

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

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

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

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

Paulo Sérgio Teixeira

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

José Flávio Silveira Feiteira

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

Rangel de Paula Almeida

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

Alexandre Furtado Ferreira

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

Resumo

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

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

Abstract

A guitar is constructed essentially of wood. However, each wood brings with it some specific characteristics. Its acoustic behavior is related to the elastic properties of the materials that compose it. It is known that the elastic properties of materials interfere not only in their mechanical resistance, but also in their dynamic behavior; a structure can vibrate more or less intensely depending on the material that composes it and its elastic properties. The present work analyzes the dynamic behavior of a computational guitar model through modal analysis calculated by the finite element method (MEF) applying boundary conditions that simulate the stiffness of the lateral bands and the tension of the strings on the easel and neck, obtaining answers in terms of natural frequencies and the corresponding forms of vibration modes. And so, compare with frequency responses obtained experimentally through the method of pulse excitation. The results show that the responses in numerical natural frequencies are similar to the values obtained experimentally, indicative of belonging to the same mode of vibration.

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

Resumen

Una guitarra está construida esencialmente de madera. Sin embargo, cada madera trae consigo algunas características específicas. Su comportamiento acústico está relacionado con las propiedades elásticas de los materiales que lo componen. Se sabe que las propiedades elásticas de los materiales interfieren no solo en su resistencia mecánica, sino también en su comportamiento dinámico; una estructura puede vibrar de forma más o menos intensa según el material

que la componga y sus propiedades elásticas. El presente trabajo analiza el comportamiento dinámico de un modelo computacional de guitarra mediante análisis modal calculado por el método de elementos finitos (MEF) aplicando condiciones de contorno que simulan la rigidez de las bandas laterales y la tensión de las cuerdas en el caballete y el mástil, obteniendo respuestas en términos de frecuencias naturales y las correspondientes formas de modos de vibración. Y así, compare con las respuestas de frecuencia obtenidas experimentalmente mediante el método de excitación de pulsos. Los resultados muestran que las respuestas en frecuencias naturales numéricas son similares a los valores obtenidos experimentalmente, indicativos de pertenencia a un mismo modo de vibración.

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

1. Introdução

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

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

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

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

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

Um dos importantes aspectos da pesquisa atual em acústica musical consiste na conexão das propriedades físicas mensuráveis de um instrumento musical e sua qualidade sonora. Um melhor entendimento das relações entre qualidade do som

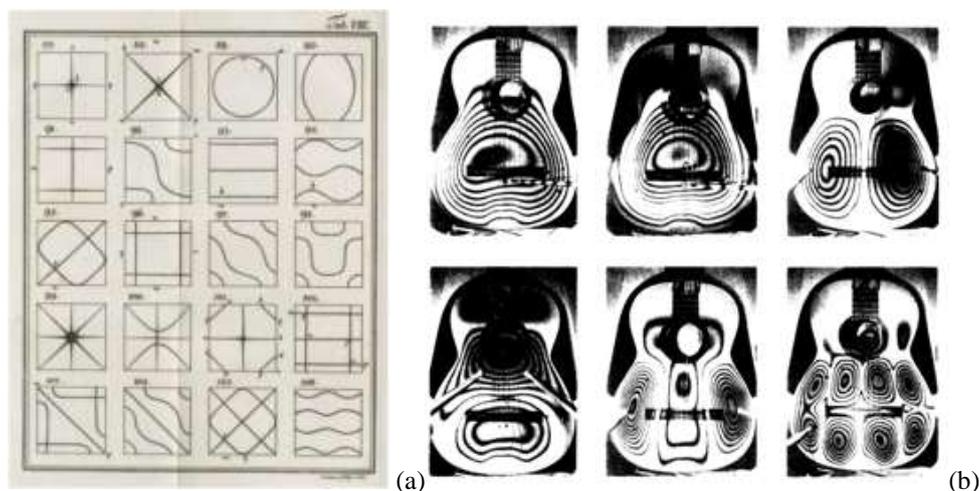
e a resposta vibro acústica do instrumento permitirá aos fabricantes de instrumentos o ajuste das características tonais do mesmo alterando seus materiais, geometrias e padrões de construção usados (Wright, 1996). Um dos métodos promissores na solução de problemas acústica musical tem sido o uso de modelos computacionais que simulem o comportamento de instrumentos reais utilizando elementos finitos.

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

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

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

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



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

Ernst Chladni (1756 - 1827) se utilizou de placas circulares e retangulares (figura 1 a) em sua pesquisa incluindo, além disso, observações sobre as variantes produzidas pela diferença de intensidade e velocidade com que o arco de violino era

percutido, agregado a porção fracionada da placa. Suas experiências produziram imagens variadas que o autor classificou e documentou a fim de determinar a ocorrência das similaridades ou disparidades dos padrões imagéticos apresentados (Almeida, 2017). Variações desta técnica são ainda comumente usadas na projeção e construção de instrumentos musicais acústicos como o violino, violão e violoncelo.

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

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

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

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

O emprego da modelagem computacional é focado na resolução de problemas em várias áreas da ciência tais como: social, ambiental, engenharia, climática, etc. Nessa abordagem é possível antecipar desempenhos, eventualmente detectar falhas, enfim prever o comportamento em condições mais abrangentes que aquelas possíveis de serem realizadas em laboratórios (Curtu et al., 2008; Lee et al., 2018). O método de elementos finitos, assim como diversas outras soluções matemáticas, é uma ferramenta numérica que permite prevê problemas de contorno (Lotti et al., 2006 apud Melo et al., 2020).

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

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

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

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

obtenção do espectro de frequências (Transformada Rápida de Fourier). Para a excitação dos modos de vibração desejados é necessário impor determinadas condições de contorno.

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

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

2. Metodologia

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

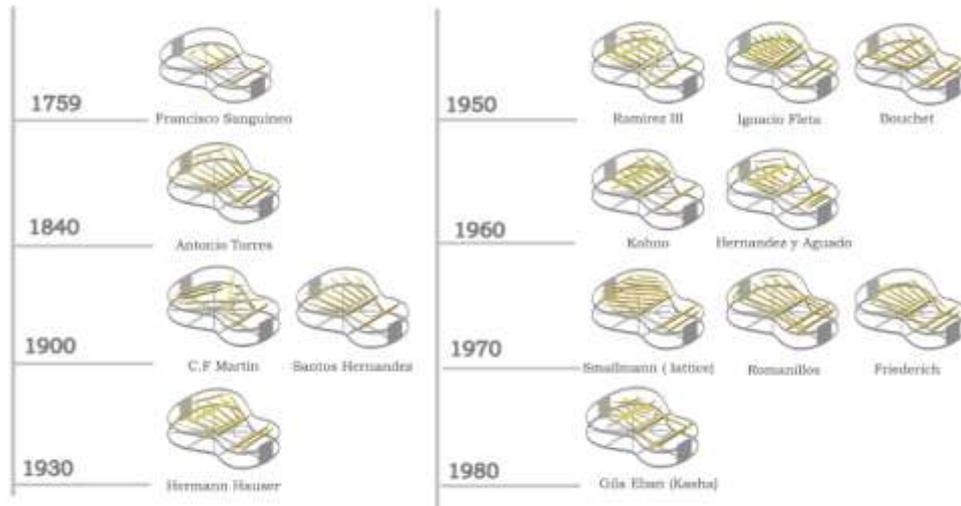
2.1 Construção do Modelo Computacional

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

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

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

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

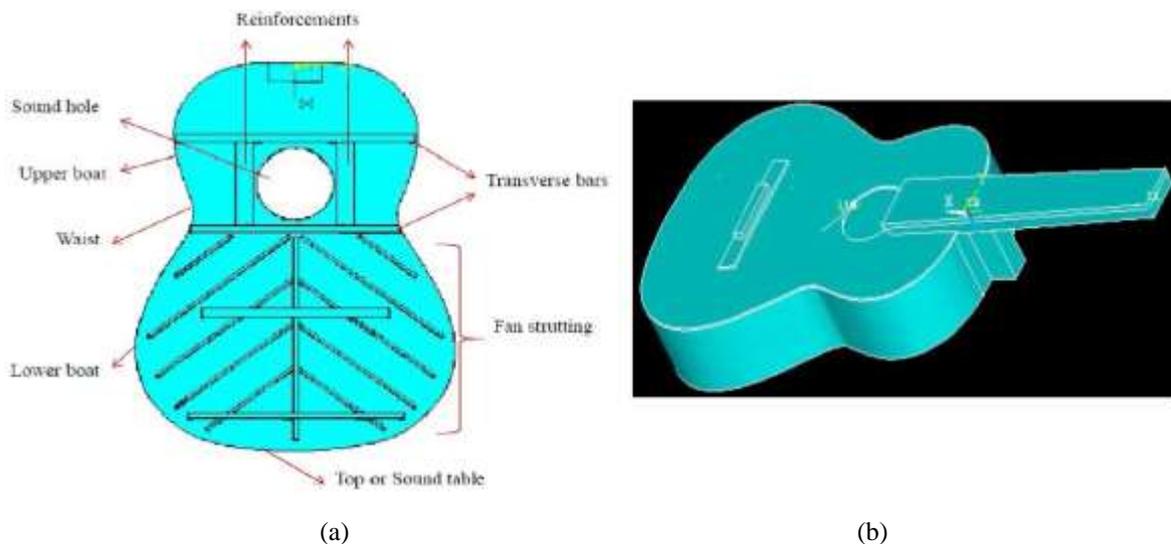


Fonte: Zaczéski (2018).

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

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

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



Fonte: Autores (2020).

A construção deste modelo Matemático é feita inicialmente pelas coordenadas do tampo superior gerando as linhas de contorno seguindo pela área da placa, criação do furo (boca do violão), geração do volume da placa (espessura de 0,0027 m), reforço da boca, varetas e travessas do leque harmônico e finalizando com as outras partes do violão tais como: fundo, laterais,

leque harmônico, tróculo e braço. Na sequência é usado o comando GLUE para unir as partes finalizando o modelo (figura 3 b). A discretização é feita via comando Smart Size (comando do Ansys que permite a geração automática da malha) (Figura 4).

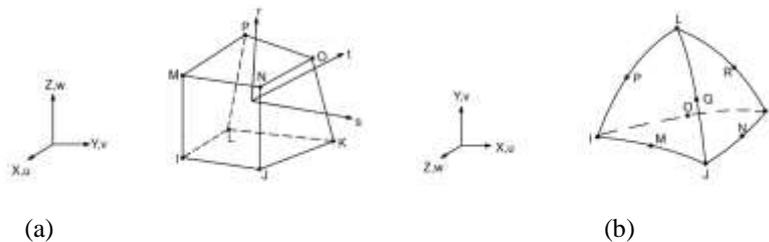
Figura 4. Discretização do tempo via SMART SIZE.



Fonte: Autores (2020).

Para a discretização, ou seja, criação da malha adotou-se do Ansys o elemento *Solid 187* (figura 5 b) para os volumes correspondentes ao braço, tróculo e culatra, tampo e fundo e o *Solid 185* (figura 5 a), para o volume de ar da caixa acústica, adequados a modelos com malha irregular e análises com materiais ortotrópicos e anisotrópicos (Ansys, 2012).

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



Fonte: Ansys (2012).

2.2 Propriedades dos Materiais

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

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

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

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

Fonte: Ribeiro (2014).

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

2.3 Análise Modal

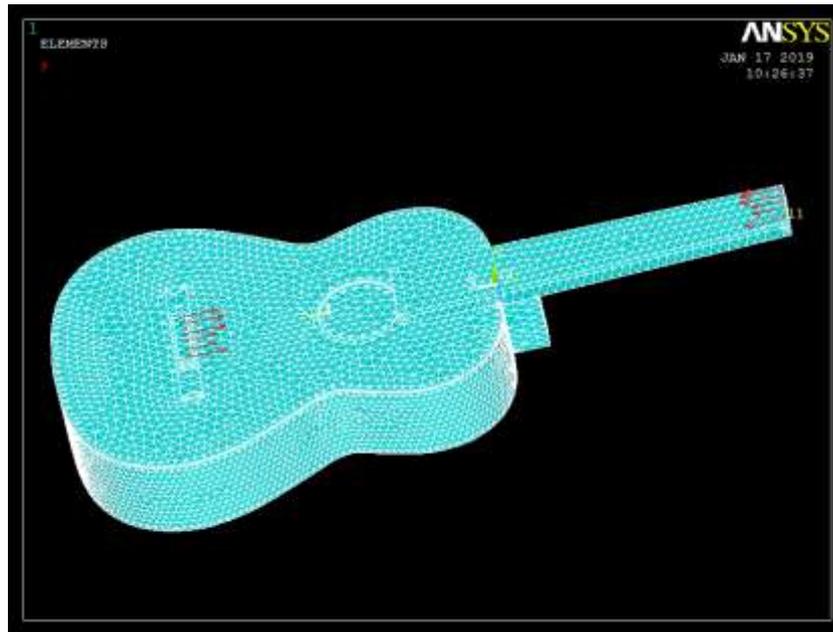
Para o presente trabalho são desenvolvidas duas análises. A primeira se trata de uma análise modal com as condições que sugerem o instrumento sem a tensão que supostamente seriam impostas pelas cordas quando o instrumento está afinado, termo utilizado no meio musical, mas que se trata do ajuste da tensão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

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

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

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

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



Fonte: Autores (2020).

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

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

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

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

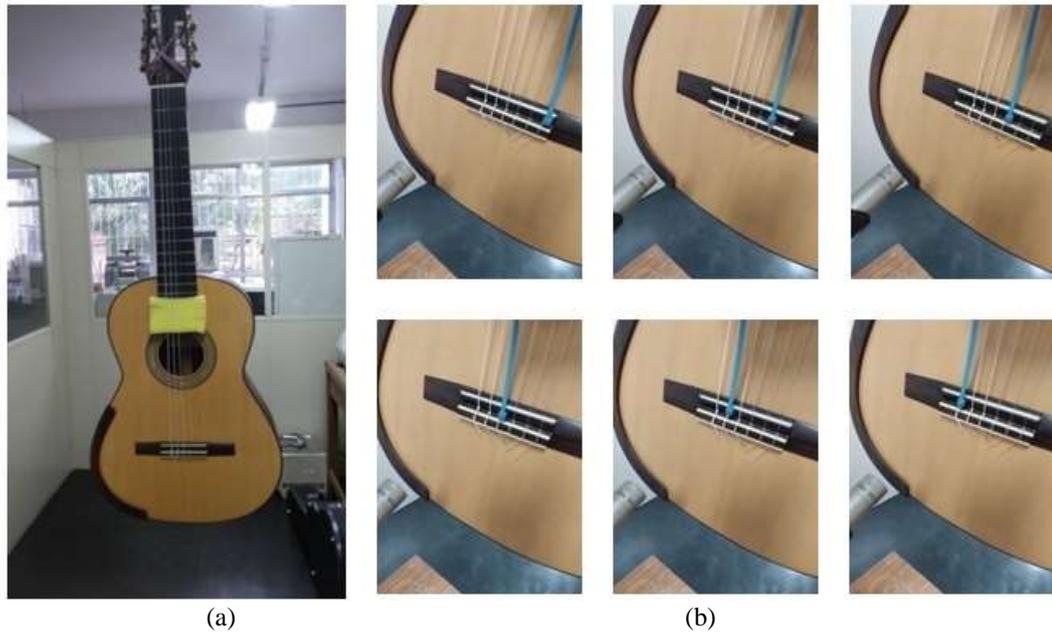
11029
EJ27H Hard/Prata / Náilon Transparente

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

2.4 Caracterização Experimental

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

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

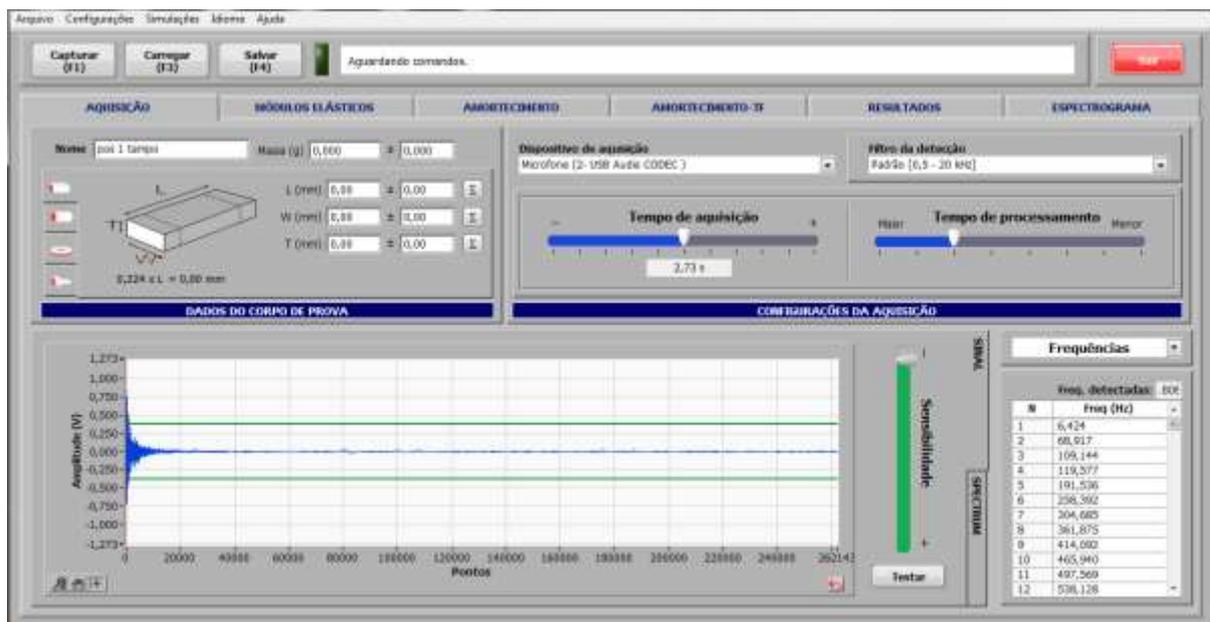


Fonte: Autores (2020).

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

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

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



Fonte: Autores (2020).

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

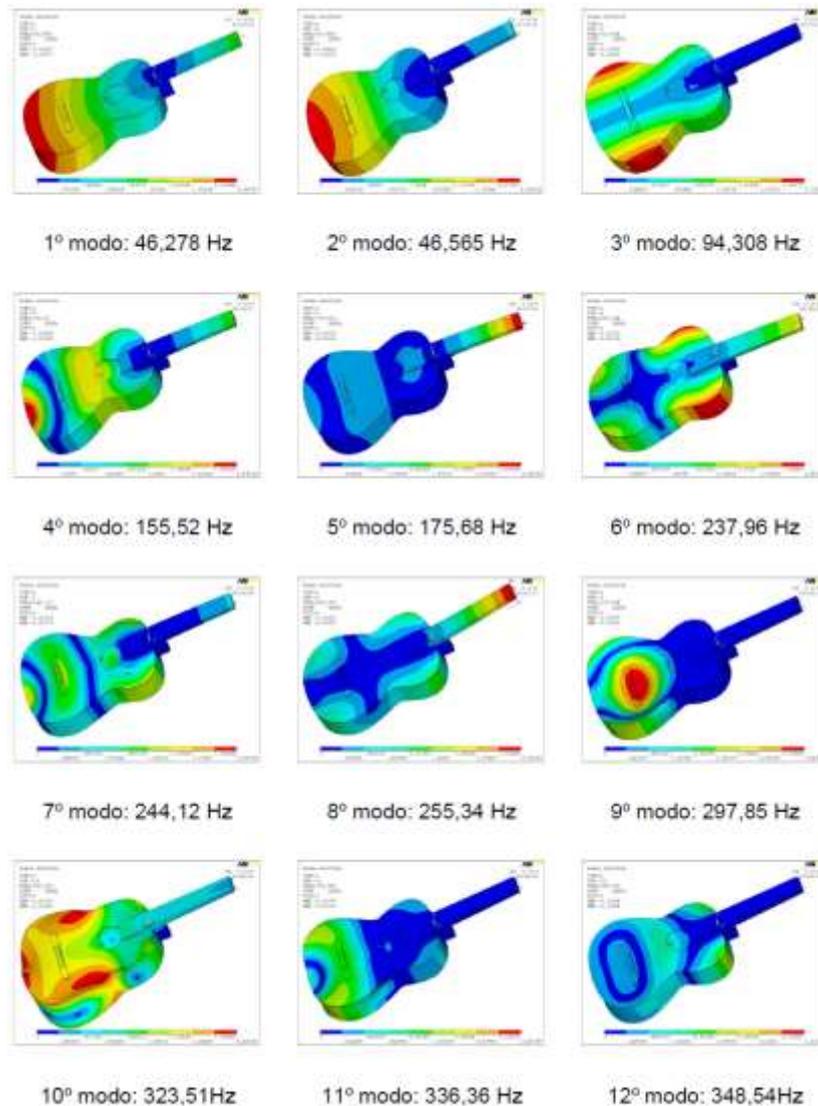
3. Resultados e Discussão

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

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

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

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



Fonte: Autores (2020).

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

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

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

Fonte: Autores (2020).

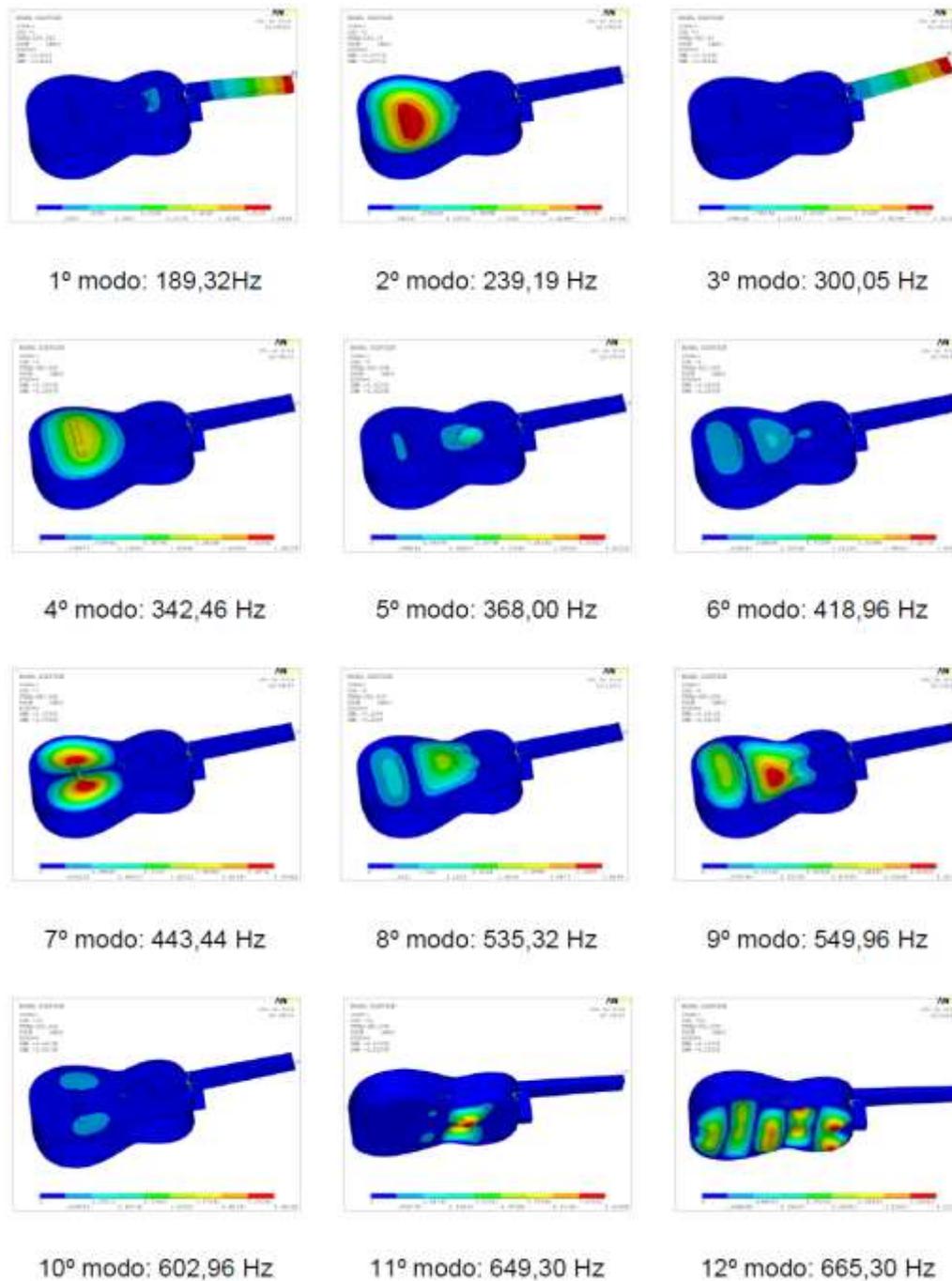
A Tabela 2 mostra resultados relevantes, tendo em vista que somente foram inseridas no modelo as propriedades dos materiais e não foi colocada nenhuma condição restritiva de movimento, que poderia diminuir sensivelmente os graus de liberdade, ou, nesse caso, a possibilidade de vibrar com mais intensidade.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

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

3.1 Segunda Análise Modal

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

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



Fonte: Autores (2020).

A restrição de movimento diminui significativamente a movimentação do modelo, conseqüentemente a suas frequências naturais que caracterizam cada modo vibracional. Avaliando os doze primeiros modos de vibração percebe-se que a cor azul, que indica menor movimentação ou vibração, é predominante. E isso provavelmente se deve as condições de contorno impostas de restrição de movimento nas laterais e tensão das cordas que diminuiu sensível os graus de liberdade do modelo. Usando com referência o intervalo entre zero e setecentos Hertz e inseridas as condições de contorno observa-se agora somente doze modos de vibração do modelo computacional.

3.2 Comparação dos Resultados Numéricos da Análise Modal e Experimental

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

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

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

Fonte: Autores (2020).

Tal procedimento foi feito nas posições referentes às cordas fazendo excitação no cavalete e variando o grau de sensibilidade do microfone para obtenção do máximo de frequências ressonantes. E assim foram enumeradas as vinte primeiras frequências relacionadas pelo software para cada ponto de excitação e os resultados mostram que a sequência de frequências naturais listadas em ordem crescente são diferentes para cada ponto impulsionado. Embora a vibração se propague para o todo o instrumento, quando se muda a posição provavelmente o caminho de propagação possa mudar, pois a madeira como é um

material essencialmente anisotrópico e a direção do alinhamento das fibras pode fazer com que essa vibração encontre regiões com taxas de amortecimentos diferentes, fator que pode influenciar a ressonância dessas frequências.

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

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

Para melhor análise as respostas em frequência foram separadas em faixas com valores próximos. Em seguida foi calculada a média e feita a comparação com frequências numéricas homônimas (próximas) (Tabela 4) para investigação dos possíveis modos de vibração a qual pertencem comparando com os resultados numéricos.

Tabela 4. Frequências homônimas experimental/numérico.

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

Fonte: Autores (2020).

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

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

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

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

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

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

Fonte: Autores (2020).

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

4. Conclusão

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

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

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

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

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

Referências

- Almeida, R. N. (2017). *O Uso do Tonoscópio como Estímulo Sinestésico Áudio Visual na Estratégia de Desenvolvimento da Percepção Musical: Fundamentação Teórica Para Sua Implementação*. Tese de Doutorado em Música. Programa de Pós-Graduação em Música. Centro de Letras e Artes, Universidade federal do Estado do Rio de Janeiro.
- Ansys. (2012). Design Exploration User Guide. *Ansys Inc*.
- ASTM International. (2007). *Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration*; ASTM E 1876, pp 15.
- Bader, R. (2005). Computational Mechanics of the Classical Guitar. *Springer*; 30-80.
- Chladni, E. F. F. (1787). Entdeckungen über die Theorie des Klanges. 1, 107, *Weidmanns Erben und Reich*, Leipzig.
- Cossolino L. C. & Pereira A. H. A. (2010). *Amortecimento: classificação e métodos de determinação* (Informativo Técnico Científico). Universidade de São Carlos.
- Curtu, I., Stanciu, M. D., Itu, C. & Grimberg, R. (2008). Numerical Modeling of the Acoustic Plates as Constituents of Stringed Instruments, in *Proc. of the 6th International Conference of DAAAM Baltic Industrial Engineering*, ISBN 978-9985-59-783-5, Tallinn, Estonia. 24-26th April 2008, 53-58.
- D'Addário Cordas. (2018). *Catálogo*. http://www2.musicaexpress.com.br/beta/wp-content/themes/musicaexpress/downloads/catalogo_s/catalogo_D%C2%B4Addario-Cordas.pdf.
- Filho, J. C. P. (2009) *Classificação de Instrumentos Musicais em Configurações Monofônicas e Polifônicas*. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ.
- Gorrostieta-Hurtado, E., Pedraza-Ortega, J. C., Ramos-Arreguin, J. M., Sotomayor-Olmedo A. & Perez-Meneses, J. (2012). Vibration Analysis in the design and construction of an acoustic guitar. *International Journal of Physical Sciences*, 7(13), pp. 1986-1997.
- Jansson, E. V. (1971). A study of acoustical and hologram interferometric measurements of the top plate vibrations of a guitar. *Acustica*, 25, 95-100.
- Jovicic, J. & Jovicic, O. (2000). The Big Red Book of American Lutherie. *Thomson-Shore, Dexter*, 402-415.
- Lai, J. C. S. & Burgess M. A. (1990). Radiation efficiency of acoustic guitars. *J. Acoust. Soc. Am.*, 88(3), 1222-1227.
- Lee, M. K., Fouladi, M. H. & Namasiv, S. N. (2018). Mathematical Modelling and Acoustical Analysis of Classical Guitars and Their Soundboards. *Advances in Acoustics and Vibration*. Vol. 2016, Article ID 6084230. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/6084230>
- Löw, A. M. (2012). *Identificação Experimental Modal da Caixa Acústica de Um Violão Clássico*. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
- Melo, R. L. F., Souza, I. C. C., Maia, A. S., Silva, F. M., Queiroz, P. R., Rocha Jr., D., Carvalho, A. C. B., Fernandes, J. P. C., Lima, J. F. V. & Queiroz, L. P. O. (2020). Numerical acquisition of the strain-deformation profile during the passage of heat source in AISI 410, 304L and 430 materials. *Research, Society and Development*, 9(7):1-22, e286974224.

- Otani, L.B., Segundinho, P. G. A., Morales, E. A. M. & Pereira, A. H. A. (2017). Caracterização dos módulos elásticos de madeiras e derivados utilizando a Técnica de Excitação por Impulso (ITC-05 /ATCP). *ATCP Engenharia Física*.
- Patil, K., Baqersad J., Ludwigsen D. & Dong Y. (2016). Extracting vibration characteristics of a guitar using finite element, modal analysis, and digital image correlation techniques. *The Journal of the Acoustical Society of America* 140, 3211.
- Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*: UFSM.
- Ribeiro, R. F. S. (2014). *Análise Experimental e Simulação Numérica da Caixa Acústica de um Violão Clássico e seus Componentes com o Método de Elementos Finitos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia Metalúrgica de Volta Redonda, Rio de Janeiro, Brasil.
- Roebben, G., Bollen, B., Van Humbeeck, J. & Van Der Biest, O. (1997). Impulse excitation apparatus to measure resonant frequencies, elastic moduli, and internal friction at room and high temperature. *Review of Scientific Instruments* 68, 4511. <https://doi.org/10.1063/1.1148422>
- Sloane, I. (1976). *Classic Guitar Construction*. *Omnibus Press*, Londres.
- Wright, H. (1996). *The Acoustics and Psychoacoustics of the Guitar*. (Ph.D.Thesis) Department of Physics and Astronomy. University of Wales.
- Zaczéski, M. E., Beckert, C. H., Barros, T. G., Ferreira, A. L. & Freitas, T. C. (2018). Guitar: Acoustic, Structural and Historical Aspects. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. 40(1). 2018 . <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0192>.