



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharias

Bancada de ensaios para avaliação da resposta em frequência de guitarras acústicas

João Paulo Fernandes Rodrigues

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Bruno Jorge Ferreira Ribeiro

Covilhã, Outubro de 2015

Agradecimentos

Ao longo da realização da dissertação foram muitos os apoios recebidos que contribuíram para a sua realização.

Desde já, o meu agradecimento especial ao João José Oliveira pela oportunidade de poder iniciar esta investigação e pelo fornecimento dos protótipos de guitarras de compósitos.

Agradeço também a paciência e dedicação do professor Bruno Ribeiro pela orientação nesta dissertação, assim como o fornecimento de ferramentas (intelectuais e materiais) que muitos contribuíram para esta dissertação. Agradeço o apoio do professor Luís Carrilho e ao professor Alexandre Miranda pelo apoio especial fornecido, e à Universidade da Beira Interior, em particular, ao Departamento de Engenharia Eletromecânica pelo fornecimento das instalações e material de teste.

Os agradecimentos estendem-se para além da comunidade académica:

- Aos meus pais e irmão e sempre me apoiaram ao longo destes anos.
- Em especial a todos os amigos e colegas que fazem parte da minha vida social, que sem esta seria impossível realizar este percurso. Como a característica mais importante do ser humano é a sua ação social, deixo aqui um apreço incondicional a todos os que decidiram despendar parte das suas vidas na partilha de conhecimentos, momentos lúdicos e momentos difíceis comigo, são estes: Jorge Rato, Bruno Santos, Artur Cruz, Freddy Silva, Miguel Clemente, Rodrigo Campos, Patrícia Aldeia, Alex Nogueira, Ricardo Santos, Diogo Carrilho e tantos outros que de uma forma ou outra contribuíram para a conclusão desta etapa.

Resumo

Devido ao aumento de produção de guitarras de madeira e, conseqüentemente, à elevada desflorestação causada nas ultimas décadas, tornou-se essencial o estudo da produção de guitarras constituídas por materiais alternativos e que possam fornecer a mesma experiência sonora. Para isso é imprescindível dotar esta indústria de ferramentas que permitam fazer uma avaliação qualitativa do som que as guitarras conseguem reproduzir. Para que esta análise seja bem sucedida é necessário primeiro referir que cada instrumento musical, e cada guitarra propriamente, acarreta a sua própria e distinta qualidade sonora, o que torna difícil esta análise. Por outro lado, é possível efetuar uma análise quantitativa da ressonância de cada guitarra e tentar assim perceber, do ponto de vista científico, quais os aspetos a melhorar por forma a aproximar a ressonância à de uma guitarra constituída por madeira. Posto isto, esta dissertação comporta a execução de uma bancada de testes que permita, com alguma facilidade, a execução de testes para obtenção da resposta de caixas das guitarras e, por via de uma comparação, obter uma avaliação comparativa da qualidade da guitarra sujeita aos testes. Este tipo de bancada está desenhada para que uma empresa do sector da construção de guitarras e, mais precisamente, de guitarras com materiais alternativos, possa obter rapidamente uma avaliação preliminar da resposta em frequência de uma guitarra protótipo e, num ciclo de testes, prosseguir para a sua alteração até que seja obtida a resposta pretendida.

Palavras-chave

Ressonância; guitarras acústicas; guitarras de compósitos; caracterização *FFT*; vibração.

Abstract

Due to the increase of wooden guitars production and consequently the high caused deforestation in recent decades, it has become essential to study the production of guitars made by alternative materials that could provide the same sound experience. It is essential to provide the industry with tools that make a qualitative assessment of the sound that guitars can reproduce. For this analysis to be successful, it must first be noted that each musical instrument and each guitar itself, carries its own distinct sound quality, which makes the analysis difficult. On the other hand, you can perform a quantitative analysis of the resonance of each guitar and try to realize, in the scientific point of view, what aspects to improve in order to approximate the resonance to a guitar made by wood. That said, this work involves the implementation of a test bench to allow, with some ease, running tests to obtain the guitars bodies responses and, by way of a comparison, get a benchmarking to the guitar subject to tests. This type of test bench is designed for a company dedicated to the construction of guitars and, more precisely, guitars made with alternative materials, can quickly get a preliminary response evaluation in frequency of a prototype guitar and, with a test cycle, proceeding to his change until the desired response is achieved.

Keywords

Ressonance; acoustic guitars; composite guitars; *FFT* characterization; vibration.

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo.....	v
Palavras-chave.....	v
Abstract	vii
Keywords	vii
Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas	xiii
1 Objetivos e estrutura	1
2 Introdução	3
2.1 Enquadramento	3
2.1.1 Música	3
2.1.2 Guitarra	3
2.1.3 Alternativas	7
3 Considerações técnicas	9
3.1 Ondas sonoras	9
3.2 Bons sons Vs. Ruído.....	15
3.3 Cordas e harmónicos	17
3.4 Espectro de frequências musicais e escala da guitarra	18
3.5 Características da ressonância de uma guitarra	21
4 Alguns métodos de teste usados	23
4.1 <i>Tapping test</i>	23
4.2 Padrão de Chladni	23
4.3 Estudo da vibração com acelerómetro	25
4.4 Interferometria	25
4.5 Cordas dedilhadas	26
5 Método experimental	29
5.1 Conceito inicial	29
5.2 Conceção do modelo	31
6 Testes	37
7 Conclusões e recomendações	45
8 Bibliografia	47

Lista de Figuras

Figura 1 - Desenho esquemático do sistema de cordas numa guitarra [3]	4
Figura 2 - Modelo de guitarra clássica fabricado por Antonio de Torres em 1888 (Foto: Winkler Collection) [5]	5
Figura 3 - Modelo extrudido da guitarra e designação de alguns dos constituintes [5]	6
Figura 4 - Produção de uma onda sonora através da vibração ou oscilação de um pistão [3] .	10
Figura 5 - Função da onda sinusoidal inicial contendo a frequência fundamental	11
Figura 6 - Evolução da soma das parcelas da serie de Fourier, acumulando as frequências parciais [16]	12
Figura 7 - Duas ondas com as suas componentes fundamental e parciais [3]	13
Figura 8 - Espectro de frequências da resposta de uma guitarra a 330 Hz e 196 Hz [3].....	14
Figura 9 - Espectro de frequências da resposta de um violino a 196 Hz [3]	14
Figura 10 - Espectro de frequências da resposta de uma flauta a 392 Hz [3]	14
Figura 11 - Análise das frequências de uma corda dedilhada no centro [17].....	17
Figura 12 - Gama de frequências fundamentais de vozes e vários instrumentos musicais [3] .	20
Figura 13 - Ataque, estado estacionário e decaimento [3].....	21
Figura 14 - Bancada de ensaios de um ensaio <i>tapping</i> [21]	23
Figura 15 - Exemplos de padrões de Chladni em tímpanos [16]	24
Figura 16 - Sistema de interferómetro de <i>speckle</i> eletrónico [24].....	25
Figura 17 - Deformações no tampo superior de uma guitarra medido com interferometria holográfica [25]	26
Figura 18 - Bancada de ensaio para o teste de qualidade sonora da guitarra [26]	26
Figura 19 - Localização da ponte numa guitarra	30
Figura 20 - Esquema de um <i>shaker</i> eletrodinâmico [33].....	30
Figura 21 - Esquema de suspensão da guitarra no tripé	31
Figura 22 - Modelo CAD de: a) peça para suporte b) suporte aplicado no altifalante	32
Figura 23 - Modelo CAD da caixa e altifalante com suporte	33
Figura 24 - Construção do modelo de ensaios	33
Figura 25 - Pormenor do batente do modelo de ensaios em contacto com a ponte da guitarra	34
Figura 26 - Janela do MAX®/MSP co programa para fornecer a onda senoide	35
Figura 27 - Microfone usado nos testes - Benhringer® C-2 [34]	36
Figura 28 - Janela de visualização do programa AudioXplorer®.....	36
Figura 29 - Esquema geral da bancada de testes	37
Figura 30 - Disposição da bancada de ensaios.....	37
Figura 31 - Espectrograma da resposta de uma guitarra sujeita a uma onda sinusoidal a 416 Hz	38

Figura 32 - Gráfico da resposta das diferentes guitarras	41
Figura 33 - Gráfico comparativo da guitarra de referência Vs guitarra de madeira modelo 2	42
Figura 34 - Gráfico comparativo da guitarra de compósito modelo 1 Vs guitarra de compósitos modelo 2	42
Figura 35 - Gráfico comparativo da guitarra de referência Vs guitarra de compósitos modelo 1	43
Figura 36 - Gráfico comparativo da guitarra de referência Vs guitarra de compósitos modelo 2	44
Figura 37 - <i>SmartShaker™ w/Integrated Power Amplifier</i> [35].....	46

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Relação das frequências dos tons de uma escala em temperamento igual [3]	18
Tabela 2 - Frequências de todas as notas musicais [3]	19
Tabela 3 - Padrões de Chladni para o estudo de caixas de guitarra [22]	24
Tabela 4 - Resposta das diferentes guitarras a frequências de excitação (mV)	40

1 Objetivos e estrutura

O objetivo desta dissertação é a conceção de uma bancada de ensaios para a aquisição de harmónicos de resposta em frequência nas guitarras. Este tema foi proposto no sentido de ser desenvolvida uma metodologia de teste para uma empresa da Cova da Beira que pretende iniciar atividade na construção de guitarras de fibras de compósitos. Sendo esta dissertação focada na área de engenharia eletrotécnica e de computadores, os conteúdos mais relevantes centram-se em torno da aquisição de dados, nomeadamente na resposta em frequência, e no seu tratamento de modo a fornecer uma visão simplificada para, posteriormente, ser utilizada pela empresa no desenvolvimento de protótipos de guitarras.

A bancada de testes tem como princípio a estimulação vibratória de ondas sinusoidais puras na guitarra e registar a sua ressonância ou capacidade de resposta ao longo de várias frequências do espectro harmónico da guitarra. Para isto recorreu-se à construção de um *shaker* que reproduz movimento vibratório na banda de frequências da guitarra.

Esta dissertação está estruturada de maneira a conduzir o leitor a uma compreensão dos principais objetivos e das conclusões tiradas. Para isso começa-se por fazer um enquadramento do que é música e os mecanismos principais de funcionamento de uma guitarra acústica no capítulo 2. Ainda dentro deste ponto, foi imprescindível mencionar algumas alternativas já usadas nas guitarras de forma a substituir a utilização da madeira. Embora este ponto não se enquadre na área científica desta dissertação, foi necessário referenciar devido ao facto de esta bancada de ensaios ter como destinatário uma empresa que se dedica a este tipo de produção. É também importante que este tipo de investigação seja realizada de modo a criar ferramentas que ajudem a perceber estas diferenças entre madeira e materiais compósitos aplicados a instrumentos musicais e assim diminuir a desflorestação causada por este tipo de indústrias.

O capítulo 3 destina-se a enquadrar o tema da dissertação de um ponto de vista mais tecnológico, com um esclarecimento de todos os pontos importantes a salientar para a devida compreensão dos resultados, assim como uma explicação física do que é uma onda sonora, a sua composição e enquadramento musical.

É apresentada no capítulo 4 uma visão geral dos testes mais usados para testar a qualidade das guitarras, de forma a conseguir enquadrar a bancada de ensaios elaborada nesta dissertação nesta área.

Nos capítulos 5 e 6 procede-se à descrição do método usado e à explicação para o uso dos vários componentes utilizados nos ensaios, e de seguida, procede-se à análise dos resultados e elucidação do seu significado tendo em conta o objetivo inicial.

2 Introdução

2.1 Enquadramento

2.1.1 Música

Algumas combinações de sons são designadas como música, enquanto outras são chamadas de ruído. Qual é a diferença entre sons musicais e ruído? Um som musical faz as pessoas gostarem ou não, ter uma atitude atrativa ou menos atrativa em relação a vários sons ou estilos musicais. Apesar de todas estas variantes, a música apresenta alguns aspetos que são comuns ao ruído, como por exemplo, a utilização de alguns sons com frequências comuns e cuja sua combinação, tal como acima referido, despertam um conjunto de emoções nos indivíduos. É natural também na música existirem padrões e ritmos de sons que são usados de forma a reproduzir um tema ou um plano anteriormente delineado pelo artista. Por outro lado, ruído é a combinação de frequências de uma forma não organizada e, por vezes, até aleatória (Avison, 2014). No entanto, se ao reproduzir várias notas simultaneamente (em vários teclas consecutivas de um piano, por exemplo) obtem-se uma sonoridade que se aproxima mais a um ruído do que, propriamente a um som musical. Por outro lado, vários tipos de ruído em conjunto nunca poderão reproduzir um som harmonioso e musical. É portanto, em certos casos, uma linha ténue que faz esta divisão [2].

2.1.2 Guitarra

Todos os instrumentos musicais têm como objetivo produzir um som agradável aos nossos ouvidos e que podem ser compostos por um ou mais tons sonoros. Para produzir estes sons, os instrumentos musicais são compostos por sistemas ressonantes ou multi-ressonantes de forma a produzir os tons das escalas compostas por músicos para esses instrumentos. Existem vários sistemas ressonantes que definem os tipos de instrumentos que existem: instrumentos de corda, instrumentos de sopro, instrumentos de percussão e instrumentos elétricos. A classe dos instrumentos de cordas (ao qual pertence a guitarra) pode ser ainda dividida pelas suas formas de execução, sendo estas: cordas dedilhadas; cordas friccionadas e cordas percutidas. Fazem parte do tipo de instrumentos de cordas dedilhadas todos os tipos de guitarras acústicas, harpa, mandolim, cavaquinho, *ukulele*, banjo, etc. Os instrumentos de cordas friccionadas são, por exemplo, os violinos, violas, violoncelos e contrabaixo. Quando os instrumentos são executados através da percussão (cordas percutidas) tratam-se de instrumentos como o piano (de cauda e vertical) e o *Dulcimer*. Independentemente da execução, todos os instrumentos de cordas funcionam, acusticamente, de forma semelhante [3].

Fazer vibrar uma corda sob tensão é uma das mais antigas maneiras de produzir um som. Uma corda sob tensão é capaz de produzir toda uma variedade de tons que têm como

característica vários harmónicos da frequência fundamental e com diferentes amplitudes. Esta corda assenta sobre uma superfície algo fina que, sem toda a amplificação acústica, seria difícil escutar o som produzido pelo instrumento. Deste modo tornou-se necessário produzir uma amplificação acústica que tem como princípio a dispersão das vibrações sobre uma superfície e induzir posteriormente movimentações de ar por uma caixa acústica de modo a aumentar o volume sonoro [3].

A guitarra consiste num sistema acústico que tem a sua origem sonora na excitação de uma ou mais cordas em simultâneo (até seis). Estas cordas estão esticadas entre a ponte e a pestana. O corpo da guitarra é constituído por dois tampos planos de madeira paralelos e acoplados entre si nas extremidades por um outro tampo de madeira contínuo e arredondado. As vibrações produzidas pela corda são induzidas no tampo superior através da ponte e refletidas pelo tampo inferior de forma a produzir um sistema acústico ressonante que tem como saída de ar ou som um orifício no tampo superior [3].

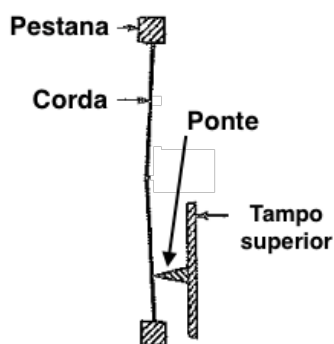


Figura 1 - Desenho esquemático do sistema de cordas numa guitarra [3]

A origem da guitarra, tal como a conhecemos, tem uma descendência direta da *vihuela* espanhola que teve a sua origem em Espanha por volta do século XVI. A guitarra, como instrumento de concerto, foi introduzida por Fernando Sor (1778-1839) e foi um dos primeiros compositores espanhóis de música para guitarra [4].

Pode dizer-se que foi devido ao *luthier*¹ espanhol Antonio de Torres (1819-1892) que as guitarras clássicas têm o aspeto presente nos dias de hoje (Figura 2). Antonio de Torres aumentou o volume da caixa oferecendo ao som da guitarra um maior volume sonoro assim como um maior balanço das frequências características de uma guitarra através da adição de ilhâras no interior do tampo superior da guitarra [4].

¹ *Luthier* é um profissional que tem como função o fabrico manual de instrumentos de cordas, excetuando os instrumentos com ação por teclas (percutidos) [42].



Figura 2 - Modelo de guitarra clássica fabricado por Antonio de Torres em 1888 (Foto: Winkler Collection) [5]

Guitarras construídas com o tampo inferior e lateral menos espesso tende a ter uma projeção sonora maior, ou seja, proporcionam um maior volume sonoro quando comparadas com as guitarras construídas com os tampos mais espessos. O trabalho do *luthier* passa por construir uma guitarra que seja espessa o suficiente para que produza um som com um volume sonoro suficientemente elevado, estável de modo a mitigar dificuldades a nível dos harmónicos e com um tampo superior suficientemente flexível para marcar a presença e corpo ao som da guitarra. O sistema de ilhargas é importante para esta estabilização e para fornecer à guitarra um som equilibrado e agradável ao nosso ouvido [5]. A guitarra fabricada por Antonio Torres é o tipo de guitarra mais popular e a partir do qual outros modelos foram desenvolvidos. A família das guitarras acústicas engloba as guitarras clássicas, guitarras de flamengo, guitarra portuguesa, guitarras *flat-top* e *arch-top*, guitarras *resonator*, guitarras de 12 cordas e guitarras-baixo acústicas [4].

Nos instrumentos de cordas, como o violino e a guitarra, o som irradiado provém, essencialmente do tampo superior e das madeiras utilizadas na sua construção. São usadas principalmente as madeiras do tipo *Picea Genus*, *German Spruce*, *Akazeomatsu* e a *Sitka Spruce*, sendo que são escolhidas as placas de madeira sem defeito algum, com o grão de madeira direito e alinhado e sem fendas para que se possa fabricar guitarras de alta qualidade [6]. No entanto, para a construção do tampo inferior e lateral a qualidade da madeira não apresenta uma influência tão acentuada quando comparada com o tampo superior. As madeiras mais usadas para a construção do tampo superior e laterais (normalmente constituídas do mesmo tipo de madeira) são *rosewood*, *maple* e *mahogany* ou mogno [7]. O *luthier* António de

Torres chegou a fazer um modelo de guitarra com madeira de *Spruce* no tampo superior e *papier-maché* nos lados e tampo inferior, de modo assim a comprovar assim que o tampo superior é o principal responsável por grande parte da qualidade de som produzido pelas guitarras [8].

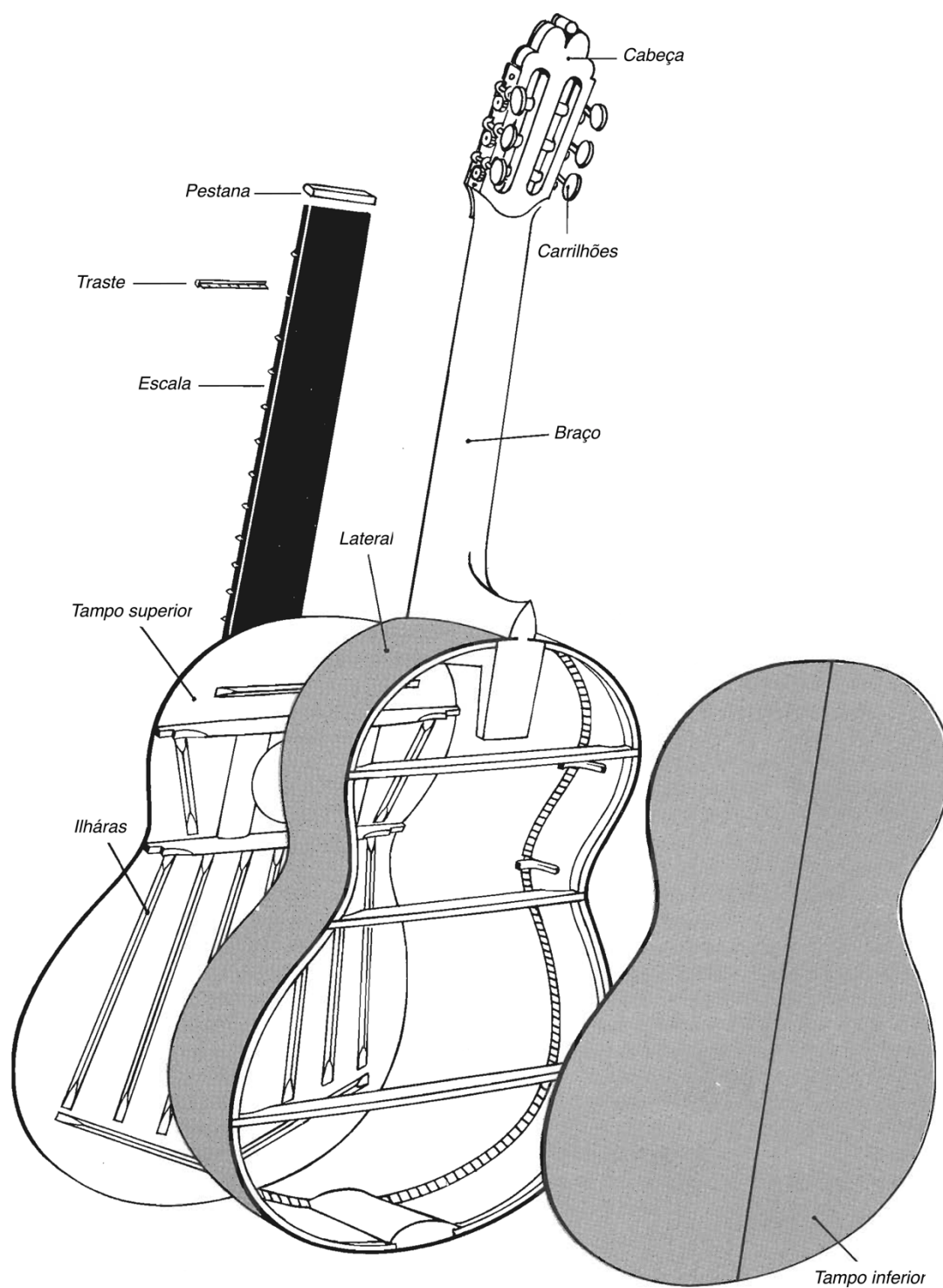


Figura 3 - Modelo extrudido da guitarra e designação de alguns dos constituintes [5]

2.1.3 Alternativas

Devido à forma como o corte da madeira é feito para que o fabrico dos tampos fique com as melhores características tanto a nível estrutural como a nível sonoro, existe muito desperdício de madeira e algumas das madeiras usadas atualmente já se encontram em vias de extinção, além disso o crescimento das árvores tem de ser feito lentamente de modo a que os grãos da madeira fiquem o mais alinhados possível. Por outro lado, para ser possível fazer tampos de guitarra de alta qualidade é necessário que uma árvore da espécie *Sikta Spruce* tenha, pelo menos, 200 anos de idade para que os anéis da madeira fiquem o mais próximos possível e sustentem a força exercida pelas cordas. Árvores com a capacidade de produzir tampos superiores de guitarras de alta qualidade estão a ser cortadas a um ritmo muito mais rápido do que o ritmo a que podem crescer e ser substituídas por novas [9].

Posto isto, abre-se uma clara janela de oportunidade na criação de alternativas para a construção de guitarras. Existem atualmente quatro alternativas às madeiras tradicionais: madeiras de espécie alternativas de florestas primárias, madeiras de espécies de crescimento rápido de florestas primárias, madeiras laminadas ou contraplacados e materiais sintetizados pelo Homem [9].

Das alternativas mencionadas acima importa salientar a última, nomeadamente os materiais sintetizados pelo homem sobre os quais já existe uma base de investigação científico-tecnológica com o intuito de alcançar um material que apresente características semelhantes às das melhores madeiras utilizadas na construção de guitarras. Em 1975 foi estudada a aplicação de compósitos de grafite-epoxy nos instrumentos musicais de modo a substituir a madeira. [10] Em 2002 foi publicado um artigo científico, com resultados interessantes, onde compara uma fibra de carbono com poliuretano e a madeira [11]. O artigo de Mark French e Rod Handy [9] faz um bom apanhado de materiais compósitos e mistos que existiam até 2006. Existe também um artigo de 2007 que faz uma comparação entre várias espécies de madeiras utilizadas, assim como vários materiais compósitos de modo a agrupá-los numa linha de tendência ideal [12]. Também as investigações realizadas sobre violinos poderão ser aplicadas aos tampos de guitarras e existe um artigo científico de 2012 onde são mencionados compósitos de plástico com reforço de fibra como o melhor candidato a substituir as madeiras naturais [13]. Existe também um trabalho redigido por Chris Dunn em 2013 que elege como a réplica mais fiável um compósito com um núcleo de aramida em formato de favo de abelha coberto por uma folha de fibra de vidro em cada face (*Single-ply fiberglass honeycomb composite*) [14]. Em 2013 foi apresentado um estudo sobre uma guitarra fabricada com um tampo superior de *foamed polycarbonate*, um policarbonato que é sujeito a um enchimento de modo a obter porosidades internas, com diversas características favoráveis à estrutura e som de uma guitarra [15]. Em relação aos modelos comercializados (alguns já descontinuados) é possível destacar alguns exemplos, como a guitarra AlternativeX da Martin & Co ® [16] composta por um tampo

superior com base numa liga de alumínio e o tampo inferior é composto por laminado de alta pressão (HPL). As guitarras da Blackbird ® [17] são compostas por um monobloco de fibra de carbono, sendo que um modelo específico, a Blackbird ® El Capitan [18], é composta por um compósito especial (Ekoa®) um monobloco à base de um compósito natural de fibra de linho. A marca Composite Acoustics ® [19] também tem alguns modelos de guitarra à base da fibra de carbono e um compósito designado *All Composite Acoustically Tailored™*. Também com o um monobloco de fibra de carbono, a Emerald Guitars ® [20] conta também com alguns modelos de guitarras. Sendo que de todas as marcas a que mais se destaca é a Ovation ® [21], sendo as suas guitarras constituídas por um tampo inferior de fibra de vidro e um tampo superior feito por uma única peça de madeira de *spruce* de alta qualidade, bem como noutra vertente algumas guitarras com o tampo superior de fibra de carbono e o tampo inferior de grafite com patente destinada à indústria aeroespacial.

3 Considerações técnicas

3.1 Ondas sonoras

Som é uma alteração na pressão, deslocação das partículas ou velocidade das partículas que são propagadas num meio elástico. Som pode ser também a sensação audível recebida através do ouvido devido às alterações descritas acima.

Dada esta definição, o som é produzido desde que exista ar ou outro meio de propagação que é colocado em movimento. Pode este ser produzido como resultante da vibração de um corpo, como acontece nas placas sonoras (tampo superior na guitarra) de alguns instrumentos como o piano, guitarra, violino, ou o próprio diafragma de um altifalante. Se a onda sonora for resultante de uma alteração na pressão ou velocidade do ar temos descrito o que acontece nos instrumentos de sopro, onde é usada a manipulação do ar para a produção de diferentes sons ou notas musicais. Uma onda sonora viaja a uma velocidade de 335,28 m/s (1207 km/h), apesar de que, teoricamente a velocidade depende da temperatura como dada na expressão:

$$c = 33100\sqrt{1 + 0,00366t} \quad (2.1)$$

sendo c a velocidade do som em centímetros por segundo e t a temperatura em graus centígrados.

Qualquer corpo vibrante em contacto com a atmosfera irá produzir ondas sonoras. Um dos mais simples tipos de corpo vibrante é imaginar um pistão que vibra alternadamente para trás e para a frente causando movimentações de ar e compressão do ar à sua frente (Figura 4). A cada ciclo trás-frente o pistão conclui um ciclo de onda sonora. Mais exemplos deste tipo de gerador de som são os diafragmas dos altifalantes que consequentemente reproduzem o som desejado.

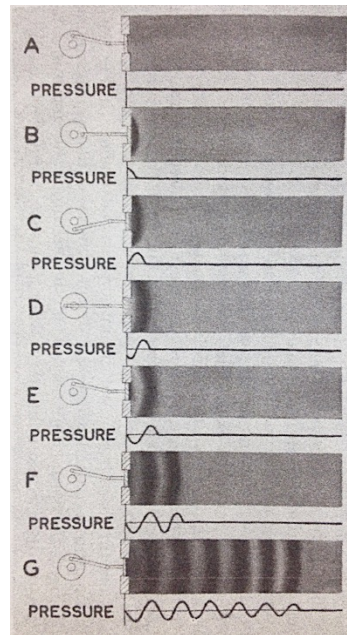


Figura 4 - Produção de uma onda sonora através da vibração ou oscilação de um pistão [3]

Em termos técnico-científicos, uma onda sonora pode ser caracterizada usando a sua frequência e a sua intensidade ou potência. A frequência de uma onda sonora corresponde ao número de ciclos completos da onda por cada segundo. Os geradores de ondas (como na Figura 4) produzem ondas recorrentes similares a uma velocidade finita, o número de ondas recorrentes ou ciclos que passam por um determinado ponto de observação a cada segundo é designado por frequência de onda e é expressa em Hertz (Hz) ou ciclos por segundo (s^{-1}).

A intensidade de um campo de som numa direção específica pode traduzir-se pela energia da onda sonora transmitida por unidade de tempo numa determinada direção através de uma unidade de área normal a essa direção. Normalmente a intensidade sonora é também uma grandeza física mensurada em termos relativos, em dB (decibel) e que por definição corresponde a dez vezes o logaritmo de base 10 de uma relação de potência desse som com uma potência de referência, como a dada na expressão [3]:

$$n = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2} \quad (2.2)$$

Apesar destes aspetos serem fáceis de assimilar, o mesmo já não acontece quando falamos em ondas sonoras, embora alguns instrumentos apresentem ondas sonoras algo similares a uma onda sinusoidal pura, muitos dos sons ou ruídos que ouvimos no dia-a-dia são composições de formas de onda bastante mais complexas, inclusive várias frequências na própria onda sonora. Como isto é possível? Para lidar com este problema foi criada uma solução

em 1822 por Jean Baptiste Joseph Fourier no seu livro *La théorie analytique de la chaleur* e ficou conhecida como a teoria de Fourier da análise harmónica. Esta análise consiste na decomposição de uma onda periódica numa soma (teoricamente infinita) de senos e cossenos, sendo que estas frequências envolvidas são múltiplas da frequência da onda periódica fundamental e cada uma destas frequências são constituídas por uma amplitude própria definida na função da onda a decompor [22].

Fourier fundamentou que todas as funções periódicas podem ser analisadas utilizando séries trigonométricas, ou seja, utilizando um intervalo de tempo que comporte um ciclo de onda completo é possível caracterizar uma onda sonora tendo por base funções seno e cosseno. De um modo geral podemos dizer que qualquer onda pode ser descrita da seguinte forma:

$$f(\theta) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\theta) + b_n \sin(n\theta)) \quad (2.3)$$

onde a_n e b_n são constantes, sendo n a ordem das séries de Fourier.

Por forma a extrapolar a teoria de Fourier mencionada acima torna-se necessário contextualizar a mesma recorrendo a um exemplo do livro [22]. Tomemos então como exemplo, a construção de uma onda quadrada a partir de somas de cossenos e senos ou de várias ondas sinusoidais puras. A serie de *Fourier* para uma onda quadrada é dada por:

$$\frac{4}{\pi} \left(\sin(\theta) + \frac{1}{3} \sin(3\theta) + \frac{1}{5} \sin(5\theta) + \dots \right) \quad (2.4)$$

temos uma evolução de n apenas nos números impares. Sendo que a onda sinusoidal pura utilizada a que apresenta na figura seguinte:

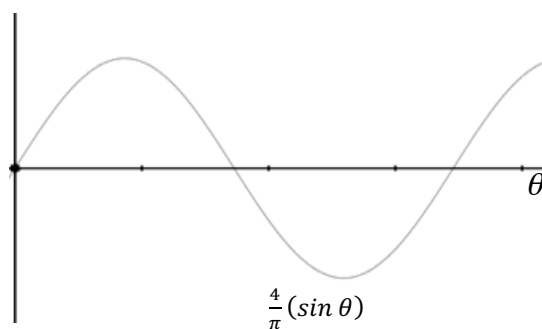


Figura 5 - Função da onda sinusoidal inicial contendo a frequência fundamental

Importa agora analisar um conjunto de interações por forma a mostrar a transformação da onda sinusoidal original numa onda quadrada ou aproximadamente quadrada:

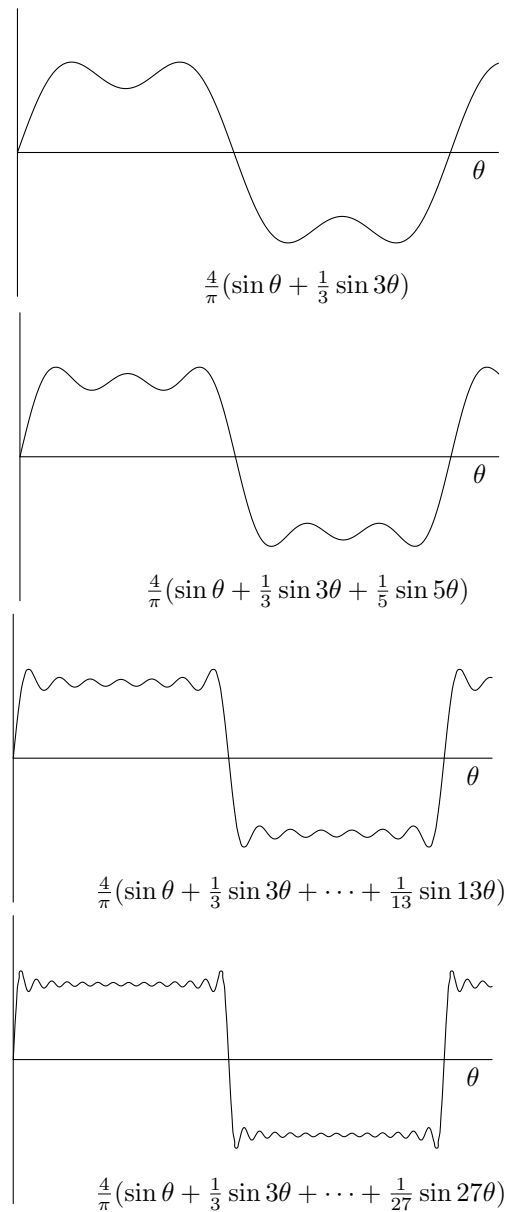


Figura 6 - Evolução da soma das parcelas da serie de Fourier, acumulando as frequências parciais [22]

Assim é fácil de observar a evolução da convergência da forma de onda sinusoidal até se aproximar de algo mais aproximado ao que designaríamos por onda quadrada. Podemos agora imaginar que a ação reversa pode também ser facilmente conseguida.

Esta questão tem bastante relevância nesta dissertação por vários motivos. É com alguma facilidade que nos apercebemos que se uma onda sonora for bastante mais complexa, ou se a sua periodicidade for bastante irregular (elevado número de alterações de frequência) ficamos com uma análise de series de Fourier bastante comprometida. No entanto, graças às

evoluções a nível do processamento computacional assistidas nas últimas décadas esta análise foi-se tornando cada vez mais assertiva.

Para se perceber melhor como uma onda complexa pode ser dividida numa frequência fundamental e várias parciais, de seguida apresenta-se um exemplo de duas formas de onda algo complexas e as frequências e respetivas amplitudes que compõem essas mesmas ondas:

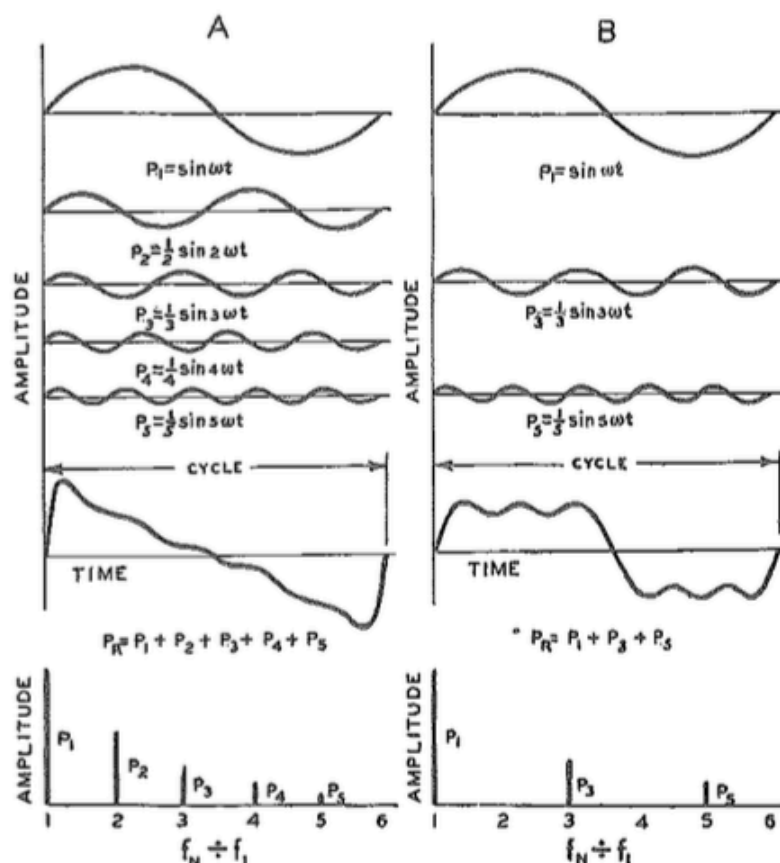


Figura 7 - Duas ondas com as suas componentes fundamental e parciais [3]

Esta forma discriminativa de analisar as ondas sonoras é largamente usada tanto no meio eletrotécnico como no meio musical, de forma a analisar a qualidade dos sinais periódicos. Esta análise é denominada análise FFT (*Fast Fourier Transformer*) e permite reconhecer as frequências envolvidas numa onda complexa. Existem alguns exemplos de espectros harmónicos ou gráficos FFT para os mais variados instrumentos musicais:

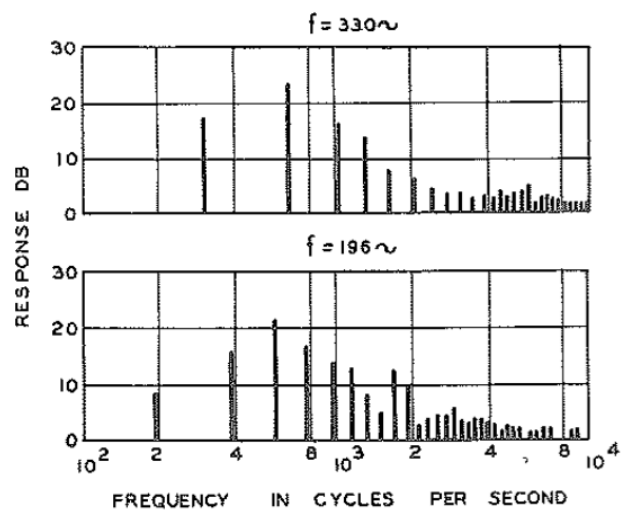


Figura 8 - Espectro de frequências da resposta de uma guitarra a 330 Hz e 196 Hz [3]

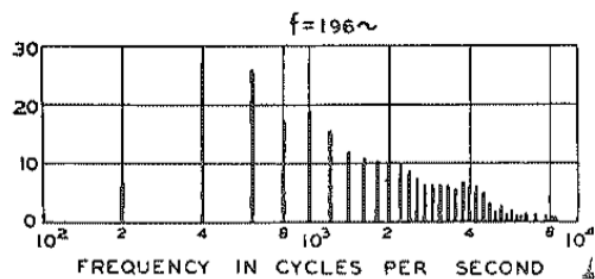


Figura 9 - Espectro de frequências da resposta de um violino a 196 Hz [3]

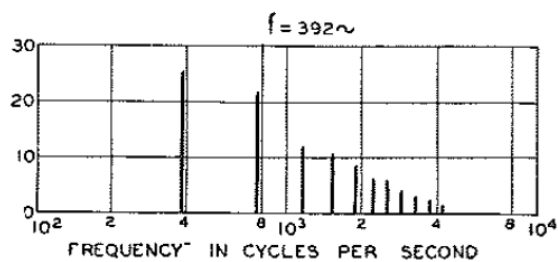


Figura 10 - Espectro de frequências da resposta de uma flauta a 392 Hz [3]

3.2 Bons sons Vs. Ruído

Fazendo uma análise superficial, a relação entre um bom som e um ruído é bastante óbvia e aparentemente linear. No entanto ao fazer-se um aprofundamento da questão vê-se que não existe uma linha que defina a separação entre estes tão distintos mundos.

É bastante intuitivo, até para uma criança, concluir que o som de uma buzina de um camião ou um alarme de um carro é considerado algo repugnante e que leva a uma reação de alerta e até uma reação de fuga a este evento alarmante, mas se formos confrontados com um trecho de música clássica, ou até o “cantar” de alguns pássaros temos a reação oposta, ficamos mais calmos e temos a tendência de achar a experiência bastante agradável.

Agora considere-se que estamos na presença de um piano acústico algo desafinado e de um piano acústico perfeitamente afinado, pode-se com certeza afirmar que existe uma diferença na qualidade do som de cada um e que é mais agradável o som de um piano perfeitamente afinado de aquele que tem algumas desafinações. Pode-se então dizer que o som de um piano perfeitamente afinado é considerado um som agradável e que o piano com algumas desafinações é considerado ruído? Como se pode perceber não é assim tão linear.

A teoria musical tenta explicar esta diferenciação com as definições de consonante e dissonante. Quando dois ou mais tons² são reproduzidos simultaneamente e o resultado é agradável ao ouvido, o som resultante é chamado de consonante. Quando a combinação de tons é desagradável ao ouvido é chamado de dissonante. Consonância depende, portanto, do grau de coincidência das ondas sonoras. Quando dois tons são reproduzidos simultaneamente e a sua frequência fundamental é muito próxima uma da outra a combinação é perturbada pelos *beats* ou batimentos nas frequências parciais mais altas de forma que o efeito produzido é um som pulsante que produz a rugosidade ou aspereza no som tornando-o mais desagradável ao ouvido. Tendo isto por base pode-se esperar que uma combinação de tons em que a relação entre as frequências possa ser expressa por uma relação de dois números que produzam o som mais agradável, como por exemplo, 2:1, 3:2, 5:3, 5:4, 4:3, etc.. Tudo isto é constantemente usado no mundo musical de modo a obter a melhor consonância de sons e produz a música mais agradável ao ouvido. Estas relações significam que as frequências parciais estão relacionadas entre si e a fundamental por um fator de 2:1 ou são sempre o dobro umas das outras. É importante salientar que estas relações não se mantêm até ao infinito, quanto maior o número

² É considerado um tom a experiência auditiva tendo uma altura a nível da frequência fundamental, ou uma onda sonora capaz de excitar uma sensação auditiva com altura musical (*pitch*) [3]. No fundo é um conjunto de um ou mais harmónicos reproduzidos e audíveis por nós e que consideremos que é uma experiência auditiva.

da relação (por exemplo a partir de 64:45, uma quinta diminuta na notação musical) entre os tons, maior se irá notar a rugosidade ou dissonância no som [3].

Claro que este conceito de dissonância e consonância é muito dentro do mundo musical e classifica relações entre as diversas notas musicais, no entanto pode ser também aplicado para determinar alguma anomalia que possa existir numa guitarra.

3.3 Cordas e harmônicos

Quando uma corda é excitada através da fricção do arco num violino, dedilhada numa guitarra ou percutida através dos martelos num piano, sendo as cordas compostas de um material elástico (geralmente aço, exceto nas guitarras clássicas em que é utilizado o nylon) a vibração resultante é uma combinação de vários modos de vibração. Por exemplo, se a corda for tocada no meio do seu comprimento total, a vibração resultante será constituída pela frequência fundamental dada pelo comprimento da corda através da equação 2.5 mais as frequências parciais ímpares [23].

$$f_r = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad 2.5$$

sendo f_r a frequência ressonante fundamental em *Hz*, l o comprimento da corda em centímetros, m a massa por unidade de comprimento, em gramas e T a tensão da corda em dynes [3].

A Figura 11 ilustra como os harmónicos ímpares, devidamente distribuídos, conseguem recriar o momento exato em que a corda foi dedilhada. Esta distribuição dos harmónicos numa corda é o que acontece sempre que uma corda vibra numa guitarra e esta reproduz o som, ou seja, o som que ouvimos da corda é um composto de várias frequências todas elas relacionadas entre si de modo a fornecer um som limpo e rico. Estes harmónicos resultantes da frequência fundamental existem até aos ultrassons, mas como se pode ver na Figura 11 a sua intensidade diminui bastante com o aumento da frequência, logo apenas ouvimos parte deste espectro completo [23].

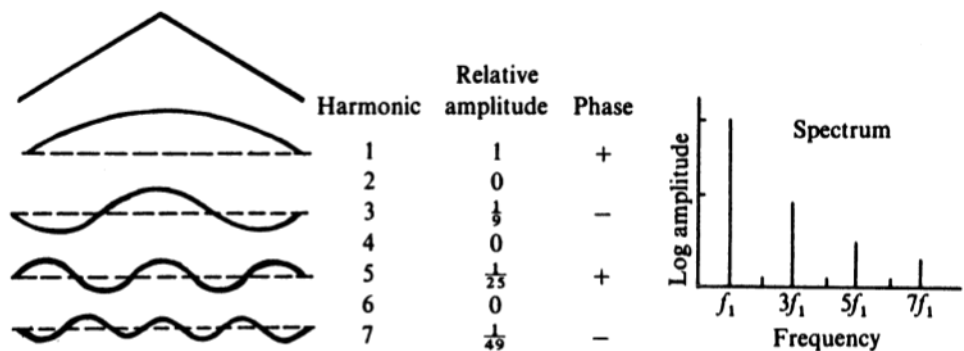


Figura 11 - Análise das frequências de uma corda dedilhada no centro [23]

3.4 Espectro de frequências musicais e escala da guitarra

Existem inúmeros tipos de instrumentos musicais, todos com um objetivo em comum, fornecer ao ouvinte uma agradável experiência de audição. Para isso, e para preencher a necessidade dos compositores de utilizarem diferentes frequências e vários tipos de som de acordo com o efeito que se deseja alcançar. Além de haver várias categorias de instrumentos e vários instrumentos dentro dessas categorias é aqui importante falar apenas no panorama geral das frequências e dar uma ideia da gama de frequência que a guitarra está apta para reproduzir.

Para ser mais fácil escrever e ler música inventou-se um sistema de escalas musicais que cobre praticamente todo o espectro de frequências que os nossos ouvidos conseguem captar. Atualmente utiliza-se o sistema de escalas de temperamento igual em que se divide um intervalo de frequências definido com uma oitava em 12 intervalos designados por semitons. Há, portanto, 12 semitons na escala musical: Dó, Dó \sharp ou Ré \flat , Ré, Ré \sharp ou Mi \flat , Mi, Fá, Fá \sharp ou Sol \flat , Sol, Sol \sharp ou Lá \flat , Lá, Lá \sharp ou Si \flat e Si. Para que este intervalo fosse bem distribuído e as frequências combinassem o melhor possível foi equacionado um intervalo de 100 cents entre cada nota e foi criada uma escala com uma relação de $\sqrt[12]{2}$:

Tabela 1 - Relação das frequências dos tons de uma escala em temperamento igual [3]³

NOTE	FREQUENCY RATIO
C	1.000000f
C \sharp D \flat	1.059463f
D	1.122462f
D \sharp E \flat	1.189207f
E	1.259921f
F	1.334840f
F \sharp G \flat	1.414214f
G	1.498307f
G \sharp A \flat	1.587401f
A	1.681793f
A \sharp B \flat	1.781797f
B	1.867749f
C	2.000000f

³ Entenda-se que na Tabela 1 f corresponde à frequência de uma nota dó

Para generalizar a sua utilização e afinação usa-se o Lá₄ a 440 Hz (é esta a referência para todas as orquestras hoje em dia), ou seja, de Lá₄ a Lá₅ existem 12 semitons e Lá₄ tem sempre uma frequência de 440 Hz e Lá₅ uma frequência de 2x440=880 Hz.

A escala musical completa conta com 10 oitavas ou 10x12 semitons (de Dó₀ a B₉) e abrange um leque de frequências entre os 16,351 Hz até os 15824,26 Hz. Na tabela seguinte estão representadas todas as frequências correspondentes às 10 oitavas. Na tabela as notas estão representadas por letras, entenda-se: Dó=C, Ré=D, Mi=E, Fá=F, Sol=G, Lá=A, Si=B [3].

Tabela 2 - Frequências de todas as notas musicais [3]

NOTE	FREQUENCY	NOTE	FREQUENCY	NOTE	FREQUENCY	NOTE	FREQUENCY	NOTE	FREQUENCY
C ₀	16.351	C ₁	32.703	C ₂	65.406	C ₃	130.813	C ₄	261.626
C ₀ [#] D ₀ ^b	17.324	C ₁ [#] D ₁ ^b	34.648	C ₂ [#] D ₂ ^b	69.296	C ₃ [#] D ₃ ^b	138.591	C ₄ [#] D ₄ ^b	277.183
D ₀	18.354	D ₁	36.708	D ₂	73.416	D ₃	146.832	D ₄	293.665
D ₀ [#] E ₀ ^b	19.445	D ₁ [#] E ₁ ^b	38.891	D ₂ [#] E ₂ ^b	77.782	D ₃ [#] E ₃ ^b	155.563	D ₄ [#] E ₄ ^b	311.127
E ₀	20.601	E ₁	41.203	E ₂	82.407	E ₃	164.814	E ₄	329.628
F ₀	21.827	F ₁	43.654	F ₂	87.307	F ₃	174.614	F ₄	349.228
F ₀ [#] G ₀ ^b	23.124	F ₁ [#] G ₁ ^b	46.249	F ₂ [#] G ₂ ^b	92.499	F ₃ [#] G ₃ ^b	184.997	F ₄ [#] G ₄ ^b	369.994
G ₀	24.499	G ₁	48.999	G ₂	97.999	G ₃	195.998	G ₄	391.995
G ₀ [#] A ₀ ^b	25.956	G ₁ [#] A ₁ ^b	51.913	G ₂ [#] A ₂ ^b	103.826	G ₃ [#] A ₃ ^b	207.652	G ₄ [#] A ₄ ^b	415.305
A ₀	27.500	A ₁	55.000	A ₂	110.000	A ₃	220.000	A ₄	440.000
A ₀ [#] B ₀ ^b	29.135	A ₁ [#] B ₁ ^b	58.270	A ₂ [#] B ₂ ^b	116.541	A ₃ [#] B ₃ ^b	233.082	A ₄ [#] B ₄ ^b	466.164
B ₀	30.868	B ₁	61.735	B ₂	123.471	B ₃	246.942	B ₄	493.883

NOTE	FREQUENCY	NOTE	FREQUENCY	NOTE	FREQUENCY	NOTE	FREQUENCY	NOTE	FREQUENCY
C ₅	523.251	C ₆	1046.502	C ₇	2093.005	C ₈	4186.009	C ₉	8372.02
C ₅ [#] D ₅ ^b	554.365	C ₆ [#] D ₆ ^b	1108.731	C ₇ [#] D ₇ ^b	2217.461	C ₈ [#] D ₈ ^b	4434.922	C ₉ [#] D ₉ ^b	8869.84
D ₅	587.330	D ₆	1174.659	D ₇	2349.318	D ₈	4698.636	D ₉	9397.27
D ₅ [#] E ₅ ^b	622.254	D ₆ [#] E ₆ ^b	1244.508	D ₇ [#] E ₇ ^b	2489.016	D ₈ [#] E ₈ ^b	4978.032	D ₉ [#] E ₉ ^b	9956.06
E ₅	659.255	E ₆	1318.510	E ₇	2637.021	E ₈	5274.042	E ₉	10548.08
F ₅	698.456	F ₆	1396.913	F ₇	2793.826	F ₈	5587.652	F ₉	11175.30
F ₅ [#] G ₅ ^b	739.989	F ₆ [#] G ₆ ^b	1474.978	F ₇ [#] G ₇ ^b	2959.955	F ₈ [#] G ₈ ^b	5919.910	F ₉ [#] G ₉ ^b	11839.82
G ₅	783.991	G ₆	1567.982	G ₇	3135.964	G ₈	6271.928	G ₉	12543.86
G ₅ [#] A ₅ ^b	830.609	G ₆ [#] A ₆ ^b	1661.219	G ₇ [#] A ₇ ^b	3322.438	G ₈ [#] A ₈ ^b	6644.876	G ₉ [#] A ₉ ^b	13289.75
A ₅	880.000	A ₆	1760.000	A ₇	3520.000	A ₈	7040.000	A ₉	14080.00
A ₅ [#] B ₅ ^b	932.328	A ₆ [#] B ₆ ^b	1864.655	A ₇ [#] B ₇ ^b	3729.310	A ₈ [#] B ₈ ^b	7458.620	A ₉ [#] B ₉ ^b	14917.24
B ₅	987.767	B ₆	1975.533	B ₇	3951.066	B ₈	7902.132	B ₉	15804.26

É importante nesta dissertação ter conhecimento destas frequências porque queremos estudar exatamente o comportamento do instrumento em algumas destas frequências.

Nem todos os instrumentos musicais conseguem reproduzir todas estas frequências, provavelmente o instrumento mais versátil e mais usado para a reprodução de grande parte deste espectro é o piano com um alcance desde o Lá₀ até ao Dó₈, no entanto o órgão de tubos consegue ultrapassar a gama do piano, tanto nas frequências mais baixas como nas frequências mais altas [3].

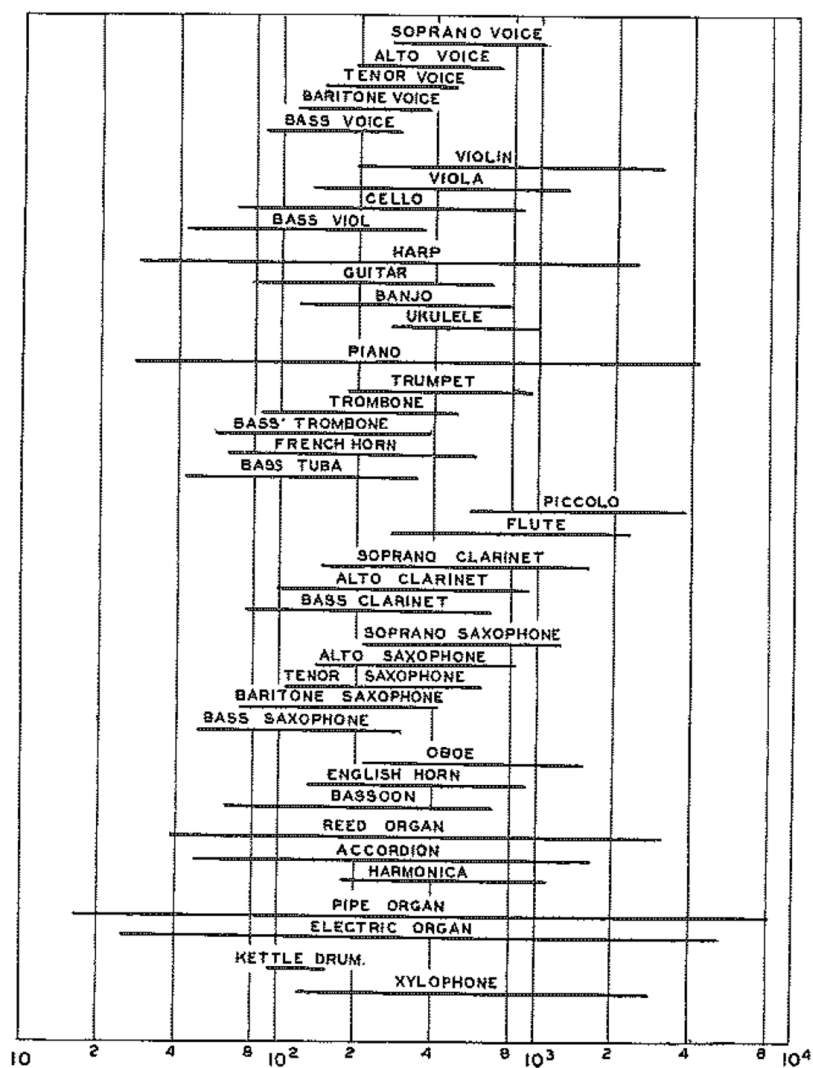


Figura 12 - Gama de frequências fundamentais de vozes e vários instrumentos musicais [3]

A gama de notas ou frequências que são mais regularmente reproduzidas numa guitarra é de Mi_2 até $Dó_6$ ou de 82,407 Hz até 1046,5 Hz, claro que a guitarra é capaz de reproduzir todos os harmónicos associados a estas frequências fundamentais devido à natureza das suas cordas, como já foi dito antes.

3.5 Características da ressonância de uma guitarra

Definir e classificar a qualidade da ressonância de uma guitarra ou qualquer instrumento musical não é fácil, no entanto existem alguns aspetos que estão relacionados diretamente com a reprodução do som ou ressonância que a guitarra ou outro instrumento musical é capaz de produzir. Há três aspetos que têm uma importância bastante relevante neste ponto, são: o ataque, o estado estacionário (onde há o desenvolvimento do som do instrumento musical) e decaimento ou extinção do som [3].

É definido de ataque o momento em que o tom é emitido pelo instrumento musical e engloba o tempo requerido para que o tom se desenvolva até uma fração do seu valor final. O decaimento de um tom emitido por um instrumento musical envolve o tempo necessário para que o tom cesse de ser emitido. O decaimento e o ataque de um tom são características que afetam a altura do tom, a intensidade e o timbre de um tom [3].

Estas características variam de instrumento para instrumento. Nos instrumentos de cordas dedilhadas, como as guitarras, o sistema de vibração é atuado a partir da ação de puxar e soltar a corda de seguida. A energia potencial armazenada na corda e em todo o sistema vibrante é libertada subitamente assim que a corda é largada, logo o tempo de ataque é muito pequeno e o decaimento bastante longo. Consoante estes atributos podemos já falar em algumas características que definem uma guitarra melhor que outra. A Figura 13 mostra vários gráficos que ajudam a perceber os tempos de ataque e decaimento de alguns instrumentos musicais: A - Instrumentos de corda dedilhada B - Instrumentos de corda percutida C - Instrumentos de corda friccionada D - Órgão de tubos E - instrumentos de sopro com palhetas F - Instrumentos de percussão com um tom definido G - Bateria H - Som vocal de vogais [3].

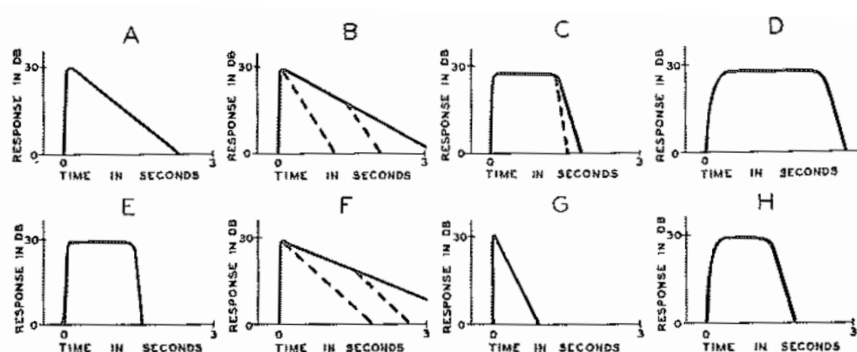


Figura 13 - Ataque, estado estacionário e decaimento [3]

Em 1980, Caldersmith e Jansson [24] fizeram um estudo a nível das respostas a frequências e tons tocados numa guitarra e tentaram assim definir uma guitarra de alta qualidade. Com os conceitos de ataque e decaimento dos tons, chegaram à conclusão que aumentando a resposta às frequências no ataque leva a um aumento na duração do tom, vice-versa para a diminuição da duração do tom quando há uma diminuição da resposta no ataque, isto, independentemente do decaimento que não é tão afetado. Estas relações físicas apresentadas por Caldersmith e Jansson são usadas para definir limites de usabilidade e qualidade das guitarras. Música mais calma tocada numa sala com baixo ruído acústico deverá ser usada uma guitarra com um decaimento mais baixo e um ataque mais suave, no entanto, música mais rápida e ruidosa deverá ser tocada numa guitarra com altos níveis de ataque e um decaimento rápido.

4 Alguns métodos de teste usados

4.1 *Tapping test*

Neste método de teste os *luthiers* utilizam os nós dos dedos das mãos e batem nos tampos da guitarra de modo a conseguirem que esta devolva a resposta sonora que procuram. Logo, é essencial que o *luthier* saiba responder apropriadamente ao som e vibração que a guitarra produz, decidindo, por exemplo, que combinação de materiais complementares deve usar, espessura de tampos ou que sistema de ilhâras deve usar para cada tampo superior [25].

Alguns exemplos onde este tipo de teste foi usado para avaliar a qualidade das guitarras são, por exemplo, [26] ou [27] onde utilizam a bancada de ensaios da Figura 14 utilizando uma esfera de aço de 11 mm de diâmetro que embate numa placa de teste e onde as frequências resultantes destas colisões são adquiridas por um microfone a 30 mm da placa.

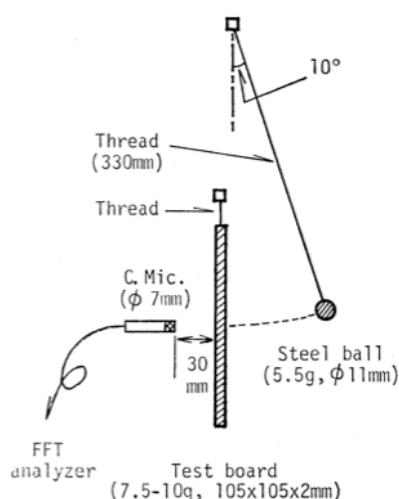


Figura 14 - Bancada de ensaios de um ensaio *tapping* [27]

4.2 Padrão de Chladni

Outro método usado para testar as ressonâncias produzidas pela caixa de uma guitarra são os padrões de Chladni. No final do século XVIII, Chladni descobriu uma maneira de ver os modos de vibração em placas, no entanto, o método foi usado no estudo da vibração das peles dos bombos e instrumentos de percussão. O método consiste em colocar areia ou outro material arenoso em cima de uma placa e colocá-la a vibrar a uma dada frequência. A areia fixar-se-á nas linhas estacionárias e assim fornece uma imagem onde se podem ver as áreas de vibração e áreas estacionárias [22].

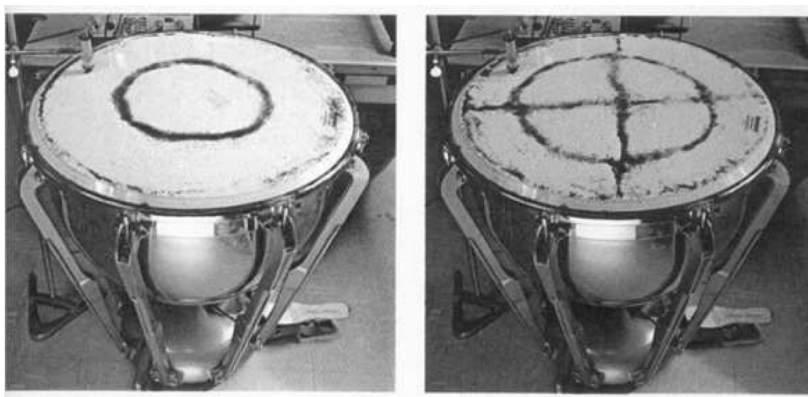


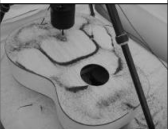











Figura 15 - Exemplos de padrões de Chladni em tímpanos [22]

Neste campo de investigações existem vários testes publicados e é, talvez, a forma mais utilizada para estudar as ressonâncias dos instrumentos musicais e é um tipo de análise que se foca nos modos de vibração de uma guitarra. Um dos exemplos onde este método foi aplicado é no artigo [28] onde são analisados vários tipos de sistemas de ilhâras e caixas de guitarras de modo a perceber quais as diferenças.

Tabela 3 - Padrões de Chladni para o estudo de caixas de guitarra [28]

Types of acoustic boxes	110 Hz	720 Hz
 Case 1		
 Case 2		
 Case 3		
 Case 4		

4.3 Estudo da vibração com acelerómetro

Neste caso a vibração é fornecida através de um martelo ou um *shaker* que induz a vibração a uma dada frequência na ponte da guitarra ou noutro local e medir a resposta num conjunto de pontos na superfície da guitarra com um acelerómetro. Este método tem a desvantagem de adicionar massa adicional no sistema, o que pode comprometer a resposta das frequências observadas, além disso, a magnitude da vibração induzida num determinado ponto indica a amplitude do modo de vibração apenas nesse ponto escolhido, ficando por explorar muitos outros pontos da superfície da guitarra [29]. Este método é em tudo semelhante aos métodos descritos anteriormente, apenas o estudo é feito através da análise do sinal do acelerómetro (ao contrário do *tapping test* - audível e do Chladni - visual).

4.4 Interferometria

De modo a eliminar a massa adicional do acelerómetro, é usado um sistema de medição com um vibrometro à base de um laser para medir a resposta, como mostra a Figura 16. O raio de laser é dividido (ponto BS na figura) num raio de referência (*reference beam*) e num raio de medição (*illuminating beam*). O raio de medição é refletido da superfície a ser medida e a fase é comparada com a referência na entrada do sensor. O espectro de frequência é calculado usando o método FFT. Este tipo de varrimento com o vibrometro de laser é usado para medir toda a superfície muito rapidamente, dispensando assim a necessidade de fazer centenas de medições. Os desenvolvimentos recentes a nível da *speckle interferometry* ou holografia eletrónica permite a visualização dos modos de vibração das guitarras em tempo real [29].

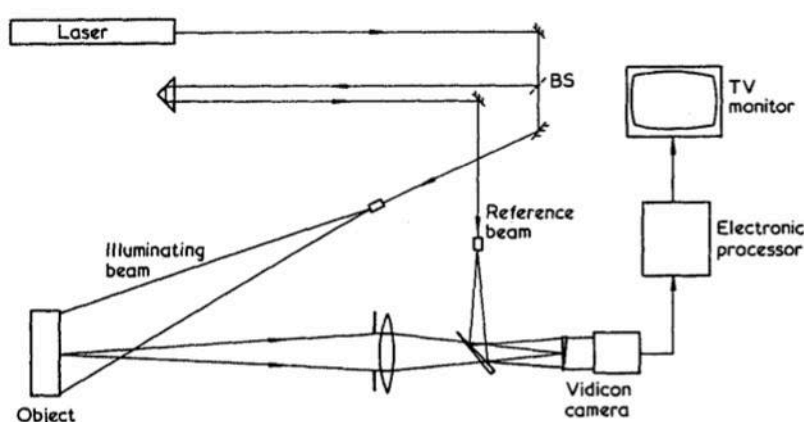


Figura 16 - Sistema de interferómetro de *speckle* eletrónico [30]

Na Figura 17 podemos ver os resultados de uma interferometria holográfica aplicada no tampo superior de uma guitarra, em tudo semelhante aos padrões de Chladni, mas aqui muito menos invasivo.

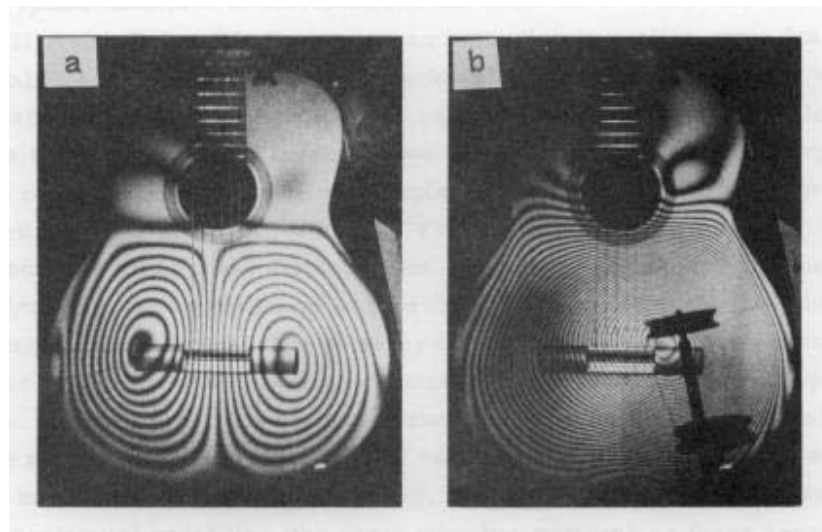


Figura 17 - Deformações no tampo superior de uma guitarra medido com interferometria holográfica [31]

4.5 Cordas dedilhadas

No artigo escrito por Samo Šali & Janez Kopač em 2000 [32] é realizado um estudo para comparação de guitarras com maior e menor qualidade com base na construção de uma bancada de ensaios em que as cordas são excitadas e a resposta da guitarra é, conseqüentemente, avaliada e comparada com outras guitarras testadas, como mostra a Figura 18.

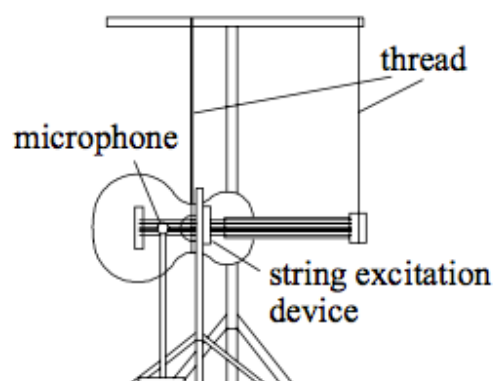


Figura 18 - Bancada de ensaio para o teste de qualidade sonora da guitarra [32]

Este tipo de teste é o mais fiel à realidade de utilização da guitarra, pois replica as condições de manuseamento e forma de tocar da guitarra. No entanto, as variáveis em causa que podem, de alguma forma, adulterar os resultados são muitas, desde as condições em que se encontram as cordas, tipos de cordas, na tensão das cordas que irá variar com a sua própria vibração e talvez o aspeto mais importante, numa análise FFT, o facto de se estar a analisar não só a resposta da guitarra aos harmónicos fundamentais, como também todos os harmónicos parciais produzidos naturalmente pelas cordas.

5 Método experimental

5.1 Conceito inicial

Pretende-se com esta dissertação conseguir adquirir e comparar da forma mais precisa e natural o espectro de resposta a frequências de várias guitarras, sendo algumas guitarras constituídas de madeira e outras constituídas de materiais compósitos. Depois de analisados os métodos de teste mais usuais e de perceber qual a melhor forma de simplificar a abordagem feita ao problema, concluiu-se que a melhor forma seria eliminar aspetos que pudessem dificultar essa análise. Um desses problemas são os harmónicos parciais produzidos naturalmente pelas cordas, ou seja, para cada frequência testada teríamos uma “infinitude” de harmónicos parciais a complicar a análise. Outro problema foi o estímulo aplicado na guitarra de modo a obter a resposta do próprio corpo da guitarra, que não poderia ser com um impacto como no *tapping test*. A melhor solução encontrada foi testar o corpo da guitarra, eliminando a vibração das cordas por meio de um material abafador e aplicando um estímulo vibratório na forma de uma onda senoide pura, ou o mais pura possível. Desta forma, o teste não verifica tanto a capacidade de a guitarra reproduzir os harmónicos e as vibrações das cordas, mas sim, a sua capacidade de amplificação dos estímulos compreendidos na largura de banda característica deste instrumento.

Existem vários trabalhos que desenvolvem métodos de testes com base na avaliação do som irradiado por uma guitarra aquando da excitação por meio de um martelo de percussão [32, 33, 34, 35, 36, 37]. No entanto o *luthier* Michael Cone [38] desenvolveu uma bancada de testes para estudar a resposta das guitarras construídas por ele próprio. A bancada de teste tem por base a excitação da ponte da guitarra com vibrações produzidas recorrendo a um *shaker* eletrodinâmico e o som irradiado pela guitarra é captado com um microfone à distância de 1 metro. A análise feita por Michael Cone tem como origem a aplicação de estímulos de ruído cor-de-rosa⁴, ao contrário desta dissertação em que é utilizado um estímulo de onda sinusoidal pura.

A caixa ou corpo da guitarra é um sistema acústico ressonante, logo as ondas sonoras induzidas no tampo superior vão ser amplificadas e, eventualmente, haverá uma variação na fase em relação à onda original induzida. O conceito deste teste é aplicar um estímulo sinusoidal puro no tampo superior da guitarra, o mais próximo possível do sítio onde as cordas

⁴ O termo ruído branco designa uma forma de onda cujo seu espectro é o conjunto de todas as frequências com a mesma amplitude. Já o termo ruído cor-de-rosa designa a mesma forma de onda, mas a amplitude das frequências aumenta em 3dB por cada oitava [22].

fazem a ligação com o tampo superior, ou seja, na ponte onde as cordas transmitem a sua vibração para o tampo.



Figura 19 - Localização da ponte numa guitarra

Esta resposta do corpo da guitarra às vibrações vai ser analisada e de seguida mapeada de forma a conseguir a resposta em frequência no espectro característico das guitarras. Os resultados adquiridos vão ser então comparados de frequência em frequência de modo a poder-se ditar qual o desvio em termos de intensidade que acontece entre cada frequência. Esta comparação é realizada entre guitarra acústica de madeira e guitarras acústicas que têm por base de construção materiais compósitos. É necessária também ser feita uma comparação entre guitarras do mesmo tipo, especialmente entre as guitarras de madeira, de modo a perceber qual o grau de similaridade entre guitarras feitas de material do mesmo género, e só depois pode ser comparável com o grau de similaridade em relação às guitarras feitas de materiais compósitos.

Um *shaker* eletrodinâmico é o tipo de excitador por vibração mais amplamente usado e, essencialmente, consiste num íman que produz um campo magnético desejado, um elemento móvel onde está acoplado o objeto de excitação, uma bobina alimentada por uma corrente alternada embutida neste elemento móvel e um suporte flexível para suportar esta bobina e alinhar o elemento móvel ao íman de forma concêntrica.

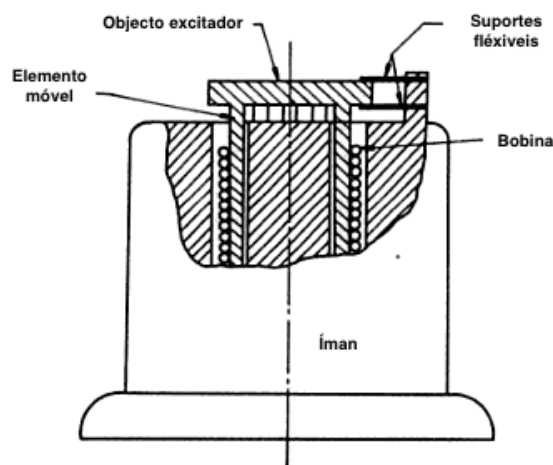


Figura 20 - Esquema de um *shaker* eletrodinâmico [39]

A utilização de um *shaker* eletrodinâmico é bastante útil neste tipo de testes, pois é um instrumento bastante fácil de controlar, uma vez que a sua resposta à introdução de um sinal elétrico na entrada é bastante linear e é possível obter uma vibração com um nível de ruído sonoro bastante baixo.

5.2 Conceção do modelo

Para que a aquisição da resposta em frequência das guitarras decorra com rigor e assertividade é necessário estabelecer uma instalação de testes que garanta fiabilidade e repetibilidade e que seja pouco vulnerável a eventuais fatores externos. Para diminuir ao máximo as interferências causadas pelas vibrações da própria guitarra em contacto com outra qualquer superfície foi pensado que seria desejável manter a guitarra suspensa num tripé e segura por um fio (Figura 21), e desta forma a guitarra poderá vibrar livremente.

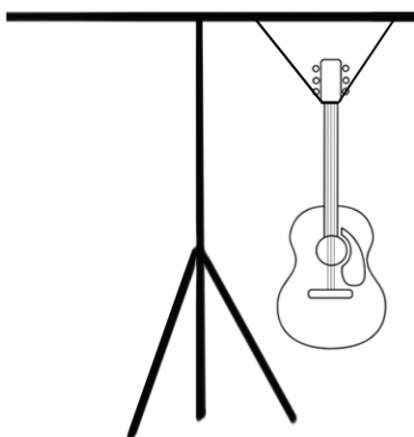


Figura 21 - Esquema de suspensão da guitarra no tripé

As respostas, em frequência, obtidas foram observadas com bastante cuidado, pois é uma parte crucial deste teste. O componente ideal a utilizar seria o *shaker* eletrodinâmico, no entanto, devido ao custo elevado deste componente e ao orçamento reduzido disponível para a sua aquisição teve que se adotar outra alternativa. Chegou-se à conclusão que um bom substituto para este tipo de teste seria realizar um *shaker* a partir de um altifalante. O altifalante consegue reproduzir facilmente a vibração que se deseja e deste modo conseguiu-se introduzir facilmente uma onda puramente sinusoidal e, com alguns ajustes, estimular a ponte da guitarra. Foi então adaptado o altifalante de 10 polegadas por meio de uma peça com uma base e um batente, como mostra a Figura 22.

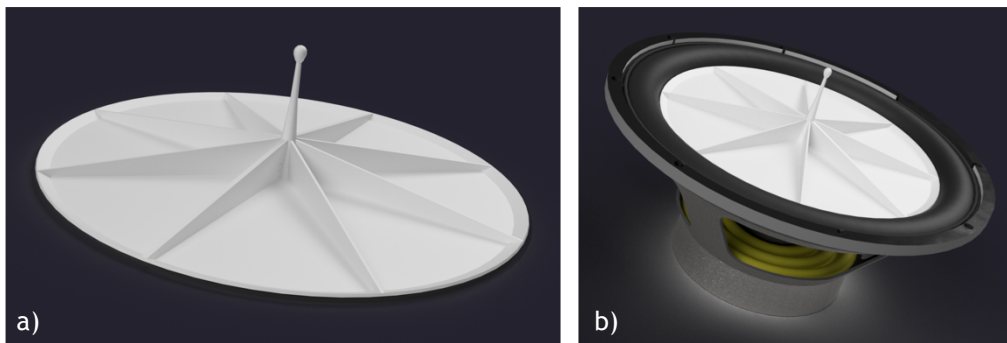


Figura 22 - Modelo CAD de: a) peça para suporte b) suporte aplicado no altifalante

Apesar de se ter tentado reduzir as vibrações do próprio suporte e emudecer o altifalante, este continuava a reproduzir som de uma forma audível. Para eliminar este fator ao máximo decidiu-se introduzir o altifalante dentro de uma caixa com um sistema que absorvesse o máximo de pressão sonora de modo a que, fora da caixa se ouvisse o mínimo possível. Como mostra a Figura 23, a ideia passa pela construção de uma caixa completamente selada com duas zonas distintas na parte traseira do altifalante. Antes de mais, a razão pela qual a preocupação com absorção do som é concentrada na parte traseira do altifalante é porque o fluxo de ar ou movimento de ar (o que podemos chamar de pressão sonora ou som como já se viu anteriormente) acontece principalmente na parte traseira, devido ao facto de que a parte dianteira estar coberta pelo suporte e assim dificultar a existência de uma pressão sonora, apenas aquela criada pela vibração do próprio suporte. Para eliminar esta pressão sonora criada na parte traseira da coluna foi preciso criar um mecanismo que possa absorver esta pressão toda e diminuir a velocidade de propagação destas ondas sonoras de modo a retirar o máximo de energia e por fim eliminá-las. No meio destes compartimentos distintos vê-se uma divisória furada, que permitirá fazer o fluxo do ar normalmente (serve de carga resistiva, deixa passar ar mas oferece alguma resistência), no entanto reduzindo a sua velocidade, isto devido também à lã que será posteriormente colocada dos dois lados desta divisória. A última divisória servirá de “*soundtrap*”, ou seja, a massa de ar ou massa sonora irá ficar presa no compartimento e irá, eventualmente, acabar por se extinguir. De modo a ser mais funcional, optou-se por aplicar outro tipo de batente no suporte de modo a ser mais facilmente incluído na caixa.

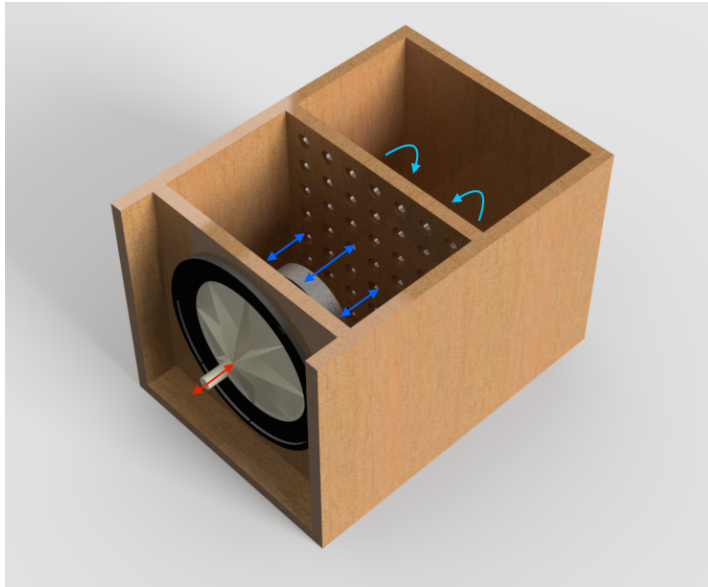


Figura 23 - Modelo CAD da caixa e altifalante com suporte

Na construção deste *shaker* (Figura 24) foi usado MDF de 19 mm de espessura para construir a caixa e os compartimentos sendo que todas as junções MDF-MDF fora preenchidas com Bostik® para prevenir que a própria caixa criasse uma ressonância e que as vibrações fossem propagadas pelo conjunto da caixa. O interior da caixa foi revestido por esponjas acústicas (nas paredes) e lã natural nas placas em contacto direto com o altifalante, como mostra a Figura 24.

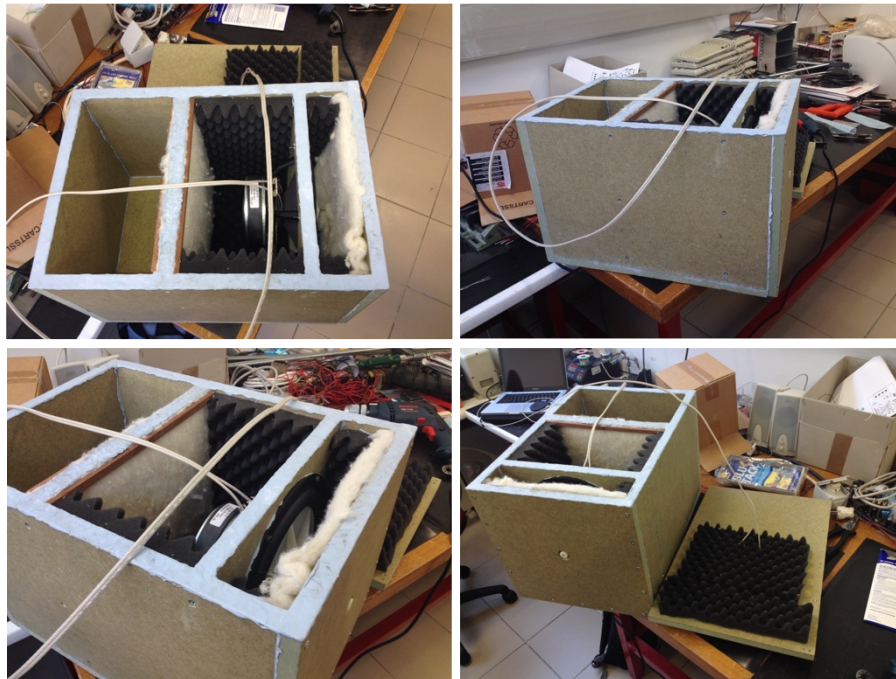


Figura 24 - Construção do modelo de ensaios

Na aplicação do batente na guitarra a opção foi usar uma haste de alumínio de 7 mm com um comprimento que fosse apenas o necessário para estimular a guitarra a uma distância em que o próprio modelo de ensaios tivesse uma influência mínima, ou seja, se o modelo de ensaios estiver demasiado perto (até 40 cm) poderia haver alguma troca de ondas sonoras entre o tampo superior da guitarra e a parede frontal do modelo de ensaios, e dessa forma influenciar a própria vibração da guitarra e o seu conteúdo harmónico. Na Figura 25 pode-se ver o batente que induz as vibrações na ponte da guitarra e, de forma a minimizar a criação de harmónico que resultassem de vibrações do batente, fizeram-se as seguintes alterações:

- 1- Na extremidade do batente onde este faz a ligação com a ponte da guitarra colocou-se uma ponta arredondada (neste caso foi usada uma ponta de baqueta de uma bateria). Isto ajuda a que a transmissão da energia da vibração seja mais eficaz e reduz os harmónicos criados da interação entre a haste e o tampo superior da guitarra.
- 2- Para garantir uma ligação eficaz entre o batente e a ponte da guitarra usou-se Bostik® para garantir que o batente acompanhe a vibração da ponte, ou seja, se em algum momento o batente estiver a transmitir a vibração a uma determinada frequência e a ponte não acompanha esta vibração, podem entrar em conflito e isto origina uma produção de harmónicos que não interessa analisar e que são resultado de vibrações de material que não está sujeito a testes.

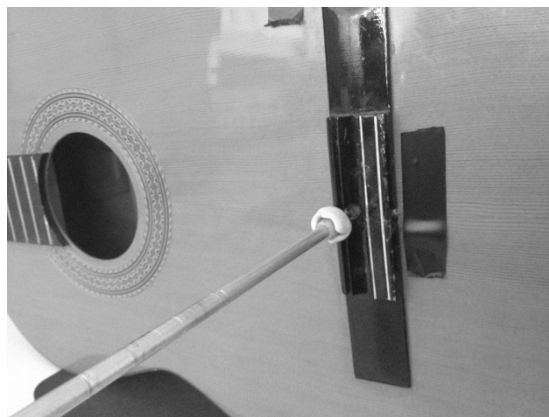


Figura 25 - Pormenor do batente do modelo de ensaios em contacto com a ponte da guitarra

A origem do sinal sonoro escolhida para os ensaios é o *software* de programação visual para música e multimédia chamado Max®, neste caso Max® MSP (Max® Signal Processing), este permite o processamento e manipulação dos elementos de áudio e vídeo em tempo real. O programa compilado é bastante básico para este tipo de ensaio, em que foi preciso apenas um gerador de ondas sinusoidais e fazer a manipulação das frequências das ondas de modo a coincidirem com as frequências naturais das notas musicais (como visto no subcapítulo 3.4).

Com este programa a correr no computador é possível percorrer todas as frequências desejadas aos ensaios da guitarra e fazer a análise de cada uma.

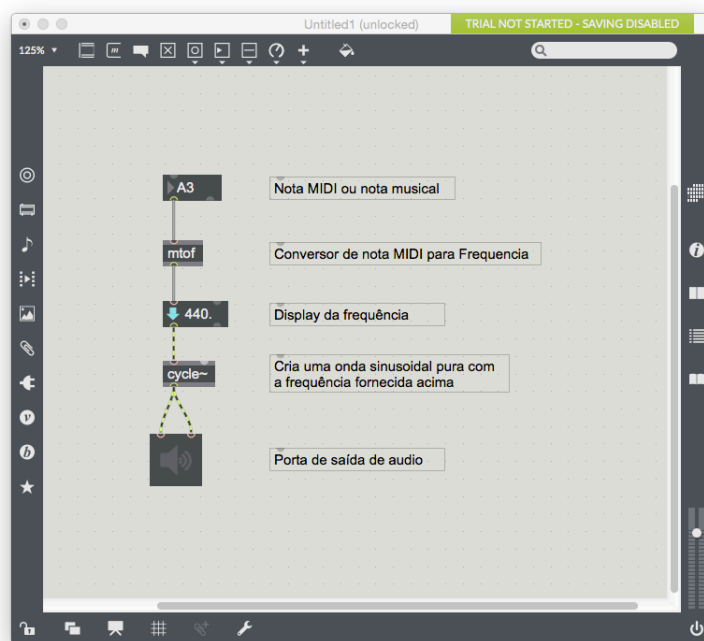


Figura 26 - Janela do MAX®/MSP co programa para fornecer a onda sinusoide⁵

O sinal de áudio resultante desta programação é amplificado por um amplificador que tem por base o módulo de amplificação modelo UcD180™HG da Hypex electronics®, de modo a elevar a potência de sinal e é aplicado ao shaker, e consequente a vibração na ponte da guitarra. De seguida o corpo da guitarra irá desenvolver esta vibração e reproduzir a onda sinusoidal com a mesma frequência original, sendo que amplificada pela própria caixa ressoante da guitarra. Esta ressonância irá ser medida com recurso a um microfone condensador unidirecional. É importante que este microfone tenha uma resposta linear à frequência, ou seja, é importante que o próprio microfone não tenha qualquer influência na medição em qualquer frequência, logo terá de responder de forma semelhante ao longo do espectro de frequências necessário à realização dos ensaios. É também importante que o microfone seja direcional para não ser suscetível a qualquer ruído que não provenha do tampo superior da guitarra.

⁵ Uma nota para o facto de a referência da nota Lá₄ não ser 440 Hz, é como visto na Figura 26 a nota Lá₃, o que não influencia em nada os ensaios, pois toda a atenção está na análise da frequência gerada e não na oitava que lhe está relacionada.

O microfone utilizado é o Behringer® C-2, um microfone unidirecional e que funcionou como desejado na aquisição dos dados que são devolvidos ao computador para serem analisados.



Figura 27 - Microfone usado nos testes - Behringer® C-2 [40]

De uma forma mais conveniente foi utilizado um *software freeware* bastante simples e intuitivo. O *software* AudioXplorer® é um analisador de som onde pode-se visualizar o som em forma de onda sonora e espectrograma (espectro de frequências), e onde é possível medir a amplitude da resposta em unidades mV.

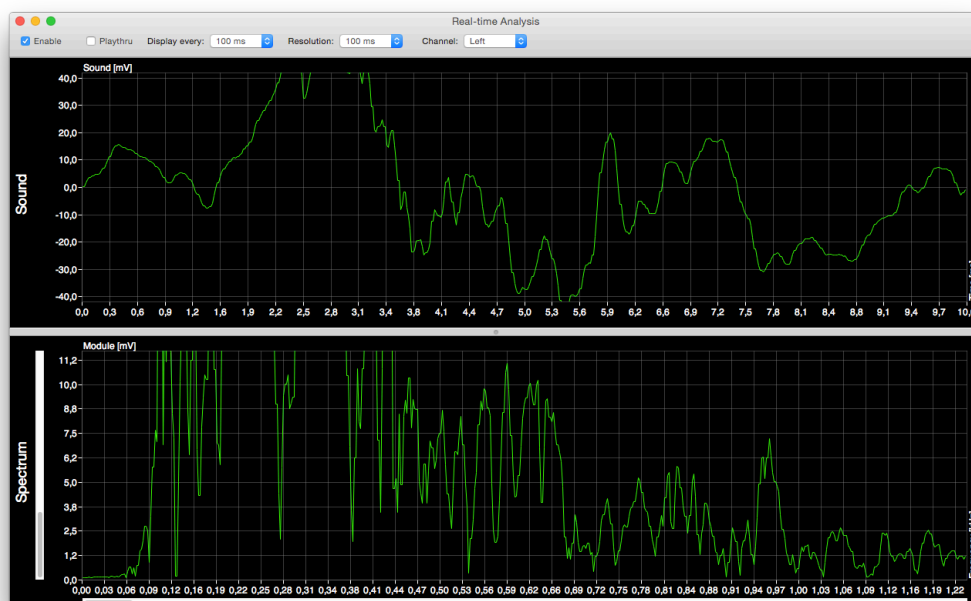


Figura 28 - Janela de visualização do programa AudioXplorer®

6 Testes

Para uma melhor compreensão do esquema geral dos testes foi elaborado o esquema da Figura 29. A fim de se conseguir uma melhor precisão os testes foram realizados numa sala acusticamente tratada para eliminar alguma da reverberação existente, sendo que, para efeitos acústicos, aquando da realização dos testes houve a importância de os fazer numa época inativa do ano letivo na Universidade da Beira Interior, e desta forma reduzir ruídos externos.

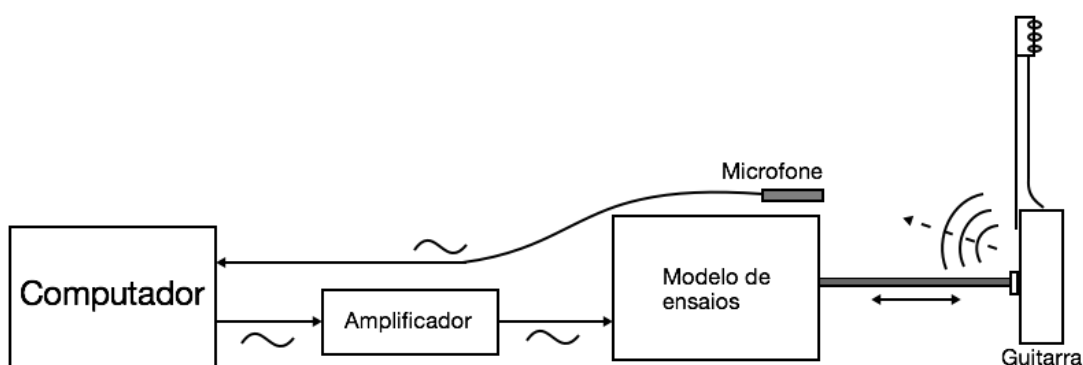


Figura 29 - Esquema geral da bancada de testes

A prática de realização dos testes consistiu em dispor a bancada de ensaios, como mostra a Figura 30, num canto da sala escolhida esperando assim reduzir ainda mais alguma reverberação que possa prejudicar os ensaios. As guitarras são colocadas e penduradas no suporte, foram feitos os ajustes necessários de modo a que os resultados que são obtidos por parte do espectrograma do microfone sejam o mais limpo possível, ou seja, espera-se que apenas exista o harmónico correspondente à frequência do sinal original gerado pelo computador. Depois de realizado o *setup* inicial é importante não alterar a disposição e realizar os testes completos, percorrendo todas as frequências que estão planeadas, Mi_2 até $Dó_6$ ou de 82,407 Hz até 1046,5 Hz.



Figura 30 - Disposição da bancada de ensaios

Para que a explicação da recolha dos dados fique mais simples, é apresentado na Figura 31 um exemplo do espectrograma adquirido aquando dos ensaios, sendo que foram seguidamente registados todos estes valores para as diversas guitarras testadas e compiladas numa tabela.

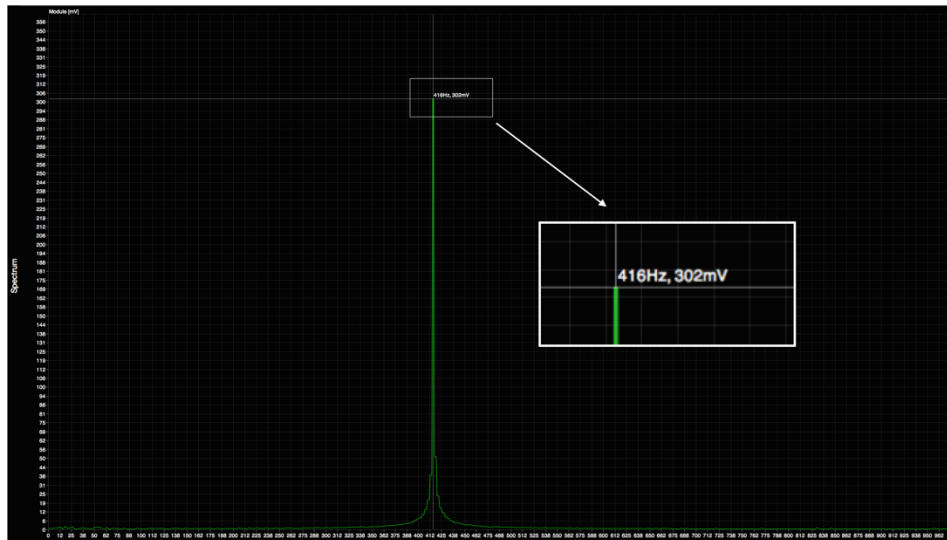


Figura 31 - Espectrograma da resposta de uma guitarra sujeita a uma onda sinusoidal a 416 Hz

Tabela 4 mostra os resultados obtidos nos ensaios feitos utilizando condições semelhantes para as diferentes guitarras. Utilizando estes valores e fazendo a sua conversão para uma escala logarítmica em termos relativos (dB) para uma leitura mais realista e adequada à situação, obteve-se o gráfico da Figura 32. Para isso fez-se a relação de potência entre medição com o sinal de maior amplitude (360 mV) e cada uma das restantes medições, segundo a equação 6.1:

$$b = 20 * \log\left(\frac{a}{360}\right) \quad 6.1$$

sendo a o valor de cada medição em mV e b o resultado em dB.

Neste gráfico pode-se observar a distribuição da resposta das várias guitarras ao longo do espectro de frequências assim como as similaridades e diferenças que existem entre elas. A comparação que foi realizada teve como base a comparação entre os dois modelos de guitarra feitos de madeira, sendo que estas guitarras diferem em alguns aspetos:

1 - Guitarra de referência (madeira modelo 1) - Tampo superior em abeto sólido e tampo inferior e laterais em mogno.

2 - Guitarra de madeira modelo 2 - Tampo superior em laminado de abeto e tampo inferior e laterais em mogno.

3 - Guitarra de compósitos modelo 1 - Tampo superior, inferior e laterais em material compósito cuja composição não pôde ser revelada por motivos de propriedade intelectual. Tampo superior com uma espessura menor que a guitarra de compósitos modelo 2.

4 - Guitarra de compósitos modelo 2 - Tampo superior, inferior e laterais em material compósito cuja composição não pôde ser revelada por motivos de propriedade intelectual. Tampo superior com uma espessura maior que a guitarra de compósitos modelo 1.

Tabela 4 - Resposta das diferentes guitarras a frequências de excitação (mV)

Frequência de excitação (Hz) / Guitarra	Guitarra de referência (madeira modelo 1)	Guitarra de madeira modelo 2	Guitarra de compósitos modelo 1 - menor espessura	Guitarra de compósitos modelo 2 - maior espessura
82,406889	8	27	22	15
87,307058	13	69	53	27
92,498606	35	129	36	60
97,998859	120	104	18	40
103,826175	96	104	25	21
110,000000	79	126	32	43
116,540941	81	177	36	39
123,470825	99	213	67	69
130,812783	26	186	107	96
138,591316	37	176	107	82
146,832384	43	119	146	171
155,563492	194	232	237	284
164,813779	77	176	131	189
174,614116	120	138	145	158
184,997211	176	120	110	162
195,997718	217	132	109	88
207,652349	196	111	114	41
220,000000	83	87	142	102
233,081881	116	136	40	56
246,941651	76	72	83	27
261,625565	139	147	107	97
277,182631	108	156	127	88
293,664768	237	128	102	174
311,126984	257	110	25	79
329,627557	209	64	54	97
349,228231	332	232	137	162
369,994423	183	360	54	51
391,995436	95	172	22	213
415,304698	79	196	38	65
440,000000	82	123	183	33
466,163761	143	113	90	66
493,883301	38	29	32	22
523,251131	15	25	9	52
554,365262	37	81	16	51
587,329536	45	40	29	65
622,253967	21	68	29	36
659,255114	31	67	17	35
698,456463	22	36	19	70
739,988845	42	20	24	24
783,990872	16	46	43	14
830,609395	13	2	7	22
880,000000	4	2	6	24
932,327522	3	3	1	2
987,766602	11	9	3	2
1046,502260	5	2	4	4

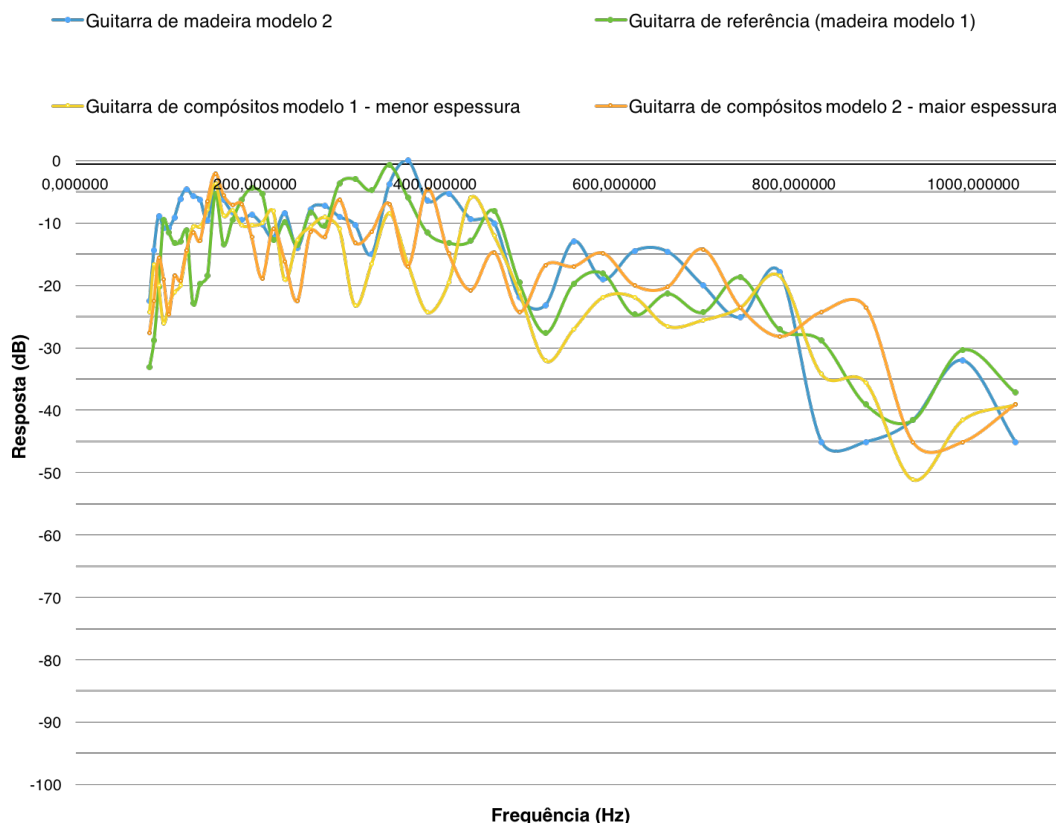


Figura 32 - Gráfico da resposta das diferentes guitarras

Esta comparação já serve para tirar algumas elações acerca da resposta de cada guitarra e a sua comparação com os modelos de referência, no entanto, para uma comparação mais direta foi preciso fazer uma relação entre cada tipo de guitarra de forma a poder visualizar exatamente qual é o grau de similaridade que existe entre cada uma. Para isso recorreu-se à comparação de cada frequência individualmente como mostram a Figura 33, Figura 34, Figura 35 e Figura 36 e tornando assim a visualização das diferenças mais clara.

Estes gráficos mostram os valores da magnitude da resposta apresentada por cada guitarra e compara diretamente com outra guitarra. Obtemos então diferenças de amplitude positivas assinaladas a negro, ou seja, onde a guitarra de referência verifica uma amplitude de resposta maior que a guitarra a ser comparada com esta. No caso das linhas assinaladas a cinza claro as diferenças são negativas o que indica que a guitarra de referência verifica uma magnitude de resposta menor que a guitarra a ser comparada com esta.

Destes gráficos pretende-se observar algumas situações, como o grau de similaridade entre guitarras feitas do mesmo material e se o grau de similaridade se altera quando se faz a comparação entre guitarras de materiais diferentes.

Numa análise aprofundada pode-se verificar no gráfico da Figura 33 que as guitarras de madeira partilham alguma proximidade de valores de magnitude na faixa de frequências entre 388 Hz e 692 Hz o que indica que as respostas da caixa destas guitarras, a esta gama de frequências, é bastante idêntica. Pode-se verificar também parte desta similaridade na comparação feita entre guitarras feitas de compósitos na Figura 34, embora aqui exista uma semelhança quase completa nas primeiras frequências do espectro, como entre 82 Hz e 204 Hz.

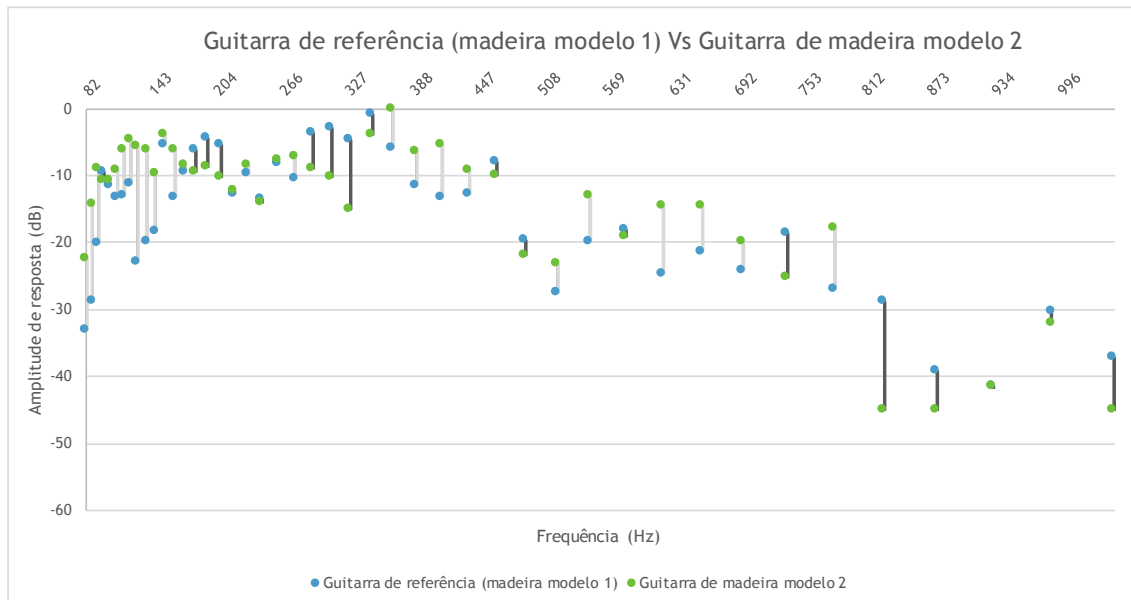


Figura 33 - Gráfico comparativo da guitarra de referência Vs guitarra de madeira modelo 2

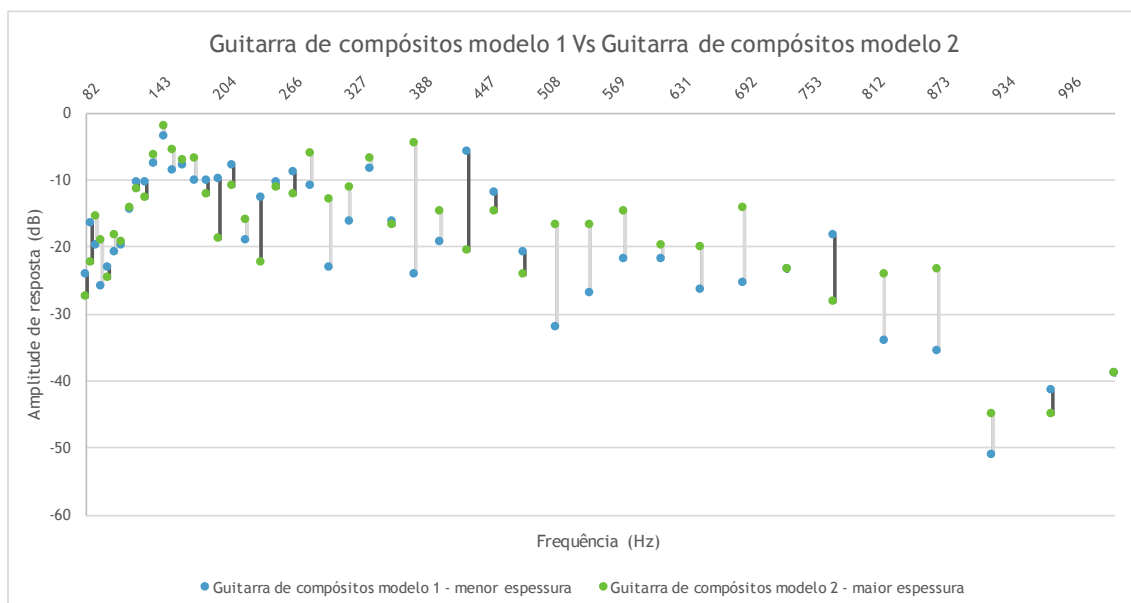


Figura 34 - Gráfico comparativo da guitarra de compósito modelo 1 Vs guitarra de compósitos modelo 2

Fazendo agora uma observação aos seguintes gráficos (Figura 35 e Figura 36), pode-se verificar a existência de pontos de similaridade mas também alguns pontos que não partilham esta característica. No geral pode-se afirmar que para frequências intermédias (447 Hz a 753 Hz) as guitarras construídas a partir de materiais compósitos têm bastantes semelhanças com as guitarras de madeira, no entanto para frequências mais baixas (82 Hz a 143 Hz e na zona dos 327 Hz) existe uma grande separação de valores entre ambas. Isto acontece de igual forma nos dois gráficos (Figura 35 e Figura 36), porém no gráfico da Figura 36, onde se compara o modelo de referência em madeira com a guitarra de compósitos que apresentava uma maior espessura de tampo superior, pode-se ver que na faixa de frequências correspondente a 327 Hz a diferença entre amplitudes nas guitarras não é tão acentuada como na Figura 35, o que poderá ser resultado da diferença que estas guitarras apresentam em relação à espessura do tampo superior, porém esta dissertação não tem como objetivo tirar este tipo de conclusões, apenas se pretende criar uma ferramenta de avaliação para este tipo de situações.

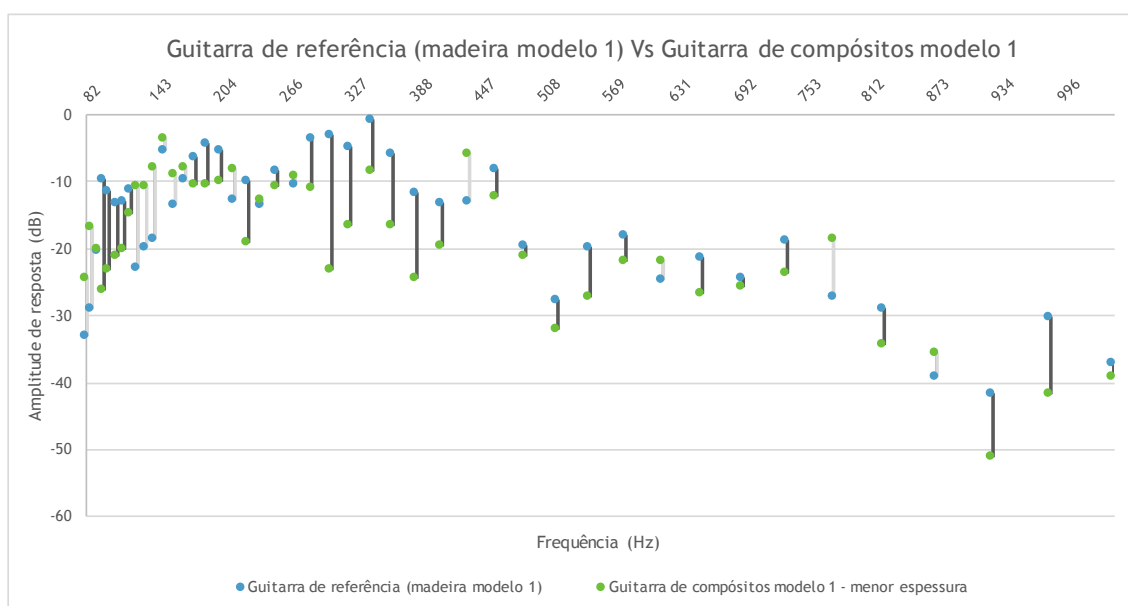


Figura 35 - Gráfico comparativo da guitarra de referência Vs guitarra de compósitos modelo 1

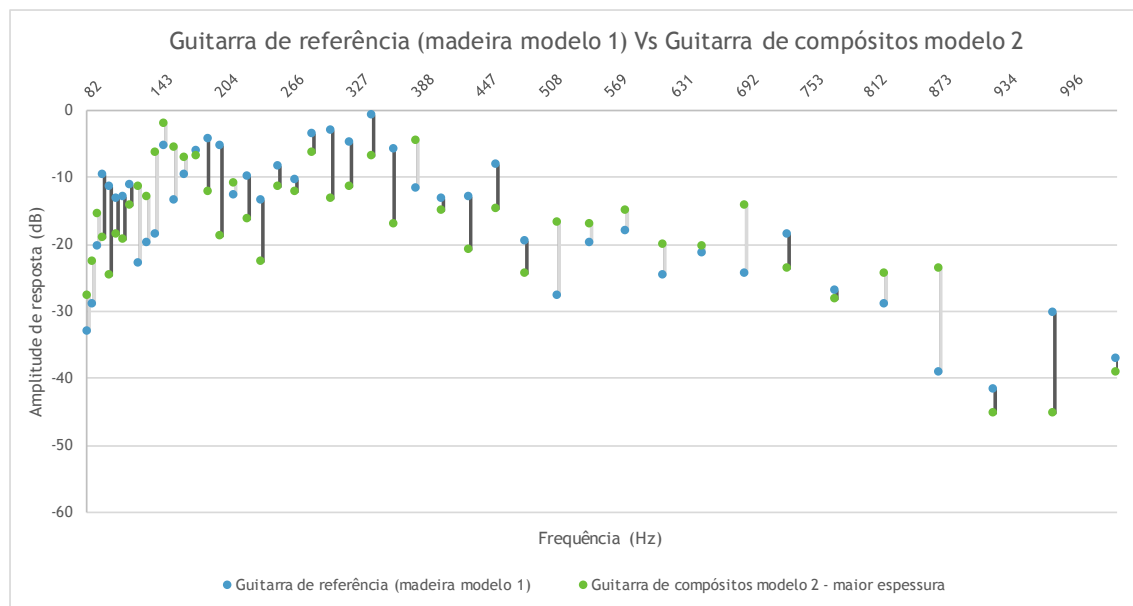


Figura 36 - Gráfico comparativo da guitarra de referência Vs guitarra de compósitos modelo 2

7 Conclusões e recomendações

É inevitável e necessário começar por frisar que a percepção do som e da música é de longe uma ciência exata, a investigação que se pode fazer é apenas na compreensão dos fatores que envolvem esta percepção. É essencial a criação de ferramentas para as perceber, e desta forma a conseguir evoluir, partindo à descoberta de materiais alternativos que consigam transmitir a mesma percepção sonora que os materiais originais. No entanto, não existe uma guitarra ideal ou um violino ideal, existe sim uma ideia pré-concebida do que é uma boa guitarra ou um bom violino e, regra geral, é feita, apenas, uma apreciação qualitativa através da comparação com esses instrumentos de qualidade superior.

Em termos conclusivos, em relação à bancada de testes elaborada e aos resultados obtidos, pode-se dizer que se verificou ser útil a utilização de um *shaker* para fazer uma avaliação quantitativa da qualidade das guitarras. A escolha das magnitudes das respostas sonoras aos tons aplicados permite fazer uma apreciação mais rigorosa da caixa da guitarra. Este método permite, ainda, uma análise mais simples e com a vantagem de eliminar variáveis que iriam complicar o estudo, como a excitação com sinais com múltiplas frequências harmónicas, ou a dependência da qualidade das cordas no caso da excitação através do toque das cordas da guitarra. Sendo assim, os gráficos apresentados representam uma distribuição da resposta da caixa da guitarra no espectro de frequências de uma forma concisa, e permitem focar o estudo da qualidade da resposta da guitarra no material e na conceção da caixa da guitarra. Com a obtenção destes gráficos é possível fazer uma comparação direta entre a resposta de uma guitarra modelo e a resposta de uma guitarra protótipo, permitindo um contínuo ciclo de aperfeiçoamentos e testes até que seja obtida uma resposta desejada. O uso do microfone na captação da ressonância da guitarra tem também grandes vantagens e permite a aquisição e estudo da ressonância geral da guitarra, ao contrário de métodos com base em estudos modais onde é feito um estudo de modos de vibração localizados.

A conceção do *shaker* utilizado nos ensaios teve como origem no facto de não haver orçamento disponível para uma utilização de um *shaker* eletrodinâmico. Desta forma este modelo de testes funciona idealmente se a ação vibratória for feita por um *shaker* eletrodinâmico e aconselha-se aqui o modelo SmartShaker™ w/Integrated Power Amplifier K2004E01 (Figura 37) que está equipado com as características necessárias à realização destes testes, com a vantagem de possuir um amplificador incorporado o que fornece ao utilizador um maior controlo e facilidade na execução dos testes. Embora com a utilização deste *shaker* os testes devem ser feitos, tendo em conta, que a força de contacto entre a guitarra e o *shaker* se mantém inalterada nos diversos testes de modo a fornecer os melhores resultados para a comparação. A utilização de um microfone de alta qualidade e com uma resposta linear é

também especto importante, e é fundamental que este esteja localizado a cerca 1 metro de distância da guitarra, à semelhança do que acontece nos estudos de altifalantes [38], de modo a que a ressonância produzida pela guitarra tenha espaço para evoluir e seja captada a uma distância realista, ou seja, à distância que estaria um ouvinte.



Figura 37 - *SmartShaker™ w/Integrated Power Amplifier* [41]

Numa futura análise pode ser também estudada a fase da resposta em frequência adquirida.

O ambiente em que os ensaios decorrem deve ser bastante controlado, por isso seria ideal a realização dos ensaios numa câmara anecoica (sala devidamente tratada de modo a absorver grande parte da reverberação que normalmente é refletida por paredes lisas). Só deste modo é possível medir a ressonância total emitida pelo tampo superior da guitarra e evitar quaisquer outras interferências. Novamente, no decorrer dos ensaios para esta dissertação não foi possível o acesso a tais condições, embora as condições nas quais os ensaios decorreram, tivessem sido monitorizadas de forma a minimizar estas interferências.

Numa nota final, é importante referir que a conceção desta bancada de ensaios destina-se ao estudo e desenvolvimento do processo de fabrico de guitarras em fibras de compósito efetuado por uma empresa da cova da beira, sendo o objetivo destes ensaios perceber que tipo de processos de construção de guitarras funciona melhor para conseguir atingir uma qualidade desejada na ressonância e *design*. Utilizando este processo de ensaios aqui apresentado torna-se fácil, numa situação investigação e desenvolvimento, fazer vários testes consecutivos, sem que se comprometa a estrutura da própria guitarra, e de uma forma rápida e precisa.

8 Bibliografia

- [1] J. Avison, *The World of Physics*, Nelson Thornes, 2014, p. 465.
- [2] J. W. Strutt e B. Rayleigh, *The Theory of Sound*, Macmillan, 1896.
- [3] H. F. Olson, *Music, Physics and Engineering*, 2^a ed., Dover Publications Inc, 1967.
- [4] T. D. Rossing, *The science of string instruments*, Springer, 2010.
- [5] I. Sloane, *Classic Guitar Construction*, Bold Strummer Limited, 1989.
- [6] T. Ono, "Frequency responses of wood for musical instruments in relation to the vibrational properties," *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)* 17:4, , pp. 183-193, 1996.
- [7] M. French, *Engineering the guitar theory and practice*, Springer, 2009.
- [8] T. Gore, "Wood for Guitars," em *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 2014.
- [9] M. French e R. Handy, "Sustainability and Life Cycle Management in Guitar Production," em *Proceedings of The 2006 IJME - INTERTECH Conference*.
- [10] D. W. Haines e N. Chang, "Application of graphite composites in musical instruments," 1975.
- [11] T. Ono, S. Miyakoshi e U. Watanabe, "Acoustic characteristics of unidirectionally fiber-reinforced polyurethane foam composites for musical instrument soundboard," *Acoustical Science and Technology*, vol. 23, n° 3, pp. 135-142, 2002.
- [12] S. Yoshikawa, "Acoustical classification of woods for string instrument," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 122, n° 1, pp. 568-573, 2007.
- [13] N. Fletcher, "Materials and musical instruments," *Acoustics Australia*, vol. 40, n° 2, pp. 130-133, 2012.
- [14] C. Dunn, *Analyzing the Acoustical Properties of Alternative Materials in Guitar Soundboards to Reduce Deforestation*, 2013.
- [15] J. Darken, "Good Vibrations: The Physics of the Acoustic Guitar," em *13th Annual New Millennium Conference: Session V*, Washington, DC, 2013.
- [16] "martinguitar.com," [Online]. Available: <https://www.martinguitar.com/guitar-care/care-guide/inactive-models/item/80-alternative-x.html?Itemid=6>. [Acedido em 2 Agosto 2015].
- [17] "blackbirdguitar.com," [Online]. Available: <https://blackbirdguitar.com>. [Acedido em 2 Agosto 2015].
- [18] "blackbirdguitar.com," [Online]. Available: <https://blackbirdguitar.com/content/blackbird-el-capitan>. [Acedido em 2 Agosto 2015].

- [19] “compositeacoustics.com,” [Online]. Available: <http://www.compositeacoustics.com/index.cfm/guitars>. [Acedido em 2 Agosto 2015].
- [20] “emeraldguitars.com,” [Online]. Available: <http://www.emeraldguitars.com>. [Acedido em 2 Agosto 2015].
- [21] “ovationguitars.com,” [Online]. Available: <http://www.ovationguitars.com>. [Acedido em 2 Agosto 2015].
- [22] D. Benson, *Music: A Mathematical Offering*, Aberdeen, Reino Unido: University of Aberdeen, 2008.
- [23] N. H. Fletcher e T. D. Rossing, *The Physics of Musical Instruments*, 2^a ed., Nova Iorque: Springer, 1998.
- [24] G. W. Caldersmith e E. V. Jansson, “Frequency response and played tones of guitars,” *Speech, Music and Hearing*, vol. 21, pp. 50-61, 1980.
- [25] O. Pedgley, E. Norman e R. Armstrong, “Materials-inspired innovation for acoustic guitar design,” *METU Journal of the Faculty of Architecture*, vol. 26, n° 1, pp. 157-175, 2009.
- [26] T. Ono, “Effects of varnishing on acoustical characteristics of wood used for musical instruments soundboards,” *Journal of Acoustical Society of Japan*, vol. 14, n° 6, pp. 397-407, 1993.
- [27] T. Ono, “Transient response of wood for musical instruments and its mechanism in vibrational property,” *Journal of Acoustical Society of Japan*, vol. 20, n° 2, pp. 117-124, 1999.
- [28] I. Curtu, M. D. Stanciu, N. C. Cretu e C. I. Rosca, “Modal Analysis of Different Types of Classical Guitar Bodies,” em *10th WSEAS International Conference on Acoustics & Music: Theory & Applications*, Stevens Point, Wisconsin, EUA, 2009.
- [29] S. M. Probert, *Design, Manufacture and Analysis of a Carbon Fiber Epoxy Composite Acoustic Guitar*, Washington, EUA: University of Washington, 2007.
- [30] J. C. Dainty, A. E. Ennos, M. Françon, J. W. Goodman, S. McKechnie e G. Parry, *Laser Speckle and Related Phenomena*, Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 1975.
- [31] E. Jansson, “Capítulo VI: The function, tone, and tonal quality of the guitar,” em *Acoustics for Violin and Guitar Makers*, Estocolmo, Suécia, KTH - Royal Institute of Technology, 2002.
- [32] S. Sali e J. Kopac, “Measuring The Quality of Guitar Tone,” *Experimental Mechanics*, vol. 40, n° 3, pp. 242-247, 2000.
- [33] S. Sali e F. Hindryckx, “Modeling and Optimizing of the First Guitar Mode,” *Savart Journal*, pp. 1-13, 2011.

- [34] B. M. Clemens, J. Kadis, D. M. Clemens, E. Pollak, P. Clark e J. R. Groves, "Effect of Vibration Treatment on Guitar Tone: A Comparative Study," *Savart Journal*, pp. 1-9, 2014.
- [35] I. Perry, *Sound Radiation Measurements on Guitars and Other Stringed Musical Instruments*, Cardiff, Reino Unido: Cardiff University, 2014.
- [36] S. Sali e J. Kopac, "Measuring the Quality of Guitar Tone," *Experimental Mechanics*, vol. 40, n° 3, pp. 242-247, 2000.
- [37] R. Inta, *The Acoustics of the Steel String Guitar*, Sydney, Austrália: University of New South Wales, 2007.
- [38] M. Cone, "Michael Cone Classical Guitars," [Online]. Available: www.coneguitar.com/acoustics.html. [Acedido em 17 Junho 2015].
- [39] J. S. Rao e K. Gupta, *Introductory Course on Theory and Practice of Mechanical Vibrations*, 2ª Edição ed., New Age International, 1999.
- [40] "music-group.com," [Online]. Available: https://media.music-group.com/media/PLM/data/docs/P0263/C-2%20%28OEM%29_P0263_M_PT.pdf. [Acedido em 22 Julho 2015].
- [41] "modalshop.com," [Online]. Available: <http://www.modalshop.com/excitation/SmartShaker-w/Integrated-Power-Amplifier?ID=272>. [Acedido em 16 Julho 2015].
- [42] Oxford University Press, Editora Objectiva, 2012.