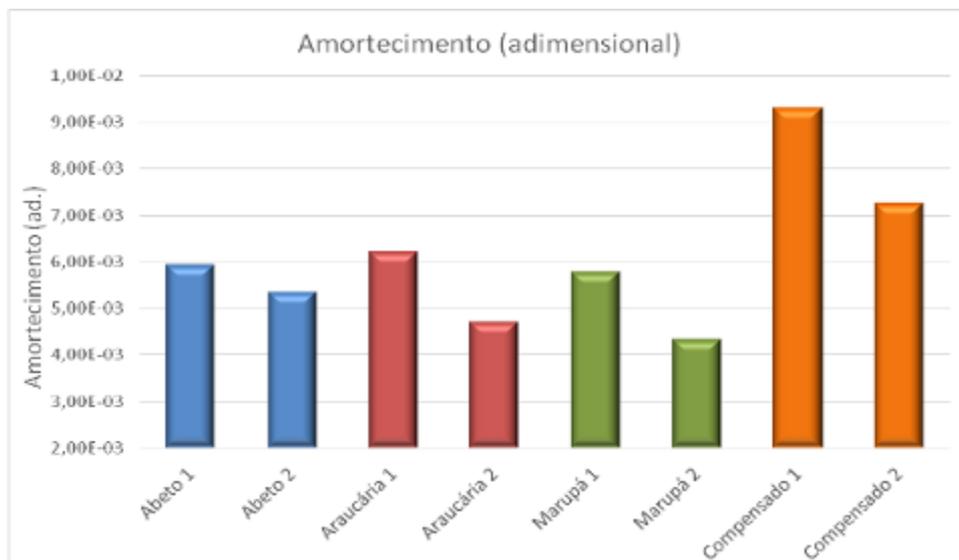
**Gráfico 4:** Modulo elástico de madeiras do tampo



**Gráfico 5:** Modulo de cisalhamento de madeiras do tampo

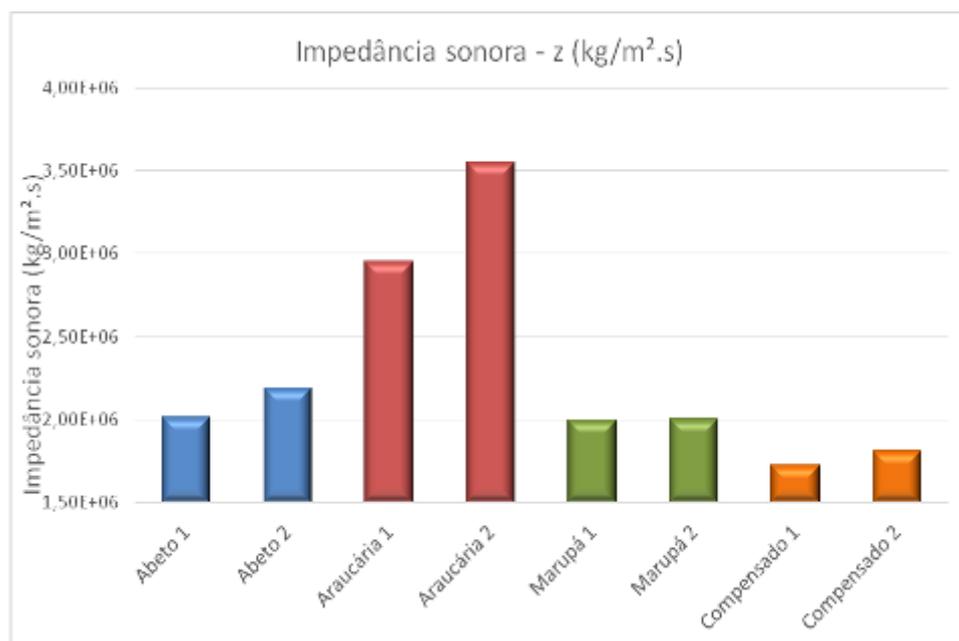
O amortecimento ( $\eta$ ) caracteriza o quão rápido será o decaimento da amplitude de vibração de um corpo após sua excitação mecânica. Esta propriedade está diretamente relacionada a mecanismos internos de dissipação de energia do material

como o atrito interno, por exemplo. Outras medidas de amortecimento incluem o fator de qualidade, o decaimento logarítmico e o ângulo de perda. A equação 4 relaciona o amortecimento com o fator de qualidade,  $u$  com o decaimento logarítmico ou com o ângulo de perda.



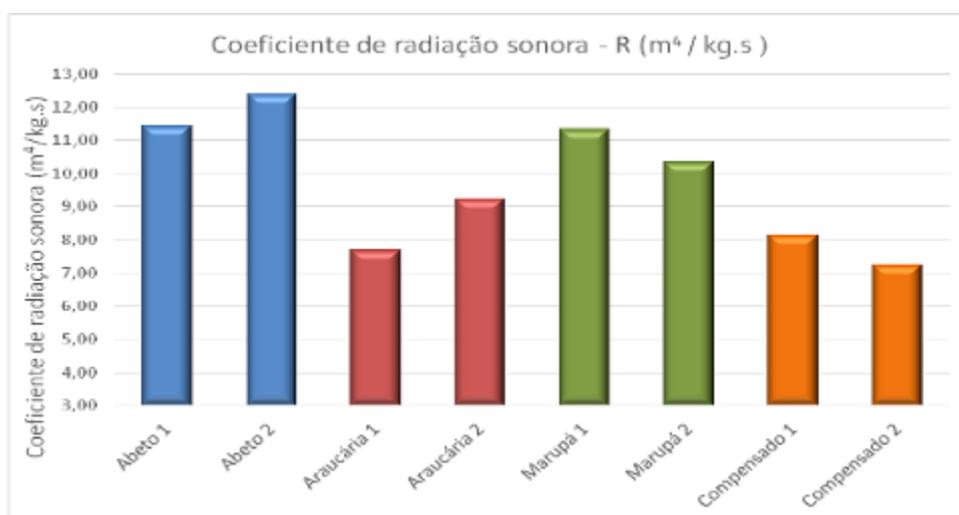
**Gráfico 6:** Amortecimento das madeiras do tempo

A impedância é importante quando a energia vibracional é transmitida de um meio para outro, sendo que a partir dela é possível verificar a intensidade do som transmitido do instrumento para o ar, por exemplo. A equação 2 relaciona a impedância com a velocidade de propagação do sinal sonoro e a densidade.



**Gráfico 7:** Impedância sonora das madeiras do tempo

O coeficiente de radiação sonora descreve o quanto de energia vibratória será convertida em ruído. Caso deseje-se que o som emitido por um instrumento seja em alto volume (intensidade), é necessário que o material apresente um alto valor para este coeficiente (caso dos xilofones, por exemplo). A equação 3 relaciona o coeficiente de radiação sonora com a velocidade de propagação do sinal sonoro e a densidade (WEGST, 2006).



**Gráfico 8:** Coeficiente de radiação sonora

Até aqui, as diferentes propriedades das madeiras utilizadas no tampo do violão foram comparadas apenas numericamente e os gráficos de barras facilitaram a identificação visual das madeiras com comportamento mais similar ao do abeto. A Tabela 6, mostra os resultados da comparação visual dos gráficos de barras referentes a técnica de excitação por impulso. O marupá e a araucária apresentaram resultados mais próximos à do abeto do que o compensado.

TESTES	MELHOR APROXIMAÇÃO COM O ABETO	2ª MELHOR APROXIMAÇÃO COM O ABETO
VELOCIDADE DO SOM SENTIDO PARALELO AS FIBRAS	Araucária	Marupá
VELOCIDADE DO SOM SENTIDO PERPENDICULAR AS FIBRAS	Araucária	Marupá
MÓDULO DE ELASTICIDADE	Marupá	Araucária
MÓDULO DE CISLHAMENTO	Marupá	Araucária
AMORTECIMENTO	Araucária	Marupá
COEFICIENTE DE IRRADIAÇÃO SONORA	Marupá	Araucária
IMPEDÂNCIA SONORA	Marupá	Araucária

**Tabela 6:** Resultados das análises feitas através da técnica de excitação por impulso nas madeiras do tampo.

### **Análise modal**

Considerando o violão como um Sistema Mecânico Vibracional – SMV, foi desenvolvido um modelo de análise cujo objetivo foi avaliar as características sonoras das madeiras, e conseqüentemente, devido à substituição destas, caracterizar os melhores materiais para as partes de vibração e reflexão ou não das ondas sonoras na caixa acústica. Esse método consistiu em utilizar uma mesma lateral do violão, para analisar diversas configurações de madeiras no tampo harmônico da caixa acústica.

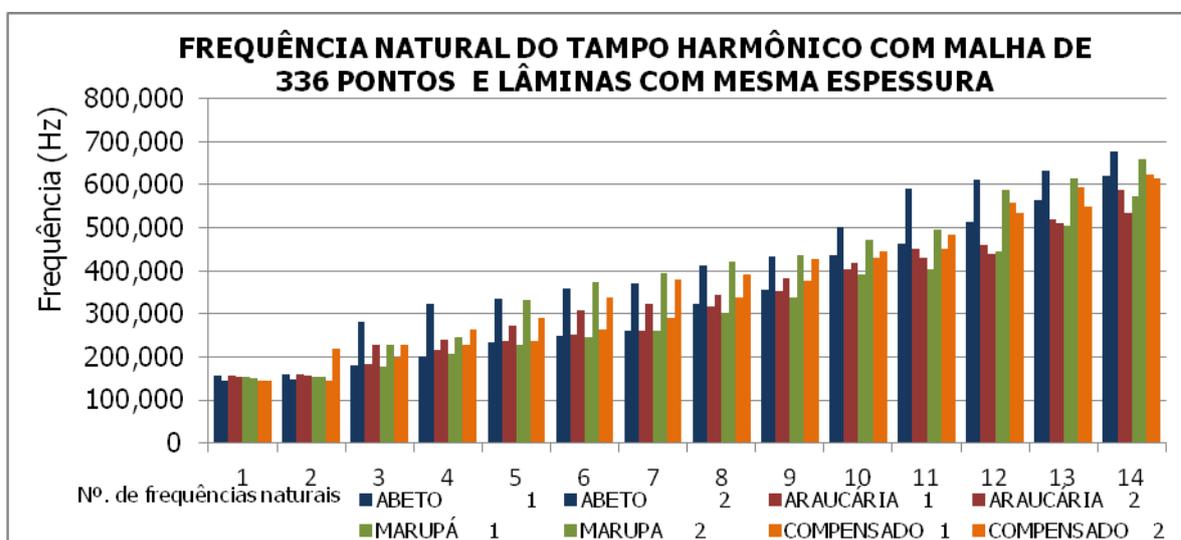
Um instrumento musical de boa qualidade não difere de outros somente pela sonoridade de suas madeiras ou devido às propriedades que estes materiais têm mas também, pelo seu funcionamento no corpo do instrumento que pode alterar devido a variáveis tais como espessura da madeira e teor de umidade, dentre outras. Desta forma, o SMV, deve funcionar para o músico de uma forma que possibilite uma boa resposta sonora, despertando o interesse e uma estreita interação entre o instrumento e o usuário. No caso de um compositor, o instrumento deve estimular e facilitar a criação de novas frases musicais nas quais a combinação de timbres possibilite a expressão de emoções e os processos de criação e composição sejam prazerosos. No caso de músicos que executam peças de outros compositores, um bom instrumento também é fonte de inspiração e prazer.

A Tabela 7 mostra as frequências naturais das madeiras estudadas no tampo com mesma espessura (aproximadamente  $2,5 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ ) e o Gráfico de Barras 9 mostra os mesmos resultados de forma a facilitar a comparação com os dados das

amostras de abeto. Pode ser observado que o marupá é a madeira com comportamento mais parecido ao abeto.

FREQUÊNCIAS EM (Hz) TAMPO MALHA COM 336 PONTOS E LÂMINAS COM MESMA ESPESSURA								
Nº.	ABETO 1	ABETO 2	ARAUCÁRIA 1	ARAUCÁRIA 2	MARUPÁ 1	MARUPA 2	COMPENSADO 1	COMPENSADO 2
1	157,527	144,022	157,123	154,038	152,794	150,180	144,113	145,558
2	160,725	148,716	159,833	156,729	155,338	153,641	145,648	219,322
3	179,322	280,288	182,617	228,325	178,181	229,338	198,069	229,661
4	201,869	322,257	215,589	241,291	206,568	246,338	226,939	264,013
5	233,919	333,776	236,765	273,867	229,548	333,663	235,747	290,365
6	249,837	359,060	251,566	307,075	246,184	373,114	264,541	338,747
7	261,832	370,776	261,975	324,266	260,941	395,302	290,308	379,300
8	323,253	411,878	317,351	343,183	303,532	419,886	339,562	391,035
9	355,035	431,752	353,616	382,603	336,935	435,365	376,873	426,988
10	436,496	501,141	403,092	418,161	390,897	470,543	430,895	446,508
11	464,254	589,665	450,109	430,556	403,974	494,271	451,868	484,477
12	512,625	610,350	459,499	440,275	444,886	588,335	559,064	533,004
13	563,429	632,954	518,421	510,406	505,576	615,437	593,220	550,249
14	620,169	676,481	588,065	534,033	574,352	659,206	622,091	614,951

**Tabela 7:** Frequências naturais do tampo com mesma espessura.



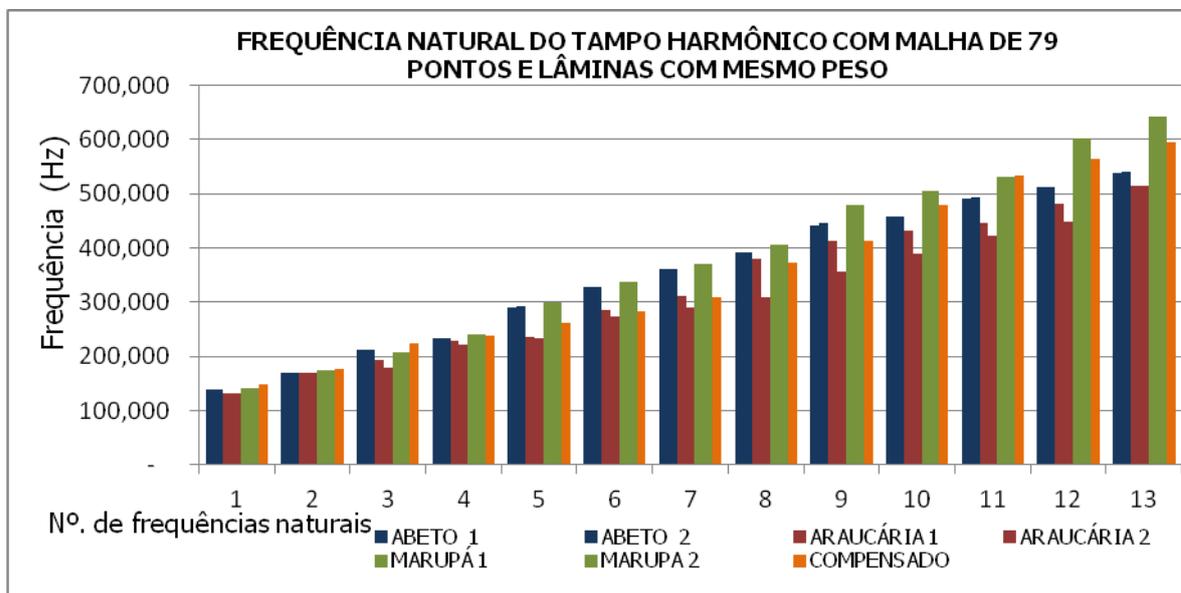
**Gráfico de Barras 9-** Comparação entre os resultados da frequência natural de madeiras de mesma espessura

A Tabela 8 mostra as frequências naturais das madeiras estudadas no tampo com o mesmo peso (aproximadamente  $120 \text{ g} \pm 2 \text{ g}$ ). O Gráfico de Barras 10 mostra os mesmos resultados de forma a facilitar a comparação com os dados das amostras de

abeto. Novamente, pode ser observado que o marupá é a madeira com comportamento mais parecido ao abeto.

FREQUÊNCIAS EM (Hz) TAMPO MALHA COM 336 PONTOS E LÂMINAS COM MESMA ESPESSURA								
Nº	ABETO 1	ABETO 2	ARAUCÁRIA 1	ARAUCÁRIA 2	MARUPÁ 1	MARUPA 2	COMPENSADO 1	COMPENSADO 2
1	157,527	144,022	157,123	154,038	152,794	150,180	144,113	145,558
2	160,725	148,716	159,833	156,729	155,338	153,641	145,648	219,322
3	179,322	280,288	182,617	228,325	178,181	229,338	198,069	229,661
4	201,869	322,257	215,589	241,291	206,568	246,338	226,939	264,013
5	233,919	333,776	236,765	273,867	229,548	333,663	235,747	290,365
6	249,837	359,060	251,566	307,075	246,184	373,114	264,541	338,747
7	261,832	370,776	261,975	324,266	260,941	395,302	290,308	379,300
8	323,253	411,878	317,351	343,183	303,532	419,886	339,562	391,035
9	355,035	431,752	353,616	382,603	336,935	435,365	376,873	426,988
10	436,496	501,141	403,092	418,161	390,897	470,543	430,895	446,508
11	464,254	589,665	450,109	430,556	403,974	494,271	451,868	484,477
12	512,625	610,350	459,499	440,275	444,886	588,335	559,064	533,004
13	563,429	632,954	518,421	510,406	505,576	615,437	593,220	550,249
14	620,169	676,481	588,065	534,033	574,352	659,206	622,091	614,951

**Tabela 8:** Frequências naturais do tampo com mesmo peso.



**Gráfico de Barras 10-** Comparação entre os resultados da frequência natural de madeiras de mesma espessura

As frequências naturais no método de análise modal utilizando o software LMS determinou que o marupá foi o que mais se aproximou das frequências naturais, quando os tampos harmônicos estavam na mesma espessura ou no mesmo peso.

Com o objetivo de se obter um critério numérico e não apenas uma comparação visual das propriedades, utilizou-se o método das diferenças absolutas para fazer a comparação com todas as propriedades do abeto, madeira considerada a ideal. A equação 6 mostra como foi feito o cálculo para cada propriedade ou característica das madeiras estudadas.

$$\text{Equação 6 - } \frac{|Propriedade(madeira) - Propriedade(abeto)|}{Propriedade(abeto)}$$

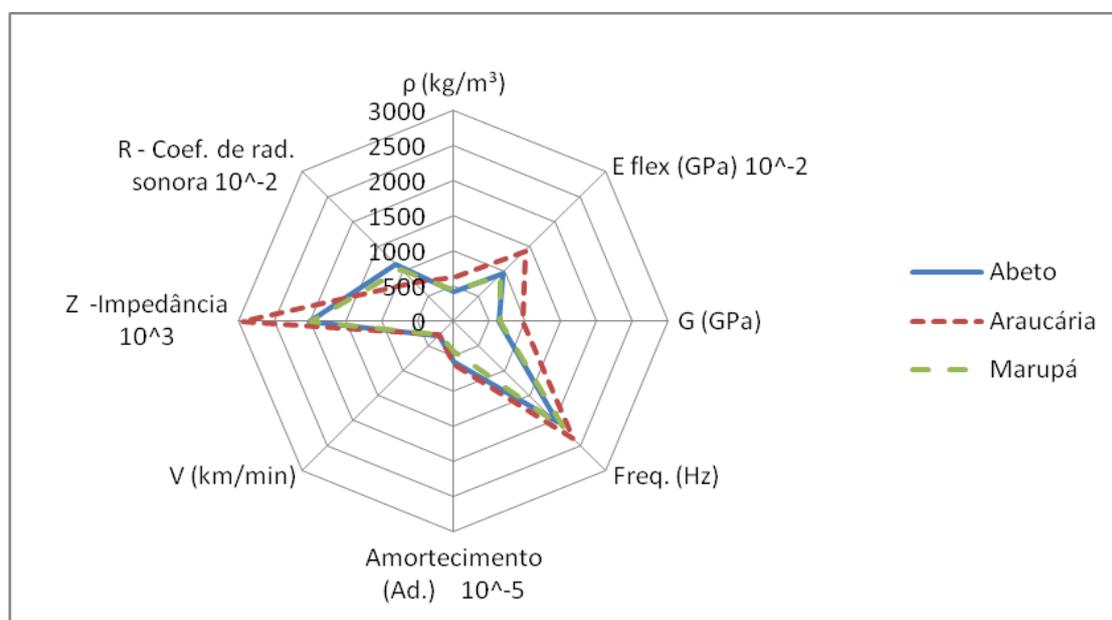
Pode ser observado que todas as características ou propriedades das madeiras estudadas se tornaram adimensionais e como o abeto é a referência, todas as suas propriedades ou características foram iguais a zero. Assim foi feita uma comparação para todas as propriedades e características estudadas e quanto mais próximo de zero a propriedade ou característica, mais próxima do abeto é essa madeira. A Tabela 9 mostra o resultado das análises mensuradas (densidade, teor de umidade, velocidade de propagação da onda, módulo elástico, módulo de cisalhamento, amortecimento, impedância sonora e coeficiente de radiação sonora) para o abeto, araucária, marupá e compensado. Foram feitas médias de duas árvores de cada espécie para o cálculo das diferentes características ou propriedades analisadas.

<b>Espécie</b>	Abeto	Araucária	Marupá	Compensado
Módulo de elasticidade	0	6,675	<u>1,225</u>	4,005
Módulo de cisalhamento	0	0,305	<u>0,025</u>	0,235
Amortecimento	0	<u>0,000169</u>	0,0005705	0,0026425
Impedância	0	1.151.289,82	<u>101.442,09</u>	331.762,64
Coef. de rad. sonora	0	3,45	<u>1,08</u>	4,21
Umidade	0	<u>0,12</u>	0,58	
Densidade	0	0,20	<u>0,01</u>	0,06
V. do som sentido paralelo às fibras	0	<u>243,06</u>	349,87	1313,87
V. do som sentido perpendicular às fibras	0	<u>228.193,2</u>	523.776,4	734.466,7

**Tabela 9:** Tabela de aproximação com o abeto

Os resultados apresentados mais próximos de zero foram sublinhados e comparando com os resultados da análise modal, nota-se que o marupá é a espécie que mais se aproxima do abeto.

O Gráfico Radar 1 mostra que comparando a espécie abeto considerada como padrão de qualidade para músicos, os resultados obtidos para o abeto foram mais próximos aos da madeira de marupá, sendo que os valores das propriedades/características da araucária ficaram também bastante similares. O compensado mostra resultados mais distantes aos da referência, do marupá e da araucária tanto na análise modal quanto nos ensaios de excitação por impulso.



**Gráfico radar 01:** Comparação das madeiras do tempo harmônico.

Com esses resultados compósitos poliméricos podem ser formulados para alcançar ao máximo as propriedades do abeto. No entanto, ao contrário da comparação do abeto com madeiras que apresentam propriedades e características imutáveis, os compósitos poderão ser formulados de forma a favorecer esta ou aquela característica ou propriedade. Assim, através da adição de negro de fumo, pós metálicos, fibras naturais ou artificiais etc será necessário discernir quais propriedades ou características são mais importantes para a obtenção de uma boa sonoridade do violão. Podem ser feitos mais de um gráfico do tipo radar com a inclusão de outras propriedades e características tais como a densidade e a capacidade de absorção de água.

## **5.2 - ANÁLISE DE MADEIRAS NO SISTEMA MECÂNICO VIBRACIONAL DA CAIXA ACÚSTICA DO VIOLÃO**

Nesta seção foi avaliado o tampo de violões confeccionados com madeiras de jacarandá, andiroba, jenipapo e compensado. São apresentadas características das madeiras tais como a identificação por EDS de elementos químicos presentes, densidade, teor de umidade e morfologia das madeiras vistas através de microscopia óptica. Resultados quanto à velocidade de propagação da onda (sentido paralelo e perpendicular às fibras da madeira), módulo de elasticidade, módulo de cisalhamento, amortecimento, coeficiente de irradiação sonora, impedância sonora e análise modal para amostras de mesmo peso foram também avaliados para as três madeiras. Para cada característica ou teste realizado, foi feita uma comparação com o jacarandá, madeira considerada ideal para a caixa acústica do violão. Desta forma, após a análise desses resultados poderá ser afirmado qual madeira é mais parecida com o jacarandá no que diz respeito ao som do instrumento. No entanto, há dois aspectos a serem considerados:

1 – Como o estudo foi realizado apenas com o jenipapo e a andiroba, não se pode afirmar se alguma outra madeira é mais parecida com o jacarandá e portanto, teoricamente poderia representar a substituição ideal. No entanto, utilizando-se o método das diferenças absolutas (equação 7), outras madeiras podem ser comparadas as jacarandá.

2 – Novamente, as mesmas considerações feitas para o tampo aplicam-se também ao fundo e à lateral do violão, ou seja, há um componente subjetivo muito importante a ser considerado neste estudo que é a identificação de um bom violão.

É quase uma unanimidade entre os profissionais da área de música que um violão de excelente qualidade deve ser feito com madeiras de abeto no tampo harmônico e jacarandá da Bahia nas faixas laterais e no fundo. Por essa quase unanimidade, e por essa espécie brasileira estar proibida pelo IBAMA de ser cortada, seu comércio está restrito principalmente a madeiras oriundas de demolição de imóveis antigos onde se utilizava Jacarandá em telhados, vigas, portas entre outras. Aplicações. Ocorre também com frequência a derrubada irregular e criminosa desta espécie muito cobiçada devido ao seu alto valor no mercado internacional. Assim, a

busca por outras madeiras que possam substituir o jacarandá da Bahia para o uso em violões é bastante importante.

No item anterior foi concluído que dentre as madeiras analisadas, o marupá é a madeira mais similar ao abeto. Neste item serão mostrados os resultados da análise de outras madeiras (andiroba, jenipapo e compensado) para substituir o jacarandá da Bahia que foi usado nas faixas laterais e no fundo do considerado o violão ideal.

As Figuras 37a, 37b e 37c mostram imagens de microscopia óptica das espécies analisadas numa seção transversal, com aumento de 50 vezes.



O jenipapo é uma madeira com porosidade difusa com poros solitários e muito numerosos. A andiroba é uma espécie que mostra vasos solitários e geminados, predominantemente vazios, alguns com conteúdos, apresenta uma porosidade difusa e camada de crescimento distintas. O jacarandá é uma madeira caracterizada por apresentar poucos poros, solitários, podendo apresentar poros geminados. A amostra de jenipapo apresenta uma frequência maior e mais difusa de vasos, o que faz com que essa madeira seja menos densa que as demais. A andiroba se aproxima mais do jacarandá por apresentar vasos duplos e obstruídos (tilose). A quantidade de vasos e seus tamanhos determinam a densidade. A Tabela 10 mostra os resultados de umidade e densidade da andiroba, jenipapo e jacarandá.

<b>Espécies</b>	<b>Massa específica</b>	<b>Umidade</b>
<b>ANDIROBA 1</b>	<b>0,679</b>	<b>15,371</b>
<b>ANDIROBA 2</b>	<b>0,728</b>	<b>15,436</b>
<b>JENIPAPO 1</b>	<b>0,661</b>	<b>15,563</b>
<b>JENIPAPO 2</b>	<b>0,735</b>	<b>13,555</b>
<b>JACARANDÁ 1</b>	<b>0,911</b>	<b>10,539</b>
<b>JACARANDÁ 2</b>	<b>0,773</b>	<b>9,781</b>

**Tabela 10:** Umidade e densidade das amostras do fundo da caixa acústica.

## Analise química

A Tabela 11 mostra os elementos químicos obtidos por EDS de amostras de jacarandá, andiroba e jenipapo. A análise química em relação ao teor de celulose, hemicelulose, lignina e teor de extrativos não foi realizada e o teor de carbono e oxigênio obtido no EDS não é relevante. Pode ser observado que os teores de enxofre e potássio do jacarandá são mais altos do que da andiroba e do jenipapo, o teor de cálcio das três madeiras é aproximadamente igual e o pequeno teor de sódio em uma das amostras de jacarandá sugere a presença de impureza.

JACARANDÁ 1	Elementos	C	O	S	Cl	K	Ca	Total	
	% p/p	64.40	35.40	0.07	0.01	0.02	0.09	100.00	
	%Atômica	70.74	29.19	0.03	0.00	0.01	0.03	100.00	
JACARANDA 2	Elementos	C	O	Na	S	Cl	K	Ca	Total
	% p/p	61.49	37.20	0.46	0.03	0.41	0.18	0.23	100.00
	%Atômica	68.37	31.05	0.27	0.01	0.15	0.06	0.08	100.00
ANDIROBA 1	Elementos	C	O	Cl	K	Ca	Total		
	% p/p	59.46	40.47	0.01	0.01	0.05	100.00		
	%Atômica	66.17	33.81	0.01	0.00	0.02	100.00		
ANDIROBA 2	Elementos	C	O	S	Cl	K	Ca	Total	
	% p/p	59.72	40.12	0.01	0.02	0.02	0.11	100.00	
	%Atômica	66.44	33.51	0.00	0.01	0.01	0.04	100.00	
JENIPAPO 1	Elementos	C	O	S	K	Ca	Total		
	% p/p	57.83	42.04	0.01	0.06	0.05	100.00		
	%Atômica	64.67	35.29	0.01	0.02	0.02	100.00		
JENIPAPO 2	Elementos	C	O	S	Cl	K	Ca	Total	
	% p/p	58.46	41.26	0.03	0.06	0.12	0.07	100.00	
	%Atômica	65.30	34.60	0.01	0.02	0.04	0.02	100.00	

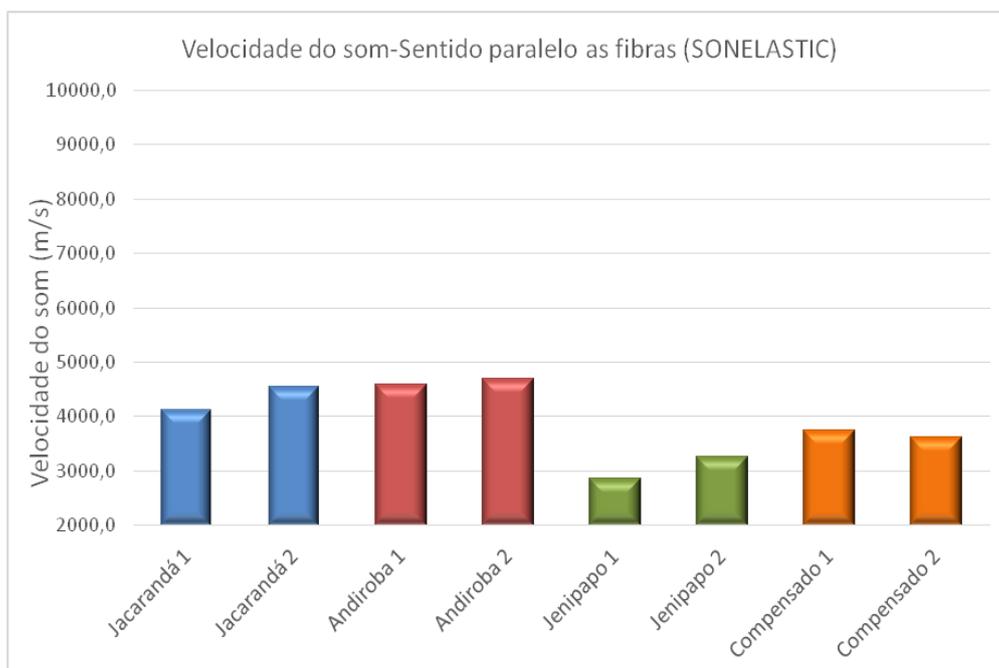
**Tabela 11:** Teor de elementos químicos encontrados em amostras de jacarandá, andiroba e jenipapo.

## Técnica de excitação por impulso

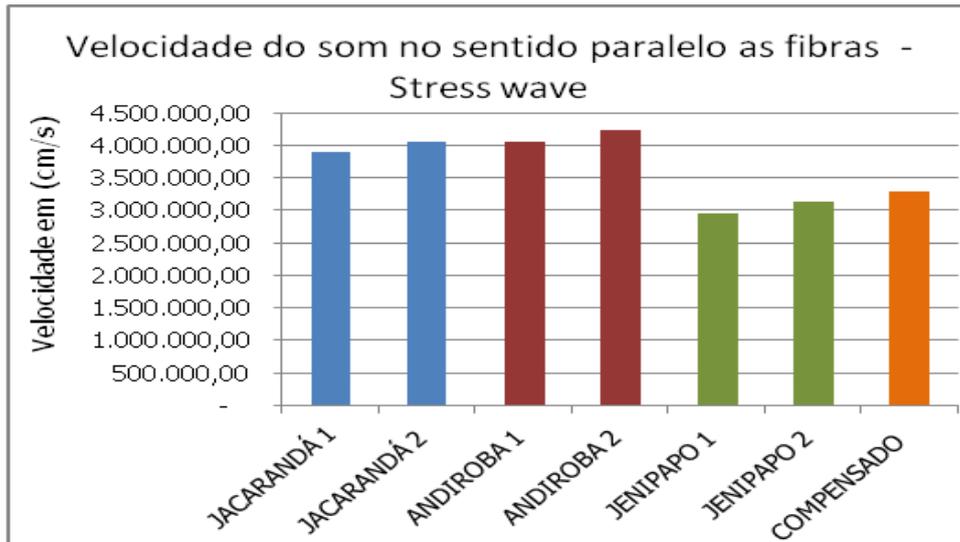
A velocidade de propagação da onda sonora em materiais pode variar de acordo com diversas propriedades, nos polímeros e nos metais ela varia de acordo com a proporção de elementos químicos que foram compostos. Nas madeiras, essa propriedade varia de acordo com a espécie, como pode ser observado abaixo de acordo com medições realizadas no Sonelastic e Stress Wave Timer.

Os Gráficos de barras 11 e 12 mostram os resultados dos testes de velocidade de propagação da onda em amostras de jacarandá, andiroba, jenipapo e compensado no sentido paralelo às fibras das madeiras. O Gráfico de barras 13 mostra os mesmos resultados no sentido perpendicular às fibras. Pode ser observado que a andiroba apresenta comportamento mais parecido ao do jacarandá em todos os testes.

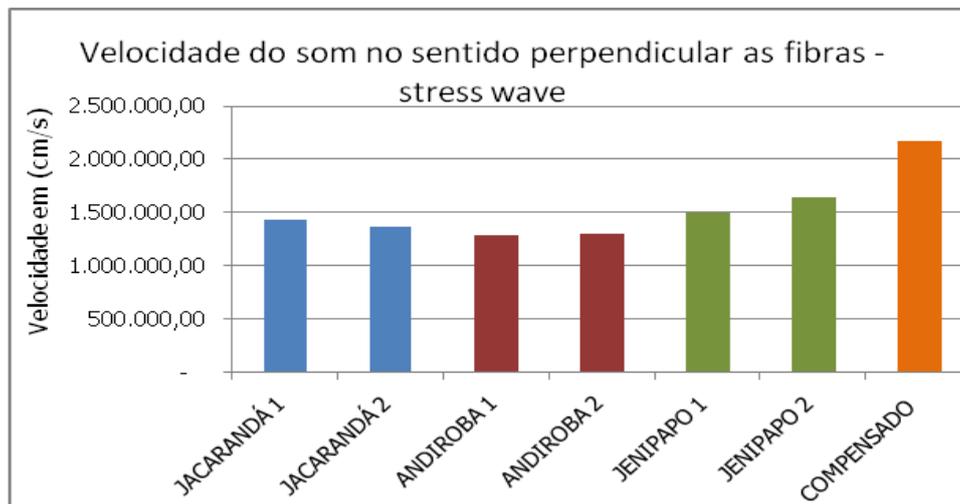
As análises foram realizadas com a utilização do equipamento Sonelastic (gráfico 11) e com o equipamento Stress Wave Timer (gráfico 12 e 13). Como o resultado foi o mesmo na comparação do teste feito no sentido paralelo, a partir daqui os testes de módulos elásticos e cisalhamento (gráficos 14 e 15), amortecimento (gráfico 16), impedância sonora (gráfico 17) e coeficiente de irradiação sonora (gráfico 18), foram realizados no equipamento Sonelastic.



**Gráfico 11:** velocidade do som no sentido paralelo as fibras

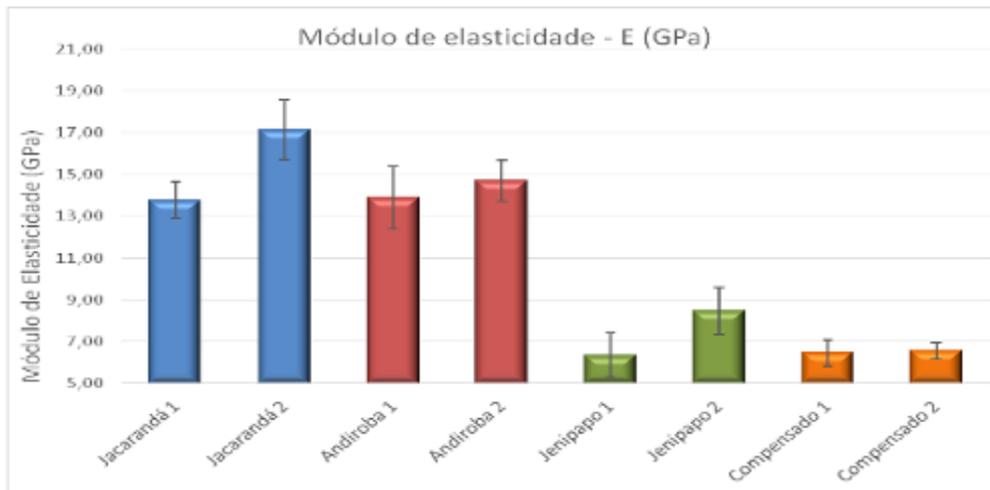


**Gráfico 12:** velocidade do som no sentido paralelo as fibras

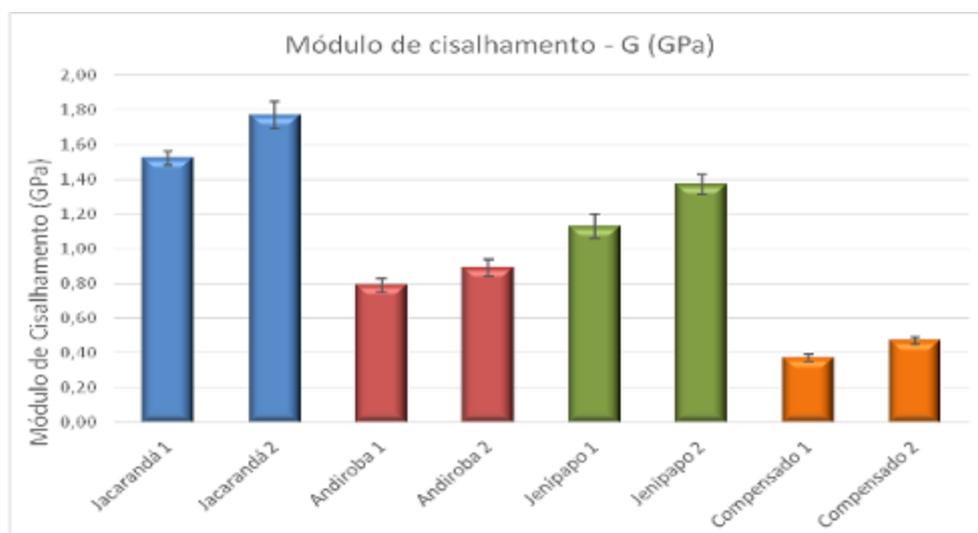


**Gráfico 13:** velocidade do som no sentido perpendicular das fibras

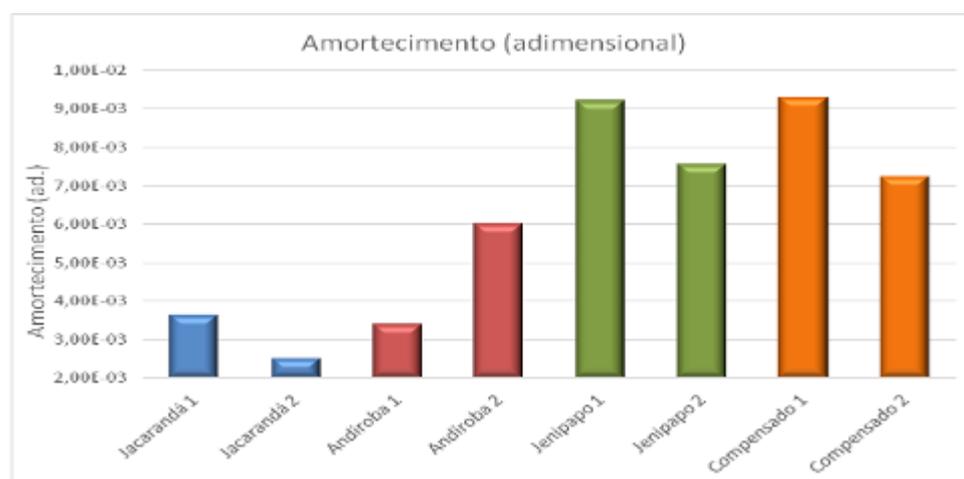
A velocidade com que o sinal sonoro se propaga no interior do material é um importante parâmetro acústico que pode ser obtido pela equação 1 mostrada na metodologia e relaciona o módulo de Young com a densidade da madeira.



**Gráfico 14:** Modulo elástico de madeiras do tempo

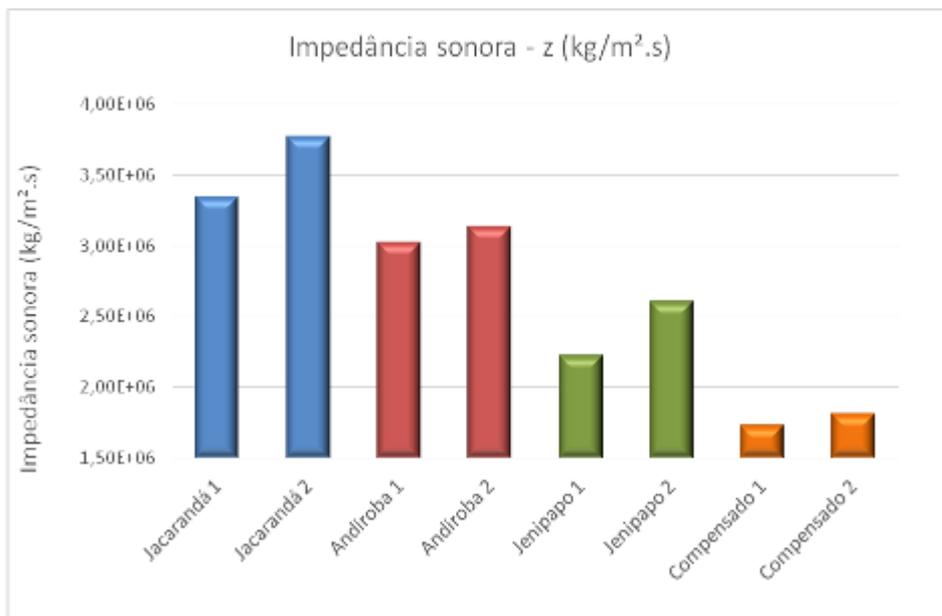


**Gráfico 15:** Modulo de cisalhamento de madeiras do tempo



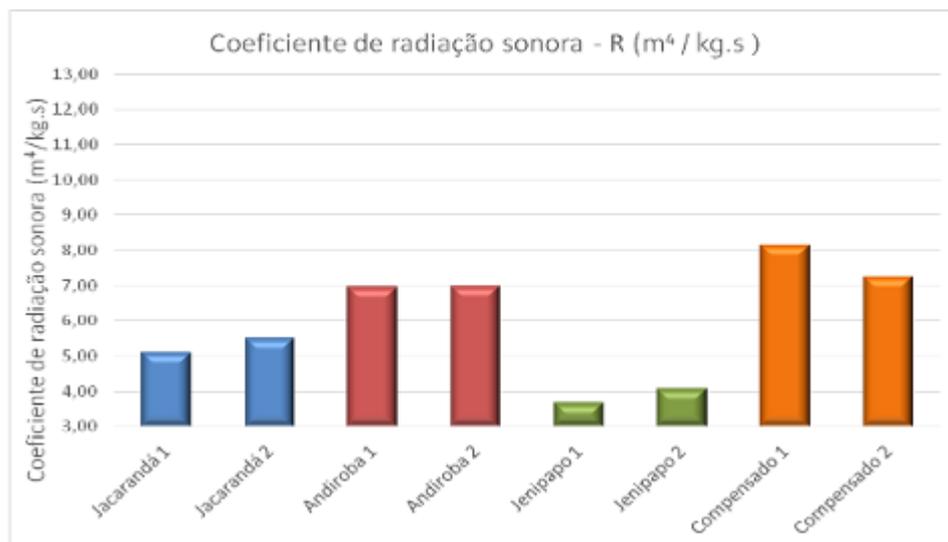
**Gráfico 16:** Amortecimento das madeiras do tempo

O amortecimento caracteriza o quão rápido será o decaimento da amplitude de vibração de um corpo após sua excitação mecânica. Esta propriedade está diretamente relacionada a mecanismos internos de dissipação de energia do material como o atrito interno, por exemplo. Outras medidas de amortecimento incluem o fator de qualidade  $Q$ , o decaimento logarítmico ( $\sigma$ ) e o ângulo de perda ( $\psi$ ). A equação 4 relaciona o amortecimento com o fator de qualidade ou com o decaimento logarítmico ou com o ângulo de perda.



**Gráfico 17:** Impedância sonora das madeiras do tempo

O coeficiente de radiação sonora descreve o quanto de energia vibratória será convertida em ruído. Caso deseje-se que o som emitido por um instrumento seja em alto volume (intensidade), é necessário que o material apresente um alto valor para este coeficiente (caso dos xilofones, por exemplo). A equação 3 relaciona o coeficiente de radiação sonora com a velocidade de propagação do sinal sonoro e a densidade (WEGST, 2006).



**Gráfico 18:** Coeficiente de radiação sonora

Até aqui, as diferentes propriedades das madeiras utilizadas na caixa acústica do violão foram comparadas apenas numericamente e os gráficos de barras facilitaram a identificação visual das madeiras com comportamento mais similar ao do jacarandá. A Tabela 12, mostra os resultados da comparação visual dos gráficos de barras referentes a técnica de excitação por impulso. A andiroba apresentou resultados mais próximos à do jacarandá.

TESTES	MELHOR APROXIMAÇÃO COM O JACARANDÁ	2ª MELHOR APROXIMAÇÃO COM O JACARANDÁ
VELOCIDADE DO SOM NO SENTIDO PARALELOAS FIBRAS	Andiroba	Jenipapo
VELOCIDADE DO SOM NO SENTIDO PERPENDICULAR AS FIBRAS	Andiroba	Jenipapo
MÓDULO DE ELESTICIDADE	Andiroba	Jenipapo
MÓDULO DE CISALHAMENTO	Jenipapo	Andiroba
AMORTECIMENTO	Andiroba	Jenipapo
COEFICIENTE DE IRRADIAÇÃO SONORA	Andiroba	Jenipapo
IMPEDÂNCIA SONORA	Andiroba	Jenipapo
ANÁLISE MODAL	Andiroba	Jenipapo

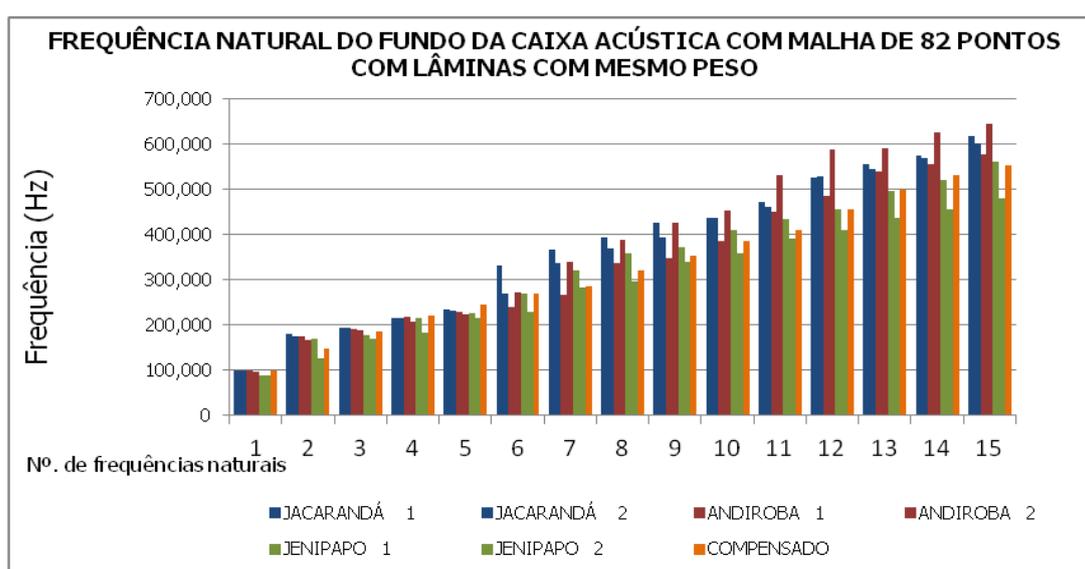
**Tabela 12:** Resultados das análises feitas através da técnica de excitação por impulso nas madeiras do fundo da caixa acústica.

### Análise modal

A Tabela 13 mostra as frequências naturais das madeiras estudadas no fundo da caixa acústica com mesmo peso (aproximadamente 208 g  $\pm$  2 g) e o Gráfico de Barras 19 mostra os mesmos resultados de forma a facilitar a comparação com os dados das amostras de jacarandá. Pode ser observado que a andiroba é a madeira com comportamento mais parecido ao jacarandá.

FREQUENCIAS NATURAIS EM (Hz) DO FUNDO DA CAIXA ACÚSTICA COM MALHA DE 82 PONTOS E MESMO PESO (70/700 Hz)							
Nº.	JACARANDÁ 1	JACARANDÁ 2	ANDIROBA 1	ANDIROBA 2	JENIPAPO 1	JENIPAPO 2	COMPENSADO
1	98,871	98,642	97,997	97,095	87,827	87,384	97,812
2	178,475	174,397	173,985	166,549	168,868	125,195	147,321
3	194,510	193,102	191,038	186,747	178,187	170,268	183,953
4	213,738	215,810	217,204	208,089	214,725	183,496	221,201
5	234,618	230,210	228,299	223,256	225,020	214,307	243,752
6	331,568	269,114	239,042	270,434	269,719	227,704	270,227
7	365,561	335,733	266,609	338,275	319,211	281,913	284,390
8	393,441	368,499	336,281	388,611	358,777	294,884	319,974
9	427,043	393,702	348,172	425,555	372,068	339,232	354,089
10	436,355	435,465	384,633	453,199	410,919	359,306	384,189
11	470,794	461,840	450,967	530,502	433,496	389,385	408,748
12	525,922	529,071	486,679	586,964	455,393	408,783	456,605
13	554,383	543,821	540,308	590,099	496,792	437,716	498,056
14	574,284	570,290	554,679	626,833	520,925	456,916	530,014
15	619,120	601,199	577,766	645,930	560,311	478,587	553,944

**Tabela 13:** Frequências naturais do fundo da caixa acústica com mesmo peso.



**Gráfico de Barras 19** - Comparação entre os resultados da frequência natural de madeiras da caixa acústica com mesmo peso.

### Tabela de aproximação com o Jacarandá

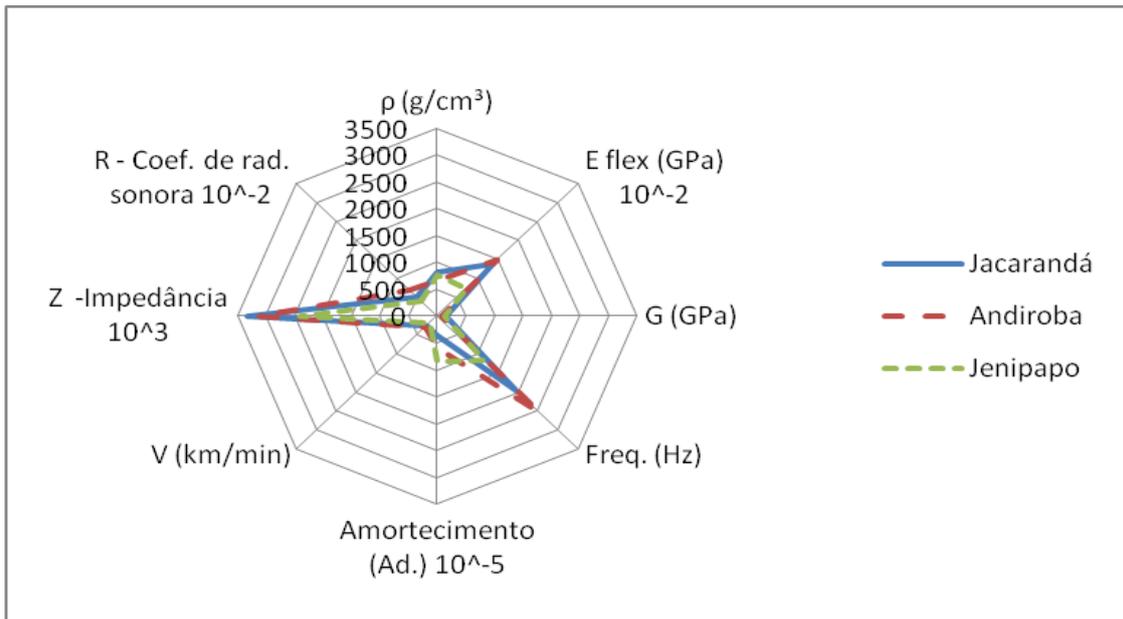
Pode ser observado que todas as características ou propriedades das madeiras estudadas se tornaram adimensionais e como o jacarandá é a referência, todas as propriedades têm o valor igual zero. Assim foi feita uma comparação para todas as propriedades e características estudadas e quanto mais próximo de zero a propriedade ou característica, mais próxima do jacarandá é essa madeira. A Tabela 14 mostra o resultado desta diferença absoluta das propriedades mensuradas (densidade, teor de umidade, velocidade de propagação da onda, módulo elástico, módulo de cisalhamento, amortecimento, impedância sonora e coeficiente de radiação sonora) para o jacarandá, andiroba, jenipapo e compensado, conforme equação 7.

$$\text{Equação 7 - } \frac{|\text{Propriedade(madeira)} - \text{Propriedade(jacarandá)}|}{\text{Propriedade(jacarandá)}}$$

Espécie	Jacarandá	Andiroba	Jenipapo	Compensado
Módulo elástico	0	<u>1,165</u>	8,05	8,93
Módulo de cisalhamento	0	<u>0,805</u>	0,395	1,225
Amortecimento	0	<u>0,001633</u>	0,00531	0,005198
Impedância	0	<u>473.299,04</u>	1.142.367,71	1.786.317,42
Coef. de rad. sonora	0	1,69	<u>1,42</u>	2,42
Umidade	0	<u>1</u>	5	
Densidade	0	<u>0,11</u>	0,12	0,34
V. do som sentido paralelo as fibras	0	<u>301,18</u>	1281,36	644,70
V. do som sentido perpendicular as fibras	0	<u>109.193,0</u>	170.922,9	774.391,5

**Tabela 14** – Resultado do somatório do módulo das propriedades mensuradas normalizadas (densidade, teor de umidade, velocidade de propagação da onda, módulo elástico, módulo de cisalhamento, amortecimento, impedância sonora, coeficiente de radiação sonora).

O Gráfico Radar 02 mostra que comparando a espécie jacarandá considerada como padrão de qualidade para músicos, os resultados obtidos para o jacarandá foram mais próximos aos da madeira de andiroba. O compensado mostra resultados mais distantes aos da referência, do jenipapo e da andiroba tanto na análise modal quanto nos ensaios de excitação por impulso.



**Gráfico radar 02:** Comparação das madeiras da caixa acústica do violão.

Com esses resultados compósitos poliméricos podem ser formulados para alcançar ao máximo as propriedades do Jacarandá. No entanto, ao contrário da comparação do jacarandá com madeiras que apresentam propriedades e características imutáveis, os compósitos poderão ser formulados de forma a favorecer esta ou aquela característica ou propriedade, levando em conta o a cor, resistência reflexão das ondas sonoras entre outras características do fundo e laterais da caixa acústica. Assim, através da adição de negro de fumo, pós metálicos, fibras naturais ou artificiais etc, será necessário discernir quais propriedades ou características são mais importantes para a obtenção de uma boa sonoridade do violão. Podem ser feitos mais de um gráfico do tipo radar com a inclusão de outras propriedades e características tais como a densidade e a capacidade de absorção de água.

## 5.3 - ANÁLISE MODAL NUMÉRICA NO TAMPO DO VIOLÃO

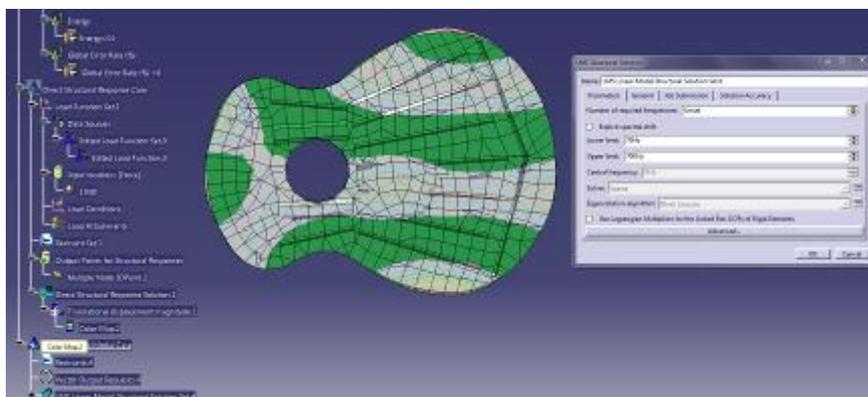
A análise modal numérica pode ser uma ferramenta funcional na modernização de instrumentos musicais e hoje, é usada na linha automotiva, linha branca entre outras. Simular um ruído ou comportamento mecânico, ajuda na escolha de materiais adequados para cada peça de um componente ou sistema mecânico vibracional - SMV, e nos instrumentos musicais como o violão, o formato da caixa de ressonância ou a abertura podem ser projetados através de simulação.

O desenvolvimento de alguns materiais já é uma realidade na indústria de instrumentos musicais, onde podem ser encontrados principalmente instrumentos fabricados com resinas reforçadas por fibra de vidro ou fibra de carbono. Devido ao comércio de algumas espécies estarem limitados, tem-se buscado o desenvolvimento de novos materiais.

O desenvolvimento de instrumentos musicais novos e melhorados tem desempenhado um papel importante no processo do aumento da gama de timbres e de sons, onde a voz humana tem sido o ponto de referência. Hoje, os instrumentos musicais são classificados em cinco famílias com base em um sistema concebido por VonHornbostel e Sachs (1914). As quatro classes iniciais eram (1) idiophones-som para instrumentos que fazem vibração por eles mesmos, sem o uso de cordas ou membranas (por exemplo, xilofones); (2) membranophones-instrumentos que usam uma membrana esticada para criar o som, (por exemplo, bateria); (3) chordophones-instrumentos que dependem de uma corda esticada (por exemplo, violinos, guitarras, pianos); e (4) aerofones-instrumentos que dependem de uma coluna de ar vibrando para a criação de som (por exemplo, flautas, clarinetes). Mais recentemente, uma quinta classe foi adicionado ao sistema de Sachs-Hornbostel que é a (5)-electrophones instrumentos que produzem som por meios eletrônicos, por exemplo: sintetizadores de teclado (ULRIKE, 2006).

O violão é um instrumento popular que pode ser estudado de forma mais abrangente devido às suas características mais simples (peso baixo, facilidade de afinação, custo acessível, maior possibilidade de troca de partes em relação a instrumentos maiores) porém completas, já que sua caixa acústica pode reproduzir frequências que vão de aproximadamente 70 Hz a 700 Hz, razão pela qual esse instrumento foi escolhido para esta análise. O tampo harmônico da caixa acústica

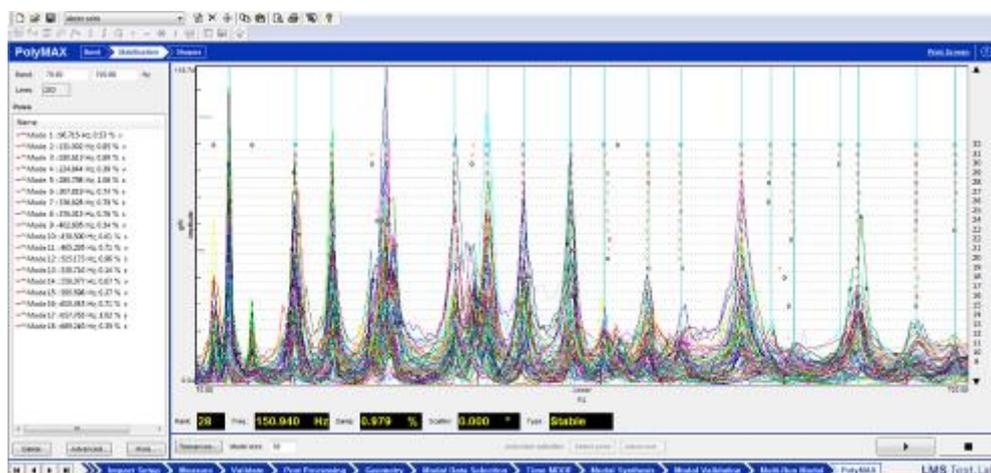
possui uma importância maior do que a lateral e o fundo e por esta razão, muitos construtores dedicam maior atenção a este componente do instrumento musical. A Figura 38 mostra a tela do LMS Virtual.Lab sendo configurada na banda de frequência de 70 a 700 Hz.



**Figura 38:** Tela do LMS Virtual.Lab sendo configurada na banda de frequência de 70 a 700 Hz.

Foram realizadas análises modal e numérica de um material com as propriedades do abeto (*Picea abies*), para simulação do comportamento e comparação com a análise modal experimental. Para fins de simplificação, a madeira no Virtua.Lab foi considerada como isotrópica na primeira simulação e ortotrópica, visto que simular um comportamento anisotrópico seria mais complexo.

A análise modal experimental foi realizada através do uso do Test.Lab no tempo de abeto separado do violão, suspenso por uma braçadeira e barbante, sem a presença da lateral do violão, utilizando um acelerômetro e um martelo de impacto, com objetivo de ficar mais próximo das condições do comportamento virtual em questão. A malha estrutural foi composta de 79 pontos com espaçamento de 40 mm, onde foram obtidas as FRFs conforme mostra a Figura 39.

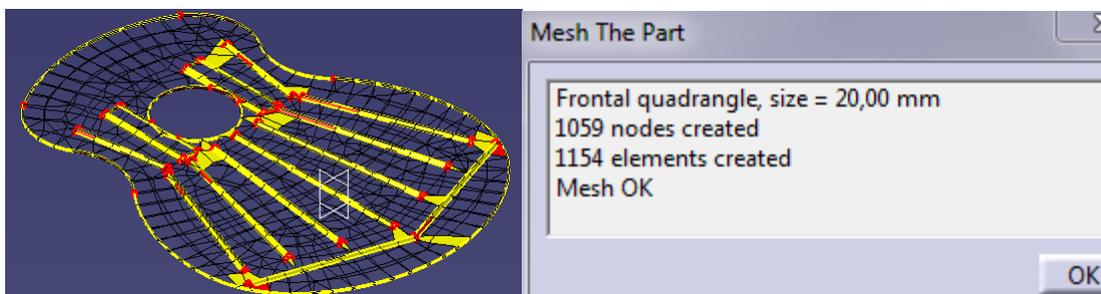


**Figura 39:** Frequências naturais do tempo de abeto solto.

Foram obtidas 18 frequências naturais afim de compará-las com as frequências naturais da análise experimental.

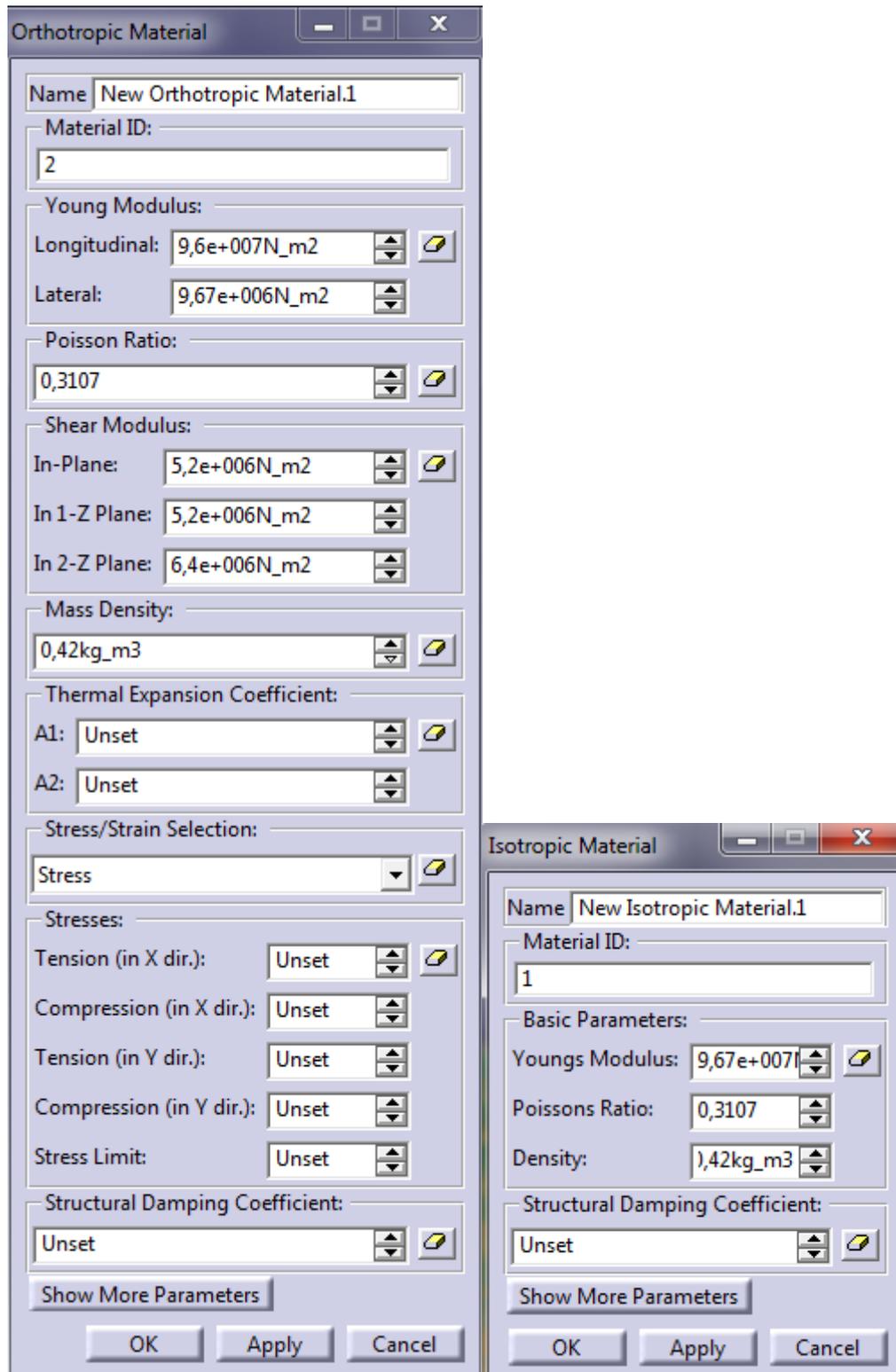
Embora a madeira seja considerada um material anisotrópico, neste estudo, considerando a escala macroscópica, o material foi considerado um material ortotrópico por suas fibras estarem no sentido paralelo ou perpendicular ao eixo do centro do tronco de uma árvore. Foram analisadas algumas constantes nessas duas principais direções sem levar em consideração pequenos desvios de suas fibras e outras prováveis orientações diagonais.

A malha estrutural foi desenhada no modelo do violão clássico com espaçamento de 20 mm, conforme mostra as Figuras 40a e 40b.



**Figura 40:** Malha estrutural no Virtual.Lab com espaçamento entre nós, número de nós e elementos.

Com objetivo de comparar o comportamento modal de materiais substitutos da madeira, procurou-se simular e identificar através da análise modal numérica, materiais com propriedades ortotrópicas ou com propriedades isotrópicas. A Figura 41 mostra a caracterização do material ortotrópico e isotrópico no programa Virtual.Lab.



**Figura 41:** Dados do material ortotrópico e isotrópico.

Para a simulação do comportamento de materiais isotrópicos e ortotrópicos foi utilizado o coeficiente de Poisson do trabalho de (LEHMANN, 2012) e os dados experimentais obtidos de amostras de abeto utilizado na técnica de excitação por impulso da Sonelastic, conforme mostra a Tabela 15.

	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidade (GPa) 10 <sup>-2</sup>	Módulo de cisalhamento (GPa) 10 <sup>-2</sup>
<b>Abeto paralelo</b>	<b>0,420</b>	<b>9,670</b>	<b>0,640</b>
<b>Abeto perpendicular</b>	<b>0,420</b>	<b>0,970</b>	<b>0,520</b>

**Tabela 15:** Propriedades do abeto.

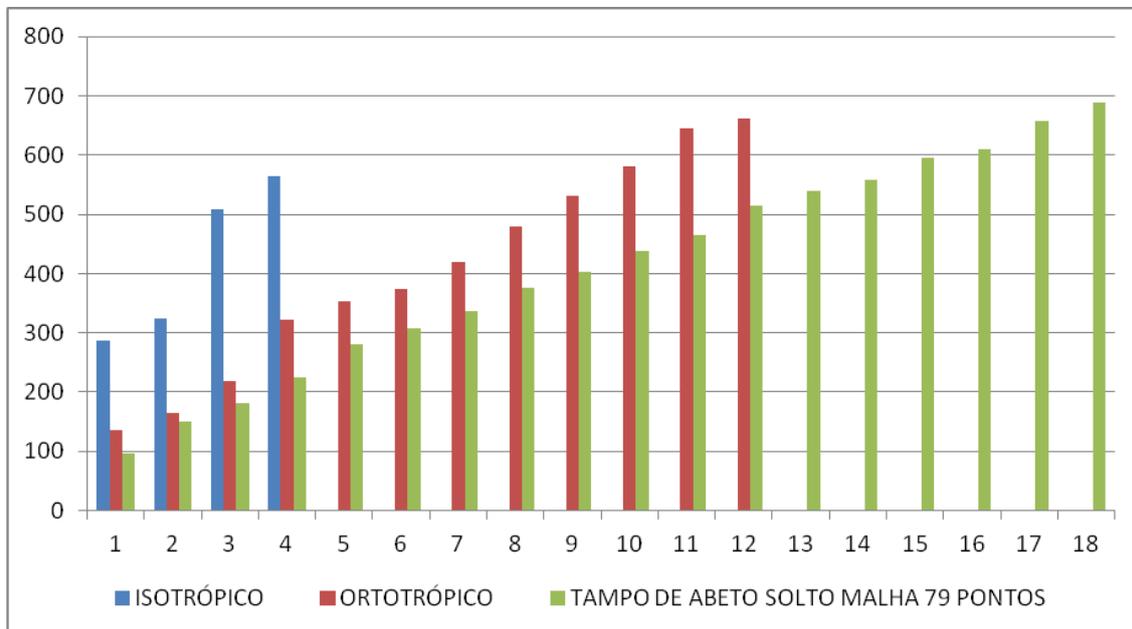
### Simulação do sistema mecânico vibracional

Os resultados da comparação de um material ortotrópico com outro isotrópico mostra que o comportamento ortotrópico é mais próximo do que o resultado experimental, como mostra a Tabela 16.

Nº.	SIMULAÇÃO (VIRTUAL.LAB)		RESULTADO EXPERIMENTAL (TEST.LAB)
	ISOTRÓPICO	ORTOTRÓPICO	TAMPO DE ABETO SOLTO SUSPENSO POR UM BARBANTE
<b>1</b>	287,38	136,59	96,72
<b>2</b>	323,30	165,67	151
<b>3</b>	507,99	219,50	180,61
<b>4</b>	563,49	321,54	224,84
<b>5</b>	652,26	352,99	280,8
<b>6</b>		374,59	307,82
<b>7</b>		418,93	336,83
<b>8</b>		478,78	376,02
<b>9</b>		530,63	402,61
<b>10</b>		580,72	438,5
<b>11</b>		645,22	465,03
<b>12</b>		660,60	515,17
<b>13</b>			538,72
<b>14</b>			558,08
<b>15</b>			595,6
<b>16</b>			610,35
<b>17</b>			657,08
<b>18</b>			689,25

**Tabela 16:** Resultados comparativos da simulação no virtual.Lab x Test.Lab em (Hz)

Foi observado que o comportamento ortotrópico se mostrou mais semelhante ao da madeira. O Gráfico de Barras 20 mostra os resultados da Tabela 16 de forma gráfica para facilitar a comparação dos resultados.



**Gráfico 20:** comparação de frequências naturais obtidos no Virtual.Lab e no Test.Lab

Pode ser observado no Gráfico de Barras 20 que o tampo de abeto obteve um resultado da análise modal experimental mais próximo à do material ortotrópico e bastante distinto do material isotrópico. Assim, com este resultado, pode-se buscar outros materiais ortotrópicos, por exemplo, compósitos poliméricos reforçados por fibras vegetais, para substituir a madeira do abeto, desde que os resultados sejam semelhantes. Desta forma, compósitos de baixo custo e com aparência semelhante à madeira tais como compósitos de matriz de polipropileno ou polietileno de alta densidade reforçados por fibras de madeira (Pinus, eucalipto ou até resíduos de madeiras mais nobres) podem ser testados desde que os parâmetros necessários para a simulação sejam conhecidos. Experimentalmente é fácil preparar tais compósitos em uma extrusora e caracterizá-los de forma a poder ser feita as simulações. Caso esses materiais possam de fato substituir o abeto de forma a manter uma qualidade minimamente boa de violões, além do uso do marupá e de outras madeiras alternativas, materiais sintéticos, mais duráveis e mais resistentes à umidade poderiam ser usados com vantagens adicionais do uso de resíduos de madeira e polímeros até mesmo reciclados.

## 6 - CONCLUSÃO GERAL

Diante dos resultados obtidos por meio dos experimentos e análises realizadas neste trabalho, foi possível identificar pelo método comparativo as madeiras que mais se aproximam do comportamento e das propriedades de madeiras nobres e tradicionais na utilização em violões.

Como este foi o primeiro trabalho desenvolvido na avaliação vibroacústica de diferentes madeiras para a aplicação em violões de boa qualidade, a metodologia criada mostrou-se eficiente.

Para as amostras do tampo, o marupá foi o que mais se aproximou do abeto. Os testes realizados para comparação de madeiras usadas no fundo e nas laterais do violão mostraram que a andiroba foi a madeira mais similar ao jacarandá.

Todas as madeiras analisadas apresentaram resultados mais próximos às referências (abeto e jacarandá) do que o compensado. A sonoridade do violão varia também com o volume e arquitetura do auditório e o revestimento das paredes, teto e piso.

O critério para a avaliação dos resultados obtidos, ou seja, método gráfico ou das diferenças absolutas em relação às madeiras de referência, mostrou-se adequado para identificar as madeiras mais semelhantes ao abeto e ao jacarandá. Além disso, esse critério possibilita à avaliação de outras madeiras alternativas não estudadas.

Nos testes de simulação do tampo do violão, quando o material foi considerado ortotrópico, o resultado da simulação foi mais próxima ao comportamento experimental do que quando o material foi considerado isotrópico.

Sendo a madeira um compósito natural, compósitos sintéticos à base de polipropileno ou polietileno de alta densidade reforçados por fibras de madeira, que também podem ser considerados materiais ortotrópicos, podem em teoria substituir diferentes madeiras em violões com boa sonoridade.

Os resultados obtidos por esta pesquisa, assim como os estudos já descritos na literatura, apontam o marupá e a andiroba como madeiras promissoras para construção da caixa acústica. O marupá apresenta crescimento rápido e dificilmente entrará na lista de espécies ameaçadas de extinção. A andiroba, assim como a araucária, possuem sementes que fazem parte do comércio e alimentam uma indústria de cosméticos, o que faz com que essas espécies sejam potencialmente preservadas e façam parte de um processo de reflorestamento e de manejo florestal.

## 7 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Simular outros parâmetros de forma a caracterizar a importância percentual do tampo, laterais e fundo da caixa acústica.
- Analisar outras espécies florestais, visto a grande diversidade na flora brasileira.
- Comparar outros materiais como polímeros e compósitos em substituição a madeira.
- Analisar acusticamente, comparando o som desses materiais em instrumentos acabados, de forma a chegar mais próximo do real.
- Estudo e caracterização do timbre.
- Utilizar uma força excitadora próxima a natureza produzida pelas cordas musicais, para utilização nos programas Test.Lab e Virtual.Lab.
- Investigar a relação da análise modal com o timbre;
- Adquirir, direcionar e priorizar as arvores caídas (araucária) em locais públicos no município de Curitiba para estudos em cursos da UFPR (Luteria e Engenharias)
-

## REFERÊNCIAS

Alves de Souza, Josefa Magma. **Caracterização e índices qualificativos de 20 espécies florestais do Acre**. Rio Branco: Secretaria de Indústria e Comércio, 1987.

BARISKA, M. **Holz fur musikinstrumente**. Forschung und Technik, 1976.

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.Lisboa, 2000. 171p. Doutorado em engenharia de materiais lenhosos – Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de LISBOA, 2000.

BELLA, A. D.; PIASENTINI, F.; ZECCHIN, R. On violin top wood qualification: the influence of growth ring distance on the acoustical properties of red spruce, Dipartimento di Fisica Tecnica, University of Padua Via Venezia 1 35131 Padova Italy p. 1-4, 2002.

BROOKE, M. RICHARDSON, B. E. Mechanical vibrations and radiation fields of guitars. **Journal of the acoustical Society of America**, V. 94, p. 1806, 1993.

BUDOWSKI, G. Distribution of tropical American rain forest species in the light of successional processes. **Turrialba**, V. 15, p. 40-42,1965.

BURGER, L.M.; RICHTER, H.G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991, 154p.

CALEGARI, L. **Uso da onda ultra-sônica como meio de controle do processo de secagem da madeira**. Santa Maria, 2006. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Agrárias, Universidade Federal de Santa Maria.

CARVALHO, P.E.R. **Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira**. Brasília: EMBRAPA-CNPQ, 1994, 640p.

CASTANHEIRA, E. **Construção de pequenas embarcações**. 2 Ed. Lisboa: Dinalivro,1998, 96p.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. (Coleção espécies arbóreas brasileiras, V.1). Brasília: Embrapa, 2003, 1039p.

CAILLIEZ, F., PAGES J.P. **Introduction à l'Analyse des données**. Paris: Smash, 1976, 616p.

CALLISTER JUNIOR, W.D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**.

7 Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 708p.

CALDERSMITH, G. Guitar as a Reflex Enclosure. **Journal of the Acoustical Society of America**, V.63, p. 1566-1575, 1978.

CARRUYO, L. J. Carapa guianensis Aublet. **In: SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE PLANTAS DE INTERES ECONOMICO DE LA FLORA AMAZONICA**, Belém. Anais...

Turrialaba, Costa Rica. Parte 1.: Informacion General. Unidad de Documentacion, 1972.p. 249-254.

CHRISTENSEN, O.; VISTISEN, B.B. Simple model for low-frequency guitar function. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 68, p. 758-766, 1980.

CISTERNA, P.A. Conversion de densidades de la madera. **Ciencia e Investigación Forestal**, Santiago do Chile V.8(2), p. 300-315, 1994.

DAMAS, C. A. M. C. e, **Violino e Tecnologia: Origem e evolução tecnológica entre os séculos XV e XXI**. Lisboa, 2012. 89f. Dissertação (Mestrado em Artes Musicais e tecnologias) – Setor de Humanas, Universidade Nova de Lisboa.

DELDUQUE, E. Ficha da planta Andiroba. **Revista Globo Rural**, V. 169, 1999.

DESAI, C. S.; SIRIWARDANA, H.J. **Constitutive laws for engineering materials with emphasis on geologic materials**. New Jersey: Prentice-Hall, 1984, 468p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Amazônia Oriental. **Andiroba (Carapa guianensis)**. **Espécies arbóreas da Amazônia**. Belém, 2004. Ficha de Identificação Botânica, n. 2. confirmar ABNT.

FERRAZ, I. D. K.; CAMARGO, J. L. C.; SAMPAIO, P. T. B. Sementes e Plântulas de andiroba (*Carapa guianensis* Aubl. e *Carapa procera*: Aspectos botânicos, ecológicos e tecnológicos. **Acta Amazônica**, Manaus, V. 32, p. 647-661, 2002.

FERRETI, A. R. **Fundamentos ecológicos para o planejamento da restauração florestal**. In: GALVÃO, A. P. M.; MEDEIROS, A. C. de S. (eds.). Restauração da Mata Atlântica em áreas de sua primitiva ocorrência natural. Colombo: EMBRAPA Florestas, 2002.

FERRETTI, A. R. **Modelos de Plantio para a Restauração**. In: GALVÃO, A.P.M.; MEDEIROS, A.C.S. (editores). *A Restauração da Mata Atlântica em Áreas de sua Primitiva Ocorrência Natural*. Colombo: Embrapa Florestas; 2002, p. 35-43.

FILIPE, P. M. D. R., **Deuses em festa: Os grandes festivais religiosos do Império Novo**, Lisboa. 2011,156p.

FLETCHER, N. H., and Rossing, T. D., **The Physics of Musical Instruments**, 2 Ed. Berlin: Springer-Verlag, 1998, 620p.

FIRTH, I. M., Physics of the Guitar at the Helmholtz and First Top-Plate Resonances. **Journal of the Acoustical Society of America**\_V. 79, p, 2010.

FRENCH, M. Response Variation in a Group of Acoustic Guitars. **Sound and Vibration**, V.Jan, p. 18-22, 2008.

FREYRE, Gilberto. **Ordem e Progresso**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1959, V. 2.

GOMES, M. H. A. ; ARRUDA, J.R. F. ; SANDO, R. . **Investigações Sobre Métodos Experimentais para a Análise Modal de Violinos**.In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 1995, Belo Horizonte, 1995.

GONZAGA, A.L. **Madeira: Uso e Conservação**. Brasília: Iphan, 2006, 2046p.

HARRIS, C. M. **Handbook of Noise Control**. 5. Ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 2002.

HOLANDA, S.B.. **O extremo oeste**. São Paulo:Brasiliense da Secretaria de Estado de Cultura, 1986.

HORNBOSTEL, E.M.; SACHS, C. Systematik der Musikinstrumente. **Zeitschrift für Ethnologie**, V.46(4-5), p. 553-590, 1914.

HSU, Hwei P. **Análise de Fourier**, Rio de Janeiro: LTC, 1973, 274p.

JESUS, R.M; GARCIA, A.; TSUTSUMI, I. Comportamento de doze espécies florestais da mata atlântica em povoamentos puros. **Revista do Instituto Florestal. Parte 2. Edição especial**. V.4, p. 491-496, 1992.

Johnston, I. **Measured Tones**. 2 Ed. New York: Taylor and Francis, 2002.

KAGEYAMA, P.Y. Biodiversidade e Biopirataria: contradição entre a biodiversidade e a pobreza no mundo. In: Amazônia e Desenvolvimento Sustentável, Cadernos X(4), p. 23-33, 2009.

KINSLER, L. E. et al. **Fundamentals of Acoustics**.3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1982.

KOLLMAN, F.F.P. e Côte Jr., W.A. **Principles of wood science and technology**.Berlin: Springer – Verlag, 1968.

LATORRACA, J. V. de F.;ALBUQUERQUE, C. E. C. de. Efeito do rápido crescimento sobre as propriedades da madeira.**Floresta e Ambiente, Seropédica**, V.7(1), p. 279-291, 2000.

LEHMANN, M.; VALLÉE, T.; RAUTENSTRAUCH, K. Testing and modelling of prestressed timber beams using a multi surface plasticity model. In: World conference on timber engineering, 2012, Auckland. **Proceedings of the World conference on timber engineering**, Auckland, 2012, p. x-y.

LEPAGE, E. S. **Manual de preservação de madeiras**. São Paulo: IPT, 1989, V.2, 365p.

LMS INTERNATIONAL (LMS - Leuven Measurements & Systems), 2014.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 2 Ed. Nova Odessa: V.2, 2002, 368p.

LOUREIRO, A. A.; SILVA, M.F.; ALENCAR, J.C. **Essências madeireiras da Amazônia**. Manaus: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, INPA/SUFRAMA-MA, 1979, 245p.

LOREIRO, M.; PAULA, H. B. Estudo da Variação do Timbre da Clarineta em Performance através de Análise por Componentes Principais da Distribuição Espectral. **Revista Eletrônica da Associação Nacional de Pesquisa e Pós-graduação em Música**, V.7, p.1-19, 2000.

MADUREIRA, Nuno Luís. **Cidade: espaço e cotidiano: Lisboa, 1740-1830**. Lisboa: Livros Horizonte, Ltda. 1992, 203p.

MAINIERI C., CHIMELO J.P. **Fichas de características das madeiras brasileiras**. São Paulo: IPT, 1989, 418p.

MARQUES, M.H.B.; MARTINS, V.A.; SOUZA, M.R.; MARCUS, V.S.A. Efeito da secagem nas propriedades acústicas da madeira de marupá (*Simarouba amara* Aubl.). **Floresta & Ambiente**, V.12, p. 57-64, 2006.

MELLINGER, L. L. **Aspectos da regeneração natural e produção de sementes de *Carapa guianensis* Aubl. (andiroba) na Reserva de Desenvolvimento Sustentável Amanã (RDSA)**, AM. Manaus, 2006, 94f. Dissertação. (Mestrado em Biologia Tropical e Recursos Naturais) – Setor de Saúde, Universidade Federal do Amazonas.

MENDONÇA, J. R. Remanescentes da Mata Atlântica – Extremo Sul da Bahia: QUADRO Nº.01 – ANO 1945: Fotografias Aéreas Recobrimento Trimetrogon Voo feito pela UNITED STATES – AIR FORCE, Acordo Cartográfico Brasil – U.S.A. – 1943 / 1945. QUADRO Nº.02 – ANO 1960: Fotografias Aéreas verticais pancromática, Voo feito pelos serviços Aéreos Cruzeiro do Sul - RJ, 1959 / 1960 – Convênio Petrobrás Escala – 1:25.000 - 1945 / 1960. QUADRO Nº.03 – ANO 1974: Fotografias Aéreas verticais pancromática, Voo feito pelos Serviços Aéreos Cruzeiro do Sul e Geofoto - RJ – 1973 / 1974, Escala - 1:108.000 - 1960 / 1974. QUADRO Nº.04 – ANO 1990: Redução e adaptação das folhas, 1:250.000. Denominadas Guaratinga (SE – 24 – V – B/X - A) e Nanuque (SE – 24 – V – D); Elaborados pelo convênio Fundação SOS - Mata Atlântica

– IMPE, com informações obtidas através da interpretação visual de imagens TM do sistema Landsat e apoio de campo - 1974 / 1990.

Miletto, E. M., Et.tall. **Introdução à Computação Musical**, Instituto de Informática - Laboratório de Computação & Música, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

MILLETTO, E.M.; COSTALONGA, L.L.; FLORES, L.V.; FRITSCH, E.F.; PIMENTA, M.S.; VICARI, R.M. Educação musical auxiliada por computador: Algumas Considerações e Experiências. **Novas Tecnologias**, Porto Alegre, V. 2(1), p. 1-11, 2004.

NEPOMUCENO, L. X. **Acústica Técnica**. São Paulo: Técnico Científica Industrial Ltda, 1968, 579p.

OLIVEIRA, F. G. R.de, Sales, A. **Efeito da densidade e do teor de umidade na velocidade ultra-sônica da madeira**, LaMEM, EESC-USP; DECiv, UFSCar, 2005.

PAIVA, G. O., **Análise modal vibroacústica da caixa de ressonância de uma viola caipira**. Campinas, Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) – Setor de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, 2013.

PANSHIN, A.J.; de ZEEUW, C. The physical nature of wood. **Textbook of wood technology**. New York: McGraw-Hill Book, 1970. chap 7, p. 237-275.

PINTO, H. **O violão no Brasil**. Disponível em: <http://www.grupos.com.br/blog/finaleforumbr/permalink/23135.html> acessado em Jul. 2014.

Ronan, C.A. **Historia Ilustrada das Ciências**, Universidade de Cambridge (Ed. Zahar, 1987);Raichel, D.R. The Science and applications of acoustics(2nd ed. Springer, 2006.

RODRIGUES, **Estudo florístico e estrutural da comunidade arbustiva e arbórea de uma Floresta em Luminárias**, MG, e informações etnobotânicas da população local, 2001.

SALI, S., **The influence of cutting on the acoustic properties of wood.** Ljubljana. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Setor de Tecnologia, 1997.

SAMPAIO, P. de T. B. Andiroba (*Carapa guianensis*). In: CLAY, J. W.; SAMPAIO, P. de T. B.; CLEMENT, C. R. **Biodiversidade Amazônica: exemplos e estratégias de utilização.** Manaus: Programa de Desenvolvimento Empresarial e Tecnológico. 2000.p. 243-251.

SHANLEY, P.; CYMERYYS, M.; GALVÃO, J. **Frutíferas da mata na vida amazônica.** Belém: Supercores, 1998, 125p.

SILVA, M. M.; RAPOUSA, A; SOUZA, J.A.; MIRANDA, E.M. Germinação e crescimento de mudas de andiroba (Carapasp) em função do tamanho da semente e tempo de imersão em água. **Revista Ciência Agronômica**, V.35(2), p. 366-370, 2004.

SILVA, R. F. **Diagnóstico das espécies mais utilizadas e alternativas para utilização nas serrarias localizadas na regional do Baixo Acre.** Rio Branco, 2002. Tantas f. Dissertação. (Mestrado em Ecologia e Manejo de Recursos Naturais) – Setor de Agrárias, Universidade Federal do Acre.

SILVA, S. **Árvore da Amazônia - Brasil.** São Paulo: empresa das artes, 2006.

SLOOTEN, H. J. V. D., SOUZA, M. R. **Avaliação das Espécies Madeireiras da Amazônia Selecionadas para a Manufatura de Instrumentos Musicais.** Manaus – Amazonas, INPA 1993, 72p.

SOUZA, C. S; ALVES, S. A; HANSEN, D. S; FONSECA, A. A. O. Correlações entre Caracteres Físicos e Químicos de Jenipapeiros Nativos do Recôncavo Baiano. **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, V.5(2), p. 270-272, 2007.

SOUZA, C. N. **Caracterização física, físico-químicas e químicas de três tipos de jenipapos (*Genipa americana* L.).** , Ilhéus, 2007. 72f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual de Santa Cruz.

SOUZA, M.R. de. **Classificacao de madeiras para instrumentos musicais.** Brasília: IBDF. Departamento de Economia Florestal, Laboratorio de Produtos

Florestais, 1983. 21p. (IBDF. Série técnica, 6). Embrapa Amazônia Oriental; Embrapa Florestas.

STOPPA, M. H., TEIXEIRA, Alexandre S. **Transformada de Fourier Aplicada à Análise Espectral de Notas e Acordes Musicais** In: SIMPÓSIO DE MATEMÁTICA E XV JORNADA DE MATEMÁTICA DE CATALÃO, Catalão, 2004.

SWAINE, M. D.; WHITMORE, T. C., **On the definition of ecological species groups in tropical rain forests**, Scotland, The University, Aberdeen, 1988. WHITMORE, T. C., & Oxford Forestry Institute, Department of Plant Sciences, South Parks Road, Oxford, England, 1989.

TABORDA, M. E. **Violão e identidade nacional: Rio de Janeiro 1830/1930**; Rio de Janeiro, 1997. 92f. Dissertação (Mestrado em música) Universidade Federal do Rio de Janeiro.

TAYLOR, J. B.; CARRANO, A. L.; LEMASTER, R. L. Quantification of process parameters in a Wood sanding operation. **Forest Products Journal**. V. 49, n. 5, p. 41-46, 1999.

TEETER, E. **Temple – The Rule and Function of Temple Singers**, Janet JOHNSON, The Life of Meresamun – A Temple Singer in Ancient Egypt, Chicago, The Oriental Institute Museum Publications, 2009.

TINHORÃO, J. R. **Historia Social da Música Popular Brasileira**. São Paulo: 34, 1998, 365p.

VELOSO H.P., RANGEL FILHO A.L.R., LIMA J.C.A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE (Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), 1991, 124p.

WEGST, G. K. Wood for sound. **American Journal of Botany**. V.93(10), p. 1439-1448, 2006.

WOODHOUSE, J. **What makes an object into a musical instrument?** Disponível em <http://plus.maths.org/content/what-makes-object-musical>, acesso mar 2015.

Wuensche, C. A., **A Física da Música**, IMPE, 2005.

WUENSCHÉ, C. A. **A física da música**. Itajubá. Monografia. Curso de Física, Setor de Tecnologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)- Divisão de Astrofísica, 1998.

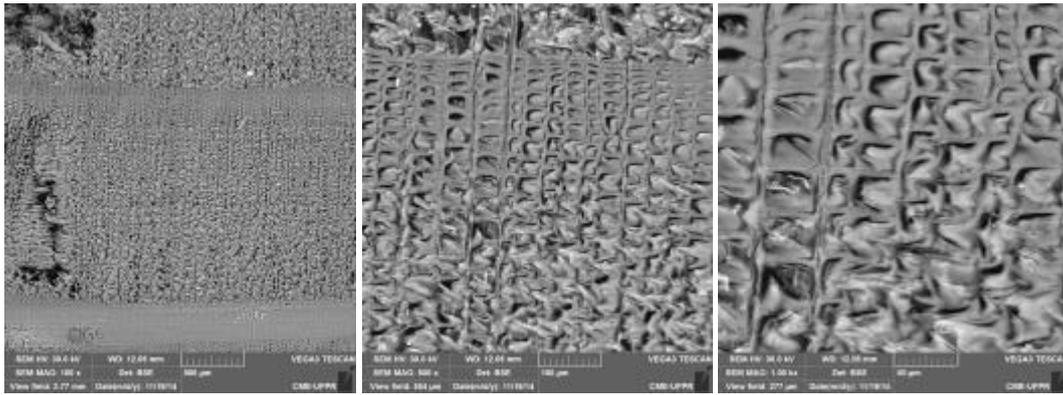
ZENID, G.J.; CECCANTINI, G.C.T. Identificação macroscópica de madeiras - Laboratório de Madeira e Produtos Derivados, Centro de Tecnologia de Recursos Florestais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, Setembro de 2007, 24p.

ZOBEL, B. J.; JETT, J. B. **Genetics of wood production**. Berlin: Springer-Verlag, 1995, 390p.

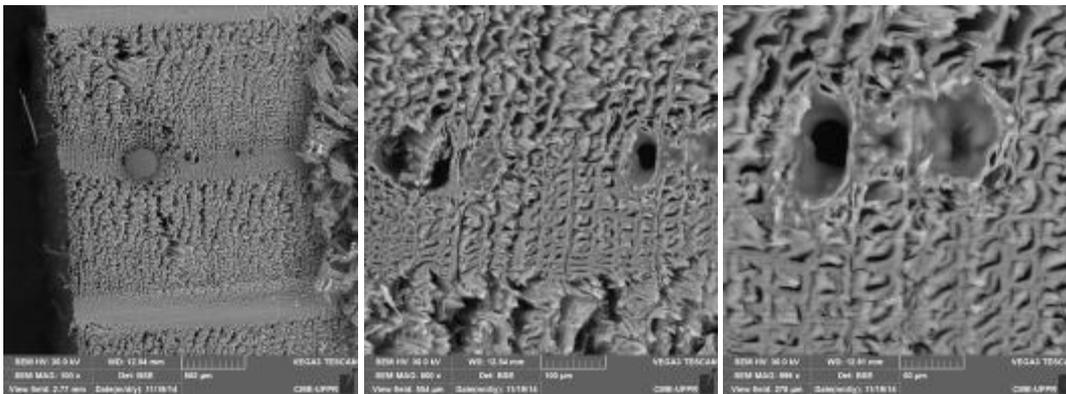
## **Apêndices:**

**Apêndice 1: Imagem de microscopia eletrônica de varredura das espécies analisadas**

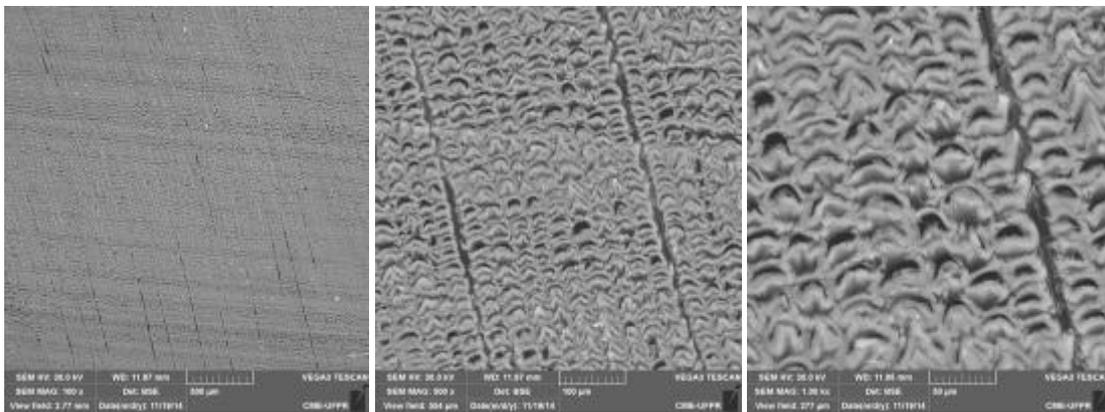
**ABETO (Amostra 1)**



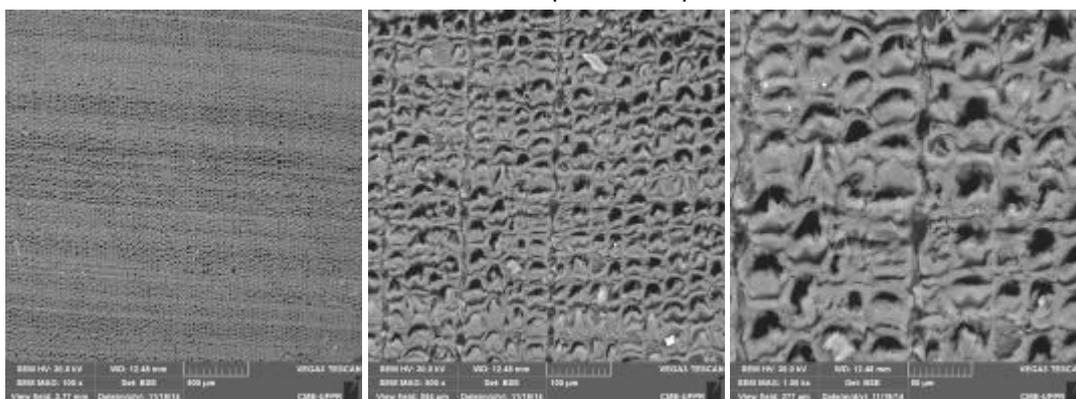
**ABETO (Amostra 2)**



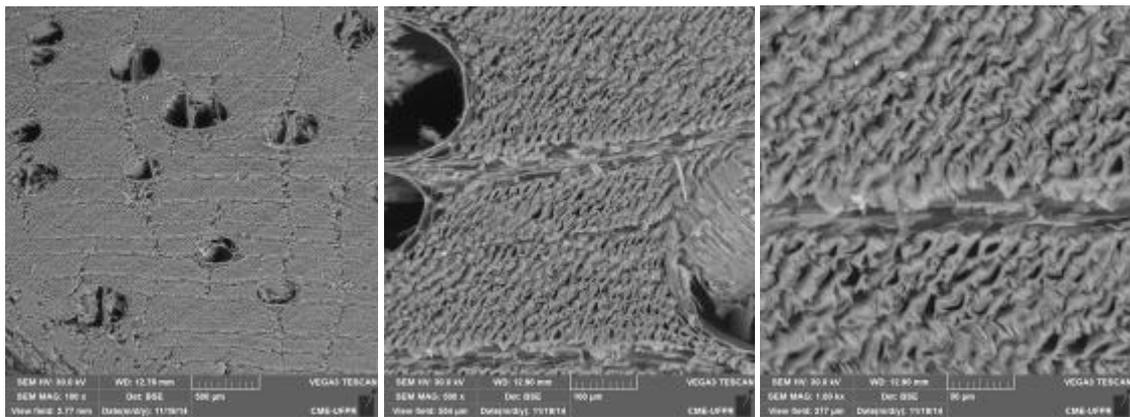
**ARAUCARIA (Amostra 1)**



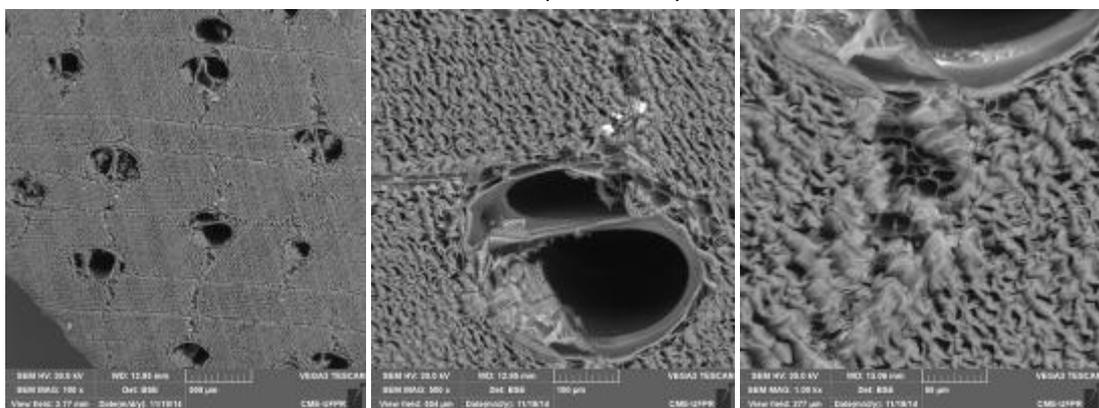
**ARAUCARIA (Amostra 2)**



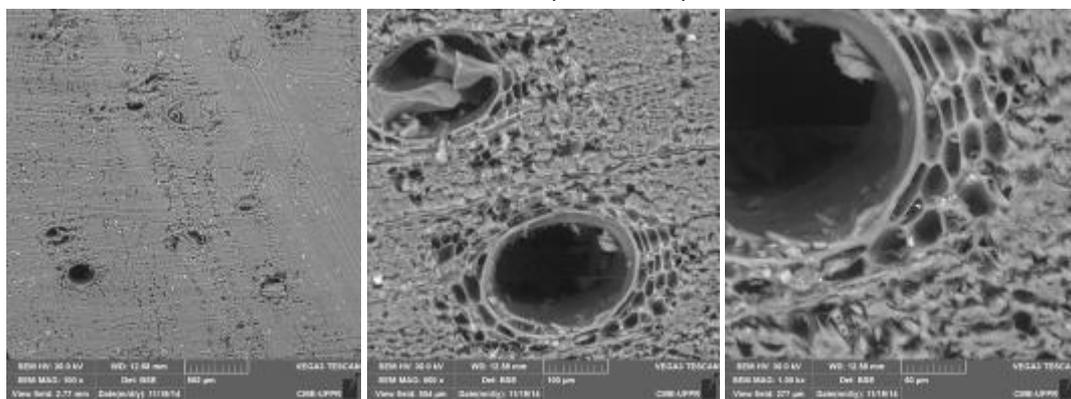
## MARUPA (Amostra 1)



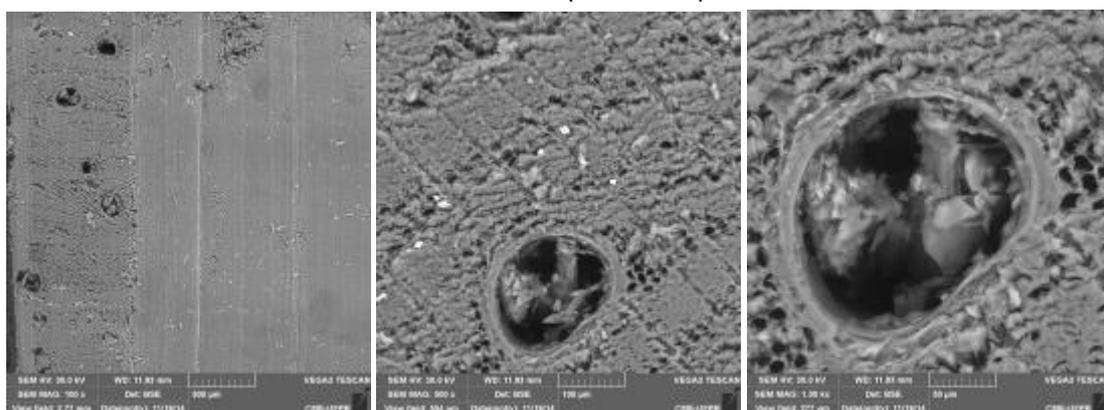
## MARUPA (Amostra 2)



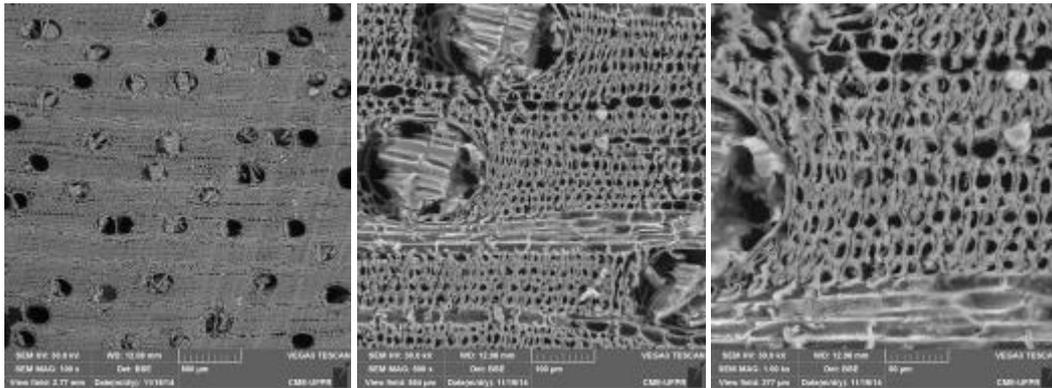
## JACARANDÁ (Amostra 1)



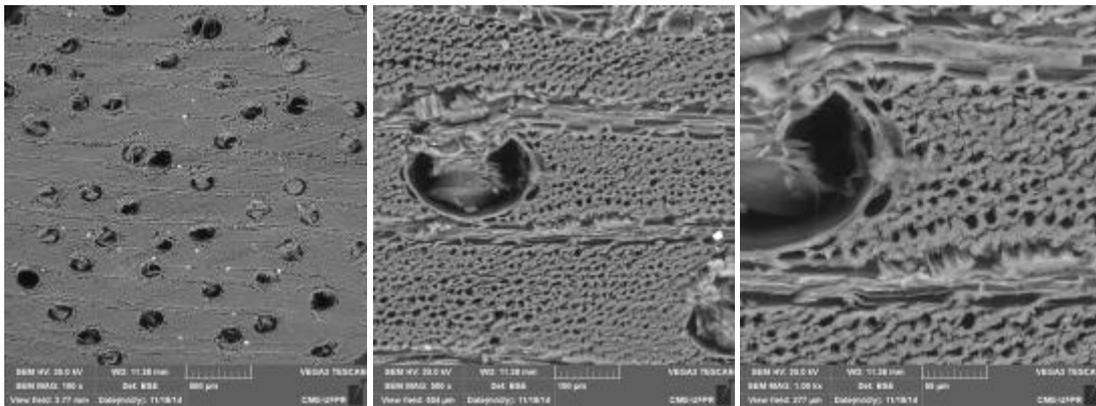
## JACARANDA (Amostra 2)



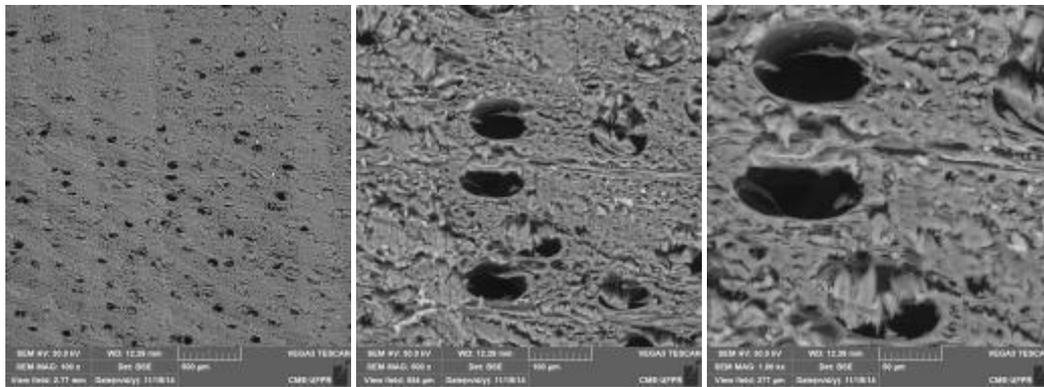
ANDIROBA (Amostra 1)



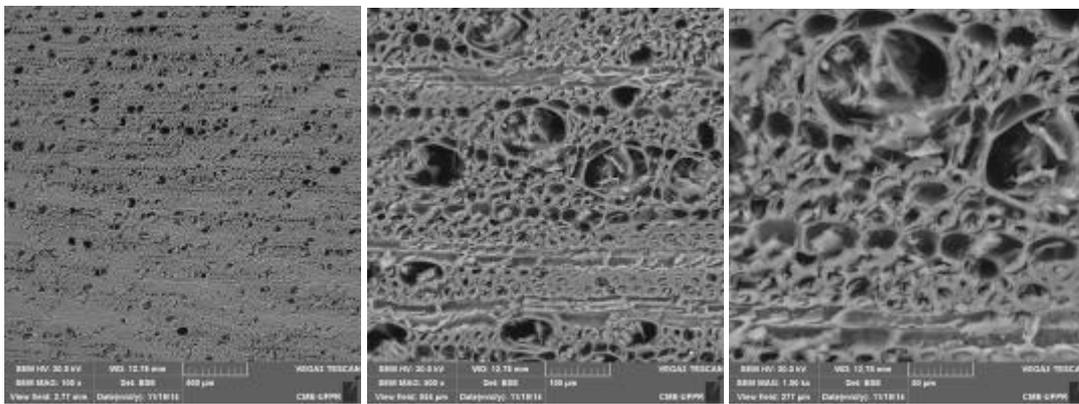
ANDIROBA (Amostra 2)



JENIPAPO (Amostra 1)

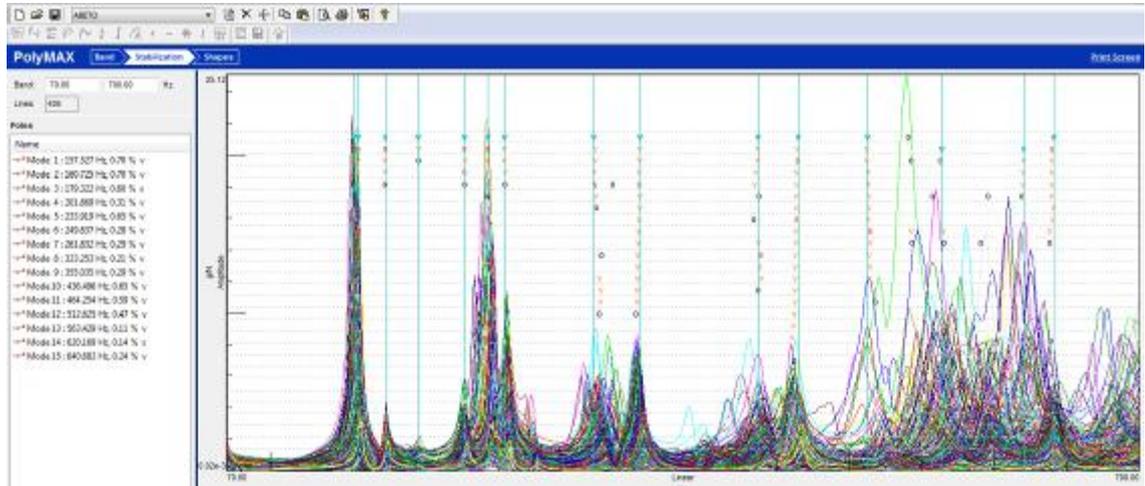


JENIPAPO (Amostra 2)

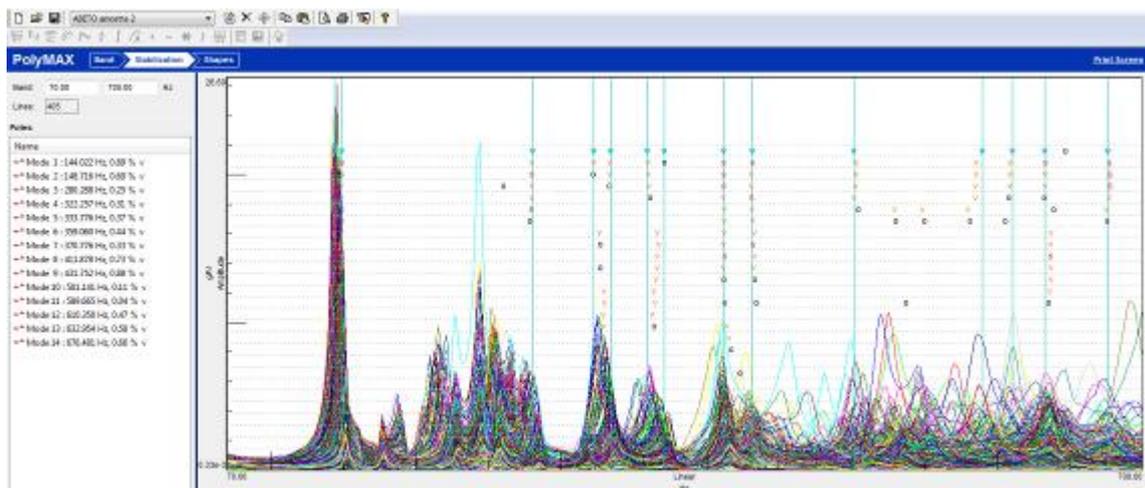


## Apêndice 2: Frequências do tempo na malha com 336 pontos e amostras com mesma espessura:

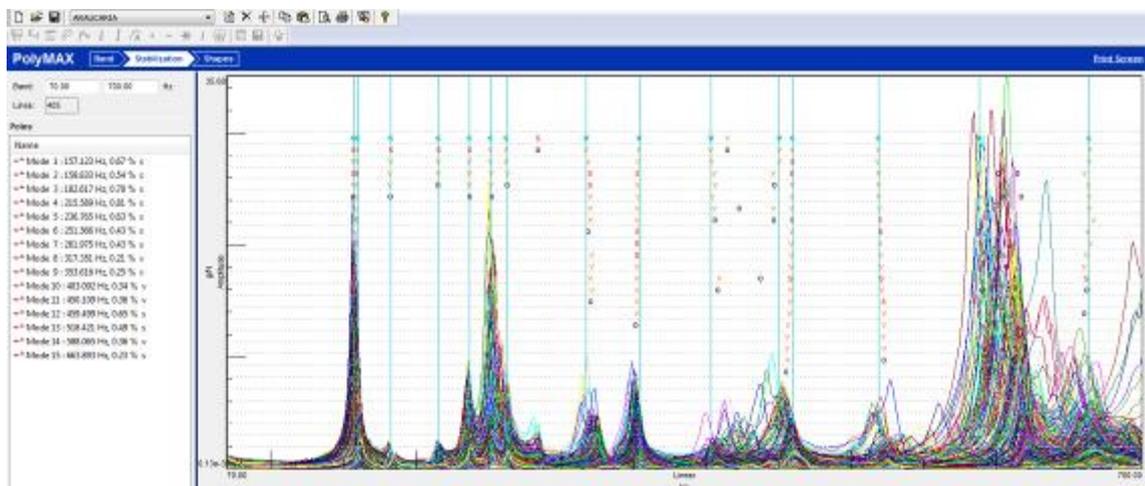
### ABETO 1



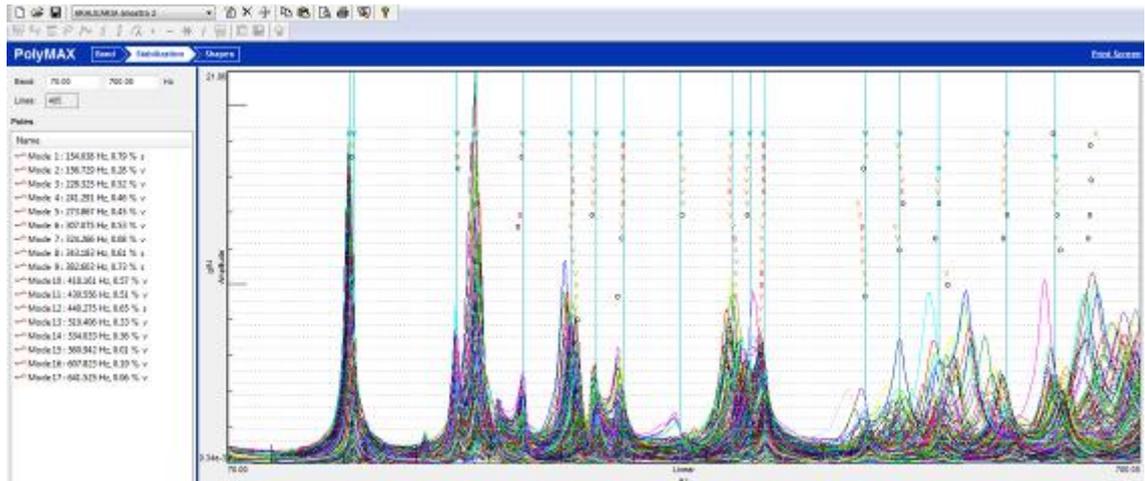
### ABETO 2



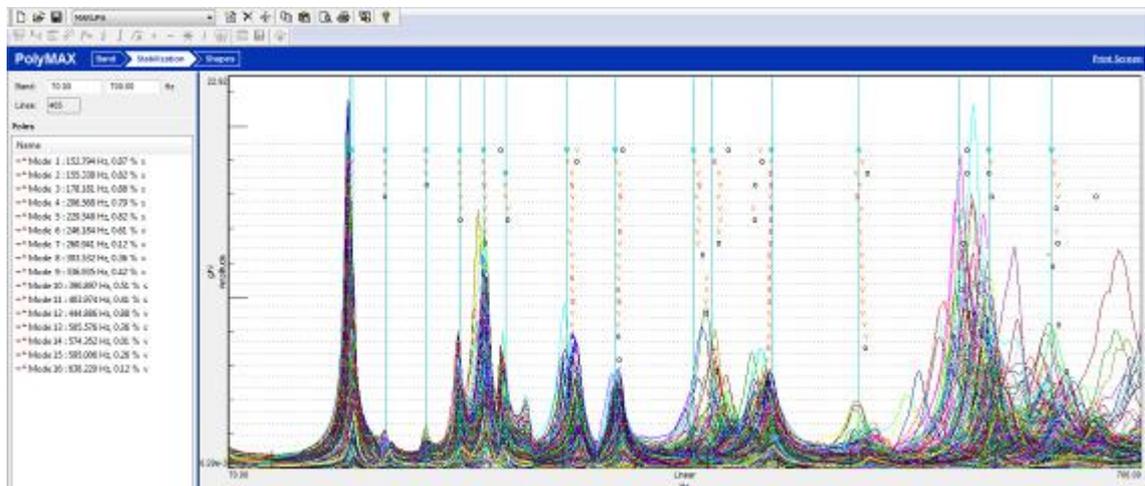
### ARAUCÁRIA 1



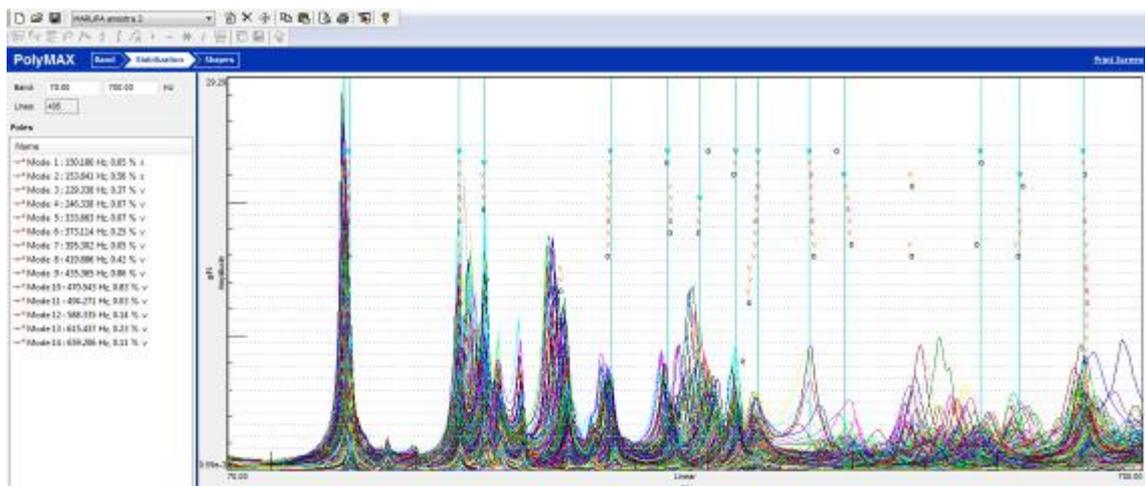
### ARAUCÁRIA 2



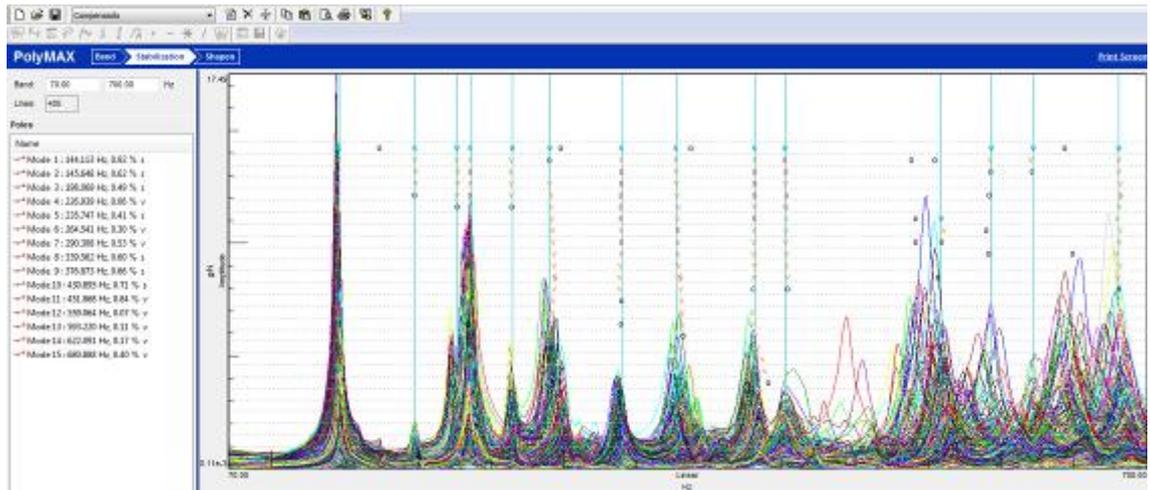
MARUPÁ 1



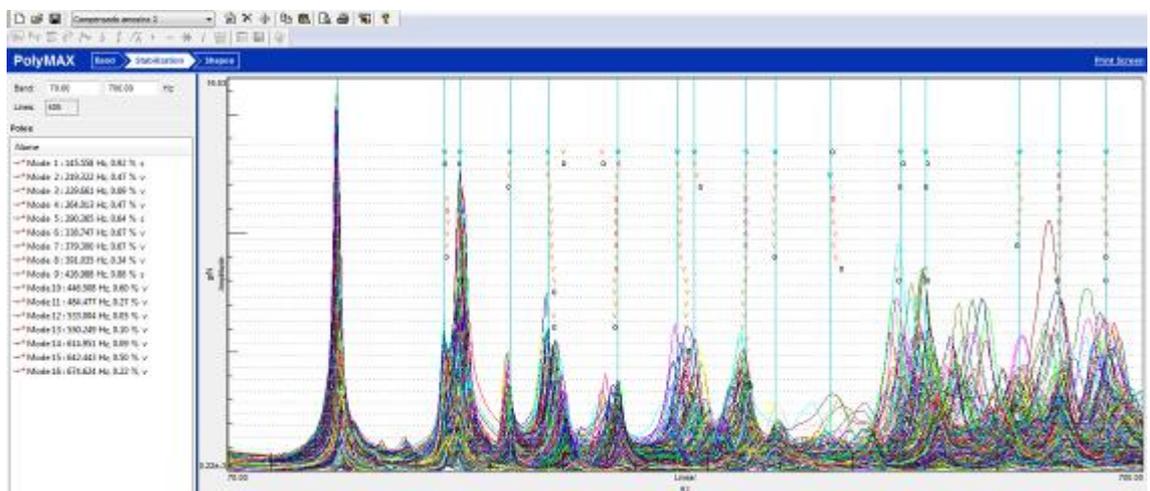
MARUPÁ 2



COMPENSADO 1

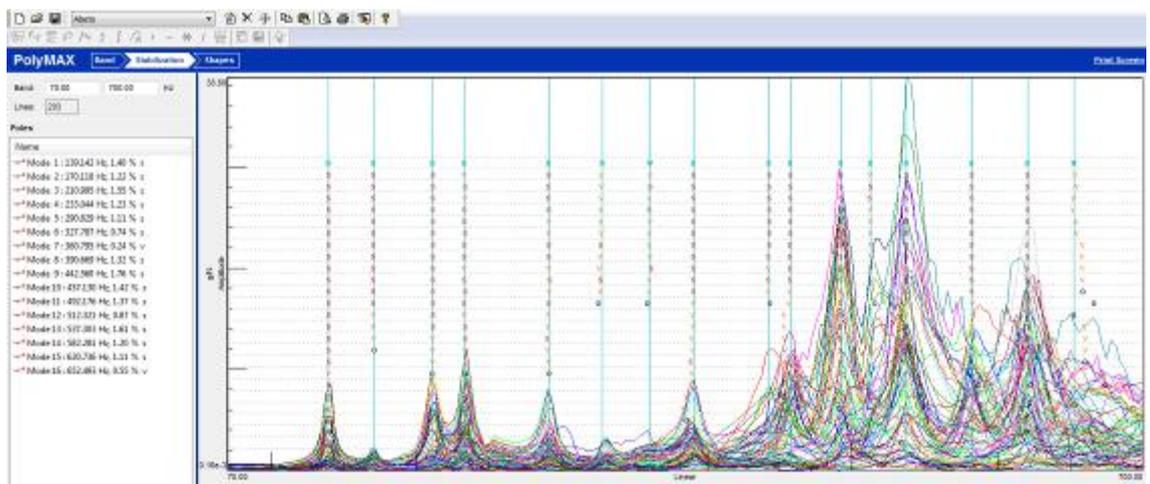


COMPENSADO 2

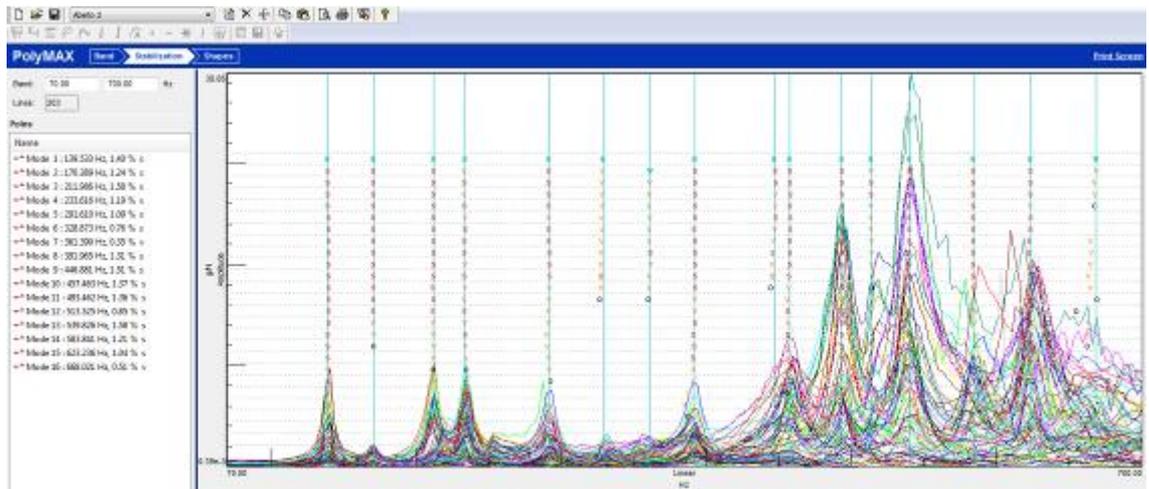


### Apêndice 3: Frequências do tempo na malha com 79 pontos e amostras com mesmo peso:

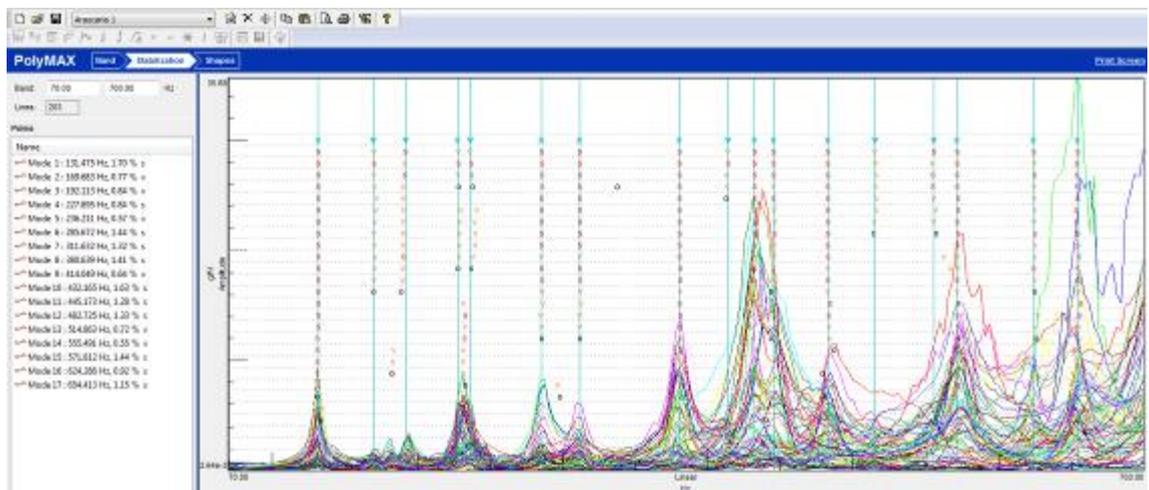
ABETO 1



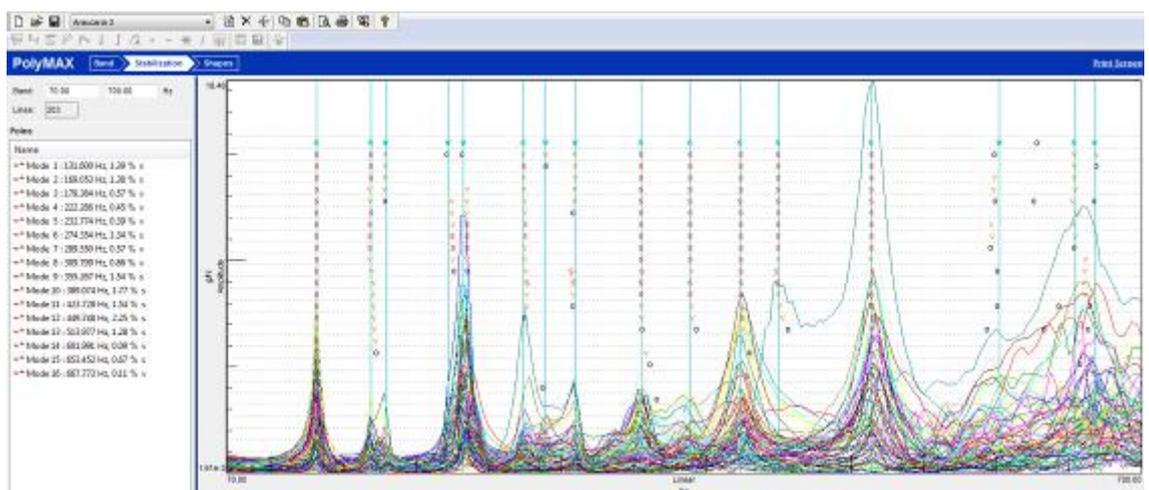
## ABETO 2



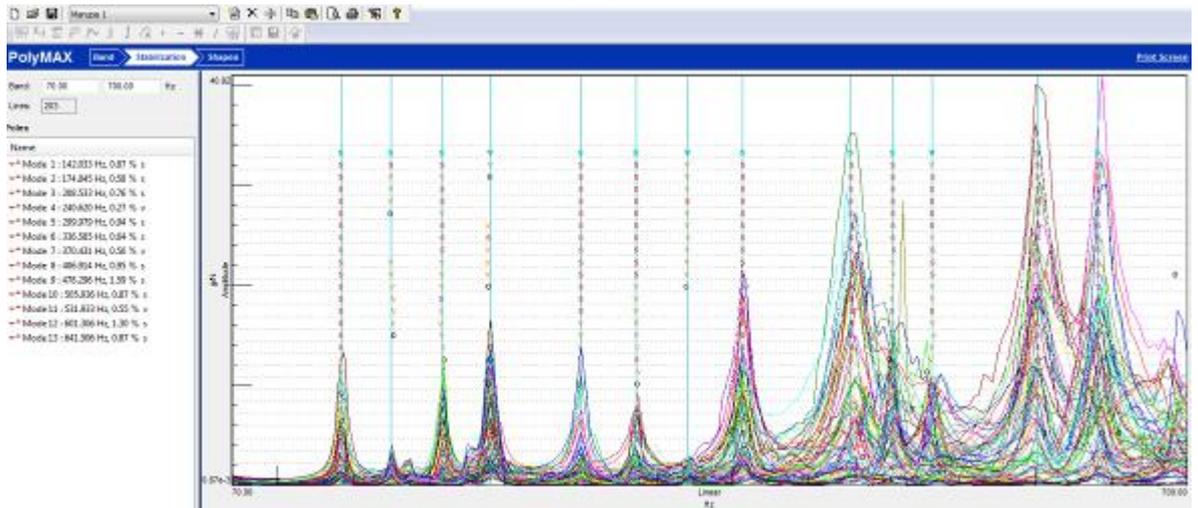
## ARAUCÁRIA 1



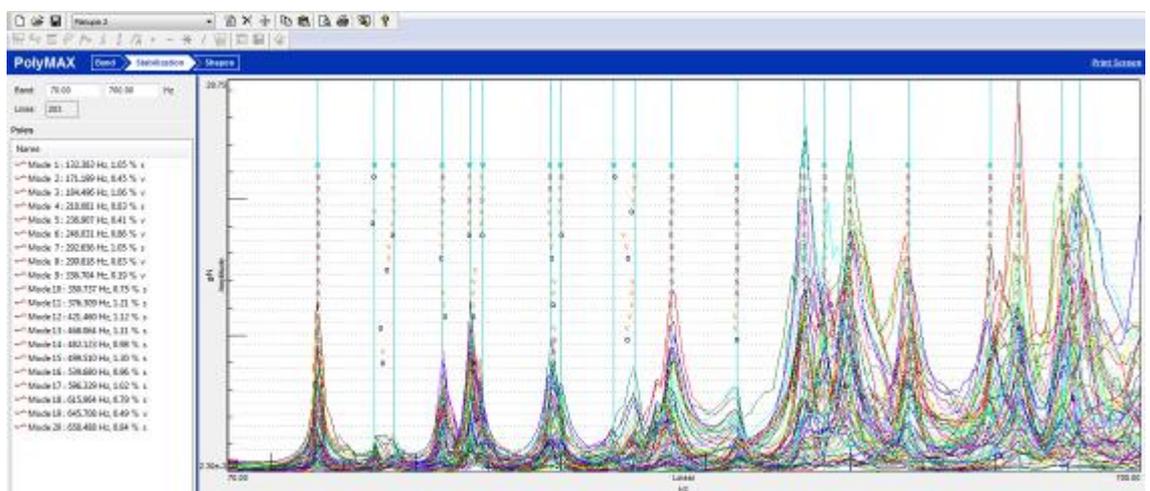
## ARAUCÁRIA 2



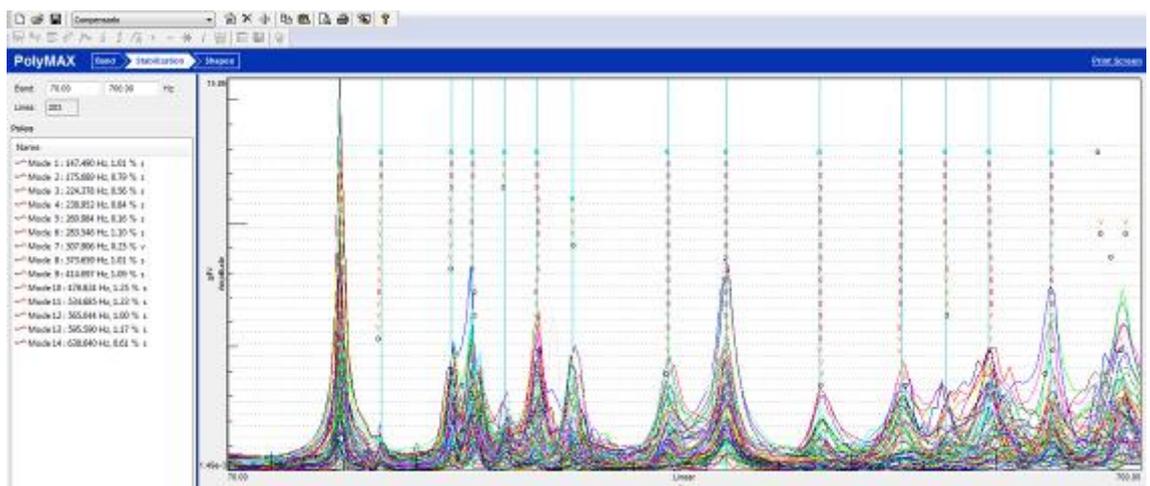
## MARUPA 1



MARUPA 2

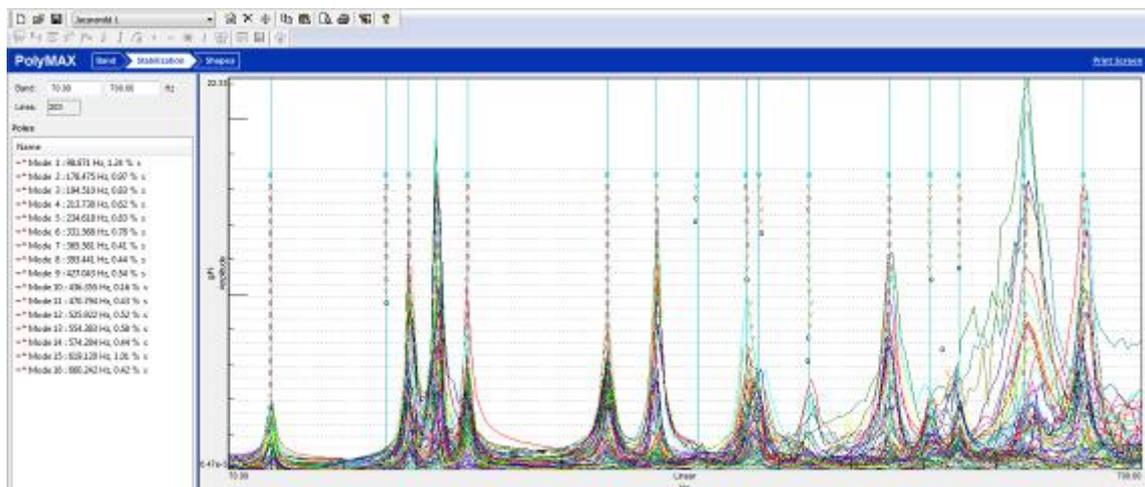


COMPENSADO

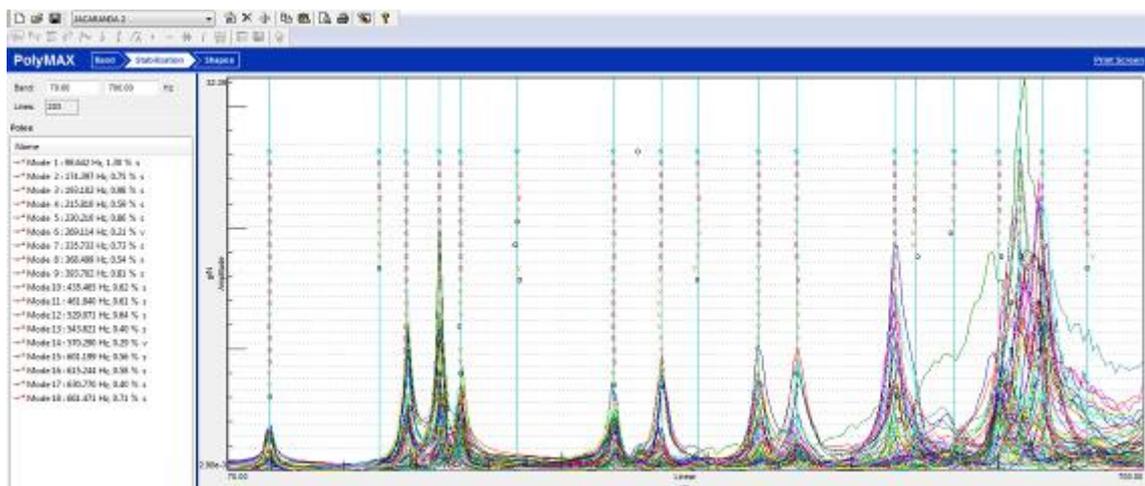


## Apêndice 4: Frequências do fundo com malha de 82 pontos e amostras com mesmo peso:

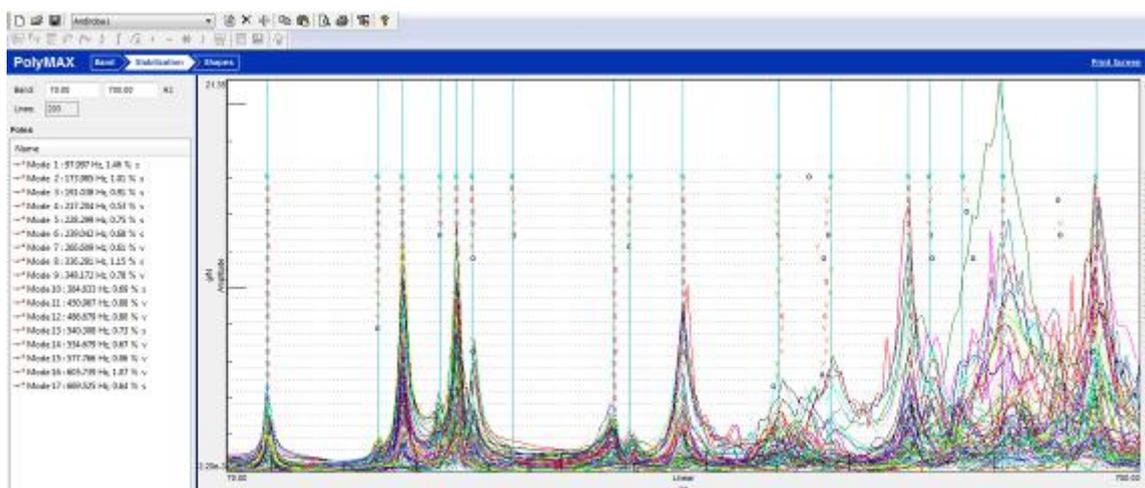
### JACARANDÁ 1



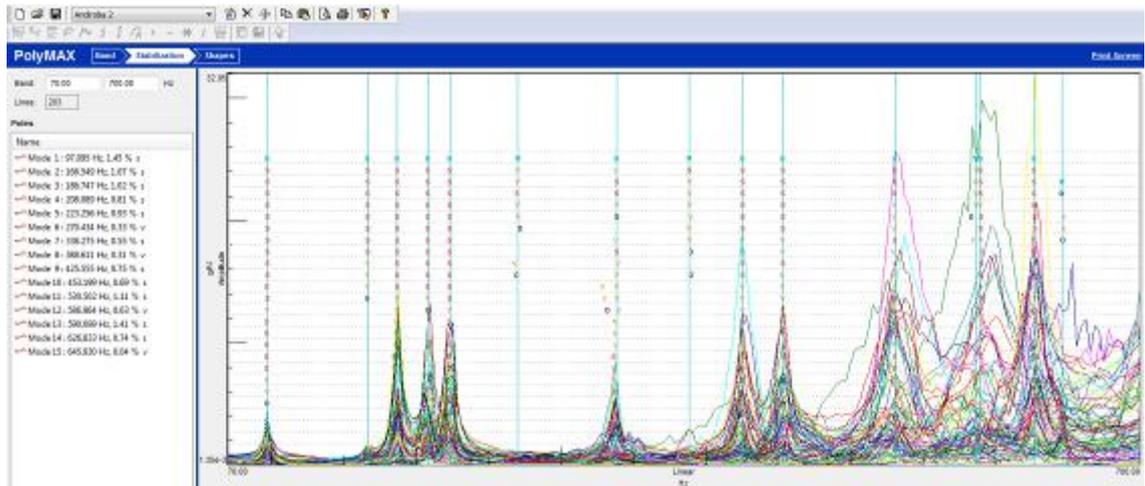
### JACARANDÁ 2



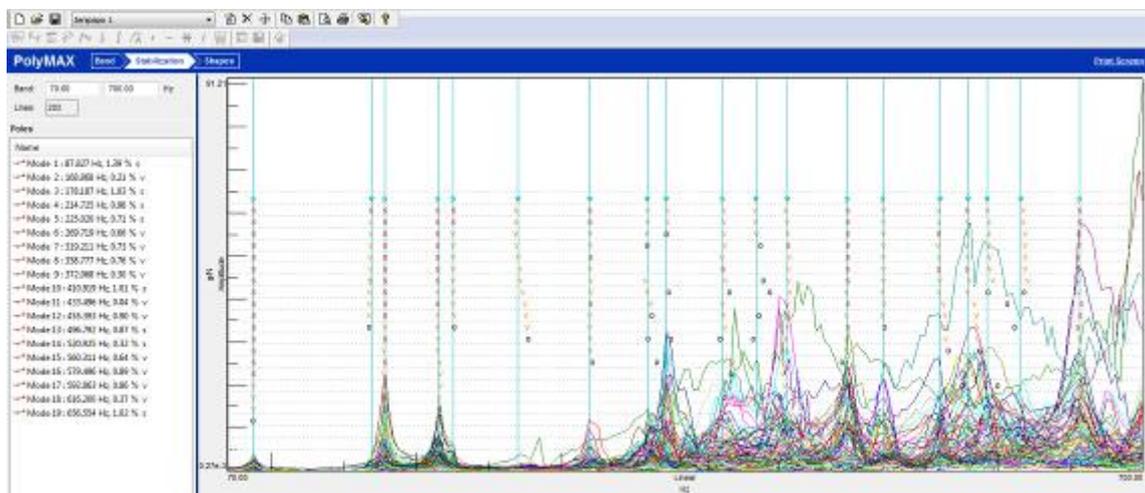
### ANDIROBA 1



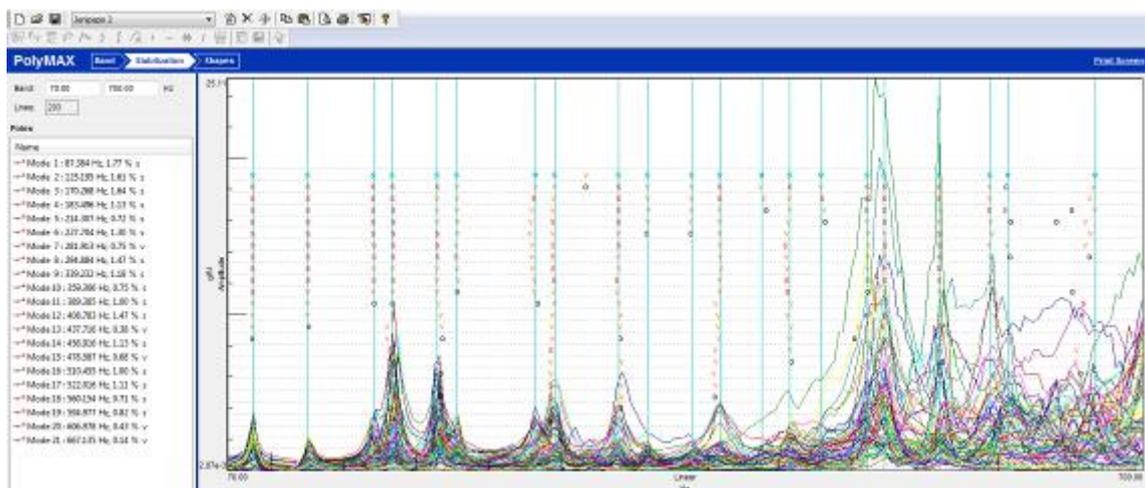
### ANDIROBA 2



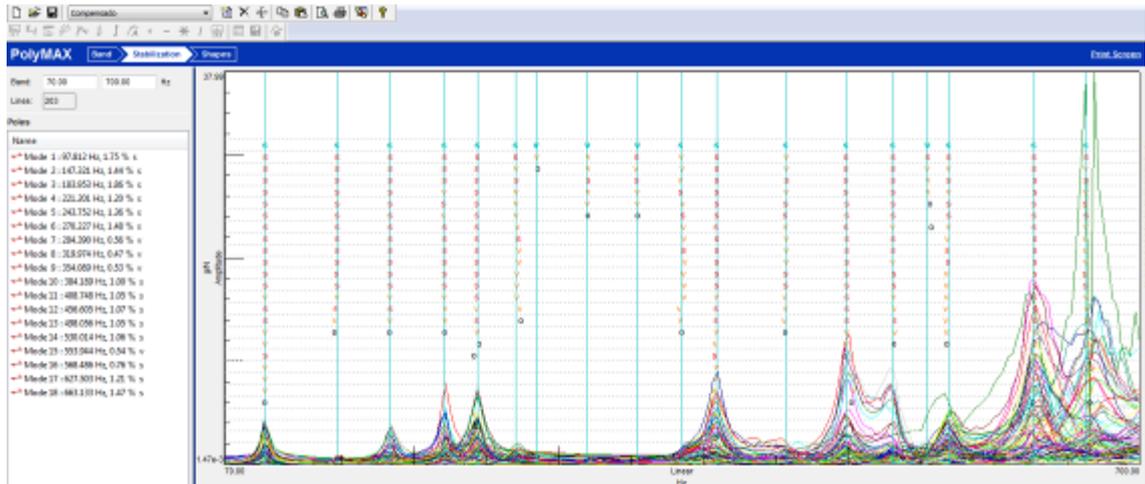
JENIPAPO 1



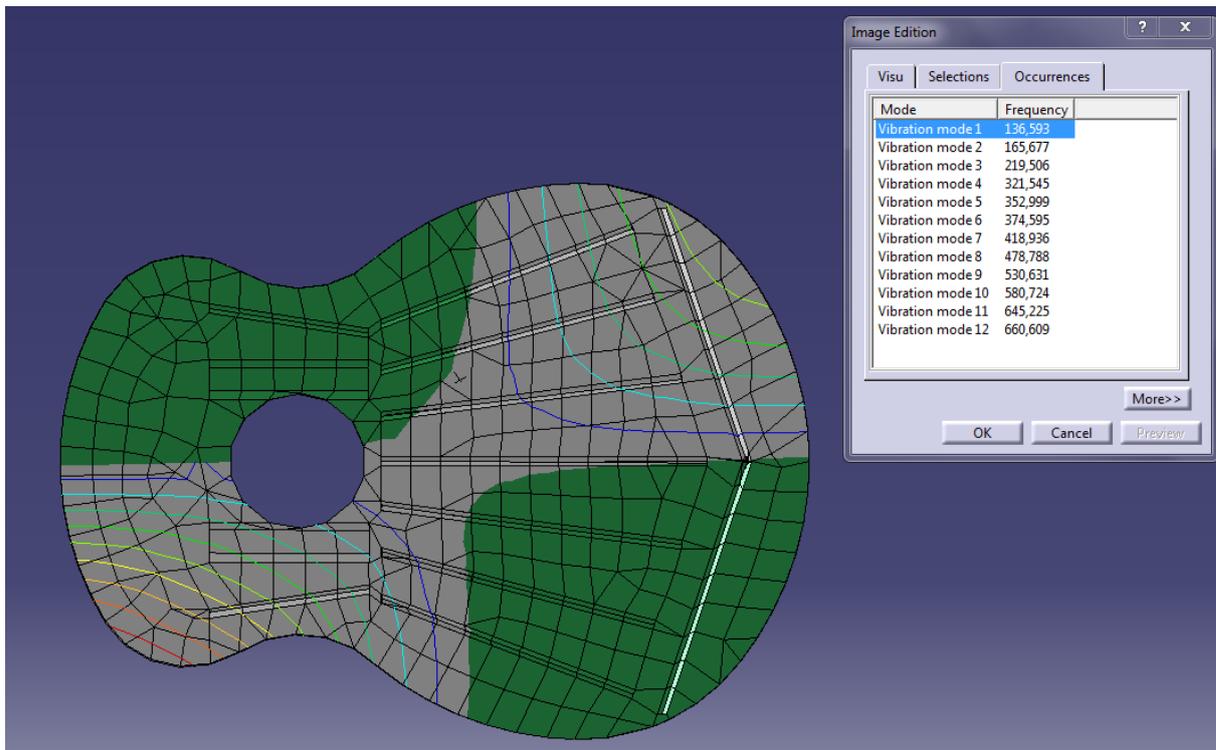
JENIPAPO 2

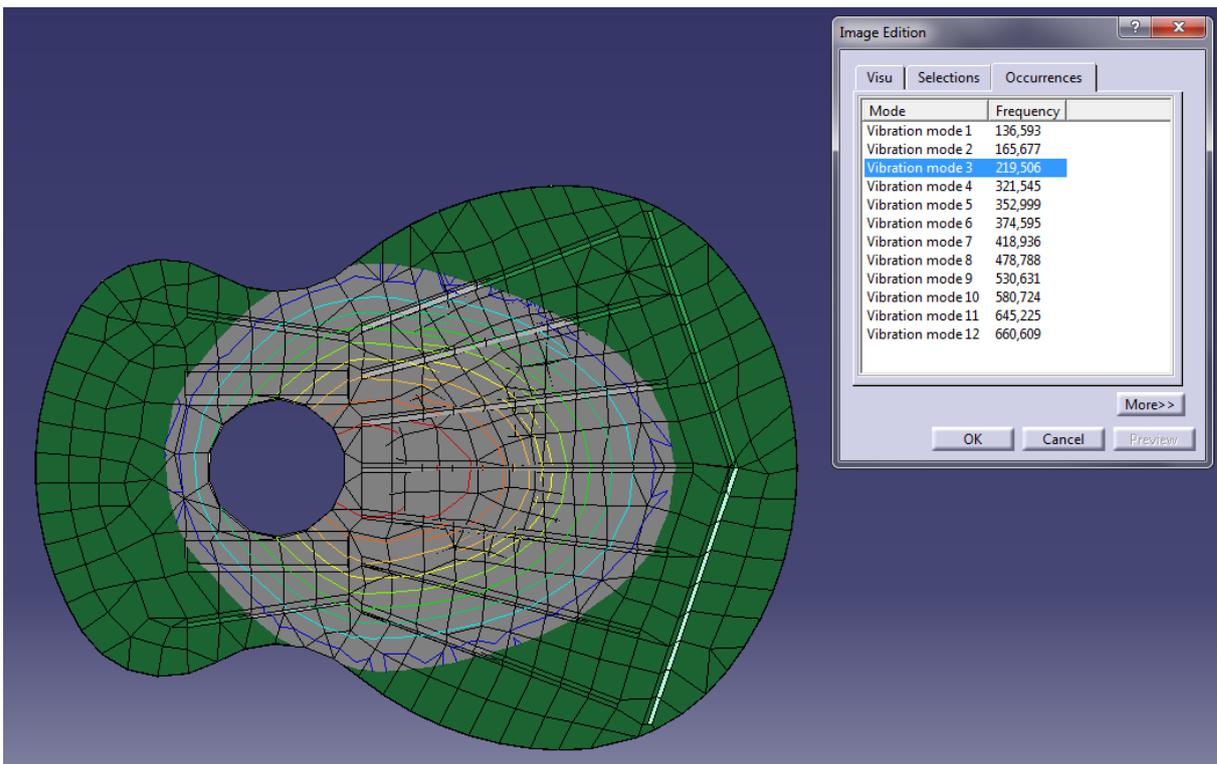
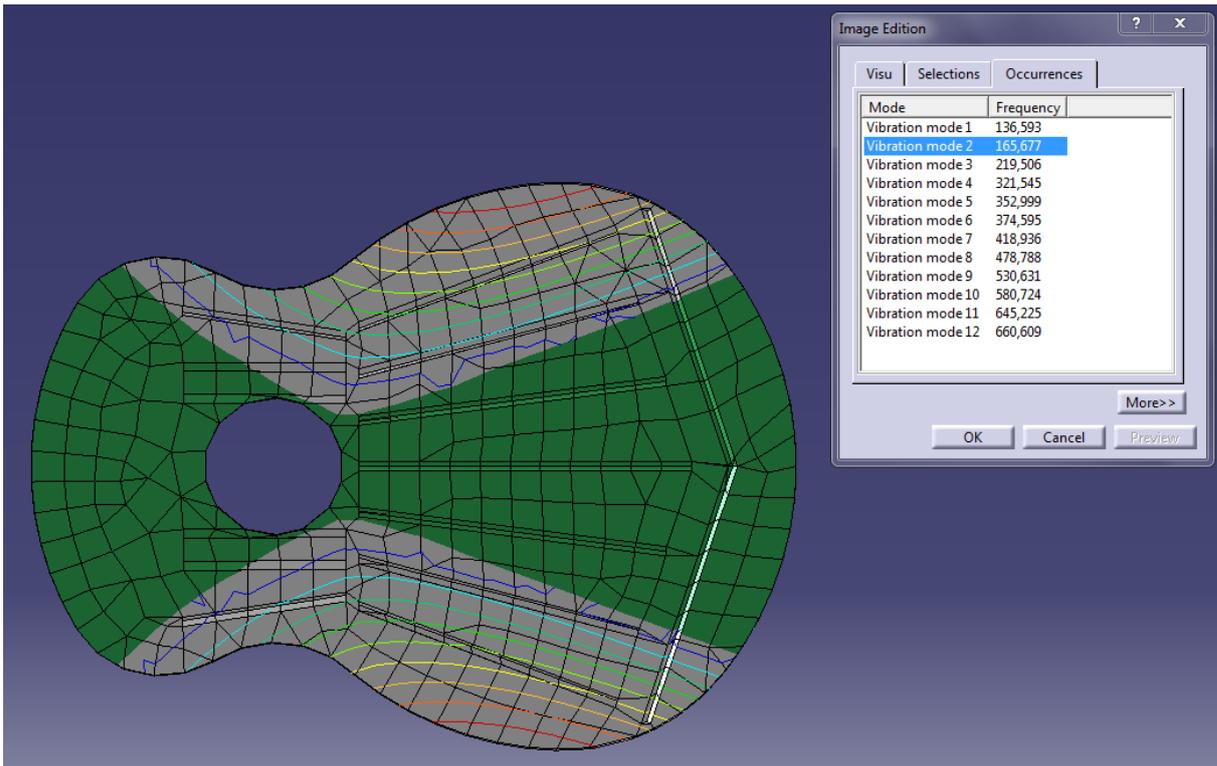


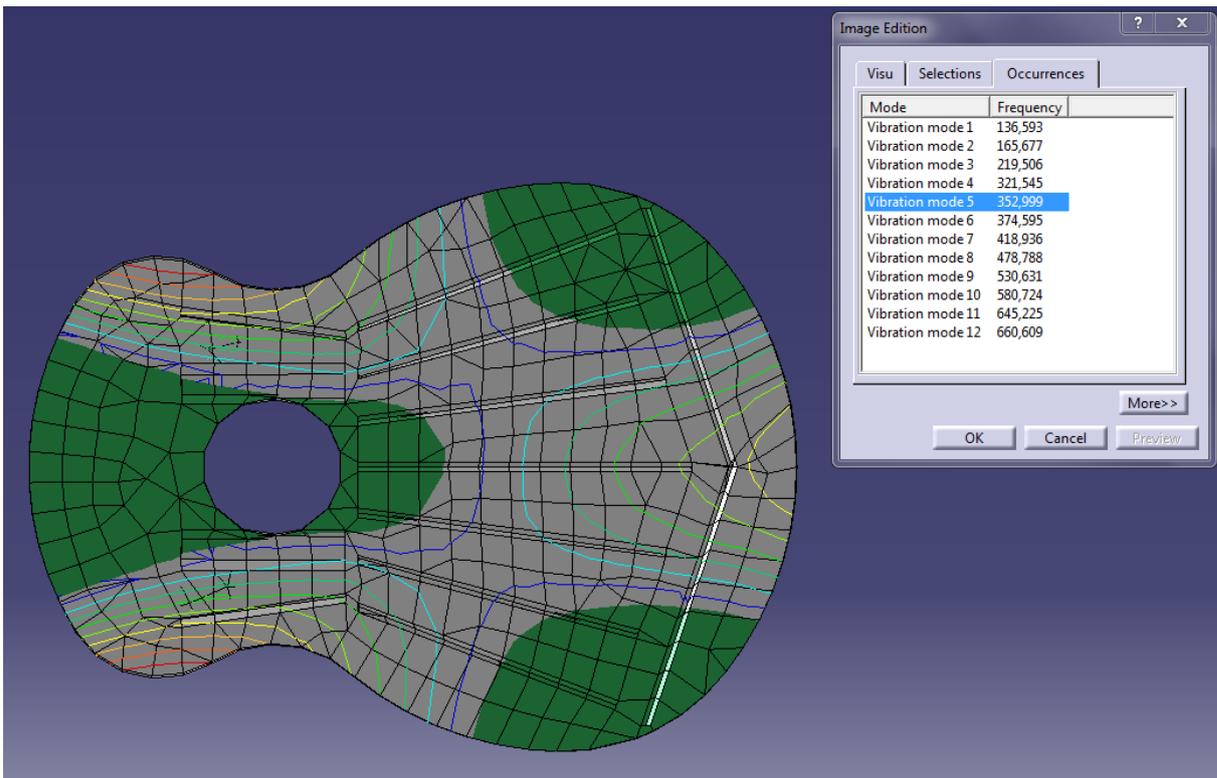
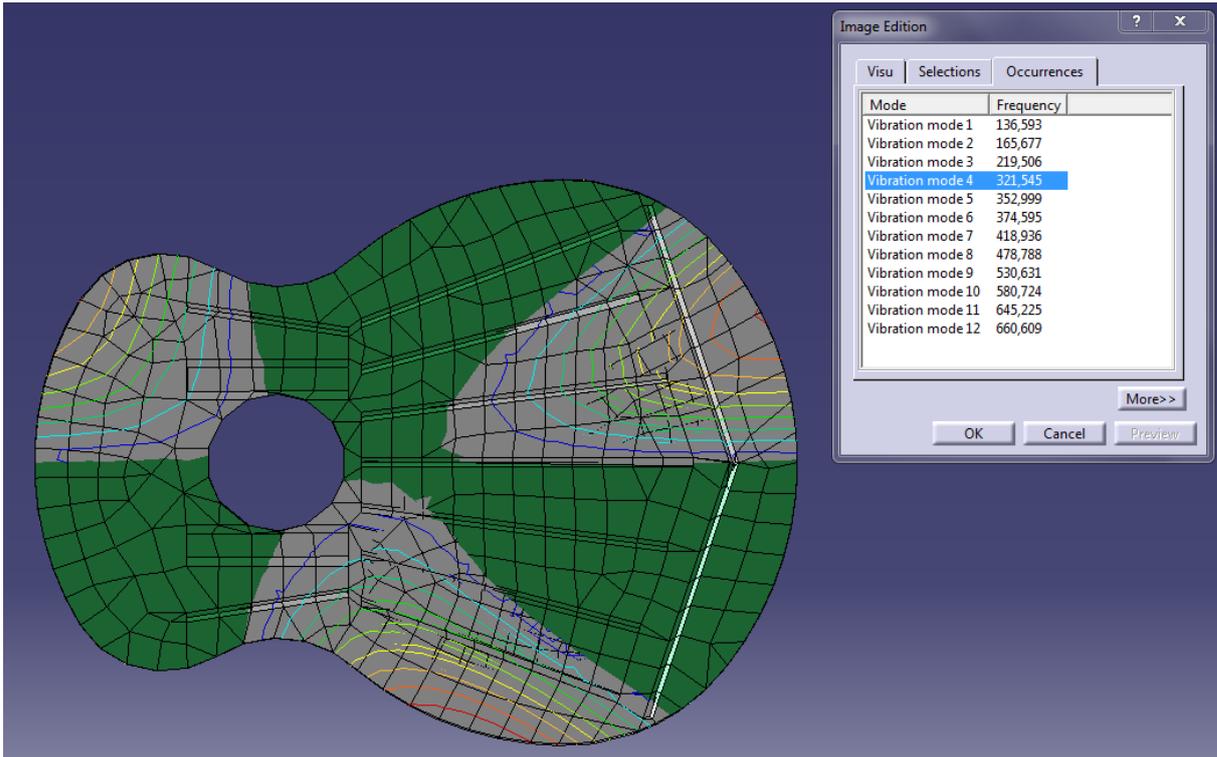
COMPENSADO

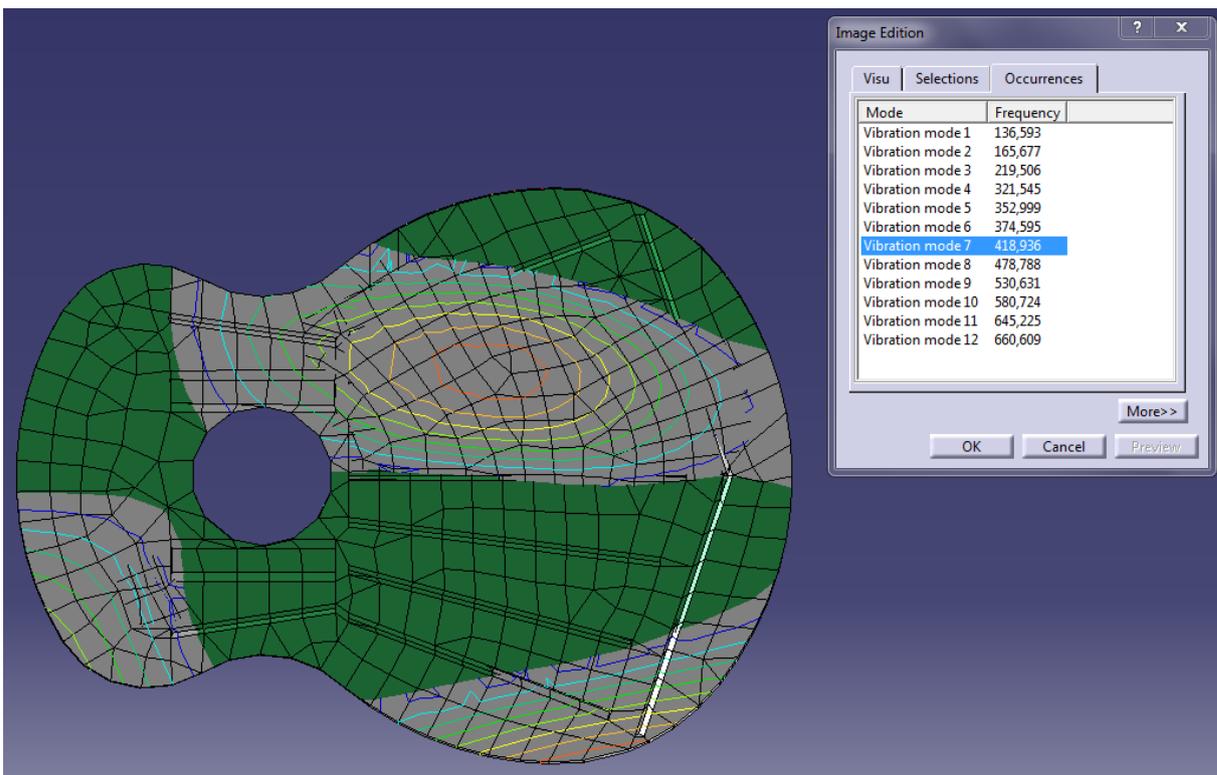
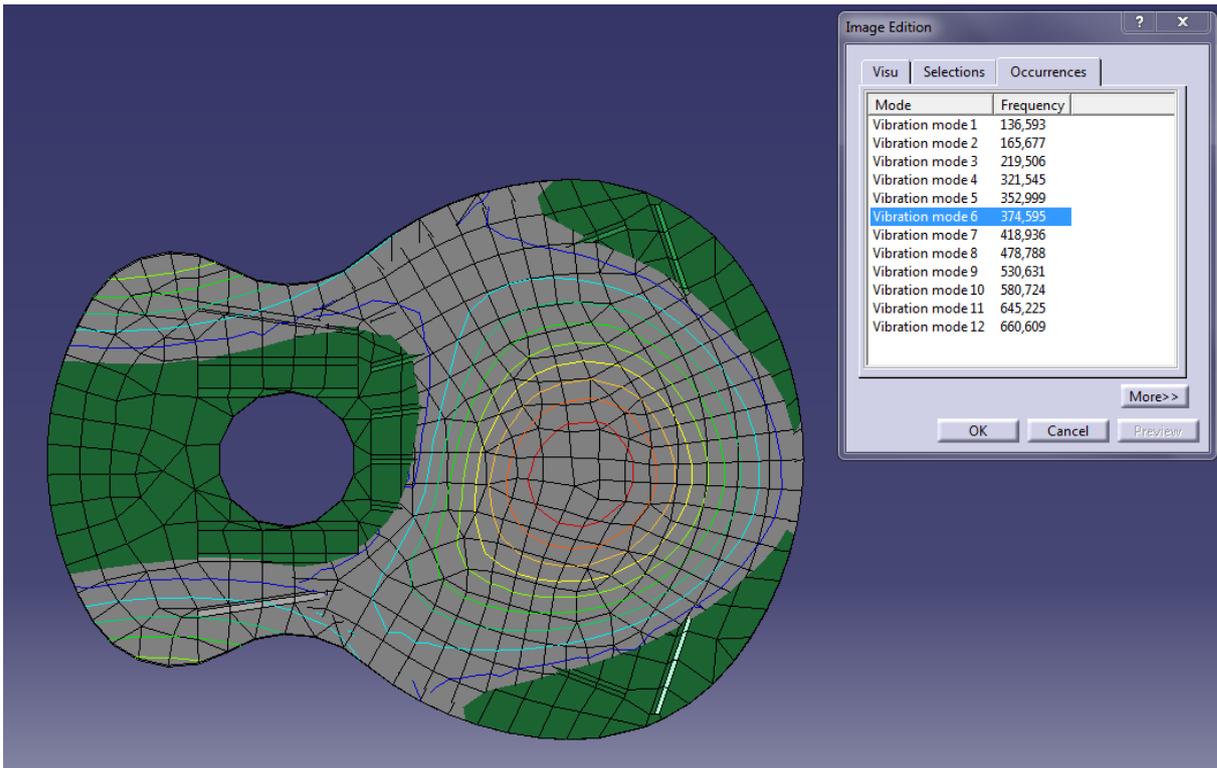


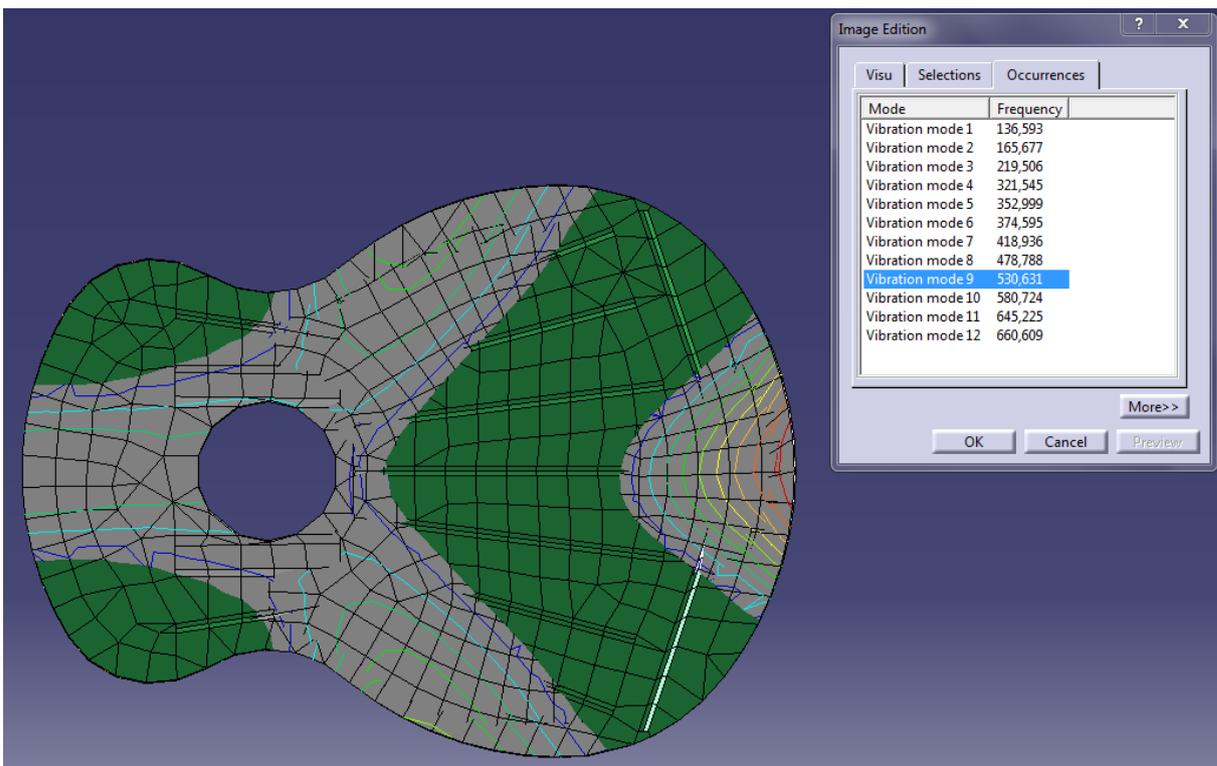
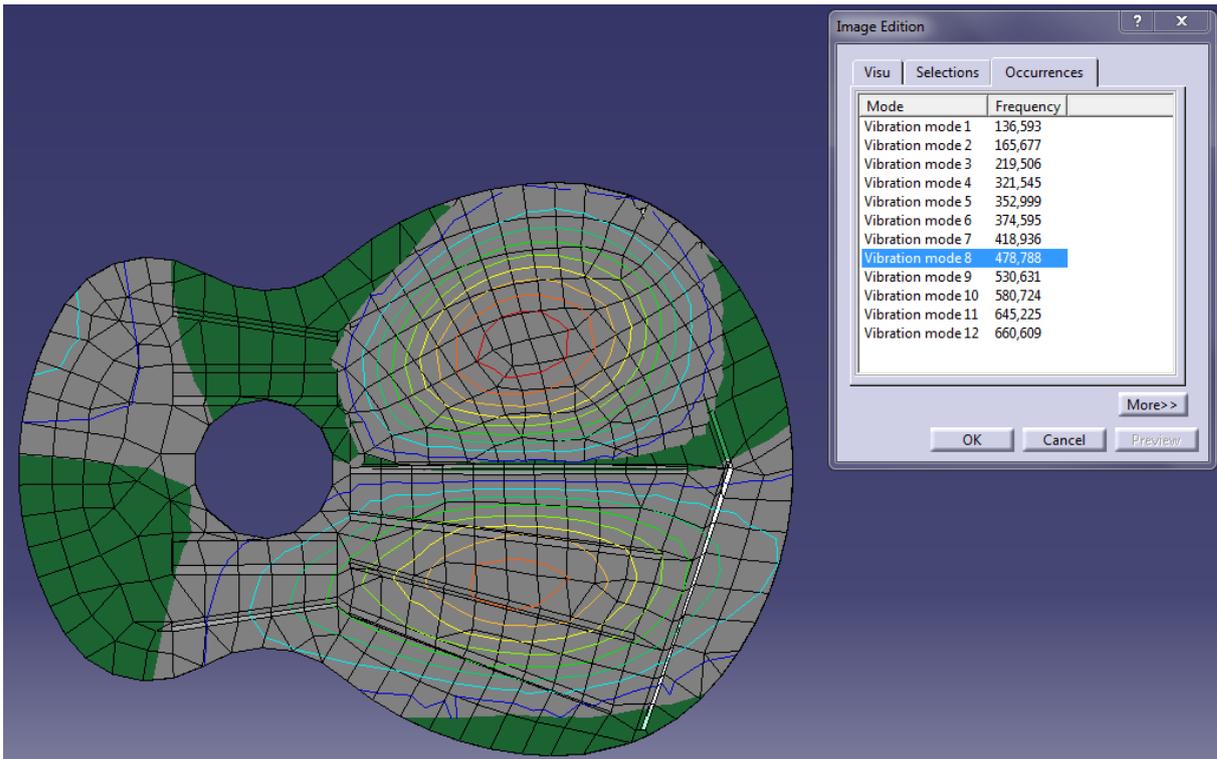
## Apêndice 5: Frequências naturais no material ortotrópico

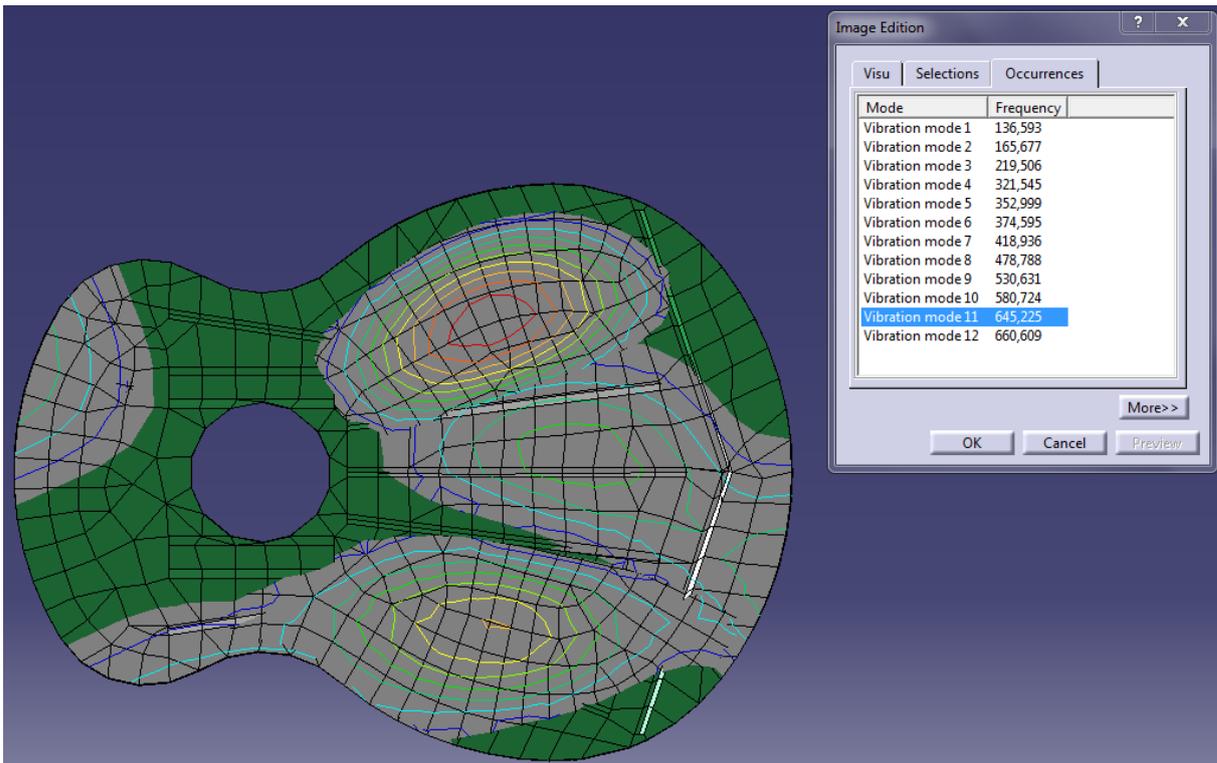
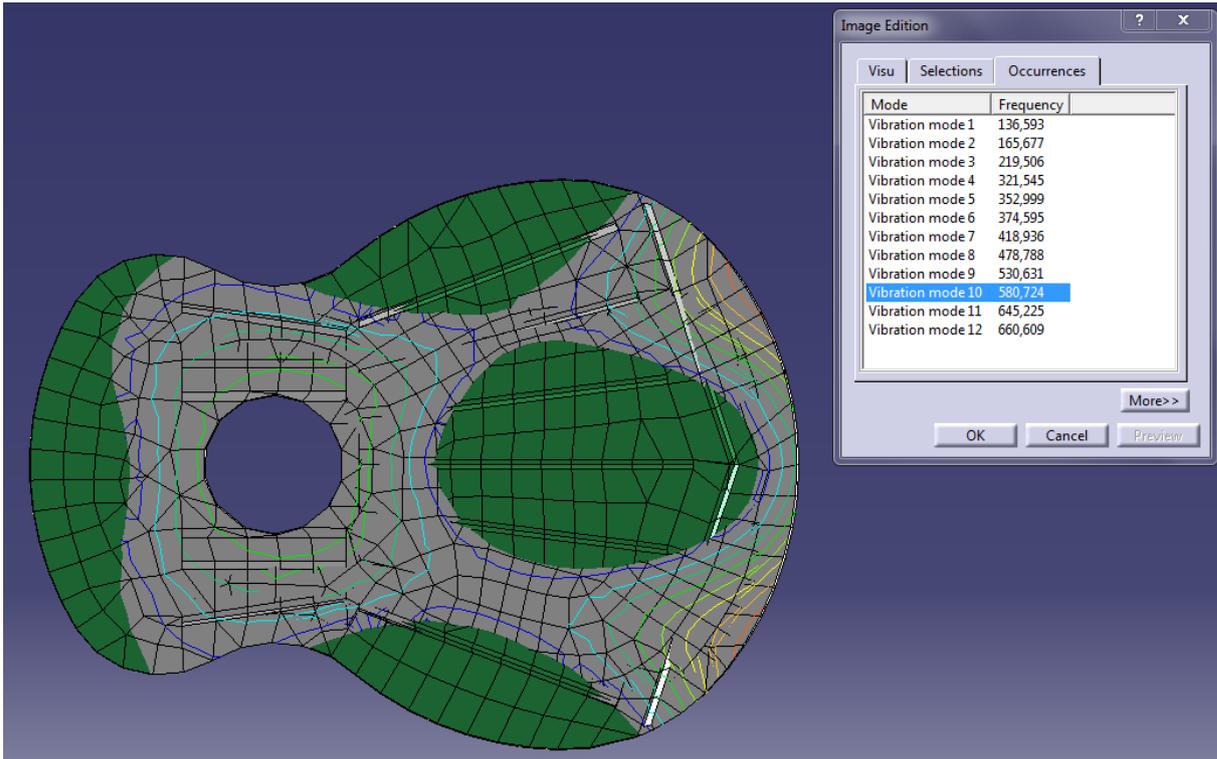


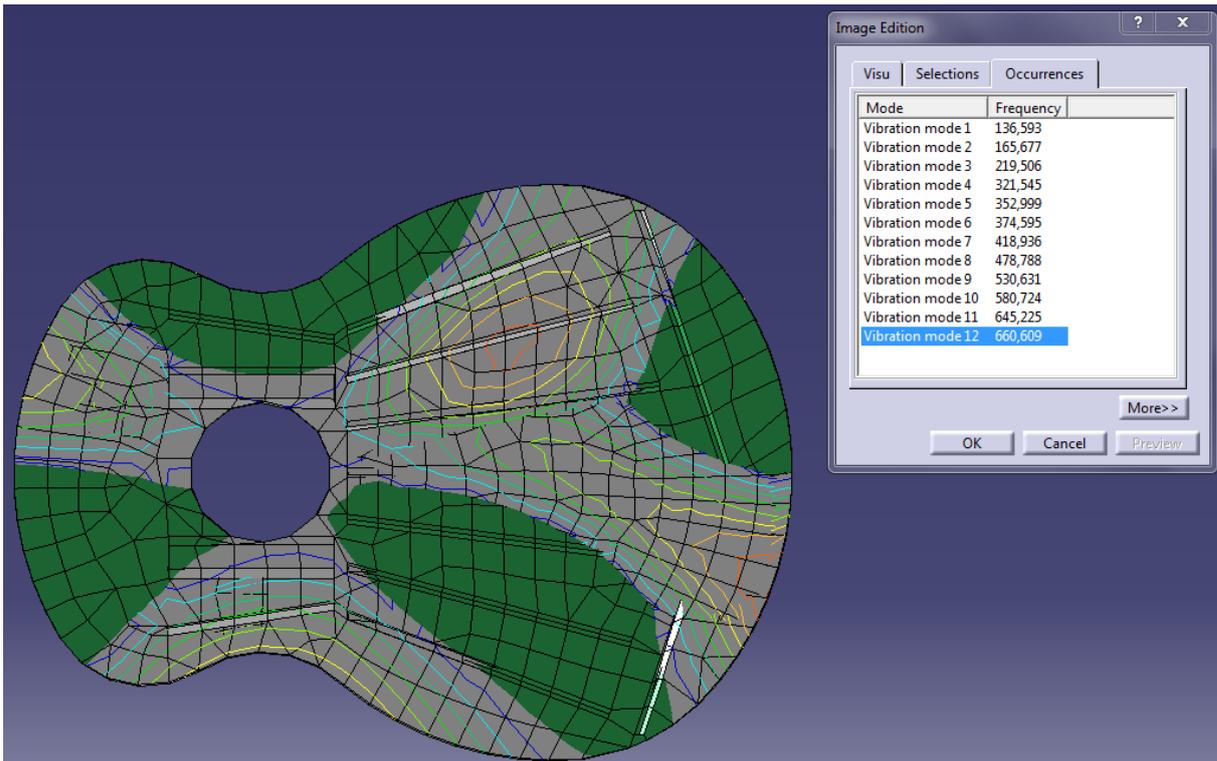




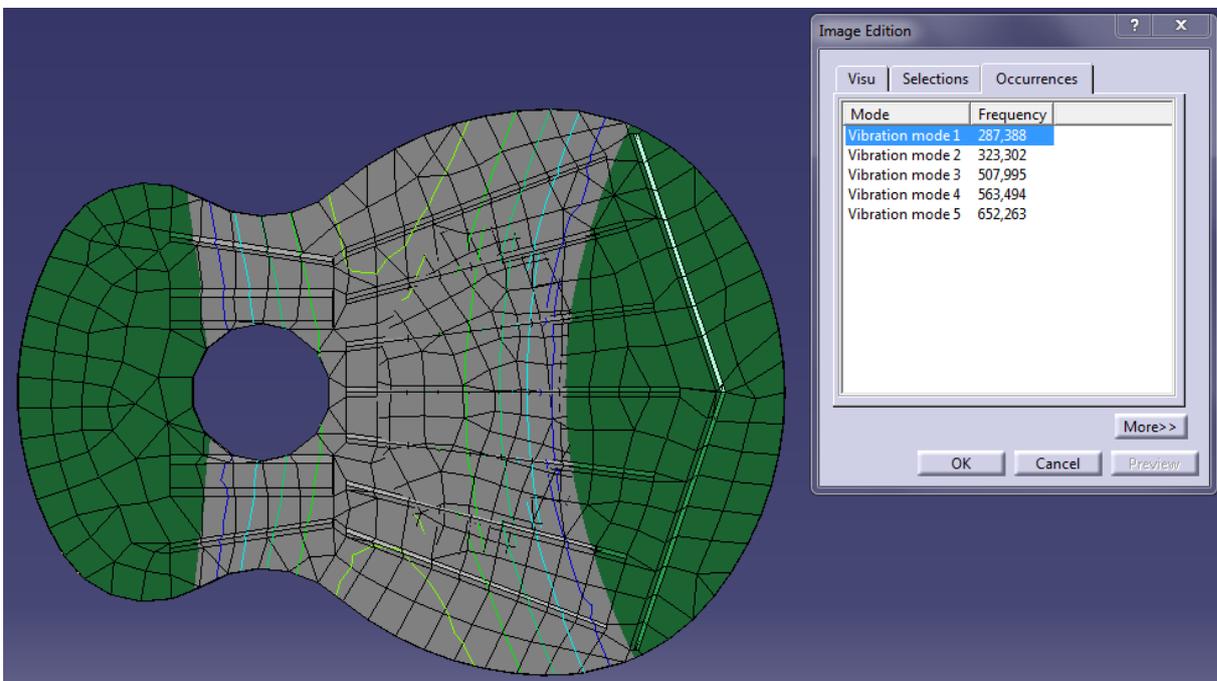


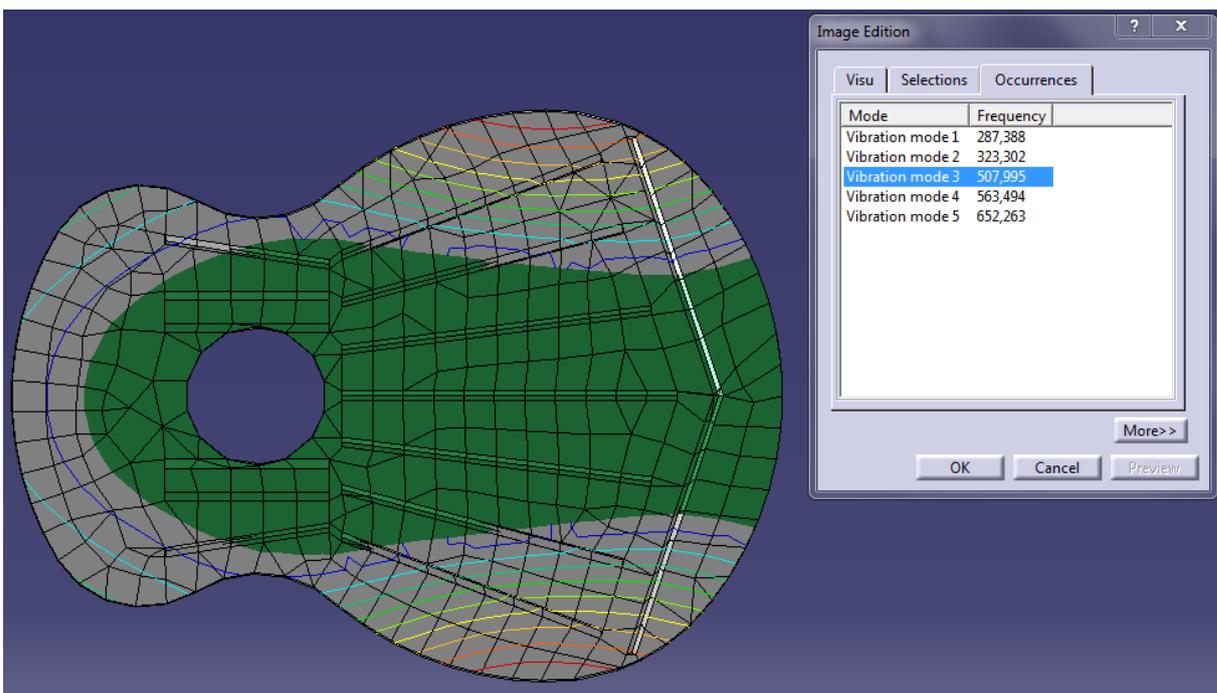
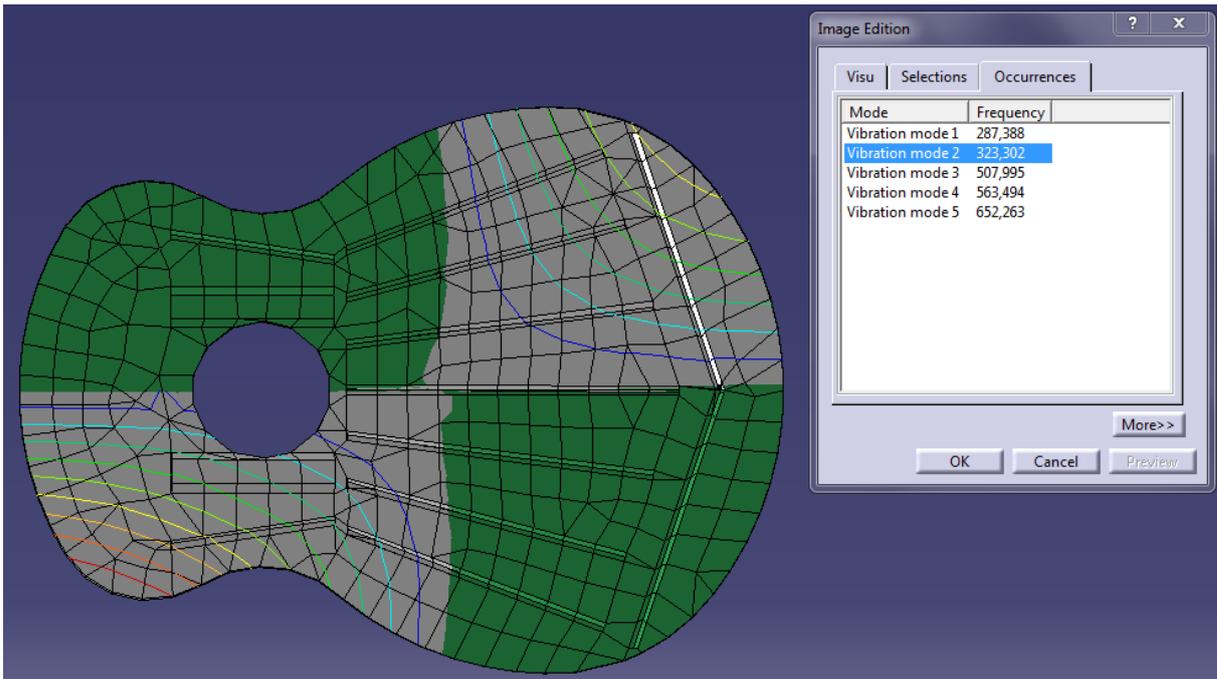


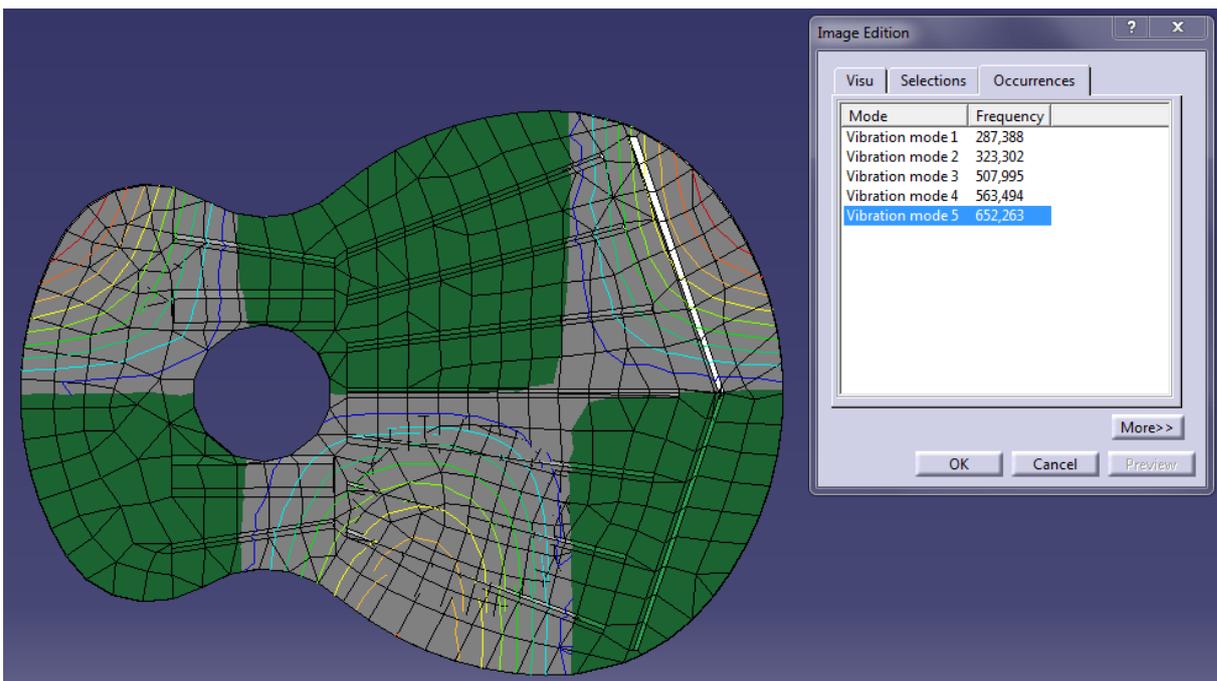
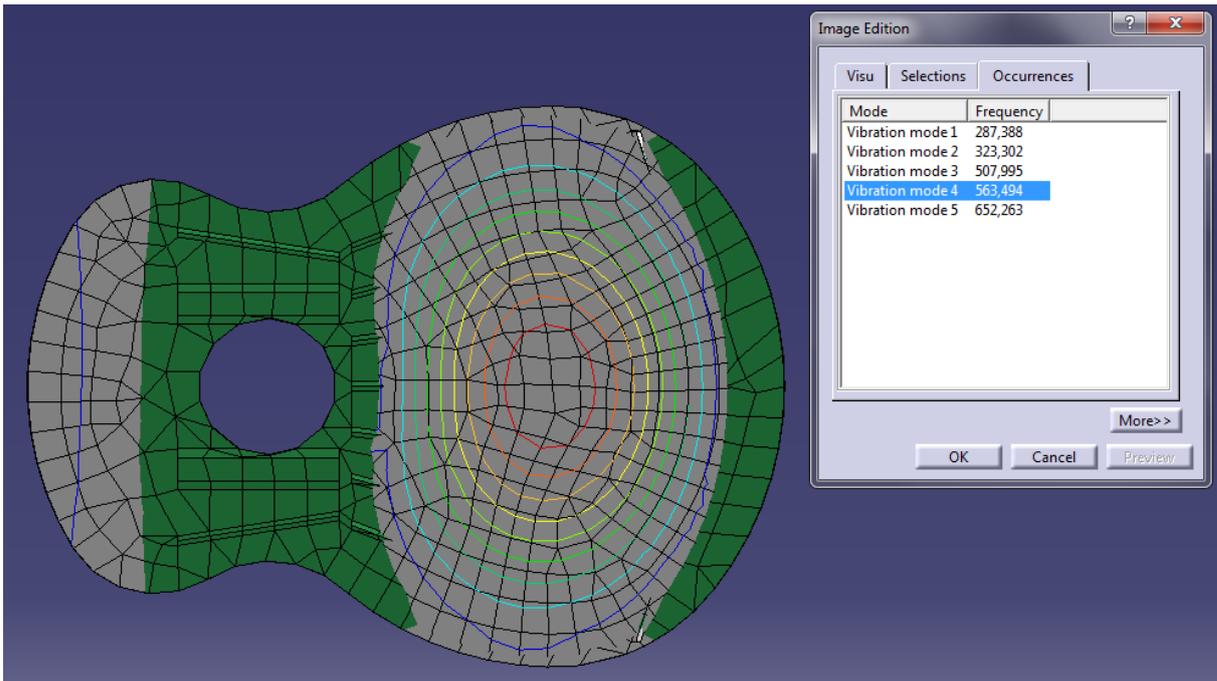




## Apêndice 6: Frequências naturais no material isotrópico

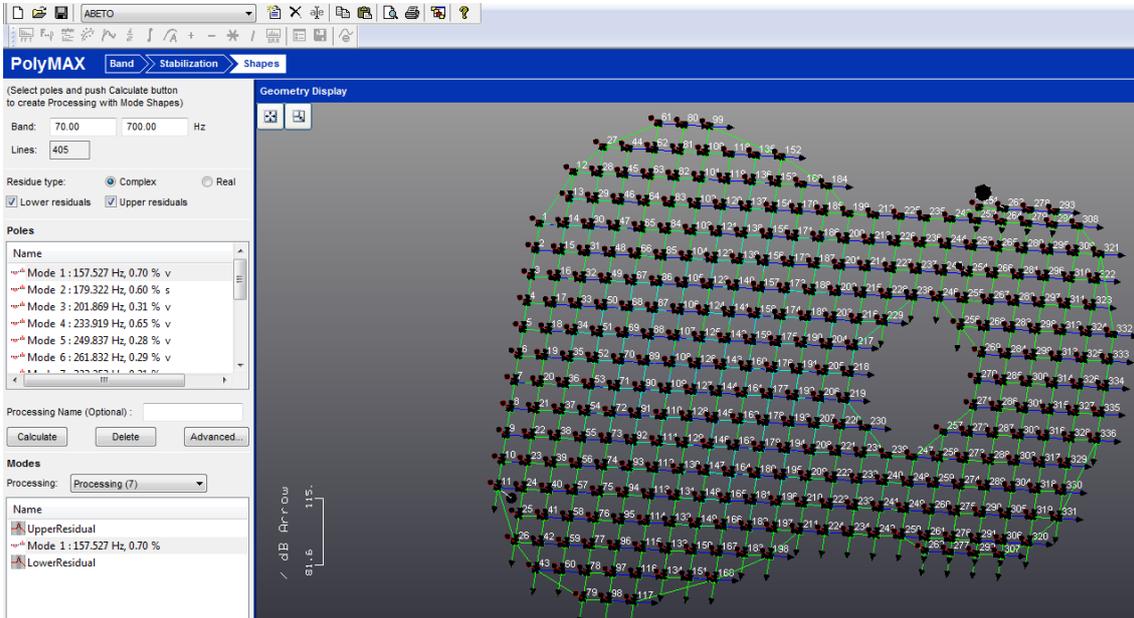




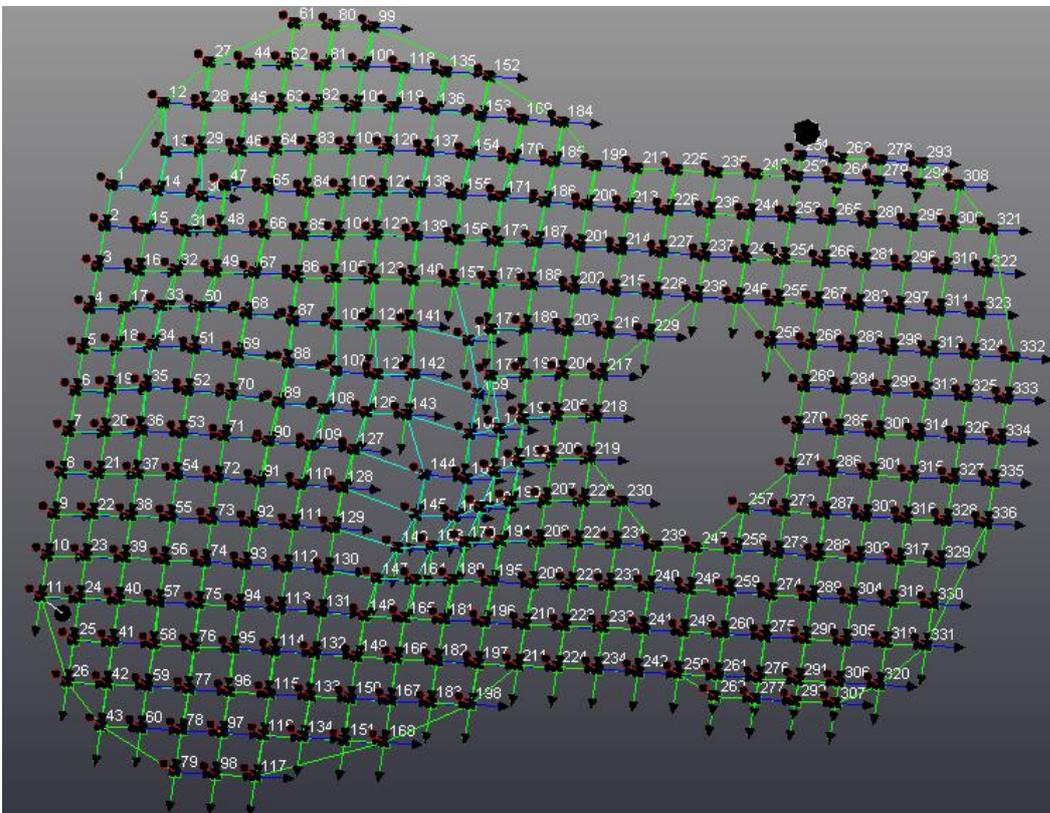


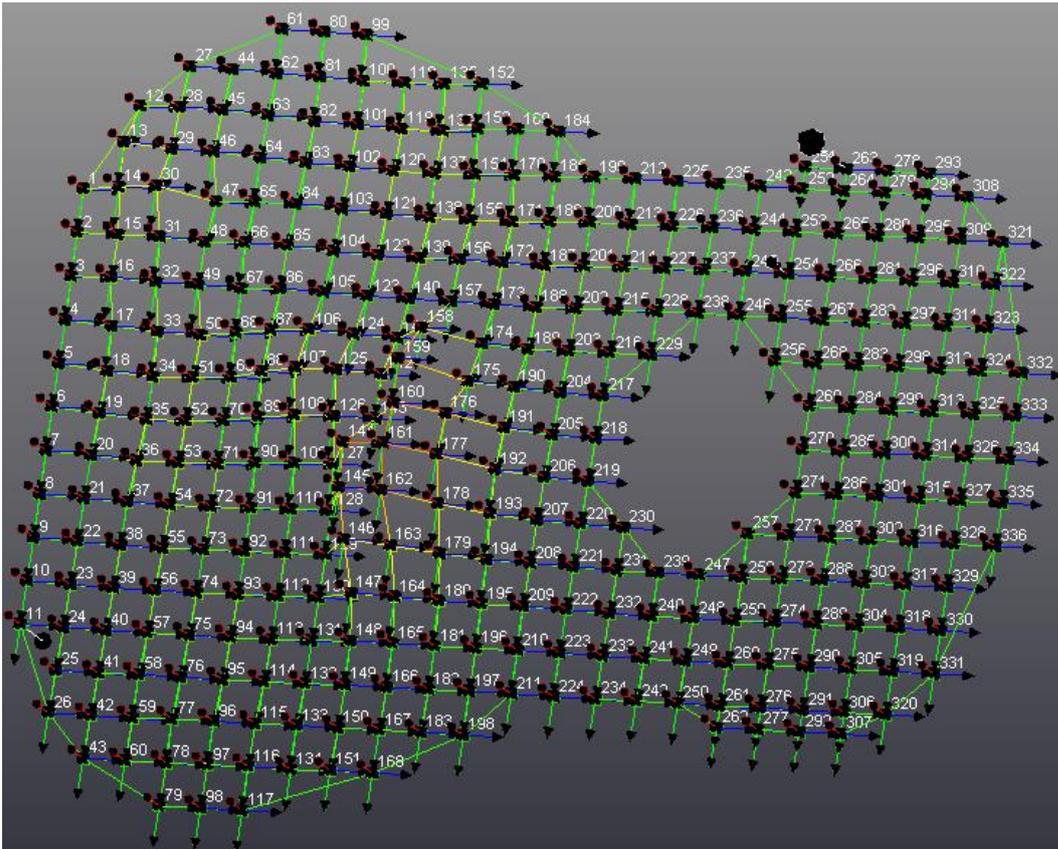
## Apêndice 7: Deformação correspondente ao modo de vibração

Exemplo de deformação do tampo harmônico de abeto, no programa Test.Lab – Polimax em 03 frequências distintas.

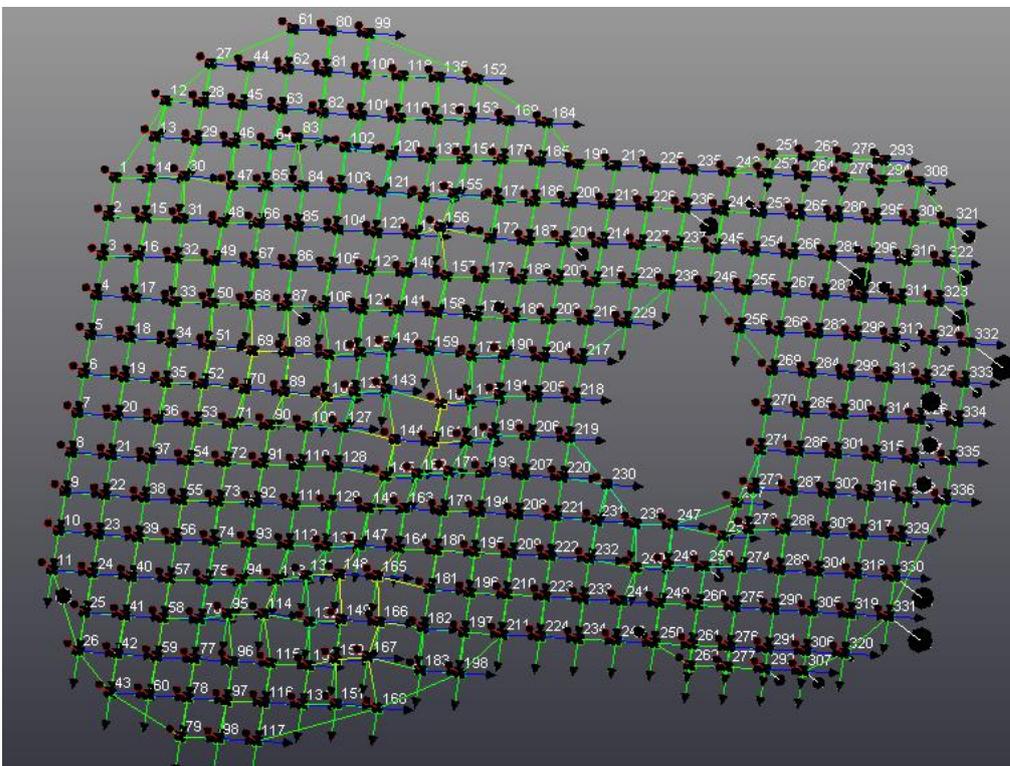


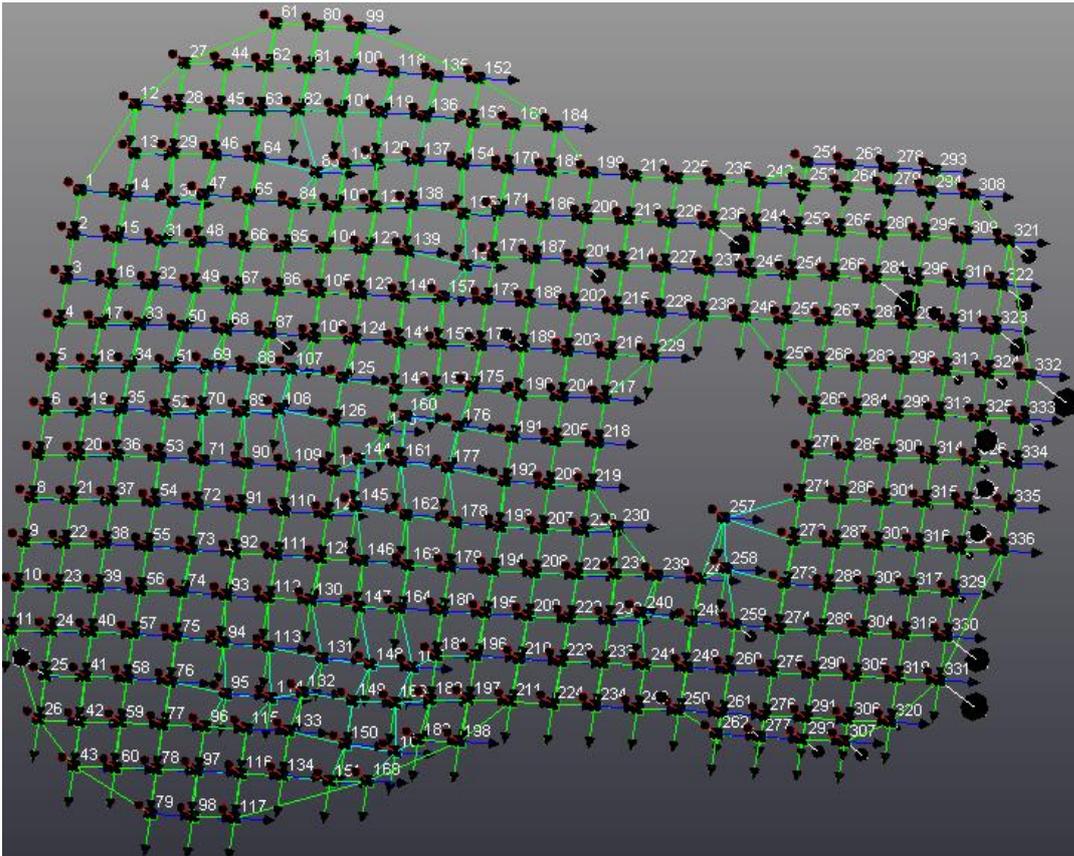
Deformação na frequência de 157 Hz



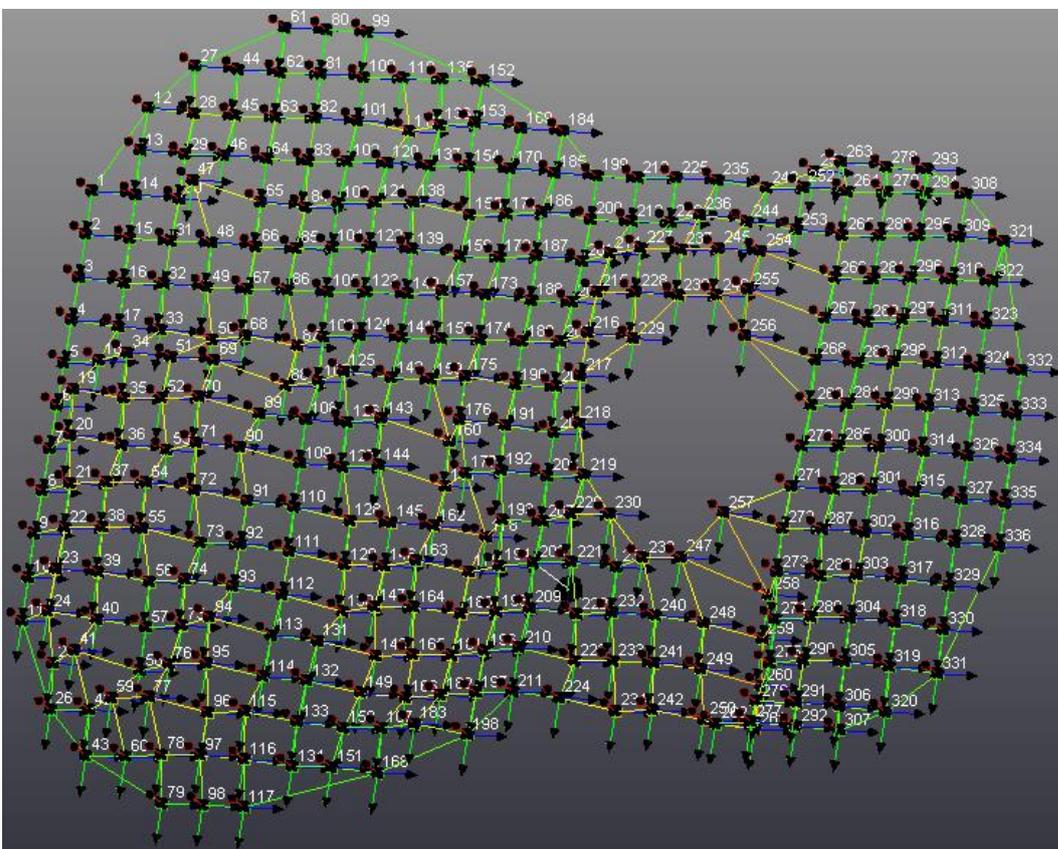


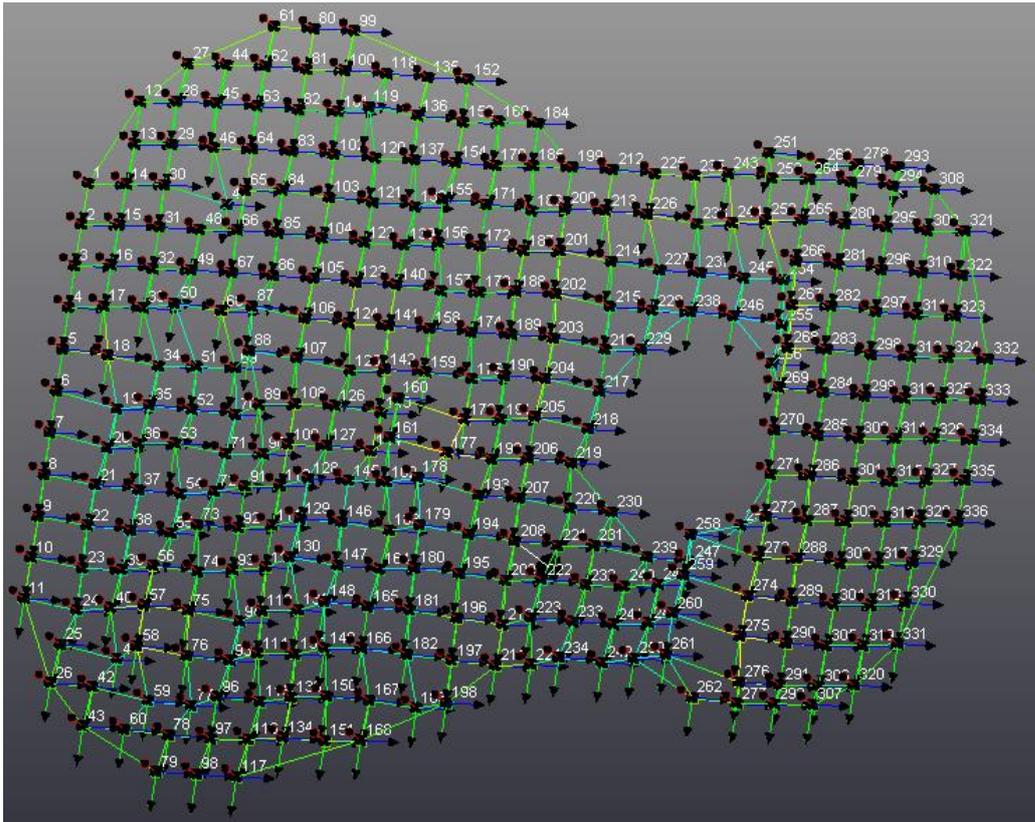
Deformação na frequência de 323 Hz





Deformação na frequência de 640 Hz





## ANEXOS:

### Anexo 1: Características do acelerômetro

Acelerômetro DeltaTron Serial Nº: 30319

Sensibilidade de referencia: para 159,2 Hz ( $\omega = 1000/$ ), 20 m/s<sup>2</sup> RMS  
 4 mA corrente de alimentação 23,6 °c 0,9993 mV/ms<sup>2</sup> (9,799 mV/g)  
 Alcance de frequência: Amplitude (±10%): 1 Hz a 25 kHz  
 Fase(±5°): 4 Hz a 2,5 kHz

Característica do acelerômetro:

#### Ambiental

Sensibilidade magnética = (50 Hz, 0,038 T): 50ms<sup>2</sup>/T  
 Sensibilidade acústica = (154 dB SPL): 0,01ms<sup>2</sup>

#### Mecânico

Material: Titanium ASTM Grade 2  
 Elemento sensor: Piezoeletrico, tipo PZ 23  
 Construção: Delta Shear  
 Vedação: Welded  
 Peso: 2,4 g (0,085 oz)  
 Conector elétrico: Coaxial M3  
 Rosca de montagem: M3 Depth 2.4 mm  
 Nivelamento da superfície de montagem: < 3 µm  
 Torque de montagem: Max. 0,6 Nm (5,3 lbf-in). Min. 0,2 Nm (1.8 lbf-in)

#### Elétrica

Voltagem: at 25°C e 4 mA: +12 V ± 0,5 V  
 Temperature complete e atual alcance: +8 V a +15 V ,  
 Impedância de saída: 10 Ω  
 Tempo de início (ao viés final = - + 10%): 5 s

#### Ruído inerente (RMS):

Banda larga: < 15 µV  
 Correspondendo a < 0,015 m/s (<1500 µg)  
 Espectral: 10 Hz: 7,9x10<sup>-4</sup> m/s/(Hz)<sup>1/2</sup> (79 µg/(Hz)<sup>1/2</sup>)  
 100 Hz: 2,1x10<sup>-4</sup> m/s/(Hz)<sup>1/2</sup> (21 µg/(Hz)<sup>1/2</sup>)  
 1000 Hz: 1,4x10<sup>-4</sup> m/s/(Hz)<sup>1/2</sup> (14 µg/(Hz)<sup>1/2</sup>)

## Anexo 2: Erro do equipamento Sonelastic

Espécie	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	E flex (GPa)	$\pm$ (GPa)	G (GPa)	$\pm$ (GPa)
Abeto 1	0,42	9,67	0,41	0,64	0,02
Abeto 2	0,42	11,39	0,6	0,67	0,02
Araucária 1	0,62	14,09	0,88	0,96	0,13
Araucária 2	0,62	20,32	8,15	0,96	0,13
Marupá 1	0,42	9,50	1,12	0,60	0,03
Marupá 2	0,44	9,11	1,02	0,66	0,04
Compensado 1	0,46	6,48	0,63	0,37	0,02
Compensado 2	0,50	6,57	0,38	0,47	0,02

Erro do equipamento sonelastic para madeiras do tampo.

Espécie	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	E flex (GPa)	$\pm$ (GPa)	G (GPa)	$\pm$ (GPa)
Jacarandá 1	0,81	13,78	0,87	1,52	0,04
Jacarandá 2	0,83	17,13	1,42	1,77	0,08
Andiroba 1	0,66	13,88	1,5	0,79	0,04
Andiroba 2	0,67	14,70	0,97	0,89	0,05
Jenipapo 1	0,78	6,34	1,08	1,13	0,07
Jenipapo 2	0,80	8,47	1,12	1,37	0,06
Compensado 1	0,46	6,48	0,63	0,37	0,02
Compensado 2	0,50	6,57	0,38	0,47	0,02

Tabela de erro nas análises de madeira para o fundo

## Anexo 3: Aplicação do Método de Elementos Finitos

O MEF é utilizado nesse trabalho para a determinação do fluxo de potência  $W_{in}$  de um subsistema a outro em uma estrutura. Além disso, é determinada a energia vibratória média de cada componente através de sua velocidade média quadrática,  $\langle v_{RMS}^2 \rangle$ . Com esses parâmetros, conhecidos o fator de perda estrutural  $\eta$  de cada subsistema e a densidade modal  $n$  (modos/Hz) de cada componente, determina-se o fator de perda por acoplamento  $\eta_{ij}$ , descrito no Item 3.2.3.

Analisa-se o fluxo de potência em vãos adjacentes de placas reforçadas por vigas, buscando-se entender o efeito proporcionado pelas vigas.

São usadas placas no mesmo plano (Fig. 2.1) com área total de  $2 \text{ m}^2$ , sendo a largura de  $1 \text{ m}$ ; o primeiro vão com  $1,1 \text{ m}$  e o segundo com  $0,9 \text{ m}$  de comprimento, objetivando-se conhecer a influência da dimensão da viga nos caminhos de propagação de energia.. Assim, tem-se diferentes frequências de ressonância para os dois vãos. As placas possuem espessuras iguais a  $5 \text{ mm}$  e são de aço com módulo de elasticidade  $E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$ , coeficiente de Poisson  $\nu = 0,29$  e fator de perda estrutural  $\eta = 0,01$ .

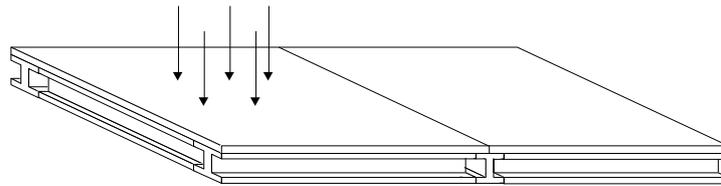


Figura 2.1 – Placas apoiadas unidas no plano.

Para o modelo de elementos finitos foram utilizados o elemento de placa SHELL 63 e o elemento de viga BEAM 44, ambos da biblioteca do programa ANSYS.

O elemento de placa SHELL 63 tem capacidade de flexão e movimentos de membrana e possui quatro nós por elemento. São permitidos carregamentos normais e no plano. O elemento possui seis graus de liberdade por nó: translações nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  e rotações sobre os eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$  [9].

As funções de interpolação  $u$  e  $v$  nas direções de membrana e  $w$  transversal à placa, para o elemento de placa SHELL 63 são dadas, de acordo com a Figura 2.2, por:

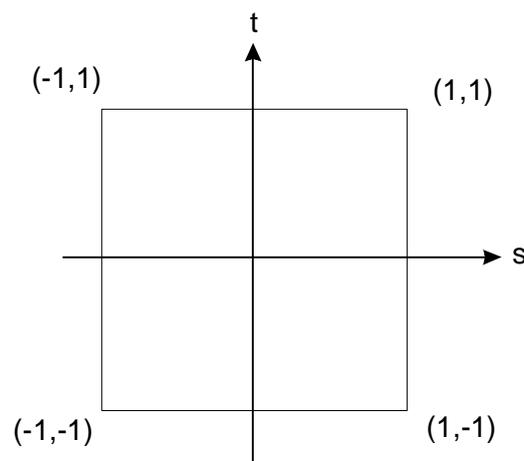


Figura 2.2 – Esquema de funções de interpolação para elemento de placa.

$$u = \frac{1}{4} [u_I(1-s)(1-t) + u_J(1+s)(1-t) + u_K(1+s)(1+t) + u_L(1-s)(1+t)] \quad (2.1)$$

$$v = \frac{1}{4} [v_I(1-s)(1-t) + v_J(1+s)(1-t) + v_K(1+s)(1+t) + v_L(1-s)(1+t)] \quad (2.2)$$

onde  $w$  é definido por quatro triângulos superpostos [10]. Os índices I, J, K e L referem-se aos valores nodais de cada função.

O elemento de viga BEAM 44 é um elemento uniaxial de dois nós com capacidade de tração, compressão, torção e flexão. Possui seis graus de liberdade por nó: translações nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  e rotações sobre os eixos nodais  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Permite uma geometria não-simétrica em cada terminação e permite que os nós fiquem deslocados do centro de gravidade da viga [11].

Para o elemento de viga BEAM 44, são usadas as seguintes funções de interpolação, de acordo com a Figura 2.3:

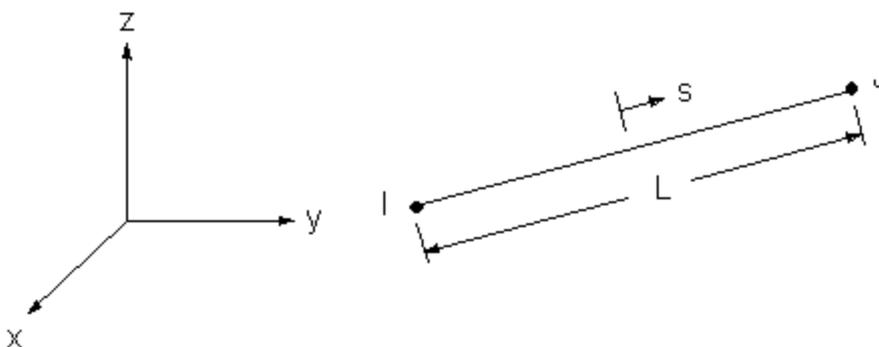


Figura 2.3 – Esquema de funções de interpolação para elemento de viga.

$$u = \frac{1}{2} [u_I(1-s) + u_J(1+s)] \quad (2.3)$$

$$v = \frac{1}{2} \left[ v_I \left(1 - \frac{s}{2}(3-s^2)\right) + v_J \left(1 + \frac{s}{2}(3-s^2)\right) \right] + \frac{L}{8} [\theta_{z,I}(1-s^2)(1-s) - \theta_{z,J}(1-s^2)(1+s)] \quad (2.4)$$

$$w = \frac{1}{2} \left[ w_I \left( 1 - \frac{s}{2} (3 - s^2) \right) + w_J \left( 1 + \frac{s}{2} (3 - s^2) \right) \right] - \frac{L}{8} \left[ \theta_{y,I} (1 - s^2) (1 - s) - \theta_{y,J} (1 - s^2) (1 + s) \right] \quad (2.5)$$

$$\theta_x = \frac{1}{2} \left[ \theta_{x,I} (1 - s) + \theta_{x,J} (1 + s) \right] \quad (2.6)$$

A aplicação do MEF para a estrutura a ser analisada consiste em:

- geração da malha utilizando-se elementos de placa e viga;
- análise modal ou resolução do problema de auto valores não amortecido;
- análise harmônica, utilizando-se os auto valores e auto vetores do problema anterior;
- pós processamento dos resultados.

Para facilitar o cálculo da energia vibratória média de cada subsistema, foram usados elementos de placa retangulares com dimensões constantes ao longo da placa. Assim, obtém-se elementos de mesma massa, facilitando o cálculo da média espacial da resposta ao longo da superfície.

A análise modal consiste da resolução da equação diferencial

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (2.7)$$

onde  $[M]$  é a matriz de massa,  $[K]$  é a matriz de rigidez,  $\{u\}$  é o vetor de deslocamento,  $\{\ddot{u}\}$  o vetor de aceleração e  $\{0\}$  é o vetor nulo.

São realizadas as hipóteses de que: a estrutura tem propriedades constantes de massa e rigidez, não há amortecimento e não existem forças aplicadas, ou seja, trata-se inicialmente de vibrações livres.

Considerando-se o sistema linear, as vibrações livres são expressas na forma:

$$\{u\} = \{\phi\}_i \cos \omega_i t \quad (2.8)$$

sendo  $\{\phi\}_i$  o auto vetor que representa o modo da  $i$ -ésima frequência natural,  $\omega_i$  é a  $i$ -ésima frequência natural e  $t$  o tempo.

Assim, a Equação 2.7 pode ser escrita na forma

$$(-\omega_i^2[M] + [K])\{\phi\}_i = \{0\} \quad (2.9)$$

e como deseja-se a solução não trivial, então o determinante:

$$|[K] - \omega_i^2[M]| = 0 \quad (2.10)$$

Este é um problema de autovalores que deve ser solucionado para  $n$  valores de  $\omega^2$  e  $n$  autovetores que satisfaçam a Equação (2.10).

A obtenção dos autovetores e auto valores do problema pode ser feita utilizando-se os seguintes métodos:

- solução reduzida;
- método não simétrico;
- método amortecido;
- método dos subespaços;
- Bloco de Lanczos.

No método reduzido, o sistema de equações é condensado para aqueles graus de liberdade associados com os graus de liberdade "masters", através da redução de Guyan. O conjunto de  $n$  graus de liberdade caracteriza as frequências naturais de

interesse do sistema. O manual do programa utilizado recomenda que o número de graus de liberdade “masters” selecionado seja pelo menos duas vezes o número de frequências naturais de interesse. Este método deve ser utilizado com cuidado, pois a seleção automática dos graus de liberdade é feita em regiões de maior concentração de massa, no caso de placas reforçadas, as vigas.

O método não-simétrico é utilizado para matrizes não-simétricas, como é o caso da interação fluido-estrutura.

O método amortecido é usado somente quando a matriz de amortecimento precisa ser incluída na Equação 2.7.

Para matrizes completas e simétricas, utiliza-se o Método do Subespaço. Esse método é o mais preciso, porém tem o maior custo computacional.

O Bloco de Lanczos é utilizado em problemas grandes de autovalores simétricos. Tipicamente, é utilizado para problemas solucionados também pelo método de subespaço, porém com maior taxa de convergência.

Desses métodos, o mais eficiente na extração dos autovalores foi o Bloco de Lanczos, possuindo uma velocidade de processamento maior que o método de Subespaço e com os mesmos resultados.

Para a análise harmônica, a equação é dada por

$$\left( [K] - \omega^2 [M] + i\omega [C] \right) (\{u_1\} + i\{u_2\}) = \{F_1\} + i\{F_2\} \quad (2.11)$$

sendo  $\omega$  a frequência angular,  $[C]$  a matriz de amortecimento,  $\{u\}$  o vetor deslocamento composto da parte real  $\{u_1\}$  e sendo  $i$  a unidade imaginária  $\{u_2\}$  e  $\{F\}$  é o vetor força composto da parte real  $\{F_1\}$  e imaginária  $\{F_2\}$ , respectivamente.

Tem-se os seguintes métodos disponíveis:

- "full";
- reduzido;
- superposição modal.

No método "full", essa equação é resolvida diretamente, dispendendo grande esforço computacional (tempo de processamento e memória).

O método reduzido utiliza uma matriz reduzida para a estrutura. São permitidas forças aplicadas diretamente nos graus de liberdade ou aceleração agindo na matriz de massa reduzida. Além disso, pode-se aplicar deslocamentos diferentes de zero somente nesses nós.

O método da superposição modal usa os autovalores e autovetores para determinar a resposta a uma excitação harmônica. Permite uma velocidade de processamento bem maior que o método "full" e melhor precisão que o método reduzido.

#### **Anexo 4: Método de análise modal – domínio da frequência**

Análise modal é o processo de extração de parâmetros modais (frequências naturais, fator de perda estrutural e constantes modais) dos dados medidos de vibração. Como os dados medidos podem ser na forma de função resposta em frequência ou resposta impulsiva, existem análise modal no domínio da frequência e no domínio do tempo. [He & Fu]

O fundamento da análise modal utilizando-se Função Resposta em Frequência é através de ajuste de curvas dos dados utilizando-se um modelo matemático pré-definido da estrutura medida. Este modelo assume o número de graus de liberdade da estrutura, o tipo de amortecimento e o número de modos de vibração dentro da banda de frequência medida.

Para a análise modal no domínio da frequência, o modelo matemático é a expressão analítica de uma FRF (Função Resposta em Frequência) que é representativa da FRF das medições.

Como toda estrutura tem um número infinito de graus de liberdade, a mesma pode ser discretizada em  $n$  graus de liberdade. Uma expressão analítica da FRF do sistema é:

$$\alpha_{ij}(\omega) = \sum_{r=1}^n \frac{r A_{ij}}{\omega_r^2 - \omega^2 + \omega_r^2 \eta_r j}$$

Se somente os primeiros “m” modos caem dentro da faixa de frequência de medição, então,

$$\alpha_{ij}(\omega) = \sum_{r=1}^m \frac{r A_{ij}}{\omega_r^2 - \omega^2 + \omega_r^2 \eta_r j}$$

Nos dá o impacto dos modos além da faixa de medição (frequência). Como esses modos não foram medidos, não há dados com os quais eles podem ser analisados. Uma solução é eleger esses modos invisíveis representados por um termo residual de alta frequência  $R_{ij}(\omega)$ . Desta forma,

$$\alpha_{ij}(\omega) = \sum_{r=1}^m \frac{r A_{ij}}{\omega_r^2 - \omega^2 + \omega_r^2 \eta_r j} + R_{ij}(\omega)$$

Como qualquer ajuste de curva em análise numérica, a função erro é usualmente definida como a FRF estimada dos modos de vibração estimados e medidos:

$$e_{ij}(\omega) = \bar{\alpha}_{ij} - \alpha_{ij}(\omega)$$

Onde  $\bar{\alpha}_{ij}(\omega)$  é a função FRF medida. Vários métodos de análise modal são baseados na minimização destas funções erro.

Alguns métodos de identificação no domínio da frequência podem ser citados [He & Fu]:

Método "Peak-picking";

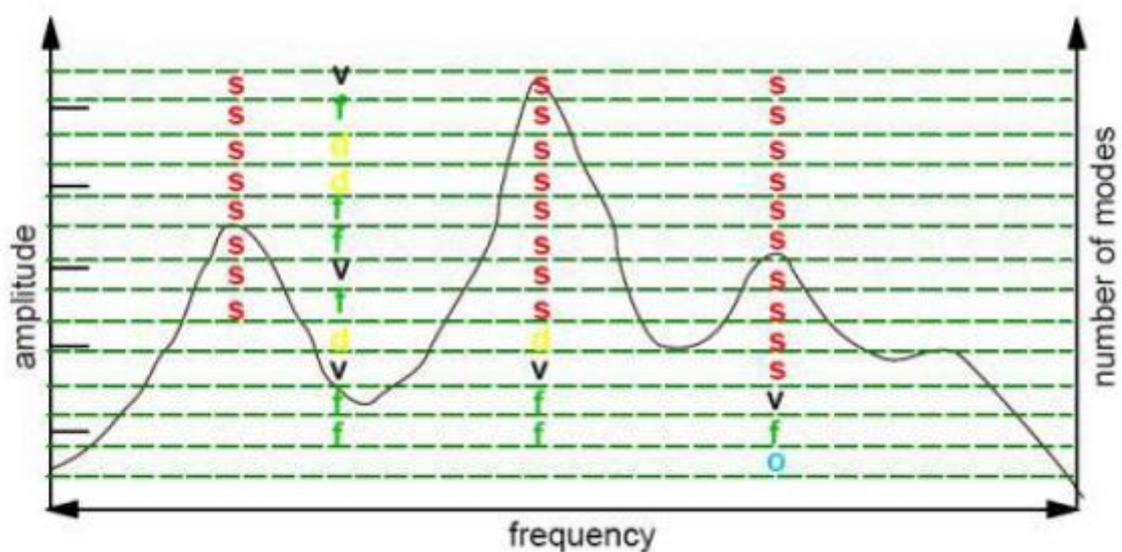
Método "Circle fit";

Método FRF inversa;

Método dos Mínimos quadrados;

Método de Dobson.

A identificação de frequências e amortecimentos correspondentes aos modos estruturais reais, devem reaparecer assim que o número de modos aumenta. Modos computacionais não vão reaparecer com frequência e amortecimento idênticos. Um diagrama que mostra a evolução da frequência e amortecimento com o aumento do número de modos pode ser calculado. Aqueles modos para o qual a frequência e amortecimento não mudam significativamente, são ditos estáveis. Isso pode ser visto através do diagrama de estabilização (LMS, 2013).



Método PolyMAX

O método PolyMAX é uma evolução do método dos mínimos quadrados complexo no domínio da frequência (LSCF) (LMS, 2013). O Método LCSF identifica um

modelo chamado denominador comum e foi introduzido para achar valores iniciais para o método iterativo de máxima probabilidade. Esses valores iniciais fornecem parâmetros modais muito precisos com um esforço computacional pequeno. A maior vantagem do método LSCF é que o diagrama de estabilização é obtido de forma muito clara (LMS, 2013).

O modelo identificado utilizando-se o LCSF ajusta-se perfeitamente à medição FRF. Contudo, quando este modelo é convertido para o modelo modal, a qualidade do ajuste decresce. Outro problema é que o diagrama de estabilização pode ser construído somente com informações dos polos (autovalores e amortecimentos). Nem o fator de participação modal e nem os modos de vibrações são disponíveis em uma primeira instância. O problema relacionado com este obstáculo é que modos pouco espaçados vão aparecer erroneamente como um polo único.