



Desenvolvimento de uma guitarra acústica em materiais compósitos

Tiago Amorim e Costa

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. António Torres Marques

Orientador na empresa: Eng. João Petiz

Mestrado integrado em Engenharia Mecânica

Fevereiro de 2018

Aos meus pais, que me ofereceram a minha primeira guitarra.

Desenvolvimento de uma guitarra acústica em materiais compósitos

Resumo

O projeto surgiu da intenção de introduzir um novo modelo de guitarra acústica, na gama de produtos da marca de instrumentos em compósitos de fibra de carbono da empresa IDEIA.M, a AVA. De início, não estava ainda definido se a guitarra seria do estilo clássico ou de cordas de aço, pelo que esta dissertação aborda a conceptualização e definição do tipo de guitarra, modelação e desenvolvimento do tampo superior.

É feito um enquadramento da evolução da guitarra na história, assim como uma breve análise de mercado, como base para a definição concreta do tipo de guitarra a desenvolver, dimensões, corrente artística, design, entre outros. É também feita uma pesquisa sobre os processos de produção correntemente utilizados nesta indústria e formas de quantificar e obter uma guitarra de qualidade, em que se apresentam métodos utilizados para o estudo de frequência e comportamentos vibratórios de referência.

De seguida, parte-se para o estudo de frequência do tampo superior, de acordo com as seguintes etapas:

- Validação do modelo de simulação (através do estudo de placas quadradas);
- Estudo das características de uma placa sandwich em compósito equiparável a uma de madeira de referência;
- Modelação de um sistema de simulação do tampo com travejamento;
- Simulação do tampo em compósitos de fibra de carbono.

Por fim, é descrito o processo de produção a adotar, e faz-se uma perspetiva de custo de produção do modelo.

Finalmente, conclui-se que o sistema de simulação desenvolvido é útil para: complementar os cálculos teóricos para o tampo e comparar os resultados com os mesmos; obter as figuras dos modos de vibração (que não são possíveis através de cálculos teóricos); fornecer uma forma prática e “imediate” de observar as alterações comportamentais no tampo provocadas pela variação de parâmetros (como propriedades dos materiais e espessuras); verificar a influencia das geometrias e posicionamento do travejamento nos modos de vibração.

Por outro lado, a fiabilidade das frequências de ressonância simuladas não se demonstra suficiente, e um estudo adequado e rigoroso necessitará idealmente de ensaios a tampos reais através do uso de laser, acelerómetros e/ou um pó fino, para que fatores excluídos na simulação sejam contabilizados

Numa breve análise ao custo de produção, conclui-se ainda que a guitarra poder-se-á situar na gama de preços das guitarras concorrentes com uma margem de lucro significativa, mas que há ainda a possibilidade de redução de custos no processo atualmente adotado pela empresa.

Development of an acoustic guitar made of composites materials

Abstract

The project arose from the intention to introduce a new model of an acoustic guitar, in the product line of the carbon fiber composites instruments' brand, AVA, of the company IDEIA.M. At the beginning, it was not yet defined whether the guitar would be classical or steel stringed, so this thesis approaches the conceptualization and definition of the guitar type, modeling, and development of the top soundboard.

It is made a framework of the evolution of the guitar in history, as well as a brief market analysis, as a basis for the concrete definition of the type of guitar to be developed, dimensions, design, among others. Then, a research on the production processes currently used in this industry and ways of quantifying and obtaining a quality guitar, where methods used for the frequency study and vibrational behaviors from top quality guitars are presented.

Afterwards, a frequency study of the soundboard is performed according to the following steps:

- Validation of the simulation model (through the study of simple square plates);
- Study of the characteristics of a composite sandwich board equivalent to one of top quality wood;
- Modeling of a system of simulation for the soundboard with bracing;
- Simulation of the soundboard made of carbon fiber composites.

Finally, the adopted production process is described, and a production cost perspective of the model is made.

At the end, it is concluded that the developed simulation system is useful to: complement the theoretical calculations for the soundboard and compare the results; get the figures of the modes of vibration (what is not possible through theoretical calculations); provide a practical and "immediate" way of observing the behavioral changes in the board caused by the variation of parameters (such as material properties and thicknesses); check the influence of the geometries and positioning of the bracing in the modes of vibration.

On the other hand, the reliability of the simulated resonance frequencies isn't proved to be enough, and an adequate and rigorous study will ideally require tests on real soundboards using laser, accelerometers, and/or a fine powder, so that factors excluded in the simulation are considered.

In a brief analysis of the cost of production, it is also concluded that this guitar can be placed in the price range of the competing guitars with a significant profit margin, but there is still the possibility of cost reduction in the currently adopted process.

Agradecimentos

Agradecimentos ao orientador da empresa acolhedora, o engenheiro João Petiz, por todo o apoio prestado e transmissão de conhecimentos, disponibilidade e colaboração. Também aos designers da empresa: Emanuel Dias, pela contribuição e feedback fornecidos no processo de design e conceptualização; Ana Ramos, pelo apoio na modelação; António Rocha, pelo trabalho desenvolvido no processo de design e pelo suporte e disponibilidade constante no fornecimento de toda a informação relacionada com o desenvolvimento do instrumento. A estes e aos restantes elementos da equipa da IDEIA.M, pelo bom acolhimento, camaradagem e espírito de entreajuda.

Agradecimentos ao professor António Torres Marques, pela orientação essencial neste projeto, e pela transmissão de conhecimentos e noções imprescindíveis, ao professor Renato Natal Jorge, pelo suporte e esclarecimento de algumas questões relacionadas com a formulação de simulações, e ao professor José Simões, pela ligação estabelecida com a empresa, que fez surgir esta dissertação.

Por fim, e não menos importante, um agradecimento especial aos meus pais e familiares mais próximos, pelo apoio incondicional ao longo deste projeto e de todo o meu percurso académico, e aos amigos mais próximos, por tornarem o meu dia-a-dia mais colorido.

Índice de Conteúdos

1	O projeto	1
1.1	Objetivos do projeto.....	1
1.2	Estrutura.....	2
2	A História da Guitarra.....	3
2.1	A guitarra moderna	5
3	Estado de Arte.....	7
3.1	Compósitos ou madeira como material de construção de instrumentos	7
3.1.1	Orientação das fibras	8
3.2	Exemplos de aplicação.....	9
3.2.1	Luis and Clark	9
3.2.2	Contrabaixo feito em compósitos de fibra de carbono que pode ser desmontado	9
3.3	O processo de produção	11
3.3.1	Saco de Vácuo (<i>Vacuum Bagging</i>).....	11
3.4	Processos alternativos	13
3.4.1	Autoclave	13
3.4.2	Uso de sistemas de cura rápida.....	13
3.4.3	Estampagem de compósitos de fibra de carbono.....	14
3.5	Produtores de guitarras	14
3.5.1	Em Madeira	14
3.5.2	Em materiais compósitos	17
3.6	Custo e qualidade	21
4	Estudo de forma	23
4.1	Definição do tipo de guitarra	23
4.2	Conceito construtivo	23
4.3	Dimensões.....	24
5	Obtenção de uma guitarra de qualidade.....	27
5.1	Estudo de frequência.....	27
5.2	Análise estrutural	30
5.3	Quantificação da qualidade.....	30
6	Estudo do tampo superior	33
6.1	Metodologia	33
6.1.1	Análise de placas quadradas.....	33
6.1.2	Obtenção de um tampo em compósitos idêntico a um tampo em madeira.....	40
6.1.3	Modelação de um sistema de simulação do tampo com travejamento	44
6.1.4	Simular tampo em compósito de fibra de carbono	46
7	Processo de produção.....	49
7.1	Perspetiva de custo.....	52
8	Conclusões e perspetivas de trabalho futuro.....	54
9	Referências.....	55
	ANEXO A: Esboços da vista frontal.....	57
	ANEXO B: Esboços da vista traseira	58
	ANEXO C: Esboços do cavalete	59
	ANEXO D: Esboços da cabeça	60

Índice de Símbolos

E - Módulo de Young (Pa)

E_x - Módulo de Young na direção longitudinal

E_y - Módulo de Young na direção transversal

E_z - Módulo de Young na direção vertical

ρ - Massa específica (Kg/m³)

ν - Coeficiente de Poisson (adimensional)

ν_{mn} - Coeficiente de Poisson correspondente a uma contração na direção “n” provocada por uma extensão na direção “m”

h - Espessura das placas quadradas e do tampo (m)

L - Dimensão lateral das placas quadradas (m)

f - Frequência (Hz)

f_{00} - Primeira frequência de ressonância

f_{mn} - Frequência de ressonância do modo de vibração índices “m,n”

b - Dimensão da base das placas (m)

c - Espessura do núcleo da estrutura sandwich (m)

t - Espessura de cada camada de casca da estrutura sandwich (m)

h – Espessura total das placas e/ou do tampo

Índice de Figuras

Figura 1 - Exemplo de uma guitarra do período barroco (fonte: (Baroque Musical s.d.)).....	3
Figura 2 - Forma atual da guitarra clássica (fonte: (Guitars from Spain s.d.) ,adaptada)	3
Figura 3 - Sistema de travejamento <i>Fan Bracing</i> (fonte: (Bailey Guitars s.d.))	4
Figura 4 - Típica guitarra da marca de cordas de aço da atualidade (fonte: (Martin Guitars s.d.))	4
Figura 5 - Tampo com fibras unidirecionais do violino da marca AVA.....	8
Figura 6 - Tampo com fibras bidirecionais de um violino da marca Mezzo-Forte (Mezzo-Forte s.d.)	9
Figura 7 - Junção do corpo com o braço, do Carbon Fiber Dbl Bass (fonte: (Gries 2017))	10
Figura 8 - <i>Carbon Fiber Dbl Bass</i> da empresa <i>Mezzo Forte</i> (Mezzo-Forte s.d.).....	11
Figura 9 - Aplicação da resina nas camadas de fibra de carbono (fonte: (Pinterest s.d.)).....	12
Figura 10 - Exemplo de vácuo aplicado a uma peça (fonte: (Pinterest s.d.)).....	12
Figura 11 - Exemplo de um ciclo de cura rápido com pré-aquecimento (Zhang, Gu, li, & Zhang, 2013).....	13
Figura 12 - Processo de estampagem de compósitos de fibra de carbono (M.D.Wakemana, et al. s.d.)	14
Figura 13 - Pormenores do design da guitarra de Greg Smallman (fonte: (Guitar Salon s.d.))	15
Figura 14 - Tampo de uma guitarra de Matthias Dammann (fonte: (Guitars from Spain s.d.))	15
Figura 15 - Guitarra Martin de alta gama horizontal (fonte: (Martin Guitars s.d.)).....	16
Figura 16 - Guitarras da marca Taylor (fonte: (Taylor Guitars s.d.)).....	17
Figura 17 - Exemplo de guitarras da marca <i>Ovation</i> (Ovation Guitars, s.d.).....	17
Figura 18 - Tampo de um modelo da <i>RainSong</i> , com os tecidos organizados em recortes (RainSong, s.d.)	18
Figura 19 - Gama de formas de guitarra da <i>RainSong</i> (RainSong, s.d.)	18
Figura 20 - Gama de guitarras da <i>Composite Acoustics</i> (Composite acoustics, s.d.).....	19
Figura 21 - Exemplo de modelos da <i>Emerald Guitars</i>	19
Figura 22 - Os três modelos de guitarras da <i>KLOS Guitars</i> (KLOS Guitars, s.d.).....	20
Figura 23 - Exemplo de guitarras da marca <i>Blackbird</i> (Blackbird Guitars, s.d.)	21
Figura 24 - Geometria disruptiva (fonte: (Emerald Guitars s.d.)).....	23
Figura 25 - Guitarra com a forma tradicional do tipo <i>Dreadnought</i> (fonte: (Martin Guitars s.d.))	24
Figura 26 - Guitarra com a forma tradicional do tipo <i>Grand Auditorium</i> (fonte: (Taylor Guitars s.d.)).....	24
Figura 27 - Medidas <i>standard</i> de uma guitarra do estilo <i>Grand Auditorium</i> , em mm (fonte: (French 2009)	25
Figura 28 - Modelação 3D da guitarra	25
Figura 29 - Exemplo de resultados de Simulações FEA e teste de Chladni (Nicholas, Hartman, & Gruber)	27

Figura 30 - Estruturas para ensaio do tampo com e sem travejamento (Okuda & Ono, 2008)	28
Figura 31 – Exemplo de figuras de Chladni antes e depois da montagem do pescoço (Inta)	..28
Figura 32 – Exemplo de figuras de Chladni antes e depois da montagem do cavalete (Inta)	..29
Figura 33 - Tensão e deformação de uma guitarra (Stanciu, Curtu, & Apostol, 2014)	..... 30
Figura 34 - Modos de vibração de uma guitarra de folk de topo (Martin D-28): (a) do tampo frontal, com a ilharga e tampo traseiro em areia. (b) do tampo traseiro, com a ilharga e tampo frontal em areia. (c) da cavidade, com o tampo traseiro e ilharga em areia (Rossing, 2010)	.. 31
Figura 35 - Movimento vibratório de uma Martin D-28 em 3 ressonâncias na região de baixa frequência (Rossing, 2010)	..... 31
Figura 36 – Resposta em frequência e espectro de som um metro em frente de uma Martin D-28, gerada por uma força sinusoidal de 0.15 N. A Curva a negrito é o espectro de som; a curva a tracejado é a aceleração no ponto gerador (Rossing 2010)	..... 32
Figura 37 - Os primeiros 10 modos teóricos de uma placa quadrada isotrópica com as extremidades livres (Martins 2007)	..... 34
Figura 38 - Figuras obtidas por simulação no programa ABAQUS	..... 36
Figura 39 - Primeiros 8 modos teóricos de uma placa quadrada isotrópica com as extremidades encastrados (Martins 2007)	..... 37
Figura 40 - Figuras obtidas por simulação no programa <i>SOLIDWORKS</i>	..... 38
Figura 41 - Esquema da estrutura sandwich	..... 41
Figura 42 - Obtenção dos parâmetros "t" e "c" para a estrutura sandwich	..... 42
Figura 43 - Desvio em função da espessura do núcleo de cortiça	..... 42
Figura 44 – Desvio em função da variação da massa específica da cortiça	..... 43
Figura 45 – Imagem do sistema de simulação do tampo	..... 44
Figura 46 – Figuras obtidas em simulação com o tampo e travejamento em madeira	..... 45
Figura 47 - Modo de vibração (1,0) da guitarra com cordas (Rossing 2010)	..... 46
Figura 48 - Exemplo da redução de uma das barras do travejamento para obter uma geometria com a mesma rigidez	..... 47
Figura 49 - Figuras obtidas em simulação com o tampo e travejamento em compósito de fibra de carbono	..... 48

Índice de tabelas

Tabela 1 - Módulo de Young e massa específica da madeira de 3 materiais utilizados na construção de instrumentos	Error! Bookmark not defined.
Tabela 2 - Frequência dos principais modos de vibração do tampo frontal, tampo traseiro em guitarras de referência (Rossing, 2010)	32
Tabela 3 - Propriedades utilizadas na placa isotrópica.....	34
Tabela 4 - Frequências de ressonância da placa isotrópica livre obtidas na simulação em ABAQUS, e respectivo desvio em relação às teóricas.....	36
Tabela 5 - Frequências de ressonância da placa isotrópica livre obtidas na simulação em SOLIDWORKS, e respectivo desvio em relação às teóricas.....	36
Tabela 6 – Desvio médio obtido em cada simulação, das ressonâncias simuladas em relação às teóricas (*elementos de casca espessa)	37
Tabela 7 - Propriedades utilizadas na placa ortotrópica	39
Tabela 8 - Desvio médio obtido em cada simulação, das ressonâncias simuladas em relação às teóricas.....	39
Tabela 9 - Propriedades utilizadas na placa do estudo em questão	40
Tabela 10 - Desvio médio obtido em cada simulação, das ressonâncias simuladas em relação aos valores fornecidos pelo estudo (Turvey, Mulcahy e Widden 2000)	40
Tabela 11 - Propriedades da madeira e dos materiais da estrutura sandwich.....	41
Tabela 12 – Parâmetros utilizados na simulação.....	44
Tabela 13 – Ressonâncias de simulação em comparação com as de referência.....	45
Tabela 14 – Resultados obtidos com o tampo e travejamento em compósito de fibra de carbono e respectivos desvios em relação ao ensaio da madeira (EC - Elementos de Casca; ES – Elementos Sólidos).....	47

1 O projeto

Título: Desenvolvimento de uma guitarra acústica em materiais compósitos

Autor: Tiago Amorim e Costa

Docente Orientador: Professor António Torres Marques

Instituição de Ensino: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Empresa Acolhedora: IDEIA.M

Curso: Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, ramo de “Produção, Conceção e Fabrico”

Ano Letivo: 2017/2018

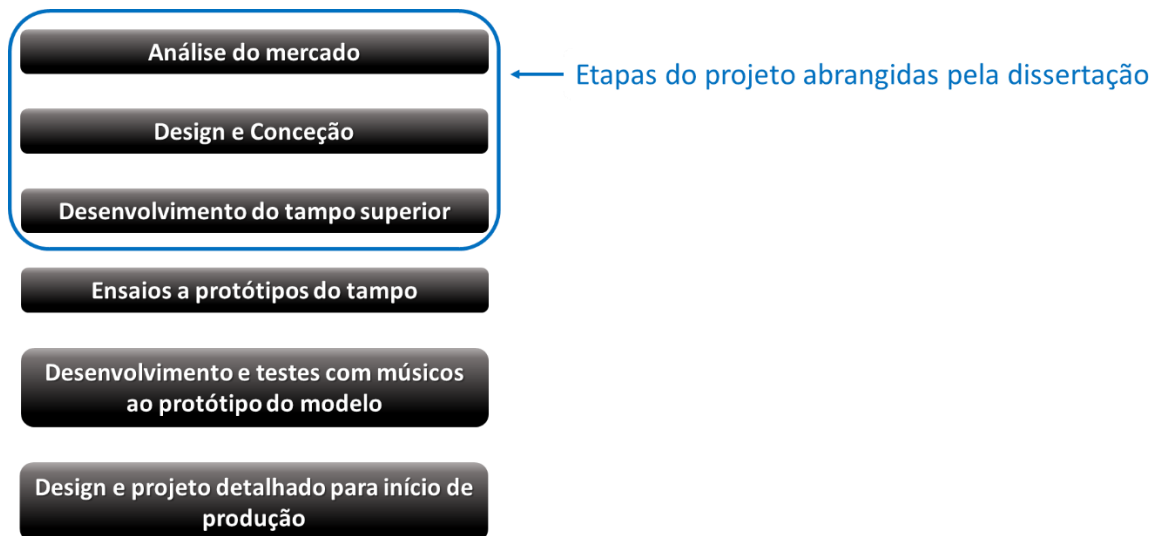
Descrição: A empresa IDEIA.M pretendia introduzir um novo modelo de guitarra acústica na gama de produtos da sua marca de instrumentos “AVA”. Esta é uma marca de instrumentos musicais feitos em materiais compósitos de fibra de carbono de matriz polimérica, subdivide-se em “AVA strings”, para instrumentos clássicos (atualmente um violino e um bandolim), e “AVA guitars”, atualmente com um modelo de guitarra elétrica. Portanto, no início do projeto, não estava ainda definido se a guitarra seria do estilo clássico ou contemporânea.

A partilha do gosto pela área entre a empresa e o autor, e a componente de engenharia envolvida na criação de um instrumento em sistemas compósitos, juntamente com o conhecimento e experiência dos orientadores, deram origem a este projeto de fim de curso.

1.1 Objetivos do projeto

O projeto de desenvolvimento do novo modelo foi iniciado pela empresa aquando do início desta dissertação, pelo que esta ocorreu a par com as etapas mais iniciais como as de idealização e design. Visa identificar os principais requisitos do produto e metodologias para os alcançar, entre os quais obter uma placa em compósitos acusticamente equivalente a uma placa de madeira, analisar e desenvolver um sistema de simulação para o tampo superior da guitarra, elemento de maior influência na sua qualidade sonora desta, e simular um tampo em compósitos neste sistema.

1.2 Estrutura



3

Inicialmente é feita uma pesquisa sobre:

- A história da guitarra, para obter um melhor conhecimento sobre a evolução da sua forma e características;
- O mercado e possíveis guitarras concorrentes (e exemplos de aplicação noutros instrumentos);
- Análise da tecnologia do uso de compósitos em instrumentos e suas vantagens e desafios;
- Processos de produção

De seguida, inicia-se o estudo de forma da guitarra, isto é, a idealização da forma e conceito da guitarra a desenvolver, para definir geometrias e requisitos que as fases seguintes terão de ter em conta.

Posteriormente, passa-se aos capítulos principais desta tese, em que se determina como quantificar a qualidade de uma guitarra, questões de maior influência e métodos que têm sido utilizados para conseguir alcançar esta qualidade, para prosseguir com:

- O cálculo e simulação de uma estrutura *sandwich* capaz de “igualar” o comportamento vibratório da madeira;
- Definir um sistema de simulação do tampo com travejamento;
- Simular o tampo com a estrutura *sandwich* obtida e um travejamento em compósito de fibra de carbono equivalente ao de madeira.

Sendo já possível e relevante nesta fase, é ainda feita uma breve perspetiva de custo de produção do modelo.

2 A História da Guitarra

As primeiras versões de guitarras surgiram no período barroco (1600-1750). Estas guitarras eram de menor largura do que as guitarras atuais, e tinham quatro pares de cordas (duas cordas para cada nota) e uma corda simples no final, normalmente feitas de tripa. O seu sistema de afinação era constituído por simples cavilhas (em vez do sistema de engrenagens utilizado hoje em dia). O seu aspeto é apresentado na Figura 1.



Figura 1 - Exemplo de uma guitarra do período barroco (fonte: (Baroque Musical s.d.))

A forma atual da guitarra clássica surgiu no início século XIX, altura em que o sistema de cordas em pares deu lugar a um sistema de seis cordas individuais, com a afinação mi-lá-ré-sol-si-mi. Nesta altura, a popularidade do instrumento estava concentrada em Espanha (país com grande influência no seu desenvolvimento) e Itália. Entretanto, com o aparecimento de músicos talentosos que a usavam e compunham peças musicais para, principalmente Fernando Sor, a guitarra tornou-se popular em toda a Europa.

Então, a sua forma foi sendo desenvolvida por vários construtores até à forma atual, entre os quais António Torres Jurado (1817-1892), o mais determinante neste processo. Os instrumentos de Torres tinham o corpo maior do que as guitarras típicas do barroco, e o seu nome está também associado ao sistema de travejamento *fan bracing*, que é ainda usado nos dias de hoje.

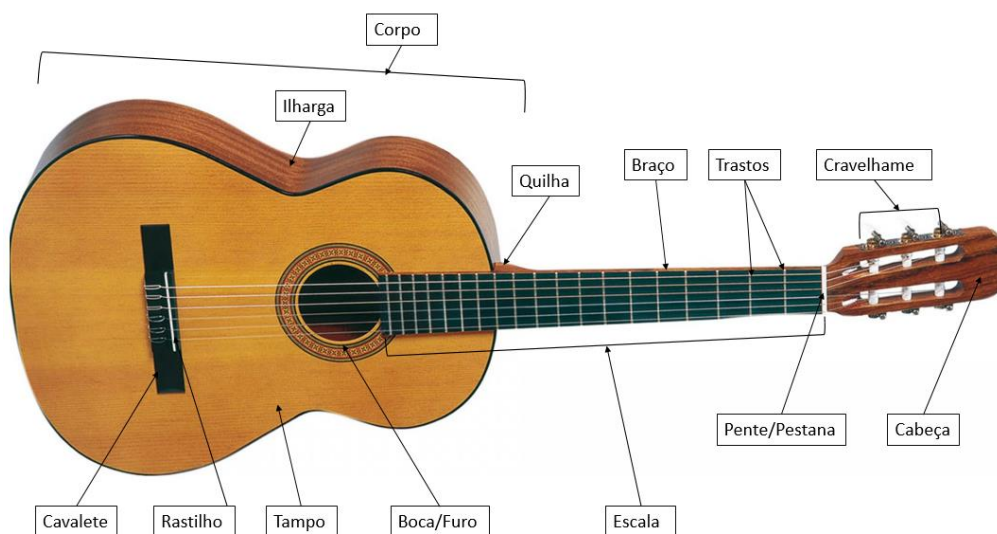


Figura 2 - Forma atual da guitarra clássica (fonte: (Guitars from Spain s.d.) ,adaptada)

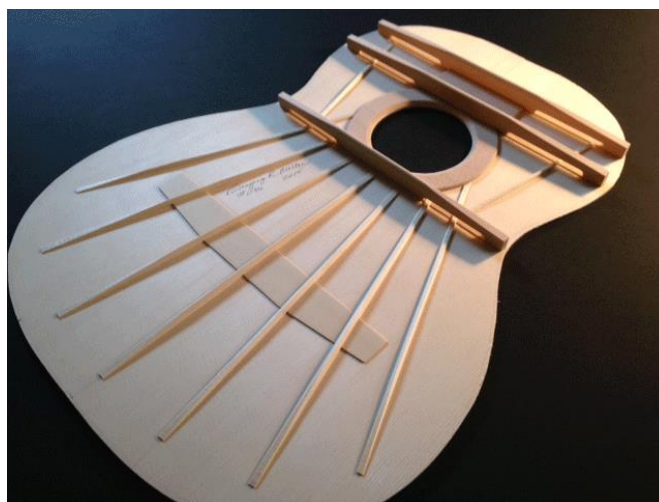


Figura 3 - Sistema de travejamento *Fan Bracing* (fonte: (Bailey Guitars s.d.))

Com a criação desta forma mais refinada, surgiram virtuosos guitarristas como Andres Segovia (1893-1987), o de maior destaque e mais importante, que fizeram com que o instrumento se tivesse estabelecido como um instrumento musical principal e sério.

Paralelamente, a guitarra ganhava também popularidade nos Estados Unidos. Em meados do século XIX, a escravatura era ainda praticada, e os escravos vindos de África trouxeram as suas tradições musicais e instrumentos. Entretanto, Christian F. Martin, um aprendiz de Johann Georg Stauffer (um construtor de guitarras de Viena, bem estabelecido), moveu-se da Europa para os Estados Unidos, onde estabeleceu, em 1838, um negócio de fabrico de guitarras. A esta altura, o desenvolvimento da guitarra nos Estados Unidos acontecia segundo duas principais correntes: Torres e Martin. Esta última era adotada por escravos libertados, que as utilizavam para canções que retratavam as suas condições de inumanidade, tendo surgido os estilos musicais *Gospel* e o *Blues*. Músicos destes estilos, como Robert Johnson e Huddie Ledbetter fizeram crescer, também, a sua popularidade. As guitarras de Martin foram, então, a base evolutiva para as guitarras de cordas de aço da atualidade.

Paralelamente, o instrumento era também o favorito dos *cowboys*, no Oeste Americano. Aqui, surgiu parcialmente por influência da proximidade com o México (raízes espanholas). A imagem do cowboy com a sua guitarra era familiar à população americana. A típica guitarra dos cowboys derivava da corrente de Torres, embora nos filmes e TV fosse mais comum a guitarra do estilo Martin.



Figura 4 - Típica guitarra da marca de cordas de aço da atualidade (fonte: (Martin Guitars s.d.))

2.1 A guitarra moderna

Martin iniciou, então, uma dinastia de construção de guitarras na América, e o instrumento era já utilizado, cada vez mais, em atuações.

No entanto, a necessidade de a música se fazer ouvir ao público era também um problema, uma vez que o som era produzido apenas pelo corpo da guitarra, ou amplificando exteriormente (o que causava o problema de feedback)

Em meados dos anos 30, começaram, então, a surgir as primeiras guitarras com soluções de amplificação incorporadas, como a guitarra Rickenbacker (o nome do seu construtor), e a Les Paul Log (inventada por Les Paul). Esta última era uma solução já sem problemas de feedback, e de qualidade de som superior a uma guitarra acústica amplificada. O avanço seguinte foi feito por Leo Fender, com a guitarra Broadcaster (mais tarde denominada de Telecaster), uma guitarra elétrica de corpo sólido. Impermeável a feedback e um timbre limpo, tornou-se rapidamente popular e apreciada.

As guitarras acústicas são de corpo oco, flexível, pelo que vibra. Esta vibração é captada pelos *pick-ups* (o dispositivo eletrónico utilizado para captar a vibração produzida pelas cordas, na amplificação) e transmitida ao amplificador, que por sua vez induz vibração no corpo da guitarra, iniciando-se um processo cíclico, o referido feedback.

Com a introdução do corpo sólido, este problema foi resolvido, sendo eliminada a vibração do corpo, e passando a qualidade do som a estar maioritariamente dependente dos pick-ups e do amplificador. Com isto, surgiram guitarras com as mais variadas formas e materiais, como sintéticos, e atualmente existem mesmo marcas que utilizam materiais compósitos.

As guitarras em materiais compósitos como os compósitos de fibra de carbono produzem um som bastante rico, pelo que passaram a ser utilizados também nas guitarras acústicas, e o desenvolvimento tecnológico neste campo continua em curso, principalmente pela escassez das madeiras utilizadas tradicionalmente.

3 Estado de Arte

3.1 Compósitos ou madeira como material de construção de instrumentos

Como referido anteriormente, as guitarras (e outros instrumentos como bandolins, violoncelos e violinos) são tradicionalmente construídos em madeira. Recentemente, têm surgido instrumentos em materiais poliméricos, compósitos ou mesmo uma combinação destes com a madeira. Uma guitarra pode ter o corpo oco, semi-oco ou sólido, e o braço é tipicamente sólido, mas há também soluções de braços ocos, para diminuição do peso, e pode ainda incluir um veio de reforço, para aumentar a resistência mecânica

Os instrumentos feitos em madeira são tendencialmente avaliados como tendo um mais agradável timbre, embora atualmente seja já aceite que os instrumentos feitos com compósitos de fibra de carbono têm uma melhor projeção do som, para além das boas propriedades mecânicas e de estabilidade de afinação. No entanto, a massa específica dos materiais compósitos é muito superior à da madeira, e as propriedades de absorção do som são também bastante diferentes, sendo o timbre dos instrumentos em compósitos por vezes descrito como “metálico” (J.Verd, 2000).

Vantagens da utilização de materiais compósitos em relação à madeira:

- Resistência mecânica e rigidez;
- Estabilidade dimensional em quaisquer condições climáticas;
- Uniformidade do material;
- Repetibilidade de propriedades;
- Permite inovações técnicas e estéticas (como a possibilidade de construção do corpo e braço num só corpo, ou a eliminação de reforços que prejudicam o som);
- Relação peso/resistência;
- Som mais pujante e de melhor propagação;
- Precisão da afinação;
- Novos e mais eficientes métodos de produção;
- Vantagem para o ambiente;
- Possibilidade de estudos e testes mais precisos;
- Estabilidade da afinação;
- Redução de peso (uma grande mais valia no caso de instrumentos como o Violoncelo ou o Contrabaixo).

3.1.1 Orientação das fibras

A madeira não é um material isotrópico, por ter imperfeições como deslocamentos, desalinhamento de átomos ou distribuição imperfeita das moléculas, o que a nível microscópico tem influência na propagação das ondas e, conseqüentemente, nas propriedades acústicas.

No entanto, do ponto de vista de seleção de materiais, estas irregularidades são negligenciadas para que a madeira possa ser comparada com outros materiais. As propriedades mecânicas relevantes na caracterização do comportamento acústico de um material são: rigidez, massa específica e o coeficiente de amortecimento, sendo que se pretende maximizar o módulo de Young e minimizar a massa específica.

Outra característica importante na obtenção de uma boa qualidade sonora é a ausência de fricção interna na direção longitudinal e a existência de uma alta anisotropia acústica (Ono, Miyakoshi, & Watanabe, 2002). Por outras palavras, pretende-se que o tampo da guitarra permita uma propagação do som longitudinalmente.

No caso dos compósitos de fibras bidirecionais, a existência de fibras na direção transversal prejudica a qualidade do som, uma vez que cria fricção e dissipa o som na direção pretendida. Por esta razão, começam a surgir modelos de instrumentos (incluindo os da AVA) cujo tampo é feito de compósitos de fibra unidirecional (a rigidez na direção transversal é conseguida através do travejamento), sendo conseguido um comportamento acústico mais próximo do da madeira, e as restantes partes da guitarra, aquelas que não são determinantes na propagação do som, com fibras em ambas as direções, para oferecer um melhor comportamento estrutural.



Figura 5 - Tampo com fibras unidirecionais do violino da marca AVA



Figura 6 - Tampo com fibras bidirecionais de um violino da marca Mezzo-Forte (Mezzo-Forte s.d.)

3.2 Exemplos de aplicação

3.2.1 Luis and Clark

Os primeiros instrumentos feitos oficialmente em compósitos de fibra de carbono foram os violoncelos da marca Luis and Clark. Luis Leguia, o fundador, velejador e músico, apercebeu-se que um catamaran feito em compósitos de fibra de vidro onde viajava produzia um som de vibração acima de determinada velocidade ao cortar o ar. Então, fabricou inicialmente um violoncelo neste material, e, após sugestão, outro em compósitos de fibra de carbono. O resultado foi agradável e desenvolveu a técnica de construção.

Segundo o mesmo, tocar num violoncelo em compósitos de fibra de carbono requer habitação, pela diferente forma como soa, e porque o som é mais forte. Explica também que os violoncelos construídos em madeira produzem um som de qualidade quando nos situamos de frente para o instrumento, mas que em auditórios de grande dimensão os corpos dos espectadores e as luzes irão aquecer esse som, para além de que se irá dissipar nas direções mais laterais, perdendo corpo e integridade.

Os violoncelos da *Luis and Clark* são hoje utilizados por alguns dos melhores violoncelistas do mundo, como Yo Yo Ma, que o considera “fantástico” (Magazine, 2009), principalmente em atuações no exterior, e para condições de transporte e climatéricas adversas, em que há um grande risco de os instrumentos de madeira perderem a sua qualidade sonora, um grande problema para os músicos.

O preço destes violoncelos ronda os 7000euros

3.2.2 Contrabaixo feito em compósitos de fibra de carbono que pode ser desmontado

Em parceria com a empresa alemã de instrumentos em compósitos de fibra de carbono Mezzo-forte Streichinstrumente, o *Institut für Textiltechnik of RWTH Aachen University*, desenvolveu um contrabaixo, o “Carbon Fiber Dbl Bass”, feito em compósitos de fibra de carbono de matriz

polimérica, cujo braço e o corpo podem ser desacoplados através de uma peça de junção feita no mesmo material, como se pode observar na Figura 1.



Figura 7 - Junção do corpo com o braço, do Carbon Fiber Dbl Bass (fonte: (Gries 2017))

A principal entrave deste instrumento é o seu transporte, pelas grandes dimensões, que associa custos extra pelas condições especiais em que tem que ser feito. Esta solução faz com que o instrumento passe a medir, quando desmontado, 1m10, em vez dos 2m de quando montado.

O aspeto crucial da inovação está no facto de a junção e o corpo serem feitos no mesmo material, não havendo perda na qualidade do som por mudança de material (o que criaria uma região foneticamente inativa) na propagação do som através do instrumento, mantendo-se a junção rígida e robusta pela alta rigidez e boas propriedades mecânicas, características do material.

Outra qualidade relevante deste instrumento é o facto de requerer menos energia por parte do músico para gerar uma nota, uma vez que os compósitos de fibra de carbono de matriz polimérica têm menor amortecimento.

O seu preço é 9600eur.

A marca alemã é já experiente no ramo, e produz também um modelo de viola de arco, de violino e de violoncelo (Gries 2017).



Figura 8 - Carbon Fiber Dbl Bass da empresa Mezzo Forte (Mezzo-Forte s.d.)

3.3 O processo de produção

Os instrumentos em madeira requerem a construção por parte de um *luthier* (construtor de instrumentos) e processos de produção na sua maioria artesanais e demorados, pelo que o custo e tempo de produção de uma guitarra de madeira de qualidade são consideravelmente altos. Deste ponto de vista, a alteração da madeira pelos materiais compósitos permite a utilização de processos de fabrico menos demorados, mais rentáveis e com mais possibilidade de desenvolvimento. (Nicholas, Hartman, & Gruber).

3.3.1 Saco de Vácuo (*Vacuum Bagging*)

Vacuum Bagging é o processo de produção utilizado pela marca Luis and Clark e unanimemente utilizado pelos restantes produtores de instrumentos feitos em compósitos de fibra de carbono, incluindo as guitarras.

Este processo consiste em dispor as camadas de fibra de carbono e a resina num molde, e envolve-los num saco de vácuo para pressionar a resina por entre as fibras de carbono, como se observa na Figura 9 e na Figura 10.

(Nota: Nas figuras abaixo, são dispostas as camadas dos tecidos de fibra de carbono e de seguida o operário aplica um banho de resina, mas pode também recorrer-se ao uso de pré-impregnados, como é explicado nos parágrafos seguintes.)



Figura 9 - Aplicação da resina nas camadas de fibra de carbono (fonte: (Pinterest s.d.))



Figura 10 - Exemplo de vácuo aplicado a uma peça (fonte: (Pinterest s.d.))

Esta montagem é introduzida num forno para que a resina se espalhe uniformemente pela peça. Aqui, o tempo e temperatura de cura variam conforme a geometria do instrumento, a capacidade do forno e do molde e, principalmente, das propriedades da resina.

Na maioria dos casos, o tampo traseiro, a ilharga, o braço e a parte traseira da cabeça são moldados numa só peça. O tampo frontal e a escala são fabricados separadamente. Uma vez unidas as peças, estas são aparadas, idealmente com ferramentas de ponta de diamante.

Segundo alguns relatos do processo de fabrico da marca Luis and Clark, são colocadas no molde os tecidos de fibra de carbono sem resina e, posteriormente, o técnico adiciona a resina com um pincel. A aplicação da resina posteriormente torna a qualidade do instrumento mais suscetível à habilidade do técnico, uma vez que é este que controla a percentagem de resina do compósito, assim como a sua uniformidade ao longo da peça. Por esta razão, recorre-se cada vez mais, incluindo na empresa acolhedora deste projeto, ao uso de pré-impregnados

Pré impregnados são tecidos de fibra de carbono que contêm já a resina aglomerada, na sua percentagem ideal. Esta percentagem e as propriedades da resina variam (nomeadamente a sua

viscosidade) consoante o modelo, e os fabricantes de instrumentos não revelam pormenores sobre os pré-impregnados que utilizam.

O método de produção referido acima é o utilizado na produção da maioria dos componentes em compósitos de fibra de carbono em molde. São normalmente utilizados fornos industriais, que operam em gamas de temperatura de trabalho de cerca de 60-120°C, e a pressurização do molde é apenas assegurada pelo saco de vácuo. Os tempos e temperaturas de cura utilizados pelos diferentes produtores de instrumentos não são revelados, mas sabe-se que se tratam de curas normalmente superiores a 5 horas.

A percentagem de resina dos impregnados utilizados pela empresa IDEIA.M é de 40%, e a cura é feita a 90°C durante cerca de 9h, com um pré-aquecimento feito durante uma hora a 60°.

3.4 Processos alternativos

3.4.1 Autoclave

Nas aplicações com requisitos de resistência mais precisos e exigentes, como a aeronáutica e a competição automóvel, são utilizados fornos de autoclave: fornos que operam a 120-230°C, com uma atmosfera de nitrogénio pressurizada a cerca 7bar. Estes fornos permitem a eliminação quase total de vazios (zonas da peça com ausência de resina).

3.4.2 Uso de sistemas de cura rápida

Os longos ciclos de cura como os geralmente utilizados na produção de instrumentos são suficientes para baixos e médios volumes de produção. Nas indústrias como a automóvel, em que os tempos de cura são críticos na otimização dos processos de produção, têm vindo a ser desenvolvidas resinas e técnicas que permitem curas de duração inferior a 30 minutos com propriedades mecânicas das peças obtidas não inferiores às obtidas com os processos de cura convencionais. Na Figura 11 apresenta-se um exemplo de um ciclo de cura rápida, em que o molde e a fibra são pré-aquecidos, e a resina é injetada. (Zhang, Gu, li, & Zhang, 2013)

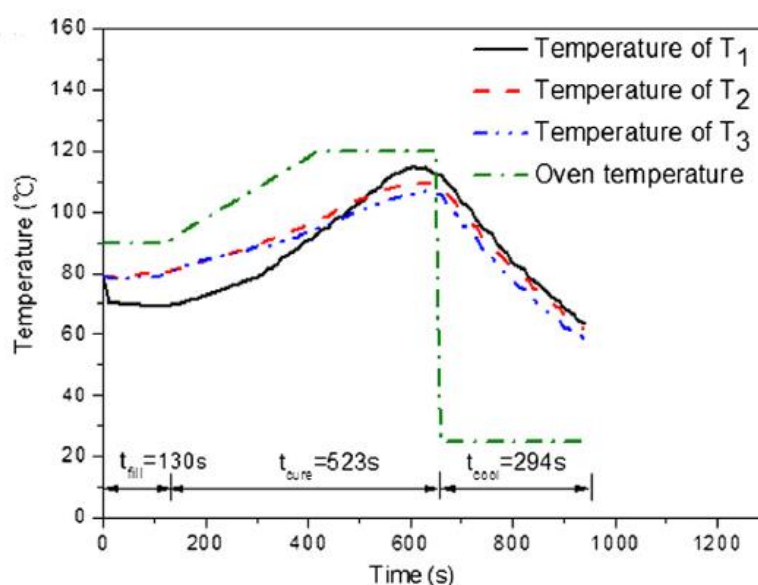


Figura 11 - Exemplo de um ciclo de cura rápida com pré-aquecimento (Zhang, Gu, li, & Zhang, 2013)

3.4.3 Estampagem de compósitos de fibra de carbono

Nas indústrias com necessidades de otimização de processos mais exigentes foi também desenvolvido o processo de estampagem de compósitos de fibra de carbono. Este processo consiste em pré-aquecer placas do material para as pressionar através de uma ferramenta “macho” contra o negativo, como se pode observar na Figura 12.

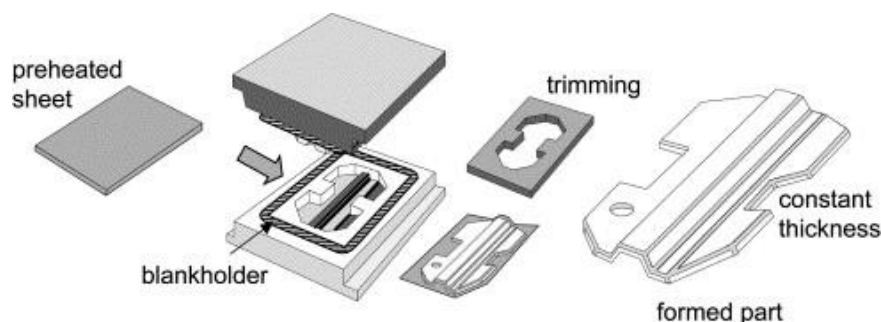


Figura 12 - Processo de estampagem de compósitos de fibra de carbono (M.D.Wakemana, et al. s.d.)

Na perspectiva de melhorar a eficiência do processo, poderá ser relevante estudar a aplicabilidade destas tecnologias na produção de instrumentos musicais em compósitos de fibra de carbono.

3.5 Produtores de guitarras

Nesta secção apresentam-se alguns dos melhores construtores de guitarras clássicas, acústicas de cordas, e de guitarras em compósitos, assim como algumas das suas particularidades.

3.5.1 Em Madeira

APC-instruments

APC é a abreviatura para António Pinto Carvalho, o maior construtor de guitarras de Portugal e um dos maiores da Europa. Fabricante de todo o tipo de guitarras em madeira, exporta para um grande número de países. Tem os seus modelos próprios e fabrica também para outras marcas. Produtor de todo o tipo de guitarras, desde a mais baixa gama a guitarras de elevado custo e com madeiras mais raras. Utiliza processos de produção semi automatizados (utilização de alguns robôs e outras máquinas), com bons níveis de acabamento e controlo de qualidade.

Greg Smallman and Sons

Greg Smallman é um construtor de guitarras clássicas popularizado pelo principalmente pelo músico John Williams (um dos melhores guitarristas da atualidade) e é conhecido pelo seu design inovador. As suas guitarras têm as costas arqueadas e mais espessas do que o normal, e a sua estrutura conjuga madeira de balsa com fibra de carbono (Figura 13), o que lhe confere um timbre mais pronunciado e de volume superior. Incorpora também um apoio de braço, e é considerada por muitos a perfeita harmonia entre o design tradicional e o moderno

A sua gama de preços inicia-se nos cerca de oito mil euros.



Figura 13 - Pormenores do design da guitarra de Greg Smallman (fonte: (Guitar Salon s.d.))

Matthias Dammann

Matthias Damman foi o pioneiro do tampo duplo, uma estrutura *sandwich*, que consiste em tampos ultra-finos com um espaço oco entre ele, e utiliza um polímero denominado de “Nomex” para os espaçadores, o que permite ao tampo mover-se com mais amplitude. Impressionou alguns guitarristas, principalmente pela possibilidade de se fazerem ouvir sem amplificação, sem perder o timbre de uma guitarra de topo.

A sua gama de preços inicia-se nos cerca de oito mil euros.



Figura 14 - Tampo de uma guitarra de Matthias Dammann (fonte: (Guitars from Spain s.d.))

Daniel Friederich

As guitarras deste construtor são conhecidas pela sua estética e pelo seu timbre tradicional, mas forte (como é o caso das outras guitarras de topo). Conjugam o design tradicional com a qualidade de construção que a atualidade permite.

A sua gama de preços inicia-se nos cerca de oito mil euros.

C.F. Martin & Company

Este fabricante Americano é, como referido anteriormente, o criador do conceito das guitarras em cordas de aço. Estas guitarras são consideradas pela maioria da população de utilizadores como as melhores do setor. É também associada à sua forma icónica de topo horizontal, como se observa na Figura 15.

São utilizadas como termo de comparação e referência em estudos de guitarras e criação de novos modelos por parte de outras marcas.

Estas guitarras podem custar de mil euros a centenas de milhares de euros, dependendo do material de construção e do nível de personalização



Figura 15 - Guitarra Martin de alta gama horizontal (fonte: (Martin Guitars s.d.))

Taylor

Esta marca é também Americana, sediada na Califórnia, e as suas guitarras são acústicas de cordas de aço ou elétricas semi-ocas. Apesar da tradição da marca “Martin”, disputa o título de melhor construtor de guitarras americanas com mesma.

Fabricam os seus próprios *pick-ups*.

A sua gama de preço começa nos cerca de quinhentos euros até cerca de mil euros.



Figura 16 - Guitarras da marca Taylor (fonte: (Taylor Guitars s.d.))

3.5.2 Em materiais compósitos

Ovation

Ovation foi a marca pioneira na utilização de materiais compósitos em guitarras. A sua gama de diferentes geometrias engloba guitarras elétricas, elétrico-acústicas, ou mesmo guitarras baixas. Parecem utilizar como “imagem de marca” o corpo com a parte traseira “oval”, como se mostra na Figura 17. Segundo (Roest, 2016), esta parte da guitarra é em fibra de vidro. São de considerável popularidade. Utilizam mesmo, em alguns modelos, madeira, fibra de vidro e fibra de carbono numa só guitarra.

As guitarras desta marca com o tampo em compósito de fibra de carbono custam cerca de dois mil e quinhentos a três mil euros.



Figura 17 - Exemplo de guitarras da marca *Ovation* (Ovation Guitars, s.d.)

RainSong

RainSong é a marca líder no mercado das guitarras em compósitos (Roest, 2016).

Segundo o website (RainSong, s.d.), as guitarras desta marca são fabricadas com a mesma tecnologia de colagem utilizada no fabrico de aviões, foguetões e equipamento de satélite, o que permite uma suave transmissão da energia das cordas para o tampo e restantes componentes da guitarra, com o mínimo de quebras de propagação.

A sua gama é composta apenas por guitarras em compósitos de fibra de carbono. Produzem tampos com tecidos de fibras unidireccionais, bidireccionais ou mesmo organizadas em recortes, como se pode ver na Figura 18.

O preço dos seus modelos situa-se entre os mil e quinhentos e os quatro mil euros, aproximadamente (RainSong, s.d.)

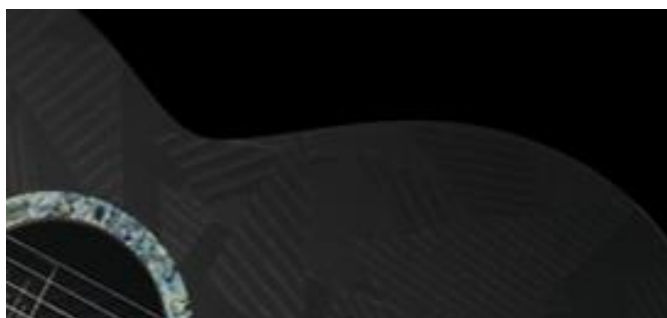


Figura 18 - Tampo de um modelo da *RainSong*, com os tecidos organizados em recortes (RainSong, s.d.)



Figura 19 - Gama de formas de guitarra da *RainSong* (RainSong, s.d.)

Composite acoustics

Esta marca parece não ser tão popular como as anteriores, mas, segundo o website (Composite acoustics, s.d.), utiliza também tecnologia de alta precisão, incluindo a máquina de calibração de trastes Plek® Pro Technology, também utilizada pela maioria dos construtores de referência, como é o caso da Martin & Co. A sua gama de guitarras engloba apenas guitarras em compósitos de fibra, que rondam os 2000eur, e variam essencialmente na sua forma, localização do furo e pintura, sendo a construção essencialmente a mesma.

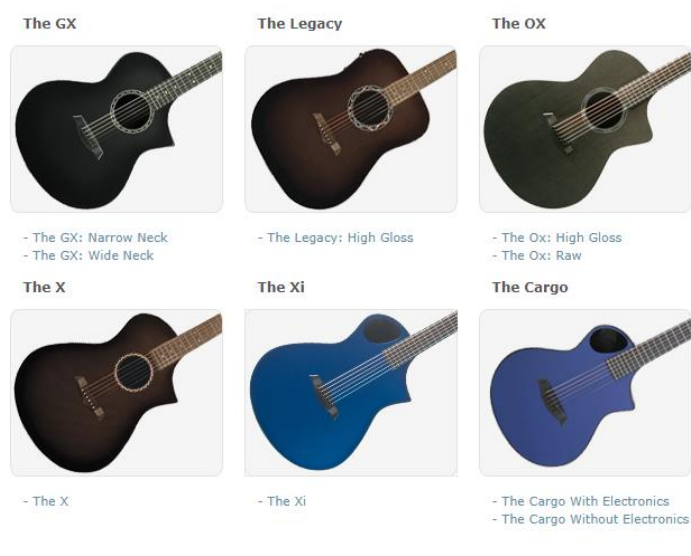


Figura 20 - Gama de guitarras da *Composite Acoustics* (Composite acoustics, s.d.)

Emerald Guitars

Fabricantes de guitarras acústicas e guitarras baixo, de cordas de aço ou de nylon, de 6 cordas, 7 ou 12, de um só braço ou de braço duplo. As guitarras são construídas acústicas de base, mas o cliente pode adquirir como extra o sistema de amplificação, que é uma adaptação à guitarra. São também inovadores na localização do furo, e há modelos com incorporação de laminados de madeira no tampo, isto é, o fabricante tira partido do fabrico em molde para explorar novas geometrias e formas. Na Figura 21 apresentam-se alguns exemplos.

Tratam-se de guitarras produzidas manualmente, que se situam entre os 1000eur e o 3000eur de custo. Produzem também modelos exclusivos a pedido do cliente. (Composite acoustics, s.d.)



Figura 21 - Exemplo de modelos da *Emerald Guitars*

Klos Guitars

Marca recente com um design minimalista e simples, fábrica guitarras em compósitos de fibra de carbono associadas ao conceito “*travel guitar*” (pela alta resistência ao impacto), de dimensão reduzida (fator portabilidade), com a particularidade de ter o braço desmontável através da remoção de 4 parafusos. Corpo em compósito de fibra de carbono e braço em madeira. Na Figura 22 apresentam-se os três modelos disponíveis, uma acústica e duas com a adição do sistema de *pick ups* para amplificação.

O preço dos seus modelos situa-se entre cerca de 1500eur e 2500eur.



Figura 22 - Os três modelos de guitarras da *KLOS Guitars* (KLOS Guitars, s.d.)

Blackbird guitars

Tal como a referida acima, esta marca associa o conceito de “*travel guitar*” às guitarras em compósitos, pela resistência ao impacto, mais uma vez, e estabilidade do som em qualquer condição climatérica.

Recentemente criaram um modelo construído num compósito denominado de *Ekoa*. Este compósito é vendido como um material ecológico, e é composto por fibras de linho e uma bioresina resultante de lixo industrial (Guitar World, 2016). As guitarras neste material assemelham-se às guitarras de madeira em termos visuais, pela cor do linho, mas oferecem propriedades mecânicas e acústicas próximas das da fibra de carbono

O preço dos seus modelos situa-se entre cerca de 1500eur e 2500eur (Blackbird Guitars, s.d.).



Figura 23 - Exemplo de guitarras da marca *Blackbird* (Blackbird Guitars, s.d.)

3.6 Custo e qualidade

“Fiquei impressionado com a beleza e o poder de som dos novos violoncelos Luis and Clark. Os jovens músicos que usam os novos instrumentos transmitem-me que consideram estes instrumentos inspiradores para trabalhar. Recomendo-os fortemente, especialmente como melhor relação qualidade-preço.” Robert Freeman reitor da College of Fine Arts, University of Texas at Austin

Apesar dos benefícios e de opiniões positivas como a apresentada, os instrumentos em compósitos de fibra de carbono enfrentam um mercado que coloca alto valor em instrumentos de madeira raros e antigos.

Atualmente, o preço dos instrumentos feitos em compósitos de fibra de carbono situa-se abaixo do preço dos melhores instrumentos de madeira, principalmente no caso dos violoncelos e violinos, que podem custar milhões de euros. A madeira é utilizada desde a existência dos instrumentos musicais, pelo que os instrumentos em compósitos enfrentam um refinamento de técnicas e qualidade de centenas de anos.

Por outro lado, os novos instrumentos em compósitos já provaram ser acusticamente bastante capazes, pelo que parecem ser um bom substituto aos instrumentos de madeira de baixa e média gama e como compra de melhor relação qualidade/preço, principalmente no que toca a projeção e corpo do som (que é mesmo superior aos melhores instrumentos de madeira). Ainda que os compósitos de fibra de carbono sejam um material de custo relativamente elevado, há ainda uma grande possibilidade de melhorar processos de produção, aumentando a qualidade e precisão (e consequentemente a qualidade do som), e simultaneamente diminuindo custos, principalmente se forem aplicadas as técnicas já utilizadas em indústrias como a automóvel e a aeronáutica.

4 Estudo de forma

4.1 Definição do tipo de guitarra

A empresa acolhedora pretendia criar um novo modelo de guitarra, e estava já definido que seria um modelo acústico, em oposição à guitarra elétrica. (já tinha sido criado e posto em produção um modelo de guitarra elétrica).

Como referido na secção sobre a história da guitarra, uma guitarra acústica pode estar inserida numa de duas grandes correntes: o estilo clássico, associado ao construtor pioneiro António Torres, ou ser de cordas de aço, também conhecida por “estilo *folk*” (associada ao construtor Martin).

Após diálogo com os envolvidos no projeto, os gerentes da empresa e o designer e responsável pela produção dos instrumentos na empresa, optou-se por desenvolver uma guitarra do estilo “*folk*”. Este tipo de guitarra é adequado para uma grande panóplia de estilos musicais e estilos de guitarristas. Para além disso, enquadra-se na identidade da marca “AVA”.

4.2 Conceito construtivo

Uma vez definido o tipo de guitarra no que diz respeito à sua corrente musical e construtiva (escolha entre a guitarra clássica e a guitarra de cordas de aço), foi necessário definir a geometria geral da guitarra, para de seguida ser possível a definição das suas dimensões principais, para proceder ao estudo de frequência que esta dissertação inclui, assim como as posteriores fases do projeto de desenvolvimento.

Após pesquisa, surgiu uma divisão natural desta escolha entre três possibilidades: uma guitarra de geometria inovadora e disruptiva (Figura 24), uma guitarra com a forma tradicional do tipo *Dreadnought* (Figura 25), ou com a forma tradicional estilo *Grand Auditorium* (Figura 26).



Figura 24 - Geometria disruptiva (fonte: (Emerald Guitars s.d.))



Figura 25 - Guitarra com a forma tradicional do tipo *Dreadnought* (fonte: (Martin Guitars s.d.))



Figura 26 - Guitarra com a forma tradicional do tipo *Grand Auditorium* (fonte: (Taylor Guitars s.d.))

Para esta decisão foi feito um levantamento de opiniões tanto junto de guitarristas como de não guitarristas, e surgiu uma tendência geral para a preferência pela geometria do estilo *Grand Auditorium*. Esta forma é produzida pelos melhores produtores de guitarras desta natureza, pelo que existem medidas de referência resultantes de décadas de refinamento. Uma guitarra com uma geometria disruptiva iria introduzir mais dificuldades e margem para erro no seu desenvolvimento, e a geometria do estilo *Dreadnought*, apesar de tradicional, é de inferior aceitação no que diz respeito à sua estética.

A geometria escolhida foi, então, a *Grand auditorium*.

4.3 Dimensões

Definido o conceito da guitarra, partiu-se para o estudo de forma, onde foram discutidos pormenores como: design da cabeça, forma do tampo traseiro e ilharga, design do *cutaway* (corte feito no corpo da guitarra junto dos últimos trastes para facilitar o acesso aos mesmos por parte dos músicos), e o design do cavalete. Em anexo são apresentados exemplos de alguns esboços feitos pelo designer responsável da empresa

French (2009) fornece as medidas *standard* para o tipo de guitarra em questão, que foram as usadas como base para o estudo de forma, e que estão coerentes com outras guitarras de referência.

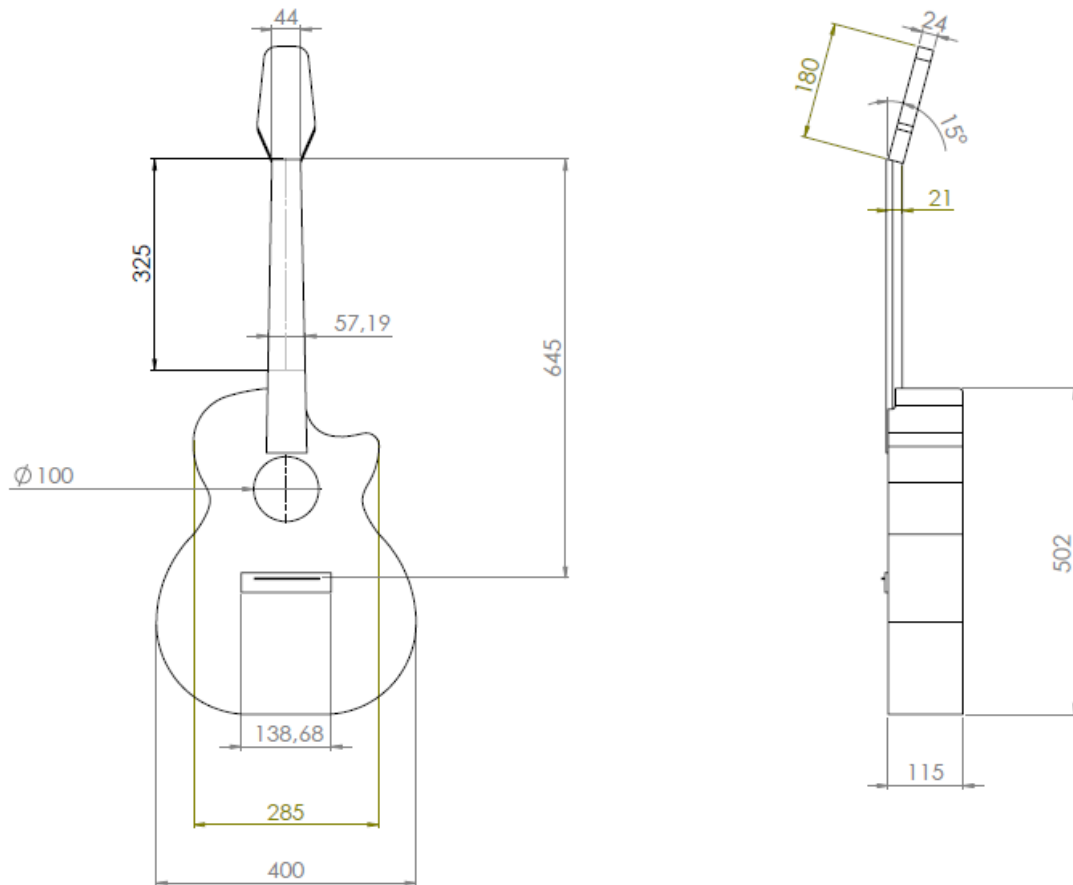


Figura 27 - Medidas *standard* de uma guitarra do estilo *Grand Auditorium*, em mm (fonte: (French 2009))

Este estudo foi, a par com os designers da empresa, um processo iterativo de desenhos manuais, discussão de ideias e análise de outras guitarras de estilo idêntico, até a execução de uma modelação final no programa SOLIDWORKS.



Figura 28 - Modelação 3D da guitarra

5 Obtenção de uma guitarra de qualidade

5.1 Estudo de frequência

As primeiras investigações detalhadas da acústica de instrumentos foram feitas por *luthiers*. Curiosamente, as guitarras com as melhores qualidades acústicas ainda na atualidade são feitas por construtores que utilizam técnicas tradicionais, experiência e intuição para definir parâmetros como a geometria dos tampos e de todos os componentes da guitarra, ou as madeiras a utilizar.

Na tentativa de estudar uma guitarra do ponto de vista científico, muitos dos estudos da acústica são focados na ressonância e nos modos de vibração do tampo, porque isto irá determinar a resposta natural do instrumento como sistema vibratório (Inta).

Para efeitos de estudo, uma guitarra pode ser considerada um tampo acoplado a uma caixa de ar.

Fazem-se, então, simulações pelo método de elementos finitos para conhecer os modos de vibração e as frequências de ressonância. Para estas simulações, introduzem-se as propriedades do respetivo material, como o seu módulo de Young e tensão de rutura e fornece-se a geometria.

De notar que as propriedades do material não são constantes, e os compósitos podem na realidade conter vazios que são de muito difícil contabilização. Portanto, como complemento a estas simulações, é também comum recorrer-se aos testes de Chladni. Estes, tratam-se de testes experimentais, que consistem em colocar um pó, como sal fino, sobre o tampo, e submete-lo a determinadas frequências. De acordo com estas frequências, a vibração do tampo irá gerar figuras com o pó, como é possível verificar na Figura 29.

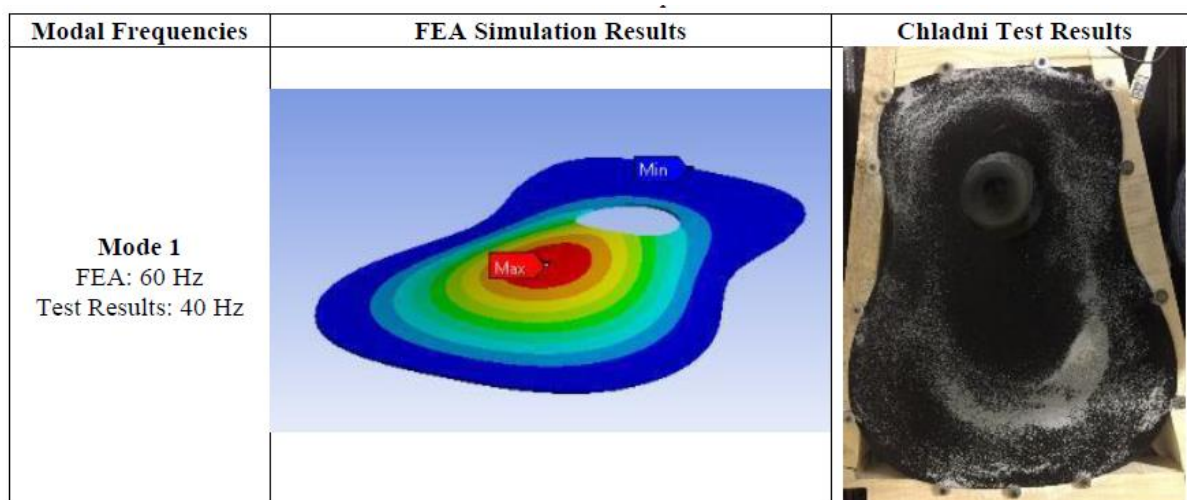


Figura 29 - Exemplo de resultados de Simulações FEA e teste de Chladni (Nicholas, Hartman, & Gruber)

As zonas em que o pó se acumula são as zonas de mínima vibração, enquanto que as que não têm pó são as de máxima vibração. Cada modo de vibração terá, então, uma figura.

Estas medições são extremamente dependentes do sistema de suporte em que é colocado o tampo, porque as frequências de ressonância da estrutura podem influenciar as do tampo. A melhor solução passa por utilizar uma estrutura cuja ressonância esteja confinada a frequências fora da gama em estudo, se quisermos avaliar apenas o comportamento do tampo.

Uma vez analisado o tampo livre (acoplado a uma estrutura que não influencie a ressonância), estes testes são também realizados com encastramento do tampo numa estrutura (para simular o acoplamento com a ilharga), após a instalação do travejamento, da ilharga em si, ou mesmo do braço e do cavalete. Estas estruturas adicionadas ao tampo irão, naturalmente, influenciar a sua vibração, por estarem em contacto com o mesmo. De notar que o cavalete é o elemento de contacto da vibração das cordas para o tampo, e é uma massa considerável localizada numa posição central do tampo. A sua geometria e material irão obviamente ter influência, mas está já provado que o seu peso deve ser o menor possível (Inta).

Para além disso, a estrutura que suporta o tampo para testes pode ser “aberta” ou com caixa de ressonância, isto é, simulando o contacto do tampo com o ar existente no corpo da guitarra, que também influenciará o modo de vibração.



Figura 30 - Estruturas para ensaio do tampo com e sem travejamento (Okuda & Ono, 2008)

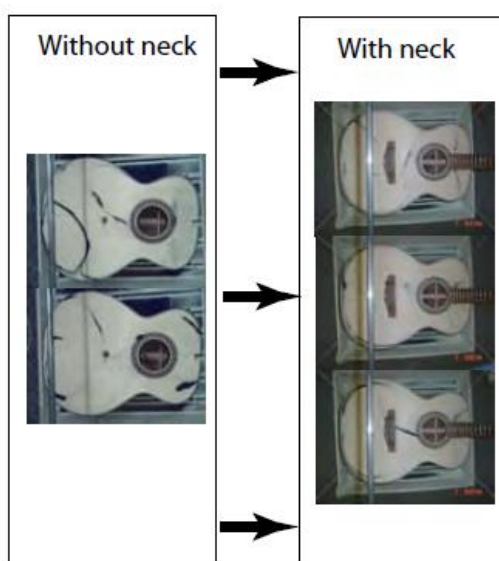


Figura 31 – Exemplo de figuras de Chladni antes e depois da montagem do pescoço (Inta)

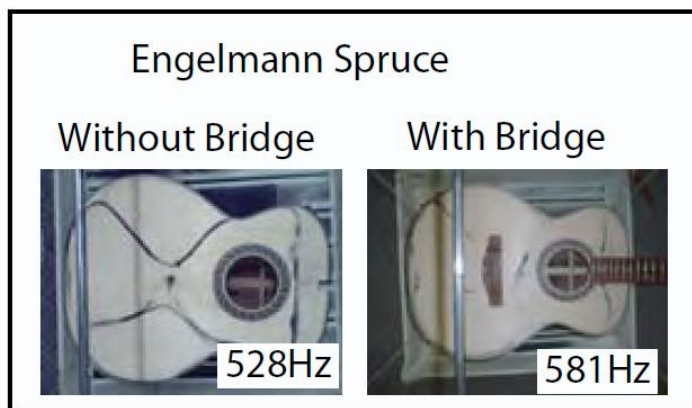


Figura 32 – Exemplo de figuras de Chladni antes e depois da montagem do cavalete (Inta)

Posteriormente à montagem da guitarra, podem também fazer-se testes como teste de intensidade do som ou do *sustain* (tempo que o som é mantido audível a partir do instante em que uma corda é tocada), isto é, de obtenção da resposta em frequência.

Em resultados de vários estudos, as guitarras construídas em compósitos de fibra de carbono aproximam-se muito das guitarras acústicas de gama alta, ou superam, em parâmetros de qualidade do som como os referidos.

Ainda assim, a qualidade do som não se resume aos parâmetros que podem ser medidos. Ainda que estes possam classificar uma guitarra como bem construída, o som, e especialmente o seu timbre, é uma questão suscetível a opiniões pessoais.

Nesta questão, segundo a experiência dos *luthiers*, há uma lista de fatores que influenciam o timbre:

- Geometria e tamanho do corpo;
- Espessura dos componentes do corpo;
- Cavalete;
- Posicionamento do furo;
- Propriedades acústicas do material da guitarra;
- Travejamento;
- Geometria da escala;
- Propriedades das cordas.

No entanto, a definição destes parâmetros é feita por parte dos *luthiers* de forma intuitiva e recorrendo à experiência e conhecimento empírico.

Têm-se desenvolvido modelos de avaliação do timbre de uma guitarra, mas são apenas avaliações estatísticas de dados qualitativos, tanto com músicos como com indivíduos menos entendidos, utilizando dimensões como “agradabilidade”, “plenitude”, “nitidez”, “compacidade”, “cor”, “brilho”, etc.

5.2 Análise estrutural

É necessário validar a guitarra como uma estrutura resistente às solicitações a que irá estar sujeita. Para tal, é comum utilizar-se também a simulação de elementos finitos, em que se pode simular a tensão das cordas e afinar a geometria geral da guitarra. Aqui, o braço da guitarra é um elemento crítico, por funcionar como uma barra em cantiléver, sujeita a tensões de flexão, que podem provocar empenos, que irão alterar o tom da guitarra.

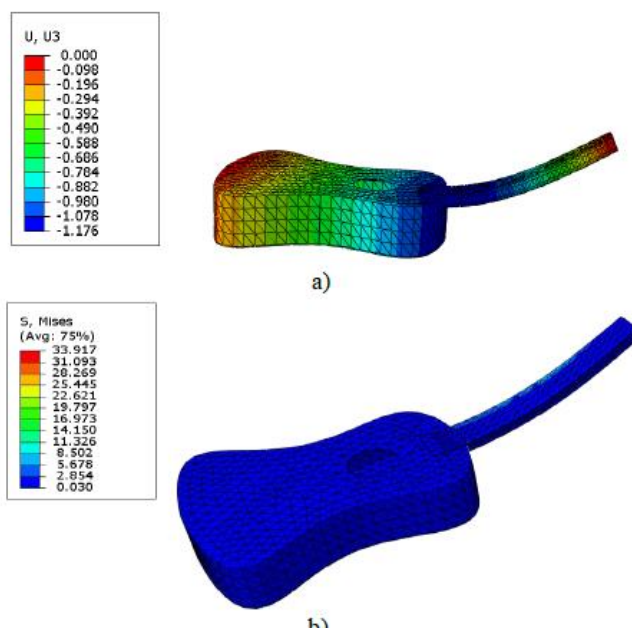


Figura 33 - Tensão e deformação de uma guitarra (Stanciu, Curtu, & Apostol, 2014)

5.3 Quantificação da qualidade

Jurgen Meyer, no *Physikalisch-Technische Bundesanstalt*, na Alemanha, realizou extensivas audições a diversas guitarras por uma determinada quantidade de músicos experientes, para tentar correlacionar a qualidade das guitarras com as suas curvas de resposta em frequência.

Após a obtenção das curvas de resposta em frequência chegou-se aos seguintes critérios de qualidade:

- As ressonâncias mais baixas devem ser tão amortecidas quanto possível, pois o seu amortecimento é naturalmente pequeno, desequilibrando o registo grave;
- O nível de pico da 2ª ressonância, quanto mais alto, mais vantajoso será;
- O nível de pico da 3ª ressonância (entre os 390 e 440Hz) deve ter o mesmo comportamento da anterior;
- Ao contrário das duas ressonâncias mais baixas, a 3ª deve ser a menos amortecida possível.
- A quantidade a que esta ressonância está acima do nível da curva de ressonância;

- A nitidez desta ressonância.

Segundo French (2009) as seguintes características estão também correlacionadas com boa qualidade sonora:

- Curto tempo de ataque;
- Baixa variação no tempo de ataque entre as diferentes cordas;
- Sons de alta frequência abaixo dos 1000Hz;
- Alta amplitude e baixo amortecimento na função de resposta em frequência das primeiras duas frequências de ressonância;
- Surgimento de adjetivos como “Limpo”, “Forte”, “Brilhante”

Na obtenção de um instrumento de qualidade, é, também, comum obter os seus modos de vibração, as frequências de ressonância e resposta em frequência, e tentar igualar estes resultados aos de guitarras de alta qualidade. Abaixo apresentam-se exemplos de referência.

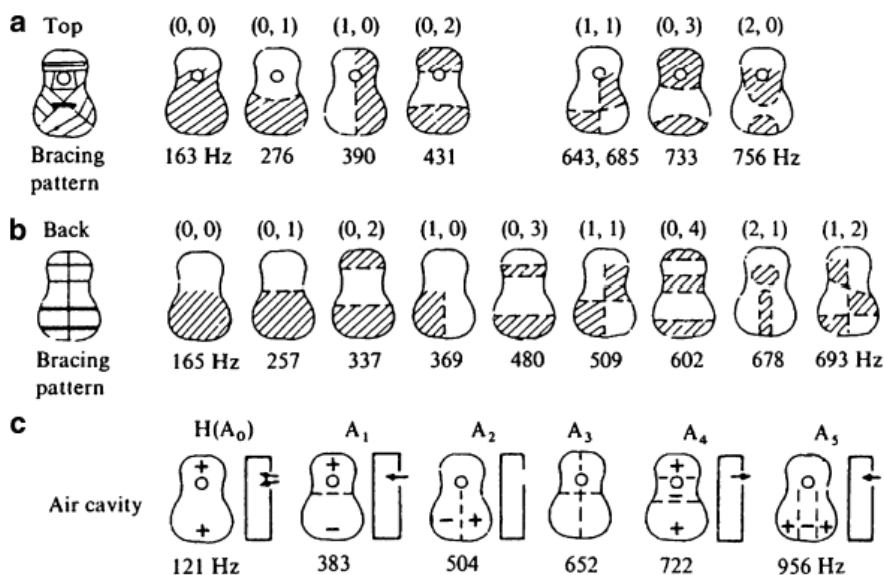


Figura 34 - Modos de vibração de uma guitarra de folk de topo (Martin D-28): (a) do tampo frontal, com a ilharga e tampo traseiro em areia. (b) do tampo traseiro, com a ilharga e tampo frontal em areia. (c) da cavidade, com o tampo traseiro e ilharga em areia (Rossing, 2010)

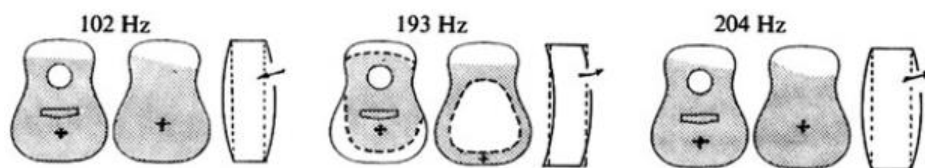


Figura 35 - Movimento vibratório de uma Martin D-28 em 3 ressonâncias na região de baixa frequência (Rossing, 2010)

Tabela 1 - Frequência dos principais modos de vibração do tampo frontal, tampo traseiro em guitarras de referência (Rossing, 2010)

Top plate	(0,0)	(0,1)	(1,0)	(0,2)	(1,1)	(0,3)	(2,0)	(1,2)
Steel string								
Martin D-28	163	326	390	431	643	733	756	
Martin D-35	135	219	313	397	576	626	648	777
Classical								
Kohno 30	183	388	296	466	558		616	660
Conrad	163	261	228	382	474		497	
Back plate	(0,0)	(0,1)	(0,2)	(1,0)	(0,3)	(1,1)	(2,0)	(1,2)
Steel string								
Martin D-28	165	257	337	369	480	509	678	693
Martin D-35	160	231	306	354	467	501	677	
Classical								
Kohno 30	204	285	368	417	537	566	646	856
Conrad	229	277	344	495	481	573	830	611
Air cavity	A ₀	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅		
	(Helmholtz)	(0,1)	(1,0)	(1,1)	(0,2)	(2,0)		
Steel string								
Martin D-28	121	383	504	652	722	956		
Martin D-35 118	392	512	666	730	975			
Classical								
Kohno 30	118	396	560	674	780			
Conrad	127	391	558	711	772	1033		

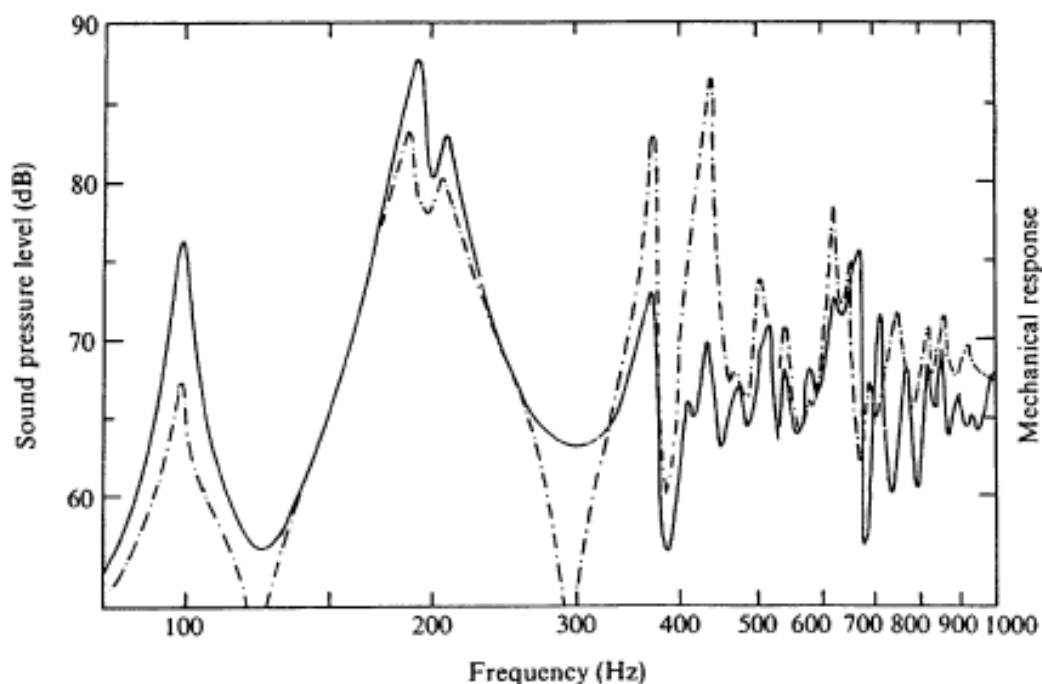


Figura 36 – Resposta em frequência e espectro de som um metro em frente de uma Martin D-28, gerada por uma força sinusoidal de 0.15 N. A Curva a negroito é o espectro de som; a curva a tracejado é a aceleração no ponto gerador (Rossing 2010).

6 Estudo do tampo superior

Como referido anteriormente, o elemento mais influente no comportamento vibratório da guitarra é o tampo superior. Deverá ter as propriedades certas para induzir os modos de vibração e resposta em frequência pretendidos.

Como tal, as seguintes secções irão incidir sobre o estudo de frequência do tampo superior.

6.1 Metodologia

Validação do modelo de simulação

- Simulação de frequência de placas quadradas isotrópicas e ortotrópicas e comparação com os dados teóricos

Estudo das características de uma placa em compósito

- Cálculo da espessura
- Simulação e teste de parâmetros

Modelação de um sistema de simulação do tampo com travejamento

- Modelação do tampo, travejamento, sistema de suporte e outros elementos
- Simulação e comparação de resultados com os conhecidos de uma guitarra de referência

Simulação do tampo em compósito de fibra de carbono

- Modelação do tampo e travejamento em compósito de fibra de carbono
- Simulação e comparação de resultados

6.1.1 Análise de placas quadradas

A empresa utiliza como programa de simulação a extensão de simulação do software SOLIDWORKS. Foi feita uma primeira análise à adequação deste software e do software ABAQUS, fornecido pela faculdade, e também uma análise ao efeito do refinamento de malha.

Para tal, calcularam-se as frequências de ressonância teóricas e compararam-se estes valores com os obtidos em simulação, para placas isotrópicas e ortotrópicas, pela seguinte fórmula (Martins 2007):

Nesta fase, utilizaram-se elementos de casca (em oposição a elementos sólidos) em todas as simulações.

Usou-se as propriedades da madeira “*Sitka Spruce*”, utilizada na maioria das guitarras de boa qualidade.

Placa isotrópica livre

Para o caso isotrópico considerou-se igual módulo de Young e coeficiente de Poisson em todas as direções.

Tabela 2 - Propriedades utilizadas na placa isotrópica

Sitka Spruce	
ρ (Kg/m ³)	460,00
E (Pa)	1,30E+10
ν	0,38
G (Pa)	7,29E+08
L (m)	0,50
h (m)	2,90E-03

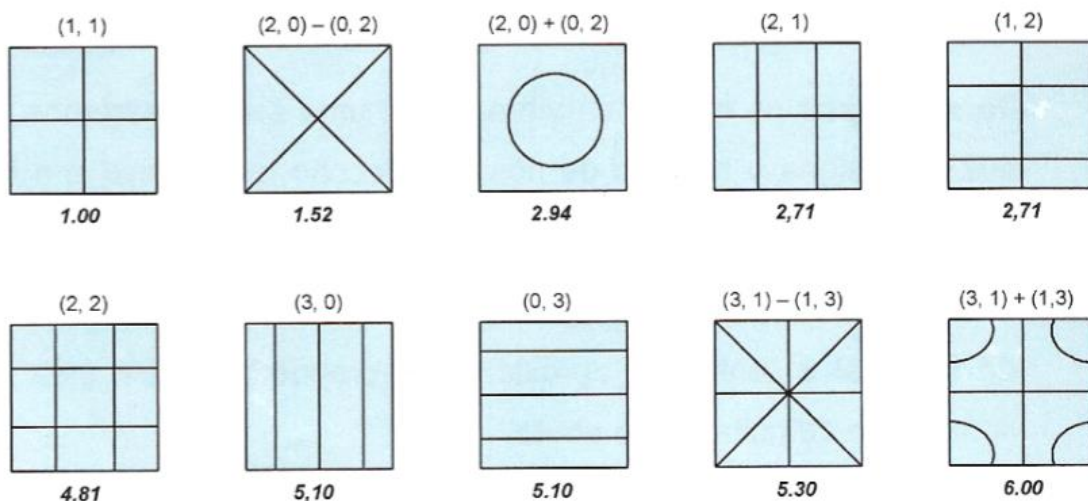


Figura 37 - Os primeiros 10 modos teóricos de uma placa quadrada isotrópica com as extremidades livres (Martins 2007)

Os números por cima dos quadrados, “m” e “n”, designam o número de linhas nodais, na direção vertical e horizontal, respetivamente, e os números abaixo dos quadrados indicam as frequências relativas (ou coeficientes) de cada modo, ou seja, obtém-se a frequência natural de um modo multiplicando o seu coeficiente pela frequência natural do primeiro modo.

Para uma placa quadrada, de material isotrópico, e sem qualquer restrição nas condições de fronteira, isto é, com movimento livre em todas as direções, a primeira frequência natural calcula-se através da seguinte fórmula (Martins 2007):

$$f_{00} = \frac{h \cdot c_l}{L^2} \sqrt{\frac{1 - \nu}{2}}, \text{ em que } c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho(1 - \nu^2)}}$$

h – Espessura da placa;

L – Dimensão lateral da placa;

ν – Coeficiente de poisson;

E – Módulo de Young;

ρ – Massa específica.

$$Erro(\%) = \frac{|Frequência simulada - Frequência calculada|}{|Frequência calculada|} \cdot 100$$

No caso do programa ABAQUS, foram testados os tipos de elemento “S4R” e “S8R” (este último assinalado nas tabelas por um asterisco)

O tipo de elemento de malha utilizado no software SOLIDWORKS foi “triangular otimizada automaticamente pelo software”, não havendo opção de seleção de elemento de “casca espessa”, mas sim “*curvature based mesh*”.

Tabela 3 - Frequências de ressonância da placa isotrópica livre obtidas na simulação em ABAQUS, e respetivo desvio em relação às teóricas

Modos		Frequência de ressonância (Hz)									
		Teórica	ABAQUS								
m	n		malha 50mm	Erro (%)	malha 25mm	Erro (%)	malha20mm	Erro (%)	malha 40mm *	Erro (%)	
1	1	37,19	39,17	5,33	39,05	5,01	39,03	4,96	38,97	4,80	
2	0	56,52	57,86	2,36	57,39	1,53	57,33	1,43	57,22	1,23	
0	2	72,14	76,64	6,24	75,53	4,70	75,40	4,52	75,16	4,18	
2	1	100,78	103,36	2,56	102,48	1,69	102,36	1,57	102,01	1,23	
1	2	100,78	103,36	2,56	102,48	1,69	102,36	1,57	102,01	1,23	
2	2	178,87	190,92	6,74	188,09	5,16	187,11	4,61	185,40	3,65	
3	0	189,65	196,28	3,50	188,09	0,82	187,11	1,34	185,40	2,24	
0	3	189,65	196,28	3,50	188,58	0,56	188,27	0,73	187,37	1,20	
3	1	197,09	210,48	6,79	205,15	4,09	204,47	3,75	203,07	3,04	
1	3	223,12	247,36	10,86	237,35	6,38	236,15	5,84	233,94	4,85	

Desvio médio 5,05 3,16 3,03 2,76

Tabela 4 - Frequências de ressonância da placa isotrópica livre obtidas na simulação em SOLIDWORKS, e respetivo desvio em relação às teóricas

Modos		Frequência de ressonância (Hz)							
		Teórica	SOLIDWORKS						
m	n		malha 50mm	Erro (%)	malha 25mm	Erro (%)	malha 20mm	Erro (%)	
1	1	37,19	38,97	4,80	38,96	4,77	38,97	4,80	
2	0	56,52	57,03	0,90	57,20	1,20	57,16	1,12	
0	2	72,14	75,20	4,24	75,14	4,16	75,14	4,16	
2	1	100,78	102,69	1,90	102,60	1,81	102,11	1,32	
1	2	100,78	102,75	1,96	102,50	1,71	102,16	1,37	
2	2	178,87	191,22	6,91	187,53	4,84	188,01	5,11	
3	0	189,65	183,93	3,02	185,34	2,27	185,52	2,18	
0	3	189,65	186,86	1,47	185,31	2,29	185,39	2,25	
3	1	197,09	206,88	4,97	203,09	3,05	203,53	3,27	
1	3	223,12	239,00	7,12	233,93	4,85	234,53	5,11	

Desvio médio 3,73 3,09 3,07

(Nota: nos seguintes casos de placas quadradas apenas se irá mostrar o desvio médio obtido, por razões de facilidade de interpretação de dados)

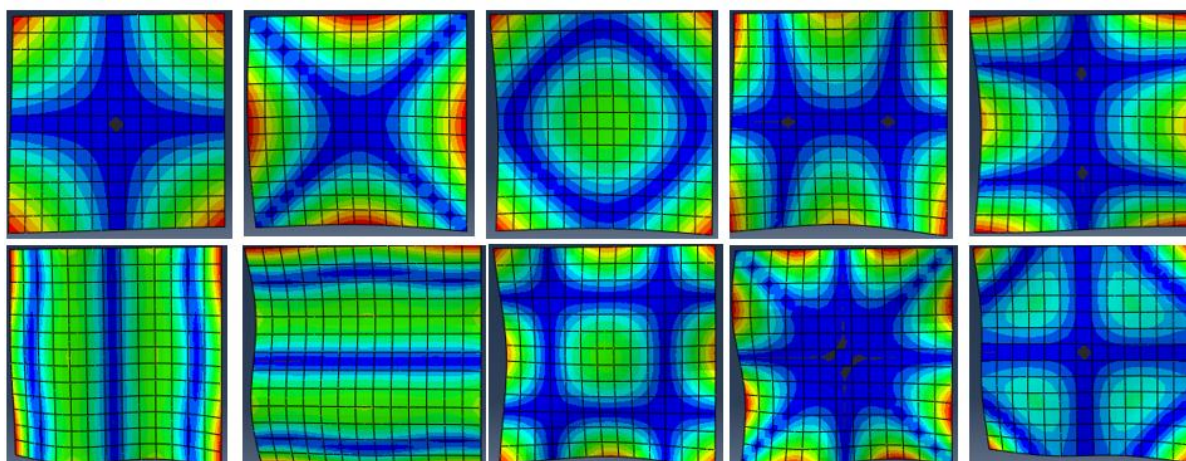


Figura 38 - Figuras obtidas por simulação no programa ABAQUS

(Nota: as figuras obtidas pelo programa SOLIDWORKS são idênticas às apresentadas no programa ABAQUS em todos os casos, pelo que apenas se irá apresenta-las uma vez para cada caso isotrópico, sendo que não existem figuras teóricas definidas para o caso anisotrópico)

É possível observar que o desvio médio diminui com o refinamento de malha, e também, no caso do Software ABAQUS, que a utilização de elementos de “S8R” (formulação de elementos de casca espessa) permite um menor desvio do que os elementos “S4R” (formulação de casca fina). Isto deve-se ao facto de a utilização de elementos do primeiro tipo ter em consideração os efeitos da deformação de corte na direção transversal. A seleção da opção “*curvature based mesh*” no programa SOLIDWORKS tem também em consideração estes efeitos.

Constata-se também que o menor desvio conseguido acontece no programa ABAQUS.

As figuras obtidas coincidem com as teóricas.

Placa isotrópica encastrada

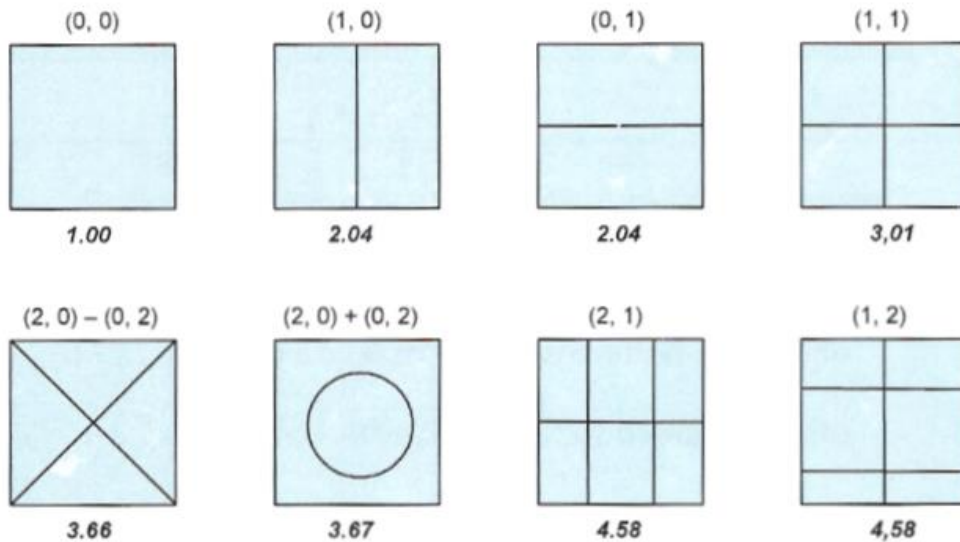


Figura 39 - Primeiros 8 modos teóricos de uma placa quadrada isotrópica com as extremidades encastrados (Martins 2007)

Para o caso de uma placa isotrópica encastrada nas arestas da placa, isto é, com o movimento bloqueado em todas as direções, a primeira frequência de ressonância calcula-se da seguinte forma (Martins 2007):

$$f_{00} = \frac{1,654 \cdot h \cdot c_l}{L^2}, \text{ em que } c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho(1 - \nu^2)}}$$

Tabela 5 – Desvio médio obtido em cada simulação, das ressonâncias simuladas em relação às teóricas (*elementos de casca espessa)

malha (mm)	ABAQUS				SOLIDWORKS		
	50	25	20	40*	50	25	20
Desvio médio (%)	9,24	2,01	1,22	0,19	8,71	1,06	0,08

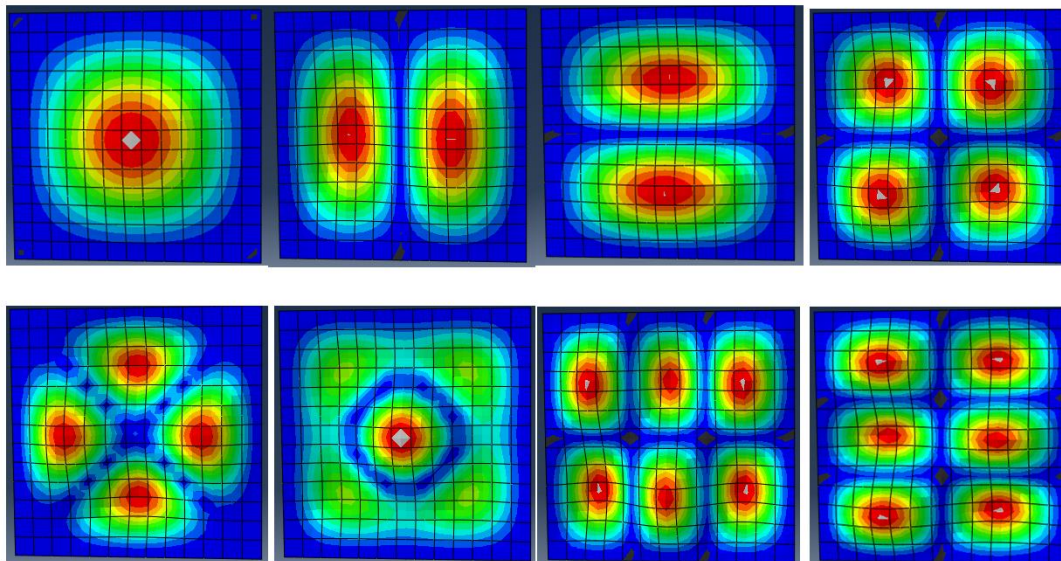


Figura 40 - Figuras obtidas por simulação no programa *SOLIDWORKS*

Para este caso, o desvio diminui também, naturalmente, com o refinamento da malha. No entanto, neste caso, o programa *SOLIDWORKS* permitiu um menor desvio.

As figuras obtidas estão também de acordo com as teóricas.

Placa ortotrópica livre

Para este caso, é necessário ter em conta a diferença de valores do módulo de elasticidade entre a direção longitudinal e transversal. Esta diferença faz com que não existam figuras teóricas definidas, isto é, duas placas com as mesmas dimensões, mas com relações de elasticidade longitudinal/transversal diferentes, irão apresentar diferentes padrões. A fórmula geral retirada de trabalhos anteriores idênticos para obtenção das frequências de ressonância é (Martins 2007):

$$f_{m,n} = 0,453 \cdot h \cdot \left[c_x \left(\frac{m+1}{L} \right) + c_y \left(\frac{n+1}{L} \right) \right],$$

$$\text{em que } c_x = \sqrt{\frac{E_x}{\rho(1 - \nu_{xy} \cdot \nu_{yx})}}, \quad e \quad c_y = \sqrt{\frac{E_y}{\rho(1 - \nu_{xy} \cdot \nu_{yx})}}$$

E_x - Módulo de Young na direção longitudinal

E_y - Módulo de Young na direção transversal

Tabela 6 - Propriedades utilizadas na placa ortotrópica

Sitka Spruce	
ρ (Kg/m ³)	460,00
E_x (Pa)	1,30E+10
E_y (Pa)	8,87E+09
E_z (Pa)	8,87E+09
ν_{xy}	0,38
ν_{yx}	0,06
G (Pa)	7,29E+08
L (m)	0,50
h (m)	2,90E-03

Tabela 7 - Desvio médio obtido em cada simulação, das ressonâncias simuladas em relação às teóricas

malha (mm)	ABAQUS			SOLIDWORKS		
	50	25	20	50	25	20
Desvio médio (%)	51,87	52,26	52,31	81,52	81,52	81,51

Neste caso, o desvio obtido não é aceitável, para além de não se terem detetado alguns dos modos de vibração. Este desvio poderia estar relacionado com as seguintes possibilidades:

- As fórmulas utilizadas para o cálculo das frequências no caso da placa ortotrópica não são satisfatórias;
- Os programas de simulação não resultam para estes casos ser utilizados no caso de placas ortotrópicas.

Como tal, recorreu-se ao estudo “Experimental and computed natural frequencies of square pultruded GRP plates: effects of anisotropy, hole size ratio and edge support conditions”. Este, consiste num estudo de frequência idêntico, em placas de compósitos fibra de carbono unidirecional, que utiliza uma fórmula de cálculo teórico distinta da apresentada anteriormente, para além de realizar simulações e ensaios a essas mesmas placas (Turvey, Mulcahy e Widden 2000).

Eram fornecidas as propriedades utilizadas, que foram introduzidas nos programas de simulação, e as frequências de ressonância obtidas foram comparadas com as apresentadas pelo estudo (calculadas e retiradas em ensaio).

Tabela 8 - Propriedades utilizadas na placa do estudo em questão

	Compósito
ρ (Kg/m ³)	1771,50
E_x (Pa)	1,42E+10
E_y (Pa)	8,87E+09
E_z (Pa)	8,87E+09
ν_{xy}	0,29
ν_{yx}	0,20
G_{xy} (Pa)	2,93E+09
G_{yx} (Pa)	3,70E+09
G_{yz} (Pa)	3,70E+09
L (m)	0,30
h (m)	3,20E-03

Tabela 9 - Desvio médio obtido em cada simulação, das ressonâncias simuladas em relação aos valores fornecidos pelo estudo (Turvey, Mulcahy e Widden 2000)

	Malha (mm)	Em relação ao valor:	Desvio médio (%)
ABAQUS	20	Teórico	3,32
		Experimental	6,57
	20 casca grossa	Teórico	1,42
		Experimental	3,77
SOLIDWORKS	20	Teórico	0,82
		Experimental	3,90

Os desvios obtidos são satisfatórios, pelo que foi decidido aceitar as condições de simulação disponíveis como válidas. O caso da placa ortotrópica livre não foi então validado, mas sim o caso da placa ortotrópica encastrada, que é o que mais se aproxima da realidade da guitarra.

Conclui-se também que o software utilizado pela empresa é adequado a este tipo de estudo.

6.1.2 Obtenção de um tampo em compósitos idêntico a um tampo em madeira

Uma vez validado o modelo de simulação de placas, passou-se ao estudo de uma placa em compósitos de forma a que esta tenha as mesmas propriedades vibratórias de uma placa em madeira de qualidade.

Como referido anteriormente, as duas propriedades de maior influência no comportamento vibratório são a rigidez, a relação rigidez longitudinal/transversal e a massa específica. Então, como ponto de partida, são estas as propriedades que se irão tentar igualar, o que se traduz no seguinte:

$$(EI)_{madeira} = (EI)_{compósito}$$

$$\rho_{madeira} = \rho_{compósito}$$

$$\left(\frac{E_x}{E_y}\right)_{madeira} = \left(\frac{E_x}{E_y}\right)_{compósito}$$

Como,

$$I = \frac{bh^3}{12},$$

$$E_{madeira}h^3_{madeira} = E_{compósito}h^3_{compósito}$$

Sendo “h” a espessura do tampo, como a rigidez de um compósito de fibra de carbono é muito superior à da madeira, rapidamente se depreende que o valor de “h” para o caso do compósito teria de ser muito baixo, e obter-se-ia um tampo demasiado fino. Então, a solução passa por utilizar uma estrutura sandwich com a seguinte configuração:

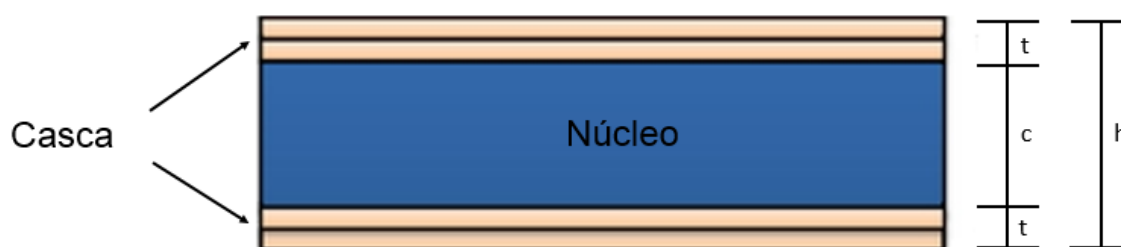


Figura 41 - Esquema da estrutura sandwich

Para o material do núcleo, optou-se pela cortiça. Este material é já utilizado pela empresa noutros instrumentos, pelas propriedades adequadas para a aplicação, nomeadamente o coeficiente de amortecimento. É também um requisito que o número de camadas de cada casca seja o mesmo. Em produção, há contrações que ocorrem no arrefecimento da peça ao desmoldar, e caso o número de camadas de cada casca fosse diferente, cada uma destas teria uma forma de contração diferente, o que implicaria empenos e/ou descolagem das cascas.

Tabela 10 - Propriedades da madeira e dos materiais da estrutura sandwich

	Sitka Spruce	Compósito	Cortiça
ρ (Kg/m ³)	460,00	1464,50	185,00
E_x (Pa)	1,30E+10	1,31E+11	3,70E+07
E_y (Pa)	8,90E+08	9,10E+09	3,70E+07
E_z (Pa)	8,90E+08	9,10E+09	3,70E+07
ν_{xy}	0,38	0,33	0,24
ν_{yx}	0,38	0,02	0,24
G_{xy} (Pa)	4,73E+09	5,00E+09	6,00E+06
G_{yx} (Pa)	4,32E+08	5,00E+09	6,00E+06
G_{yz} (Pa)	4,32E+08	5,00E+09	6,00E+06

A terceira condição é satisfeita, uma vez que o valor do rácio apresentado é idêntico para os dois materiais.

Resta otimizar os valores de “c” e “t” para conseguir satisfazer na melhor medida do possível a primeira e segunda condição.

Tendo em conta a estrutura sandwich, vem:

$$1. (Eh^3)_{madeira} = E_{cortiça} \cdot c^3 + E_{compósito} \cdot ((c + 2t)^3 - c^3)$$

$$2. \rho_{madeira} = \frac{(\rho_{cortiça} \cdot c + \rho_{compósito} \cdot 2t)}{c + 2t}$$

É também sabido que os laminados do compósito a utilizar têm 0,09 milímetros de espessura, o que implica que “t” seja um múltiplo desse valor, como se mostra na Figura 42.

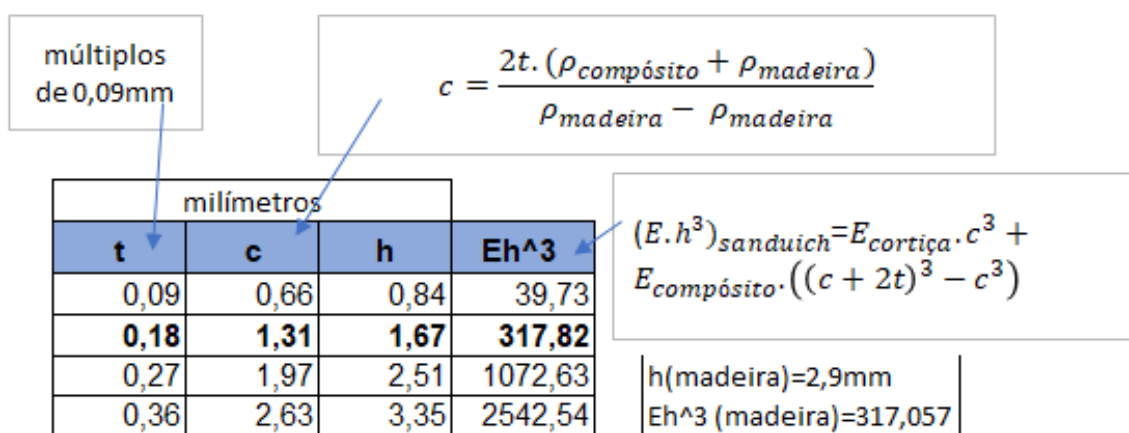


Figura 42 - Obtenção dos parâmetros "t" e "c" para a estrutura sandwich

Uma vez obtidos estes valores como primeira abordagem, partiu-se para o estudo de frequência em simulação de uma placa com a estrutura sandwich, fazendo variar a espessura da camada de cortiça, “c”, e a massa específica da mesma (esta propriedade varia com as diferentes remessas do fornecedor entre uma gama de valores (160-240 Kg/m³)), e comparando as frequências de ressonância obtidas para a placa sandwich com as obtidas para a placa de madeira.

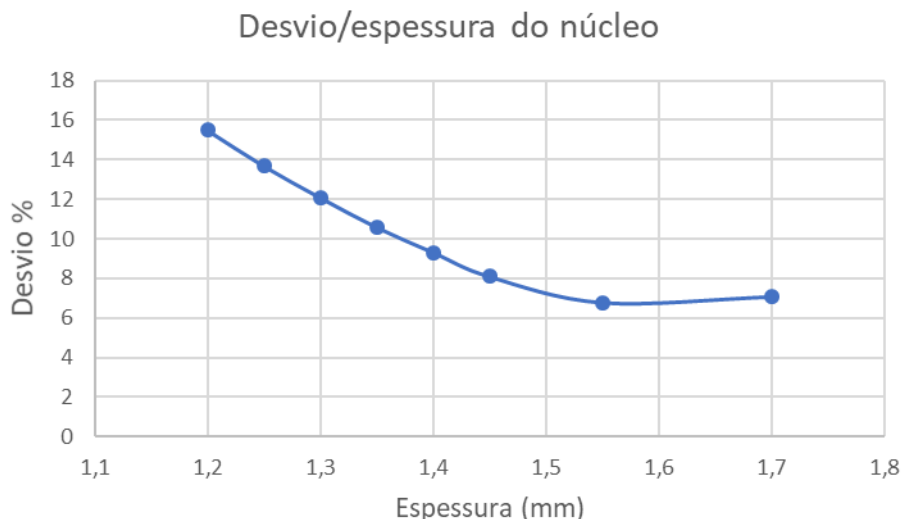


Figura 43 - Desvio em função da espessura do núcleo de cortiça

(Nota: Desvio=média dos desvios das frequências de ressonância da placa sandwich em relação à de madeira de referência)

Estes resultados indicam que o valor de “c” que mais faz aproximar o comportamento vibratório do de referência é cerca de 1,55mm. Fixando “c” neste valor, fez-se variar a massa específica da cortiça, para averiguar em que medida as variações do fornecedor afetam o comportamento da placa.

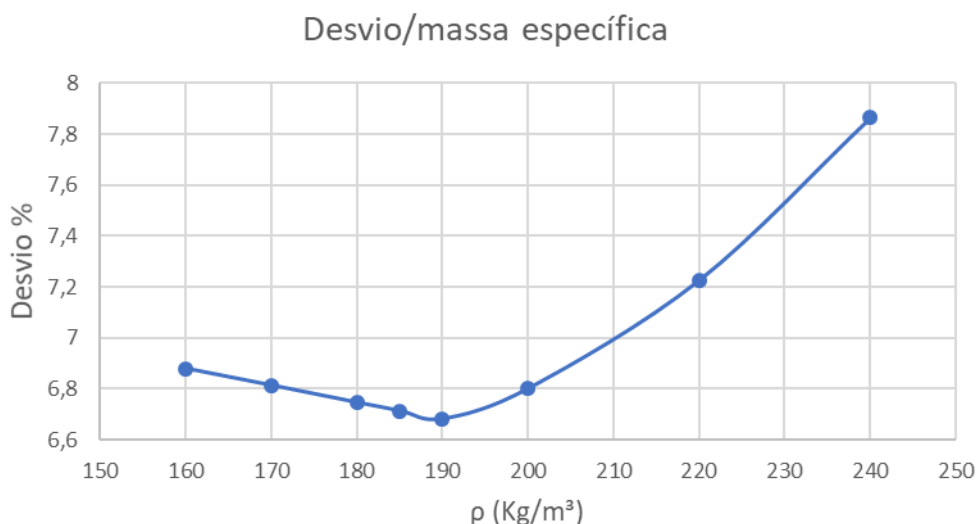


Figura 44 – Desvio em função da variação da massa específica da cortiça

Dos resultados da Figura 44 retira-se que:

- A massa específica que permite o menor desvio é cerca de 185 Kg/m³;
- A gama de valores em que a massa específica da cortiça pode variar faz com que o desvio das ressonâncias em relação a uma placa de madeira se situe entre cerca de 6,7% e 7,9%, o que significa que a variabilidade introduzida pelo fornecedor não introduz variações significativas.

Esta gama de desvios foi considerada aceitável e as espessuras da estrutura sandwich foram fixadas nos valores referidos, porque:

- As propriedades da madeira utilizadas como termo de comparação foram fixadas neste estudo, mas na realidade estas variam também;
- A obtenção de um tampo com o comportamento vibratório desejado dependerá numa fase posterior de outros fatores (como a geometria do travejamento, a influência da caixa de ar da guitarra ou a massa).

6.1.3 Modelação de um sistema de simulação do tampo com travejamento

Após o estudo dos parâmetros da estrutura sandwich para o tampo, partiu-se para a modelação de um sistema com a geometria “real” da guitarra, assemblado ao travejamento, ilharga e outros elementos com influência no comportamento vibratório, como o cavalete e a escala.

Para averiguar a qualidade dos resultados do sistema de simulação, recorreu-se à comparação dos mesmos com resultados de estudos já realizados. Apesar da escassa informação neste âmbito por razões de confidencialidade dos construtores, foi encontrado um estudo aos modos de vibração da guitarra “Martin D-28”, uma guitarra de alta qualidade da marca Martin&Co, cujos resultados e figuras estão apresentados na secção 5.3. Os ensaios foram feitos com a parte de trás da guitarra em areia e com o furo tapado por uma folha fina de madeira de balsa (Rossing 2010).

Recorreu-se às dimensões deste modelo para modelar o sistema de simulação, como se mostra na Figura 45.

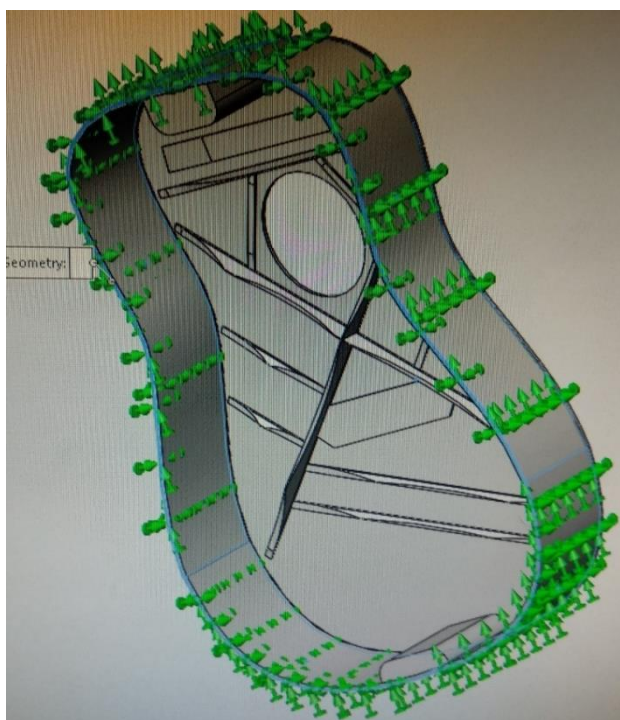


Figura 45 – Imagem do sistema de simulação do tampo

Na perspectiva de conseguir os resultados o mais próximo possível dos dados do estudo, fez-se variar as características da malha e a escolha dos pontos de fixação (entre as faces laterais do tampo superior, a ilharga ou o tampo traseiro)

Tabela 11 – Parâmetros utilizados na simulação

Tipo de Elemento	Sólido
Dimensão da malha (mm)	8,40
Tolerância da malha (mm)	0,42
Tipo de malha	"Cuvature based"
tampo traseiro encastrado	

Tabela 12 – Ressonâncias de simulação em comparação com as de referência

Frequências de ressonância		
Referência	Obtidos	Desvio (%)
163,00	158,12	2,99
326,00	397,08	21,80
390,00	413,12	5,93
431,00	Não detetado	
643,00	693,09	7,79
733,00	625,33	14,69
756,00	850,90	12,55

Desvio médio	10,96
---------------------	--------------

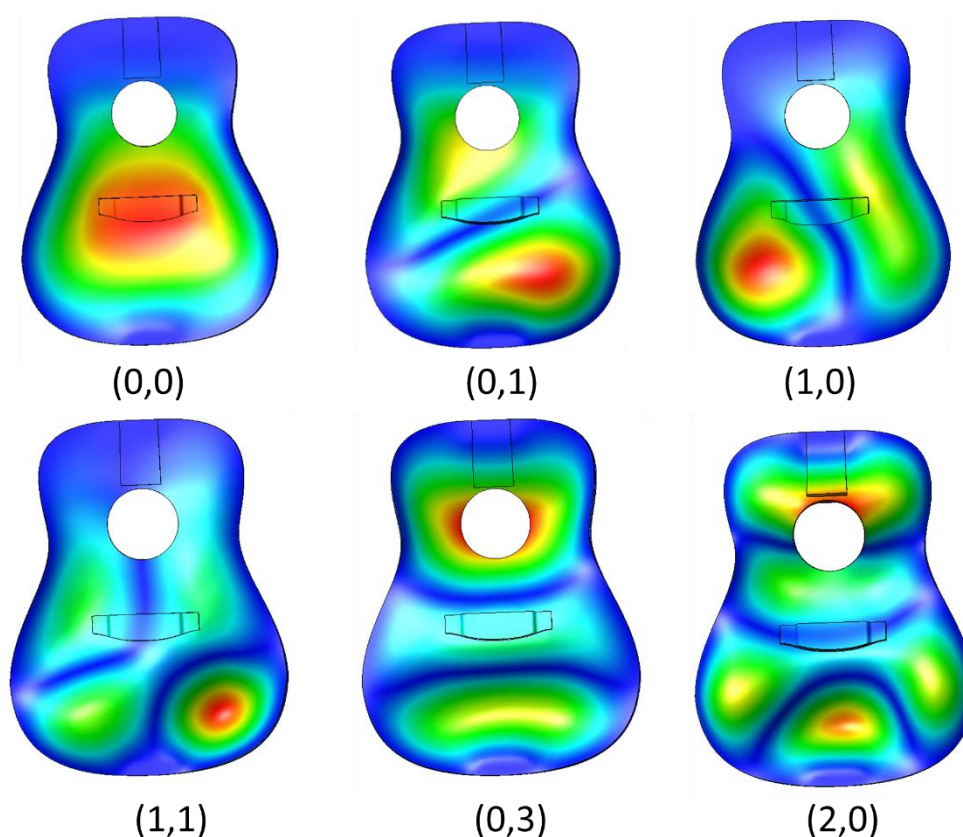


Figura 46 – Figuras obtidas em simulação com o tampo e travejamento em madeira

Um dos modos de vibração não é detetado, e o desvio obtido não é desprezável, como seria de esperar. Como referido anteriormente, a vibração do tampo da guitarra é provocada pela vibração das cordas, mas é também influenciada pela cavidade de ar (ar no interior da guitarra), pelas condições atmosféricas e pela gravidade, questões que não são abrangidas pela simulação. Para além disso, na realidade, o travejamento é montado na guitarra em pré-tensionamento para compensar a deflexão que ocorre no tampo superior na montagem da guitarra, o que também não é contemplado na simulação.

Quanto aos materiais, e não menos importante, é necessário contabilizar também as seguintes fontes de desvios:

- A variabilidade das propriedades da madeira;
- A falta de informação concreta sobre o coeficiente de amortecimento, propriedade de grande influência no estudo;
- A ortotropia real não se resume à diferença de rigidez na direção dos eixos principais, uma vez que há alterações de propriedades locais;
- As propriedades da colagem entre os diferentes componentes da guitarra não são conhecidas, e no sistema de simulação este contacto é considerado rígido.

Quanto às figuras dos modos de vibração, as obtidas assemelham-se às fornecidas pelo estudo, embora com uma rotação nos modos (0,1), (1,0) e (1,1). Esta rotação existe na realidade, e deve-se à assimetria da geometria do travejamento. Não se observa nas figuras fornecidas pelo estudo, uma vez que estas são apenas representações, mas comprova-se num ensaio a laser feito a uma guitarra do mesmo modelo, como se mostra na Figura 47.

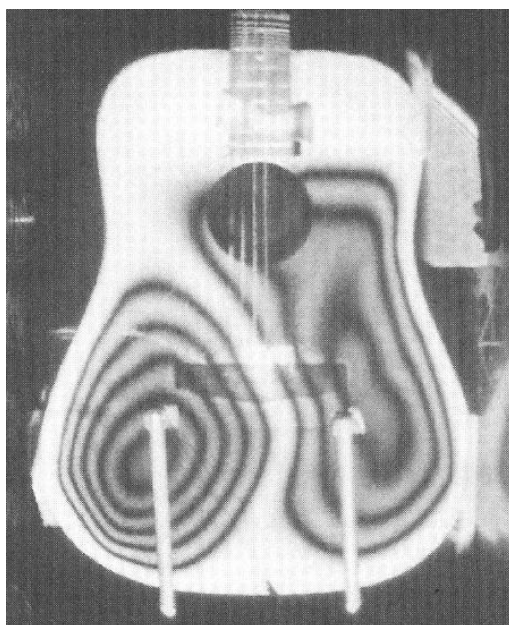


Figura 47 - Modo de vibração (1,0) da guitarra com cordas (Rossing 2010)

6.1.4 Simular tampo em compósito de fibra de carbono

Utilizando as condições de simulação definidas, passou-se agora à análise do tampo e travejamento em compósito de fibra de carbono. As características da estrutura sandwich tinham sido já definidas anteriormente (secção 6.1.2.). Restava redimensionar o travejamento para que este mantivesse a mesma rigidez do de madeira, recorrendo a barras de secção retangular, de sistema de compósitos de fibras unidireccionais:

$$(EI)_{madeira} = (EI)_{compósito}$$

Por simplificação, optou-se por definir a secção do novo travejamento como retangular, do que resulta:

$$(EI)_{madeira} = \frac{(Ebh^3)_{compósito}}{12}$$

Utilizando a ferramenta do programa SOLIDWORKS “Section Evaluate”, obteve-se o valor do momento de inércia em várias localizações do travejamento de madeira.

Restava então definir o valor “b” (constante em todo o travejamento) e “h” para cada secção calculada.

“b”, a dimensão da base do travejamento, foi escolhido de acordo com barras de compósito de fibra de carbono unidirecional disponíveis no mercado, com uma largura suficiente para suportar a colagem entre o travejamento e o tampo. Por experiência da empresa na conceção de outros instrumentos, optou-se por uma barra disponível no mercado, de secção 2x8mm², ficando apenas por maquinar pela empresa a altura, “h”, ao longo de cada barra.

$$h = \sqrt{\frac{12 \cdot (EI)_{madeira}}{2 \cdot E_{compósito}}}$$

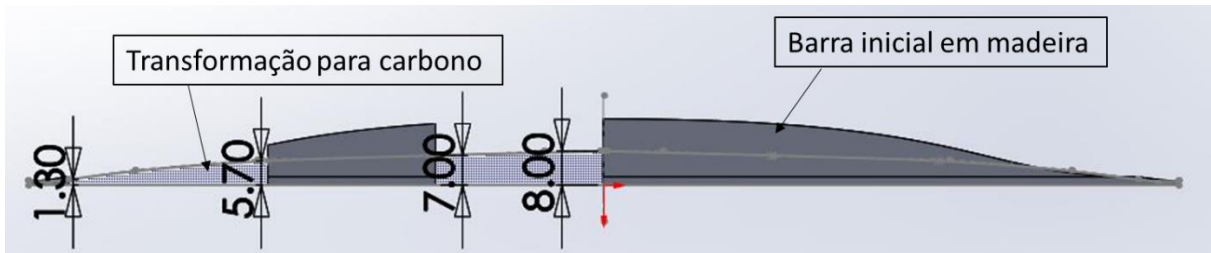


Figura 48 - Exemplo da redução de uma das barras do travejamento para obter uma geometria com a mesma rigidez

Tabela 13 – Resultados obtidos com o tampo e travejamento em compósito de fibra de carbono e respetivos desvios em relação ao ensaio da madeira (EC - Elementos de Casca; ES – Elementos Sólidos)

Modo		Frequências de ressonância			Desvio EC (%)	Desvio ES (%)
m	n	Madeira	Carbono EC	Carbono ES		
0	0	158,12	178,80	179,26	13,08	13,37
0	1	397,08	486,60	427,70	22,54	7,71
1	0	413,12	435,60	472,95	5,44	14,48
0	2	Não detetado	Não detetado	Não detetado		
1	1	693,09	779,00	657,00	12,40	5,21
0	3	625,33	655,00	614,00	4,74	1,81
2	0	850,90	855,84	775,85	0,58	8,82
		Desvio médio			9,80	8,57

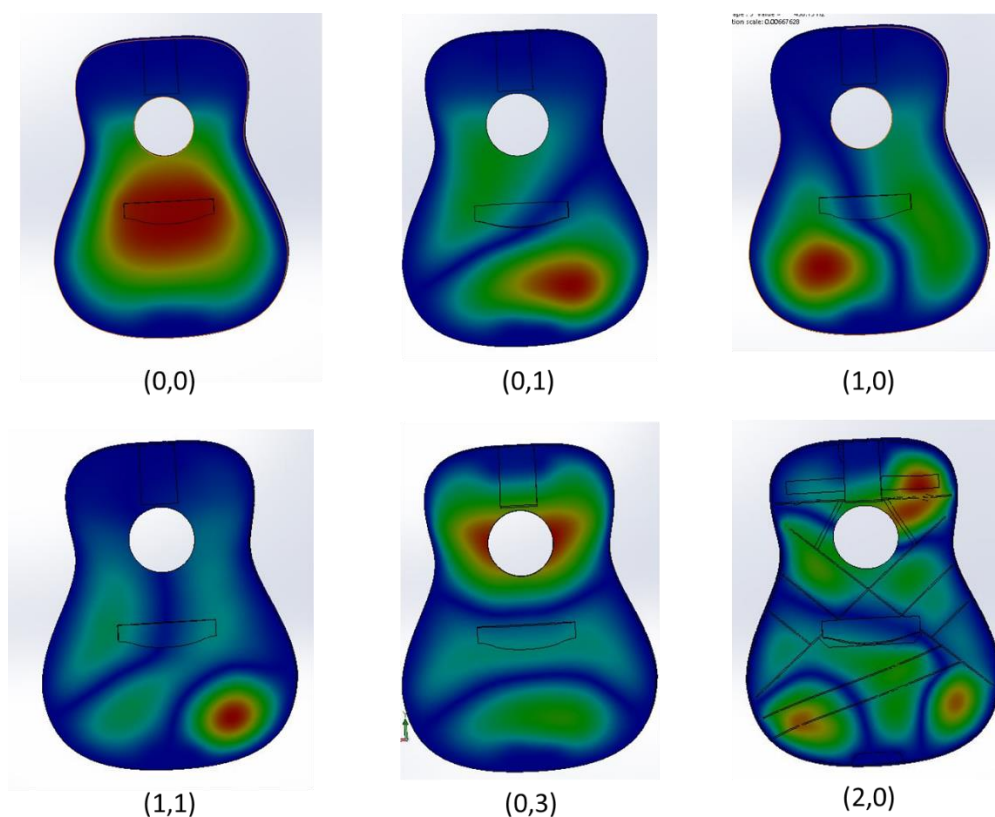


Figura 49 - Figuras obtidas em simulação com o tampo e travejamento em compósito de fibra de carbono

Na Figura 49 mostram-se os resultados da simulação do tampo e travejamento em compósito de fibra de carbono, e comparam-se os mesmos com os resultados da simulação em madeira. O programa permite também a formulação da estrutura *sandwich* em elementos de casca, pelo que se comparou os resultados desta formulação com uma formulação em elementos sólidos.

O desvio foi de cerca de 8%, o que é apenas um pouco superior ao obtido na secção 6.1.2., em que a placa em estrutura *sandwich* usada no tampo apresentava já um desvio médio de cerca de 7% em relação à madeira, em termos de frequências de ressonância.

No entanto, estes desvios podem não ser comparáveis, uma vez que no caso da simulação do tampo o número de modos contabilizados no cálculo do desvio é baixo para afirmar com certeza qual o desvio médio em questão, principalmente tendo em conta que há grandes oscilações no valor do desvio entre os modos.

Há outros fatores que poderão ter influência nestes desvios:

- A qualidade da malha para as geometrias em questão;
- O cálculo de equivalência da rigidez é feito tendo apenas em conta o módulo de Young, mas as diferenças noutras propriedades como o coeficiente de poisson o módulo de resistência ao corte.

As figuras obtidas estão de acordo com as da simulação de madeira.

7 Processo de produção

Uma vez que as dimensões principais, materiais e acessórios da guitarra já são maioritariamente conhecidos, e também tendo em conta a experiência da empresa no desenvolvimento dos seus instrumentos, determinou-se que o processo de produção irá ser idêntico ao já utilizado na construção da guitarra elétrica, que recorre à técnica referida anteriormente “Saco de vácuo (*Vacuum Bagging*). Abaixo apresenta-se uma descrição deste processo e de alguns procedimentos de controlo de qualidade, e também uma breve perspetiva de custo, para averiguar as parcelas de maior peso, viabilidade e possíveis reduções.

A guitarra será constituída por duas peças principais que são coladas, ou seja, irão existir dois moldes (em alumínio). Estas partes englobam as seguintes subpeças:

- Peça 1: tampo frontal, base para a escala e face frontal da cabeça;
- Peça 2: tampo traseiro, ilharga, braço, face traseira e laterais da cabeça.

Estas “subpeças” são componentes separados no caso das guitarras em madeira. O facto de, no caso desta guitarra, serem uma só peça, permite uma mais eficiente e suave propagação do som ao longo do instrumento.

Os procedimentos seguintes são os mesmos para ambas as peças.

Preparação dos moldes	<ul style="list-style-type: none"> • Distribuição de um desmoldante à base de cera pela superfície do molde que irá estar em contacto com o compósito; • Aplicação de uma fita selante nas bordas do molde para posterior aplicação do saco de vácuo.
Recorte de fibras e Hand lay-up	<ul style="list-style-type: none"> • Recorte dos pré-impregnados com a forma da peça e um excedente de cerca de 1cm, e da placa de cortiça com a forma do tampo a menos de cerca de 1 cm em relação às bordas; • Aplicação das camadas de pré-impregnados necessárias (no caso do tampo superior, camadas dos pré-impregnados de fibras unidireccionais, seguido da colocação da placa de cortiça com a geometria do tampo a menos de 1cm em relação às extremidades, seguida das restantes camadas dos compósitos). • Aplicação de um tecido sintético, <i>Peel-Ply</i>, para melhor qualidade de acabamento interior.

<p>Preparação do sistema de vácuo</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Colocação de um filme “desmoldante”, que impede a impregnação do <i>breather</i> com a resina; • Colocação do <i>breather</i>, um manto que promove a distribuição uniforme da resina); • Montagem do saco de vácuo com a devida “folga” para impedir que haja zonas da peça sem pressão de vácuo (saco acoplado à válvula de vácuo, por sua vez conectada ao tubo da máquina de vácuo).
<p>Cura</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Inserção da montagem no forno seguido de estágio de 1 hora a 60°C, para uma correta distribuição e impregnação da resina pela peça; • Estágio de 9 horas a 90°; • Arrefecimento de cerca de 10h. (não existe um período de tempo rigidamente estipulado para esta fase, ou seja, o técnico retira as peças do forno quando determina que o molde se encontra à temperatura ambiente. <p>(Nota: Este ciclo de cura foi o definido pela empresa no desenvolvimento dos instrumentos anteriores, tendo em conta as recomendações do fabricante dos pré-impregnados e as características do forno disponível. Como a qualidade das peças tem sido a pretendida, irá utilizar-se o mesmo ciclo.)</p>
<p>Controlo de rechupes e empenos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Desmontagem do sistema de vácuo; • Remoção manual das peças curadas do molde; • Controlo de rechupes a olho nu; • Controlo dimensional e de empenos com paquímetro, e análise a olho nu. <p>(Nota: Até à data, não houve empenos nem outros defeitos que justificassem a rejeição de nenhum modelo. No entanto, a qualidade visual das peças tem vindo a aperfeiçoar-se com a experiência do técnico responsável.)</p>

<p>Facejamento e colagem</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Facejamento da rebarba das peças, e conseqüente preparação das superfícies de colagem entre as duas; • Enchimento do interior do braço e cabeça com espuma de poliuretano; • Colagem do travejamento ao tampo superior (em pré-tensionamento); <p>(Nota: esta etapa implica que o travejamento tenha sido já fabricado, isto é, maquinadas as formas desejadas nas barras de fibra de compósito de fibra de carbono unidirecional)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lixagem das arestas coladas; • Avaliação de desvios dimensionais e espessuras (nomeadamente do braço);
<p>Acabamento</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Detecção de poros a olho nu (depende da experiência do técnico) e aplicação de tapa poros (resina de epóxico, caso se pretenda que o instrumento venha a ter as fibras de carbono visíveis, e betume de poliéster pistolável, caso se pretenda que venha a ser pintado); • Lixagem de todo o instrumento; • Aplicação de verniz, no caso do carbono à vista, ou pintura. <p>(Nota: A pintura é um serviço subcontratado, uma vez que a empresa ainda não contém instalações adequadas para uma pintura eficiente de produção em série)</p>
<p>Montagem dos componentes</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Montagem da escala e trastos, cavalete, afinadores. • <i>Fret dressing</i> (nivelamento dos trastos) <p>(Nota: A montagem da escala implica que esta já tenha sido fabricada, isto é, maquinada a geometria em CNC com os rasgos para os trastos, colocados os <i>Inlays</i> de pérola, feito o nivelamento e polimento, e, por fim, a aplicação dos trastos)</p>

7.1 Perspetiva de custo

Custo de Produção	
Compósito de fibra de carbono (unidirecional); Preço: 17eur/20m ² ; quantidade: 1metro	17,20 €
Compósito de fibra de carbono (bidirecional); Preço: 45eur/20m ² ; quantidade: 2metros	90,00 €
Cortiça; Preço: 70cents/(mm de espessura), por placa 940/640mm; quantidade: 1,6mm	1,12 €
Eletricidade (forno)	1,62 €
Eletricidade (máquina de vácuo)	0,22 €
Cravelhame	200,00 €
Travejamento	18,60 €
Cavalete	20,00 €
Pente	5,00 €
Escala	22,00 €
Trastos	5,00 €
Mão de obra; Preço: 9.3eur/h; quantidade: aproximadamente 25h	232,50 €
Pintura/acabamento	300,00 €
Total	913,26 €

Investimento para o novo modelo	
Custo do protótipo	2 700 €
Moldes de resina de poliuretano	1 500 €
Moldes de alumínio (cerca de 2500eur por cada molde)	5 000 €
Total	9 200 €

(Nota: esta análise não inclui as horas de trabalho despendidas no desenvolvimento da guitarra)

O preço de venda ao público pode situar-se na média dos preços das guitarras do mesmo setor apresentadas na secção 3.5.2 e que, se este for de cerca de 2000eur, por exemplo, será necessária a venda de cerca de 9 guitarras para amortização do investimento inicial para na criação do modelo. Ainda assim, é possível introduzir reduções.

Os acessórios da guitarra como a escala ou o cravelhame são comprados a outros produtores especializados na sua produção, de quem depende a definição do preço. Restam como parcelas de maior peso no custo de produção a mão de obra e a pintura.

Tempo de *setup*

O custo da mão de obra pode ser reduzido otimizando o processo. Na produção dos atuais instrumentos, a empresa produz um instrumento em cada período alocado para produção de instrumentos sempre que há disponibilidade. Uma forma de reduzir o tempo de produção seria programar a produção do maior número possível de guitarras em cada um destes períodos, de forma utilizar apenas um tempo de *setup* para este conjunto de guitarras, em vez de um tempo de *setup* para cada guitarra.

(Nota: “tempo de *setup*” - período em que a produção é interrompida para que os equipamentos da oficina sejam ajustados e/ou preparados, como preparação de suportes, sistema de cura, preparação de resinas, entre outros)

Cura das peças

Foi também detetada uma possibilidade de redução de tempo de produção, e custo de mão de obra no processo de cura. Pelas dimensões dos moldes e do forno, no caso da produção do modelo de guitarra elétrica, é feita uma cura para cada bloco, ou seja, uma para o corpo e outra para o tampo. Então, o redimensionamento destes no sentido de realizar apenas um ciclo de cura para os dois blocos em simultâneo poderá também ser interessante.

Pintura/acabamento

A pintura e/ou acabamento são serviços subcontratados, mas foi já averiguado que se esta etapa for feita internamente, o custo é de cerca de 70eur, o que se trata de uma redução bastante significativa. Neste sentido, é justificável estudar o investimento em instalações adequadas para o efeito.

8 Conclusões e perspectivas de trabalho futuro

Conclusões

No âmbito do projeto de uma estrutura em compósitos de fibra de carbono para o tampo superior que pudesse “igualar” o comportamento de um tampo em madeira, esta dissertação tinha como principal objetivo desenvolver um modelo de simulação que permitisse prever o comportamento sonoro do tampo do novo modelo de guitarra.

Neste sentido, conclui-se que o sistema desenvolvido é capaz de:

- Complementar os cálculos teóricos para o tampo e comparar os resultados com os mesmos;
- Obter as figuras dos modos de vibração (que não são possíveis através de cálculos teóricos);
- Fornecer uma forma prática e “imediate” de observar as alterações comportamentais no tampo provocadas pela variação de parâmetros (como propriedades dos materiais, espessuras);
- Verificar a influencia das geometrias e posicionamento do travejamento nos modos de vibração.

Por outro lado, a fiabilidade das frequências de ressonância simuladas não se demonstra suficiente. Através das simulações, é possível observar aumentos ou decréscimos gerais nos valores destas com a alteração de diferentes parâmetros, mas um estudo adequado e rigoroso necessitará idealmente de ensaios a tampos reais através do uso de laser, acelerómetros e/ou um pó fino, para que os fatores como propriedades locais, variabilidade de propriedades e ortotropia real sejam contabilizados.

Verificou-se também, na secção 6.1.2, que o cálculo teórico de uma estrutura sandwich em compósito não se traduz na prática num comportamento vibratório rigorosamente igual ao de uma placa de madeira, o que reforça a necessidade de ensaios.

Numa breve análise ao custo de produção, conclui-se que há a possibilidade de redução de custos, e que a guitarra poder-se-á situar na gama de preços das guitarras concorrentes com uma margem de lucro significativa.

Trabalhos futuros

Uma vez que esta dissertação abrange as primeiras etapas de um projeto com todas as etapas já delineadas, e simultaneamente tendo em conta as conclusões sobre o sistema de simulação, surge naturalmente a necessidade de prosseguir para a construção de um protótipo de tampo para ensaio. Isto permitirá não só continuar o desenvolvimento do modelo, mas também averiguar e/ou melhorar a qualidade dos resultados do sistema de simulação.

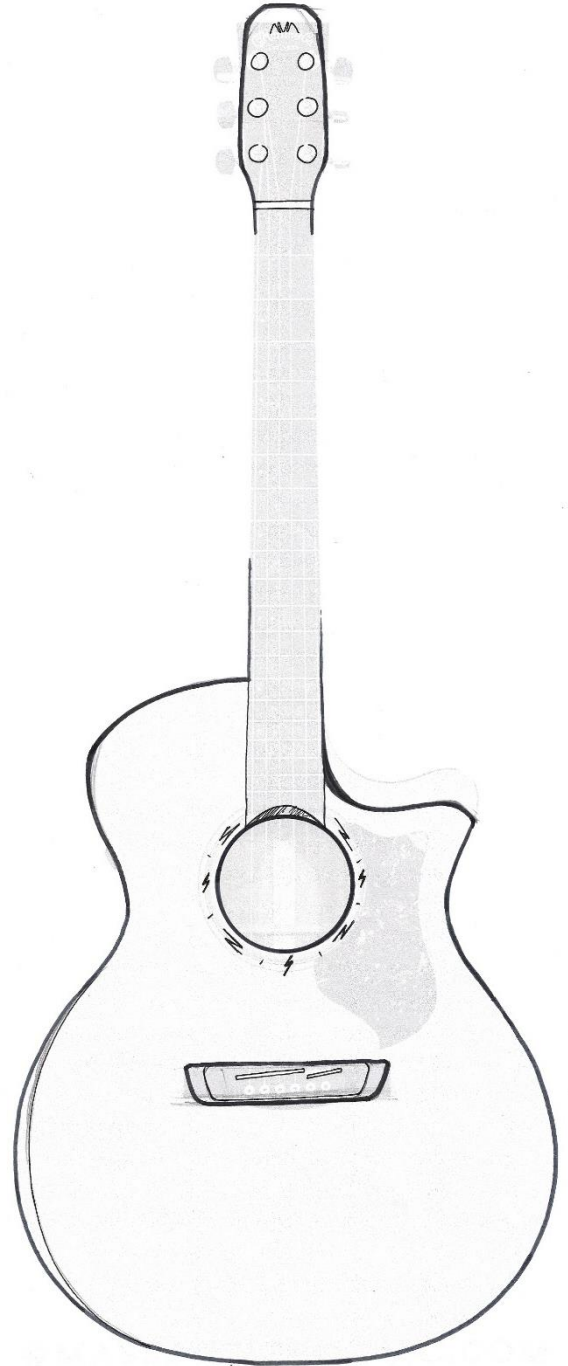
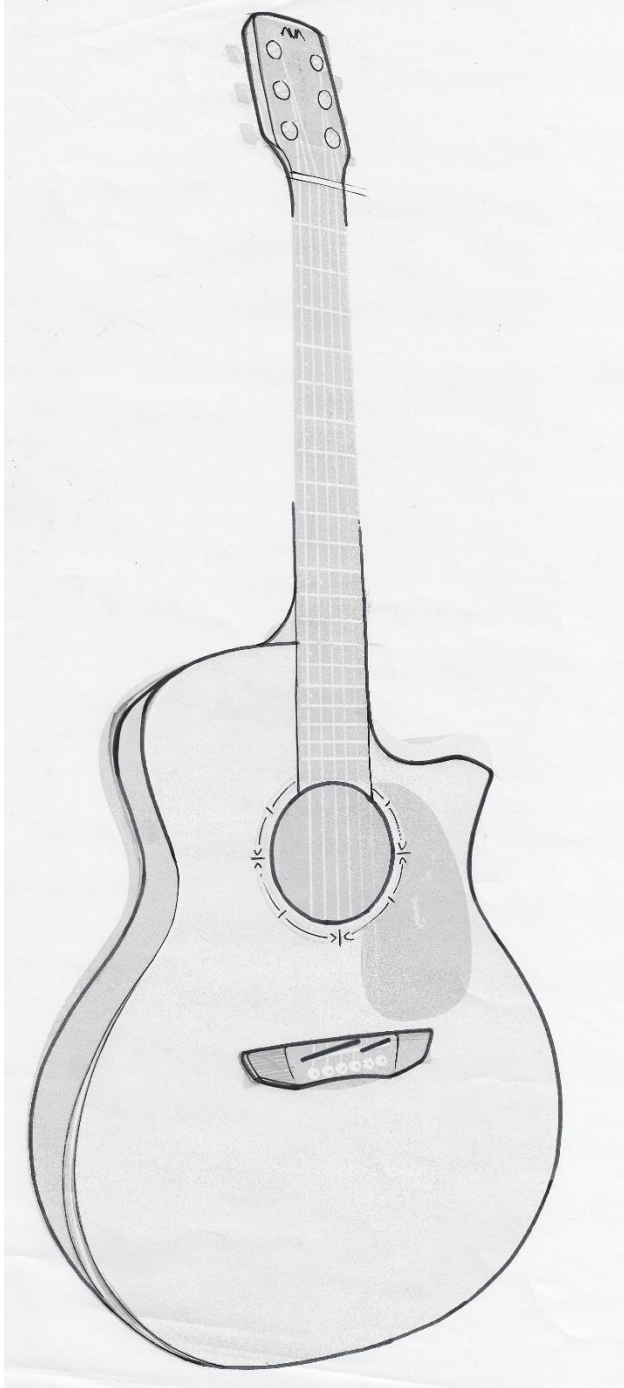
Ainda na definição da estrutura sandwich, e implicando menos recursos e tempo, seria interessante fabricar pequenas placas quadradas e ensaiá-las, como complemento ao estudo realizado, numa fase anterior ao fabrico de protótipos de tampo.

9 Referências

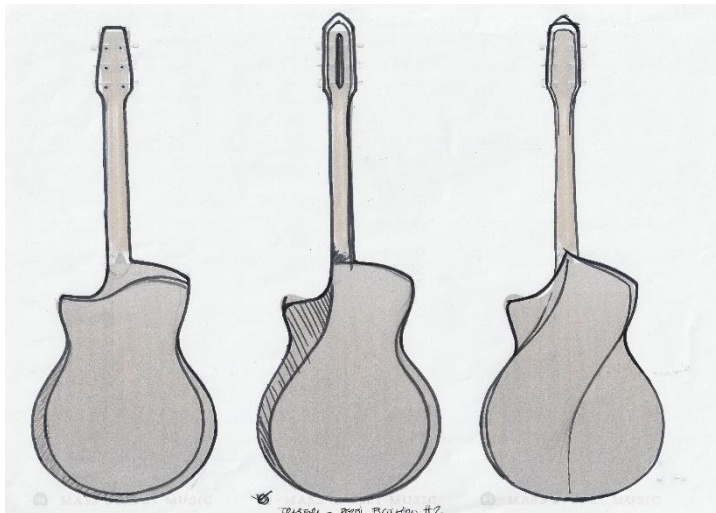
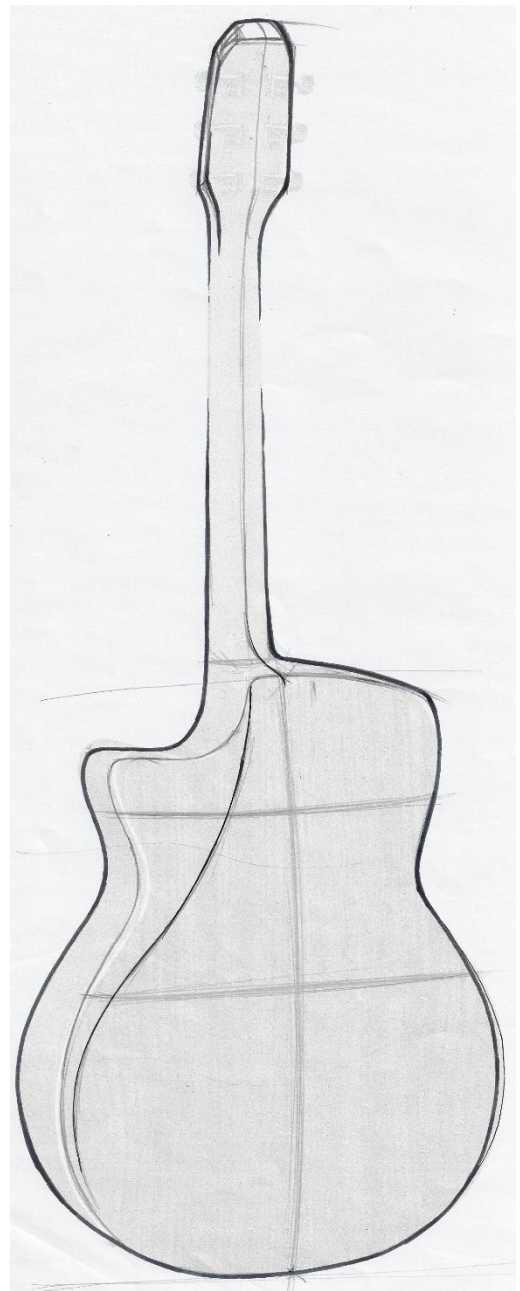
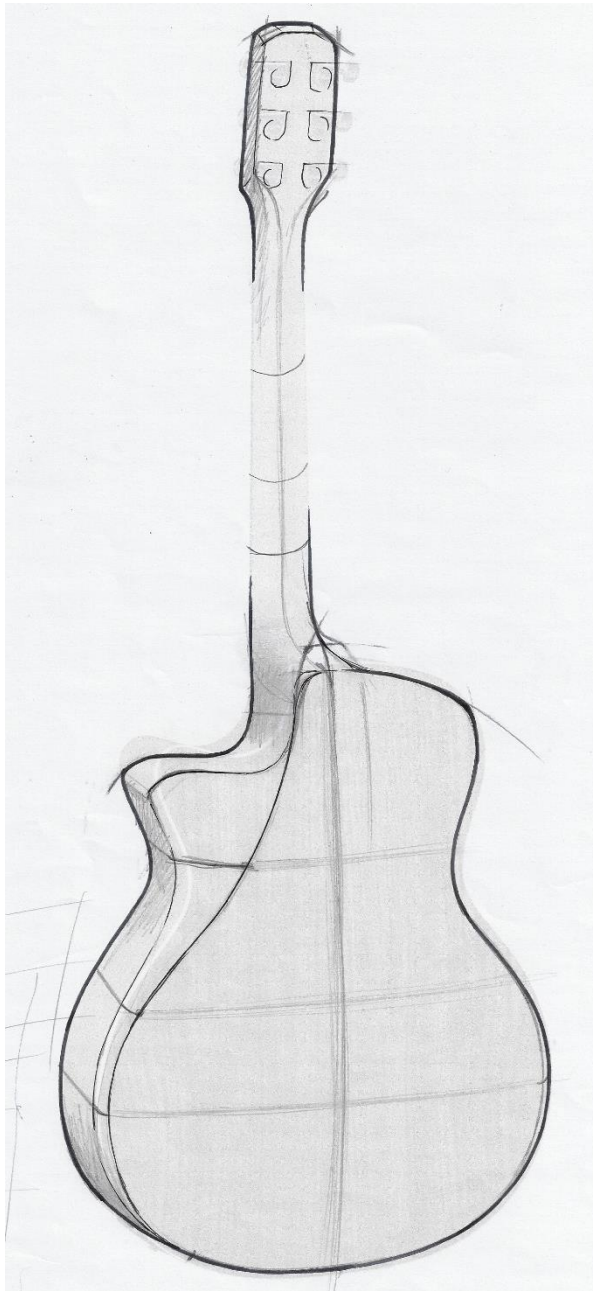
- Bailey Guitars*. s.d. <http://news.baileyguitars.co.uk> (acedido em Setembro de 2017).
- Baroque Musical. s.d. <http://baroquemusicalinstruments.blogspot.pt/2012/06/baroque-guitar.html> (acedido em Setembro de 2017).
- Blackbird Guitars. s.d. www.blackbirdguitar.com (acedido em Setembro de 2017).
- Composite acoustics. s.d. <http://www.compositeacoustics.com/> (acedido em Setembro de 2017).
- Emerald Guitars*. s.d. <http://emeraldguitars.com> (acedido em Setembro de 2017).
- French, Richard Mark. *Engineering the Guitar*. New York: Springer, 2009.
- Gries, Thomas. “A double bass made of carbon-reinforced plastics that can be disassembled.” *JEC COMPOSITES MAGAZINE*, 2017: 55.
- Guitar Salon*. s.d. <https://www.guitarsalon.com> (acedido em Setembro de 2017).
- Guitar World. s.d. <http://www.guitarworld.com/gear-news-acoustics-gear/composite-guitar-looks-its-made-wood/29479> (acedido em Setembro de 2017).
- Guitars from spain*. s.d. <https://www.guitarfromspain.com> (acedido em Setembro de 2017).
- Inta, Ra. “THE ACOUSTICS OF THE STEEL STRING GUITAR.” SCHOOL OF PHYSICS. *THE ACOUSTICS OF THE STEEL STRING GUITAR*. SYDNEY, 2007.
- J. Verd, Frederick. Estados Unidos. 2000.
- KLOS Guitars. s.d. <https://www.kloguitars.com/> (acedido em Setembro de 2017).
- M.D.Wakemana, L.Zingraffa, P.-E.Bourbana, J-A.E.Månsona, e P.Blanchardb. “Stamp forming of carbon fibre/PA12 composites – A comparison of a reactive impregnation process and a commingled yarn system.” s.d.
- Magazine, Strings. <http://stringsmagazine.com/a-buyers-guide-to-carbon-fiber-instruments/>. Abril de 2009.
- Martin Guitars. s.d. <https://www.martinguitar.com/> (acedido em 2017).
- Martins, Júlio. *Modelo de análise do comportamento dinâmico de materiais compósitos em instrumentos musicais*. Projeto de fim de curso, Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007.
- Mezzo-Forte. s.d. <https://www.mezzo-forte.de/> (acedido em Setembro de 2017).
- Nicholas, Noah C., Nicholas Hartman, e Cody Gruber. “Optimization of Acoustic Soundboard through.” The University of Akron. *Optimization of Acoustic Soundboard through*. s.d.
- Okuda, Akira, e Teruaki Ono. “Bracing effect in a guitar top board by vibration experiment and modal analysis.” Japan, 2008.
- Ono, Teruaki, Souji Miyakoshi, e Ugai Watanabe. “Acoustic characteristics of unidirectionally fiber-reinforced polyurethane.” *Acoust. Sci. & Tech*, June de 2002.
- Ovation Guitars*. s.d. <http://www.ovationguitars.com/> (acedido em Setembro de 2017).
- Pinterest. s.d. <https://www.pinterest.pt/ramsdendrums/videos-on-steel-drums/> (acedido em Setembro de 2017).
- RainSong. *RainSong guitars*. s.d. <http://www.rainsong.com/guitars.html>.

- Roest, Max. “Design of a Composite Guitar.” TU Delf. *Design of a Composite Guitar*. Holanda, 2016.
- Rossing, Thomas D. *The Science of String*. Stanford, CA 94302-8180, USA: Springer, 2010.
- Stanciu, Mariana Domnica, Ioan Curtu, e Dragos Apostol. “EVALUATION OF STRAIN AND STRESSES STATES OF REINFORCED GUITAR NECK WITH FINITE ELEMENTS METHOD.” Transilvania, 2014.
- Taylor Guitars. s.d. <https://www.taylorguitars.com/> (acedido em 2017).
- Turvey, G.J., N. Mulcahy, e M.B. Widden. “Experimental and computed natural frequencies of square pultruded GRP plates: effects of anisotropy, hole size ratio and edge support conditions.” *Composite Structures*, 2000.
- Zhang, Kaomin, Yizhuo Gu, Min li, e Zuoguang Zhang. “Effect of rapid curing process on the properties of carbon fiber/epoxy.” *Materials & Design*, 2013.

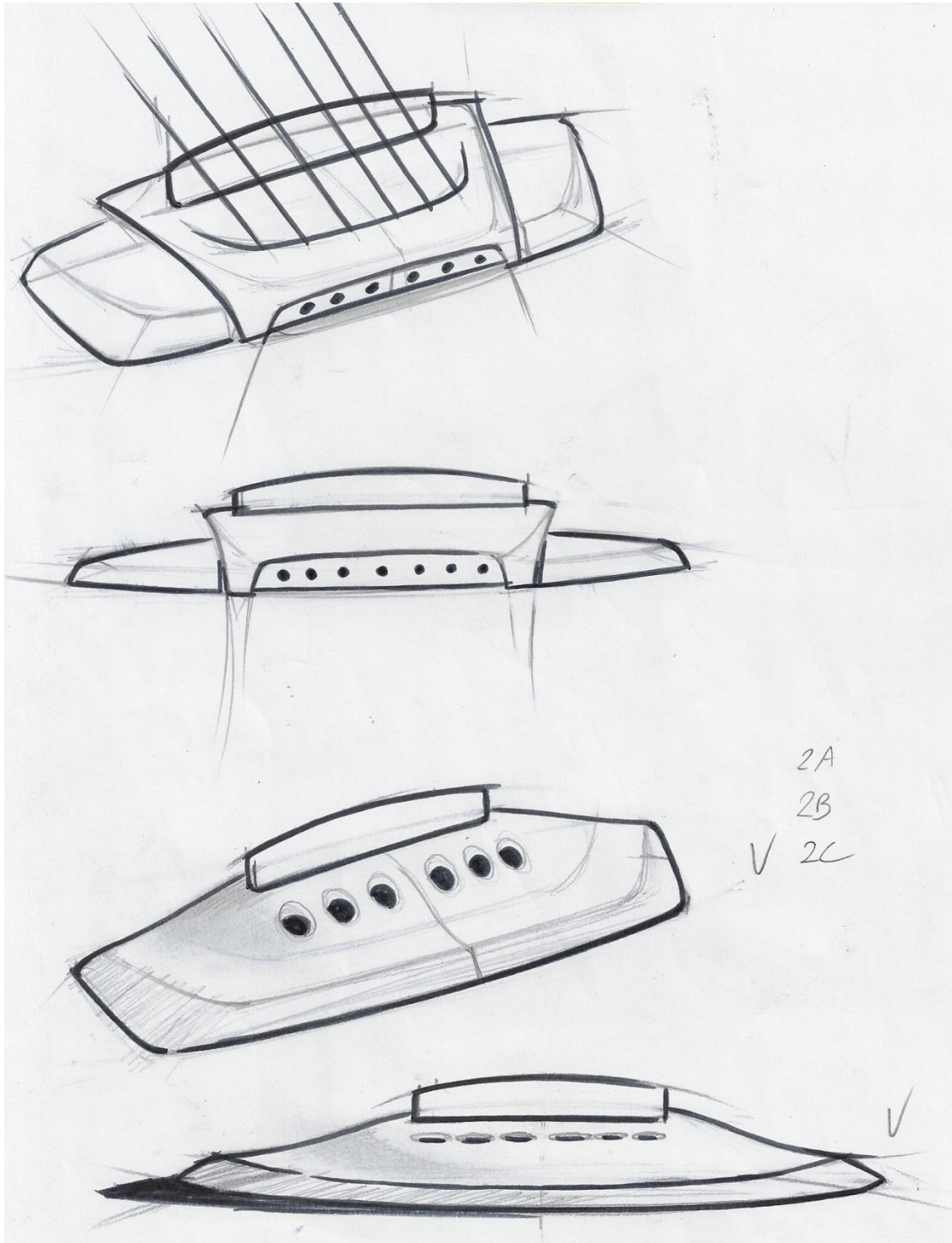
ANEXO A: Esboços da vista frontal



ANEXO B: Esboços da vista traseira



ANEXO C: Esboços do cavalete



ANEXO D: Esboços da cabeça

