

ALEXANDRE MARKS LÖW

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM TAMPO HARMÔNICO DE VIOLÃO
CLÁSSICO REFORÇADO COM MATERIAIS COMPOSTOS

Monografia apresentada ao
Departamento de Engenharia Mecânica
da Escola de Engenharia da
Universidade Federal do Rio Grande
do Sul, como parte dos requisitos para
obtenção do diploma de Engenheiro
Mecânico.

Orientadores: Prof. Dr. Jun Sérgio Ono Fonseca
Prof. Dr. Herbert Martins Gomes

Porto Alegre
2010



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

AValiação EXPERIMENTAL DE UM TAMPO HARMÔNICO DE VIOLÃO CLÁSSICO REFORÇADO COM MATERIAIS COMPOSTOS

ALEXANDRE MARKS LÖW

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
ENGENHEIRO(A) MECÂNICO(A)
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Walter Jesus Paucar Casas
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Ignacio Iturrioz
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. Juan Pablo Raggio Quintas
UFRGS / DEMEC

Porto Alegre
2010

à Caro.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais e minhas irmãs pelo apoio de todos os dias,

a toda a minha família e agregados, em especial à minha tia e 1^a professora de música Marieta Ervina Löw,

a Carolina e toda a família Avellar de Muniagurria, e agregados,

àqueles colegas que formaram uma parceria desde o começo, e também àqueles que se juntaram ao longo do longo caminho,

ao mestre Antônio Sales,

à família Teixeira Borges,

aos meus orientadores, Prof. Dr. Jun Sérgio Ono Fonseca e Prof. Dr. Herbert Martins Gomes, que me apoiaram na escolha deste tema até então não abordado dentro do DEMEC,

aos *luthiers* e instrumentistas Eduardo Castañera, Eduardo Cordeiro, e César Prieb, que se dispuseram cordialmente a ajudar com sua experiência e conhecimentos na área.

Tornai-vos a mudança
que vós gostaríeis de ver
no mundo.

Mahatma Ghandi

LÖW, A. M. Avaliação Experimental de um Tampo Harmônico de Violão Clássico Reforçado com Materiais Compostos. 2010. 29f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma revisão bibliográfica de trabalhos já realizados no campo de estudo das vibrações aplicadas a instrumentos musicais, com ênfase sobre o Violão Clássico, seguida de uma comparação experimental das Transmissibilidades entre um ponto próximo à região de excitação do sistema e outros três pontos ao longo do tampo, visando a comparar a performance de um tampo harmônico reforçado de uma maneira tradicional, com outros dois reforçados com materiais compostos, sendo um com 'colmeia' de fibra de aramida e outro com sanduíche de madeira e tecido de fibra de carbono polidirecional. Para tanto utiliza-se como sinal de entrada o impacto de uma pequena barra de madeira, e para capturar os sinais de resposta são utilizados dois acelerômetros ligados a uma placa de aquisição.

PALAVRAS-CHAVES: Vibroacústica de instrumentos musicais, Vibrações estruturais, Acústica, Violão clássico.

LÖW, A. M. **Experimental Evaluation of a Classical Guitar Top Reinforced with Composite Materials**. 2010. 29f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ABSTRACT

The present work presents a literature review of recent works on vibrations of musical instruments, emphasizing the Classical Guitar. Following, an experimental comparison between two types of thin reinforced tops and a conventional bracing one is made. The reinforcements are a thin aramid honeycomb in one of them, and a wooden truss with a polydirectional carbon fiber layer inset in the other. The Transfer Function between the acceleration of the system driving point and three other points along the tops is used to reach this purpose. The input signal is made by tapping the bridge with a little wood stick, and both, input and output signals are measured using a data board and accelerometers.

KEYWORDS: Vibroacoustics of musical instruments, Structural vibrations, Acoustics, Classical guitar.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Conjunto de medição
- Figura 2 – Detalhe do padrão de reforço do TC
- Figura 3 – Detalhe do tampo reforçado com fibra de carbono
- Figura 4 – Detalhe do tampo reforçado com Nomex®
- Figura 5 – Representação esquemática da caixa acústica como um sistema massa-mola de 2 GDL (Fonte: French, 2006)
- Figura 6 – Desenho esquemático do aparato de medição
- Figura 7 – Largura das faixas de frequência por corda solta
- Figura 8 – Médias da Transmissibilidade por faixa de frequência entre cordas soltas
- Figura 9 – Médias da Transmissibilidade por faixa de semitom

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Frequência de cada nota musical – do limite da audição humana até 8 kHz

Tabela 2 – Razões de Amortecimento no P1

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FRF	Função Resposta de Frequência
GDL	Grau(s) de liberdade
MEF	Método dos elementos finitos
FFT	Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform)
FC	Fibra de carbono
TC	Tampo convencional
TN	Tampo reforçado com colmeia de Nomex® em matriz de epóxi
TFC	Tampo reforçado com treliça de balsa e fibra de carbono

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	4
3.1. Parâmetros de Comparação.....	5
3.1.1 Transmissibilidade.....	5
3.1.2 Amortecimento.....	5
3.2. Modelo Massa-Mola-Amortecedor Aplicado à Caixa Acústica.....	6
3.3. Metodologia e Procedimentos de Medição.....	7
4. DESCRIÇÃO DO MODELO ESTUDADO.....	8
4.1. Tampo convencional – TC.....	9
4.2. Tampo reforçado com treliça de balsa e fibra de carbono – TFC.....	9
4.3. Tampo reforçado com colmeia de Nomex® em matriz de epóxi – TN.....	10
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	11
5.1. Transmissibilidade.....	11
5.2. Amortecimento.....	13
6. CONCLUSÕES.....	14
REFERÊNCIAS.....	14
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	15
APÊNDICE	16
ANEXOS.....	17

1. INTRODUÇÃO

O projeto estrutural do chamado *violão clássico* está completando já mais de 150 anos, e até hoje muitos construtores ainda utilizam as primeiras plantas desenhadas por António de Torres. Majoritariamente considerado como o idealizador deste instrumento da maneira como é conhecido nos dias de hoje, este *luthier* espanhol que começou sua carreira em 1840 foi um dos principais responsáveis pela determinação das formas e dimensões definitivas da moderna *guitarra*. Ainda que tenha sido influenciada por vários outros instrumentos de corda antigos, sua aceitação plena na cultura popular e erudita se deu principalmente no momento em que este tomou gradativamente o lugar do alaúde – instrumento de cordas usado do Renascimento ao Barroco tardio principalmente como acompanhamento para a voz; chamado em francês de *luth*, daí vem o nome *luthier*.

De lá pra cá, porém, este projeto consagrado recebeu em diversos momentos pequenas alterações construtivas, ainda que muitas vezes de forma paralela e desconectada. Uma das partes do projeto que mais vem instigando a criatividade dos construtores e pesquisadores ao longo dos anos é o tampo harmônico, por participar simultaneamente e de maneira significativa em três características importantes dos instrumentos musicais: projeção e volume (presença sonora), e timbre. Do ponto de vista do timbre, qualquer análise se torna extremamente subjetiva, pois trata-se fundamentalmente do gosto particular de cada um. Já projeção e volume, estes sim podem ser associados a parâmetros físicos bem compreendidos, tais como a amplitude de vibração da estrutura e as frequências naturais, e a partir destes a massa, a rigidez e o amortecimento, por consequência.

Foi somente no final da década de oitenta que começaram a aparecer pela primeira vez os tampos reforçados. Primeiramente pelas mãos do *luthier* australiano Greg Smallman, que utilizou fibra de carbono num reforço tipo treliça. Pouco tempo depois, na Alemanha, Gernot Wagner e Mathias Damann apresentaram o “tampo duplo” que se constitui de dois tampos muito finos separados por uma camada de colmeia de fibra de aramida.

A partir do exposto acima, o objetivo geral deste trabalho é estudar as vibrações estruturais do Violão Clássico e tentar escalonar gradativamente, de forma inter-relativa, as performances de três tipos de construção de tampo estudadas. Mais especificamente falando, o intuito inicial, é traçar uma profunda revisão dos trabalhos escritos sobre este assunto, para que se possa visualizar um panorama do estágio atual das pesquisas nesta área, levando-se em conta que este é um campo de pesquisa relativamente novo, e, a partir daí, testar três modelos de tampo visando a realizar tal comparação: um reforçado com tiras de madeira balsa em forma de leque, outro com colmeia de fibra de aramida em matriz de resina epóxi, e um terceiro com treliça de sanduíche de balsa e tecido poli-direcional de fibra de carbono ao centro. Os três tampos ensaiados na mesma caixa e, para a diminuição de variabilidades, construídos com chapas de madeira retiradas do mesmo corte e imediatamente adjacentes.

A Transmissibilidade será traçada a partir da Transformada de Fourier – FFT – da aceleração capturada no cavalete, ao lado das cordas, e em outros três pontos na parte inferior do tampo. Uma vez obtida a Transmissibilidade, para cada uma das três posições, em cada um dos três tampos, passa-se à comparação das projeções, tendo em vista que as medições efetuadas indicam o quanto cada tampo amplifica/atenua a excitação imposta pelas cordas.

Tendo ainda como foco a comparação quantitativa entre os tipos de construção, o *sustain* (medida da sustentação do som por mais tempo) de cada tampo será avaliado através da

Razão de Amortecimento da FFT da aceleração. Dado que todos os testes se dão sob as mesmas condições ambientais, este pode ser tomado como uma medida representativa da performance de cada tipo de reforço em estudo.

No Capítulo 2 pode-se encontrar, então, uma revisão bibliográfica trazendo vários resultados que vêm a contribuir para o objetivo deste trabalho. No Capítulo 3 apresenta-se um modelo analítico aproximado para a caixa acústica, assim com o detalhamento dos cálculos de transmissibilidade e amortecimento. No capítulo 4 apresentam-se descritos os modelos ensaiados. O capítulo 5 expõe os resultados obtidos, enquanto no 6 comentam-se as conclusões retiradas da aplicação da metodologia.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As pesquisas no campo da sonoridade dos instrumentos musicais é quase tão antiga quanto estes. De maneira mais específica, os instrumentos de corda pinçada considerados como os antecessores da moderna *guitarra*, como o alaúde, o sitar e a *vihuela*, entraram na Europa ocidental somente no século VIII, com os mouros, na época da invasão ibérica, e encontraram seu grande impulso só a partir do Renascimento. Porém no campo restrito da ciência há que se citar o trabalho pioneiro de Lord Rayleigh (1887), onde pela primeira vez o assunto da acústica relacionada à música é tratado formalmente. Ainda assim, os trabalhos que surgiram a partir daí (frequentemente tendo o violino como objeto de estudo) trouxeram conexões subjetivas entre a teoria e a prática, sem lograr desta forma, na maior parte dos casos, estabelecer um modelo físico/matemático preciso para cada instrumento e/ou cada tipo de construção [FRENCH, 2009].

É na pesquisa de Suzuki (1986) onde pode-se observar uma mudança significativa de orientação. Concentrando-se em um piano de cauda, neste trabalho o assunto foi abordado de forma experimental, empregando para tanto as modernas técnicas e equipamentos de aquisição e registro de dados disponíveis na época. O aparato de medição utilizado constituía-se de um excitador eletromecânico (*shaker*) transmitindo para o tampo harmônico uma força controlada pelo sinal proveniente de um analisador/registrator (HP 5423A) com dois canais de entrada, um com o sinal de saída de um transdutor de força acoplado ao *shaker* e outro conectado a uma chave alimentada de um lado por um acelerômetro e de outro por um microfone, instalados lado a lado no ponto de tomada do sinal de resposta do tampo na ponta da cauda. Especialmente importante neste trabalho é a abordagem do problema do ponto de vista do balanço energético envolvido no processo, chegando a resultados e a conceitos relevantes, como a potência irradiada – a partir da integração da intensidade sonora sobre uma superfície de controle – e a eficiência de radiação, esta última estabelecendo-se desde então como um parâmetro fundamental para este tipo de investigação. Neste trabalho demonstram-se ainda as inter-relações dos padrões de intensidade de vibração/radiação com os primeiros modos de vibração para o tampo harmônico do piano para quatro pontos diferentes de aplicação do sinal de entrada sobre o tampo.

Paralelamente, Caldersmith (1986) traçou as Funções Resposta de Frequência – FRF – da caixa acústica de um violão comparando as medições registradas por um microfone afastado 1 m do centro do tampo e por um acelerômetro preso ao cavalete próximo ao *shaker*, enquanto o tampo era excitado por um sinal senoidal de força constante. Além de importantes

relações entre a geometria dos modos e do tampo com a intensidade de projeção, apresentam-se neste trabalho também algumas das formas pelas quais o tipo de construção da caixa pode influenciar na resposta (“qualidade”) do instrumento, abordando aspectos como “afinação” do fundo, efeitos de “bombeamento” no acoplamento ar/tampas e posição do cavalete em relação às linhas nodais.

Seguindo na mesma linha de Suzuki (1986), porém desta vez aplicado especificamente ao violão, destaca-se o trabalho de Lai e Burgess (1990), onde especial atenção foi depositada na Eficiência de Radiação e na Acelerância (função de transferência entre força e aceleração) para dois tampas de violão, um padrão comercial/industrial e outro artesanal (de *luthieria*), de tal forma que na discussão dos resultados encontra-se uma comparação entre estes dois tipos de instrumentos analisados, embasada na medição dos parâmetros expostos acima. Tais procedimentos, somados ao fato de que os testes foram realizados em instrumentos completamente acabados, ou seja, que contavam com todas as suas partes constituintes (inclusive cordas), apresentaram um importante respaldo técnico/científico a este tipo de comparação, que tradicionalmente limita-se à contraposição de opiniões subjetivas de fabricantes e músicos. Ainda sobre este trabalho vale mencionar o emprego de equipamentos desenvolvidos especificamente para medições de energia/potência associadas à acústica e à dinâmica de estruturas, como o medidor de impedância estrutural (*Impedance Head*) e a o medidor de velocidade de partícula e pressão sonora (*Sound Intensity Probe*), para a quantificação da potência dos sinais de excitação e resposta, respectivamente.

Aplicando o conceito de Eficiência de Radiação com o intuito de relacioná-la, juntamente às características de afinação, com a qualidade subjetiva para quatro violões clássicos de diferentes tipos de fabricação (industrial ou *luthieria*), sofisticação e preço, apresenta-se como trabalho de referência a pesquisa de Boullosa, Orduña-Bustamante e Lopez (1998), que através de uma série de medições dos parâmetros físicos primeiramente, e depois realizando uma audição com vários musicistas, elencaram estes instrumentos quanto à performance em cada aspecto.

Na linha das pesquisas com o Método do Elementos Finitos – MEF, Elejabarrieta, Ezcurra e Santamaría (2002) desenvolveram uma análise integrada numérica/experimental completa da caixa acústica através da criação de um modelo computacional o mais próximo possível do modelo real; este último construído com reforço ao modo Torres, foi encomendado a um *luthier* especialmente para a realização dos testes. Uma grande colaboração trazida por esta metodologia no que diz respeito à previsão de modificações foi a determinação das contribuições individuais de cada componente (tampo, fundos, ar enclausurado, etc.) nos parâmetros modais da caixa como um todo. Determinadas com o MEF através de um sistema de fatores de participação, esta pode orientar o construtor/fabricante em escolher em que modos de vibração atuar.

Representando um passo à frente no sentido de determinar modelos de quantificação do comportamento físico/acústico e de predição de resposta de alterações, French (2006) desenvolveu, baseando-se no trabalho anterior de Christensen e Vistisen (1980), um modelo discreto (sistema massa-mola) de 2 Graus de Liberdade – GDL – considerando a massa de ar ao redor da abertura como sendo um dos GDL, e o tampo superior o outro. Ainda que retorne como resultados apenas as primeiras frequências naturais, esta metodologia traz como vantagem considerável a possibilidade de avaliação de melhorias no projeto sem a necessidade de construção de protótipo e com baixa demanda de capacidade computacional, através de um

processo de recalibração do modelo matemático utilizando-se os valores medidos dos parâmetros físicos, variados controladamente. A partir daí, uma vez resolvido simultaneamente o sistema de equações resultante, é possível chegar aos valores das novas frequências naturais para as alterações desejadas de rigidez, massa e amortecimento, utilizando-se o mesmo equacionamento. Posteriormente este modelo foi ampliado para 3 GDL para contabilizar a participação do fundo (tampo posterior).

Ono e Okuda (2007), e Hiller (2006b) investigam o uso da fibra de carbono no tampo do violão, porém como reforço de espuma de poliuretano no primeiro caso e de resina epóxi no segundo, apresentando-o portanto como um material alternativo à madeira. Em Hiller apresenta-se ainda uma discussão bastante relevante no uso do MEF para este tipo de problema, que trata de qual tipo de vínculo (engaste ou rotação livre) melhor aproxima as condições reais de fixação entre tampo e caixa acústica na modelagem numérica.

Reunindo, enfim, numerosos aspectos da construção de violões e guitarras, French (2009) leva em conta vários avanços científicos e tecnológicos na área da *lutheria*, sempre tendo em vista a aproximação dos conhecimentos de musicistas, construtores e engenheiros.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A comparação da “qualidade” entre dois instrumentos musicais distintos é bastante diferente do que se poderia esperar para outros tipos de máquinas ou componentes mecânicos, como por exemplo bombas hidráulicas, aparelhos de condicionamento de ar ou trocadores de calor, ou ainda uma suspensão veicular. No caso dos três primeiros a “qualidade” (e aí entenda-se eficiência) está diretamente ligada à parâmetros de energia, ainda que características dos materiais e de projeto, como vibração e ruído, também sejam importantes. Já um sistema de suspensão, por outro lado, é avaliado principalmente em função da sua resposta dinâmica à excitações de força alternada. De qualquer maneira, geralmente a própria **função** do componente/máquina já indica qual, ou quais variáveis físicas deverão ser medidas para se avaliar se determinado componente “funciona bem” ou não. Tal objetividade não se verifica no caso da música, tanto pela ausência de uma **função** bem definida para a arte, quanto pelas diferentes sonoridades (qualidades) buscadas por cada usuário.

No caso das pesquisas envolvendo a performance acústica de instrumentos de cordas, a estratégia mais comumente adotada com o intuito de quantificar o problema objetivamente tem sido a análise modal, através da obtenção da FRF a partir da aplicação da transformada discreta de Fourier no sinal de resposta.

Para a realização deste trabalho optou-se, a partir do exposto acima, por concentrar os esforços na determinação experimental da influência que cada tipo de reforço exerce na resposta dos tampos por meio da análise das funções de transferência aceleração/aceleração entre diferentes pontos ao longo do tampo. Ainda assim, métodos analíticos simplificados serão abordados, embora de maneira pouco aprofundada, para contribuir na busca de um melhor entendimento sobre o assunto.

3.1. Parâmetros de Comparação

3.1.1 Transmissibilidade

Tendo em mãos os registros das medições, é possível proceder à comparação entre a performance de cada tampo, tendo em vista que a projeção da onda sonora que chega ao ouvido humano é fortemente influenciada pelo comportamento vibratório da estrutura da caixa acústica e do acoplamento entre ar enclausurado e tampos, principalmente o tampo superior [ELEJABARRIETA, EZCURRA E SANTAMARÍA, 2002].

A partir daí, Considerando-se que o acelerômetro preso ao cavalete representará com boa aproximação a excitação imposta ao tampo pelas cordas, a transmissibilidade traçada entre o ponto de excitação, P0, e P1, P2 e P3, gera um mapa da amplificação/atenuação sobre o tampo, na região de maior contribuição na projeção sonora, ou seja, ao redor do cavalete, conforme a equação abaixo:

$$TR(\omega) = \frac{A_{Pi}(\omega)}{A_{P0}(\omega)} \quad (1)$$

onde $A_{Pi}(\omega)$ é a FFT da aceleração registrada no ponto de interesse para P1, P2 e P3, e $A_{P0}(\omega)$ é a FFT da aceleração no ponto de referência, P0.

Para uma maior aplicabilidade dos resultados entre construtores e instrumentistas, e por se tratar de uma distribuição logarítmica em função da frequência, atenção especial foi dada ao traçado das curvas por faixas de frequência de semitom em semitom e também entre cordas soltas.

3.1.2 Amortecimento

Outro fator importante de diferenciação entre os tipos de construção é a Razão de Amortecimento da estrutura. De posse dos resultados das medições, esta pode ser calculada, para cada frequência, usando-se o Fator de Magnificação Dinâmica, de acordo com [GROEHS, 2006, eq. 5.4-4]:

$$TR = M \cdot \sqrt{1 + (2 \cdot \zeta \cdot \beta)^2} \quad (2)$$

substituindo-se M pela seguinte expressão [GROEHS, 2006, eq. 4.3-15]:

$$M = \frac{1}{\sqrt{(1 - \beta^2)^2 + (2 \cdot \zeta \cdot \beta)^2}} \quad (3)$$

resulta:

$$TR = \frac{\sqrt{1 + (2 \cdot \zeta \cdot \beta)^2}}{\sqrt{(1 - \beta^2)^2 + (2 \cdot \zeta \cdot \beta)^2}} \quad (4)$$

onde **TR** é a Transmissibilidade, **M** é o Fator de Magnificação Dinâmica, **β** é a razão entre a frequência de excitação e a Frequência Natural da estrutura, e **ζ** é a Razão de Amortecimento. Levando-se em consideração que o valor de ζ será calculado na Frequência Fundamental, deve-se considerar $\beta=1$ e TR como o valor da Transmissibilidade identificado para esta frequência.

A importância da avaliação do amortecimento na comparação dos tempos refere-se a um parâmetro de caracterização sonora dos instrumentos bastante observado pelos músicos, conhecido no jargão da área pelo nome em inglês *sustain*, podendo ser traduzido literalmente para “sustentação” (no tempo) do som. Especificamente falando, o *sustain* é só parte do chamado Envelope Acústico, que se divide em quatro partes, *Attack*, *Decay*, *Sustain* e *Release*, sendo chamados, geralmente, de Ataque, Decaimento, Sustentação e Repouso. Porém, como as outras partes do envelope acústico se relacionam com características muito particulares de cada instrumento, torna-se muito difícil chegar a uma estimativa de cada componente, podendo-se apenas avaliar, pelas medições realizadas, um valor de decaimento global.

3.2. Modelo Massa-Mola-Amortecedor Aplicado à Caixa Acústica

Para uma primeira percepção do efeito que os tipos de reforço alternativos aqui analisados possam trazer à sonoridade da caixa acústica do violão, é importante tentar entendê-los inicialmente de forma qualitativa, sob a ótica do funcionamento físico/vibratório do instrumento. A figura abaixo representa o conjunto tampo, lateral, fundo e ar enclausurado como um sistema massa-mola de 2 GDL (graus de liberdade), onde o cubo à esquerda indica a massa de ar que se desloca através da abertura do tampo, a placa à direita representa a região do tampo que sofre a maior parte do movimento vibratório, as letras **A**, **m**, **k** e **x** indicam área, massa, rigidez e deslocamento, respectivamente, e os índices **h** e **p** se referem aos dois GDL em questão: abertura (*hole*) e tampo (*plate*).

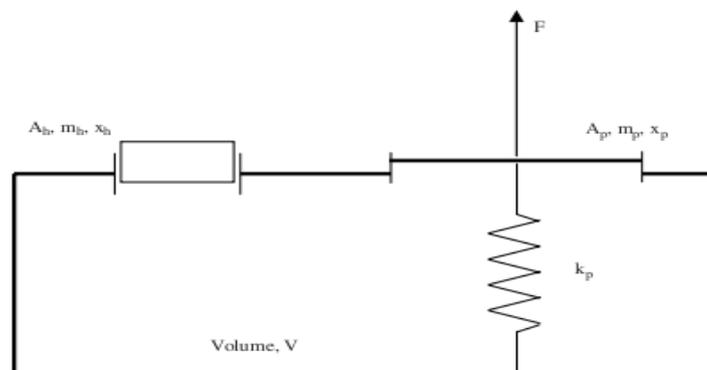


Figura 1 – Representação esquemática da caixa acústica como um sistema massa-mola de 2 GDL (Fonte: French, 2006)

Aplicando-se as equações do movimento ao sistema mostrado acima, na forma matricial, chega-se a:

$$[F(t)] = [M][\ddot{X}(t)] + [C][\dot{X}(t)] + [K][X(t)] \quad (5)$$

onde grandezas dispostas entre chaves representam vetores, e entre colchetes representam matrizes. Para a determinação dos coeficientes da matriz de rigidez é possível considerar um acoplamento entre os dois GDL, envolvendo a velocidade do som e massa específica do ar, o volume da caixa, a área da abertura e uma área efetiva do tampo, chegando-se ao seguinte resultado [Christensen&Vistisen, 1980]:

$$\begin{bmatrix} k_p + \mu \cdot A_p^2 & \mu \cdot A_h \cdot A_p \\ \mu \cdot A_h \cdot A_p & \mu \cdot A_h^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

onde μ é uma relação de proporcionalidade entre Δp e ΔV , considerando compressão adiabática, calculado da seguinte maneira:

$$\mu = c^2 \cdot \rho / V \quad (7)$$

sendo c a velocidade do som para o ar, ρ a massa específica do ar e V o volume interno da caixa acústica.

De acordo com Gomes (2009), a solução desta equação diferencial para 2 GDL, assumindo-se forças externas (F) harmônicas e levando-se em consideração o amortecimento, resulta:

$$\begin{cases} x_1(t) \\ x_2(t) \end{cases} = \begin{cases} X_1 \cdot e^{i\omega t} \\ X_2 \cdot e^{i\omega t} \end{cases} \quad (8)$$

Permitindo achar a partir daí a o sistema no domínio frequência:

$$\begin{bmatrix} (-\omega^2 \cdot m_{11} + i \cdot \omega \cdot c_{11} + k_{11}) & (-\omega^2 \cdot m_{12} + i \cdot \omega \cdot c_{12} + k_{12}) \\ (-\omega^2 \cdot m_{12} + i \cdot \omega \cdot c_{12} + k_{12}) & (-\omega^2 \cdot m_{22} + i \cdot \omega \cdot c_{22} + k_{22}) \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} x_1 \\ x_2 \end{cases} = \begin{cases} F_{10} \\ F_{20} \end{cases} \quad (9)$$

A Impedância Mecânica se define a partir das equações acima, como sendo:

$$Z_{rs}(\omega) = (-\omega^2 \cdot m_{rs} + i \cdot \omega \cdot c_{rs} + k_{rs}) \quad (10)$$

Ou na forma matricial:

$$[Z(\omega)] \cdot [X(\omega)] = [F(\omega)] \quad (11)$$

sendo que $H(\omega)$, que é o inverso da Impedância, é a matriz das FRF que indica qual será a resposta num GDL j , devida a uma excitação num outro GDL i .

Neste ponto podemos definir, então, (para sistemas de 2GDL) a Transmissibilidade entre dois GDL (dois pontos quaisquer, num sistema contínuo). Imaginando que somente o GDL 1 é excitado por uma força externa, chega-se a:

$$[T_{21}(\omega)] = \frac{H_{21}(\omega)}{H_{11}(\omega)} = \frac{i \cdot \omega \cdot c_{12} - \omega^2 \cdot m_{12} - k_{12}}{-(i \cdot \omega \cdot c_{22} - \omega^2 \cdot m_{22} - k_{22})} \quad (12)$$

3.3. Metodologia e Procedimentos de Medição

Para a realização das medições foram utilizados uma placa de aquisição USB-1208FS Measurement Computing de 12 bits e dois acelerômetros ADXL 203 com limite máximo de saturação de $\pm 1,7 \text{ g}$ (g : aceleração gravitacional), sensibilidade de 970 mV/g , resolução de 1 mg e faixa de operação de 0 a 2,5 kHz, um no canal 0 e outro no canal 1. Dada sua pequena massa, na ordem de 4 g, considera-se que esta não vá influenciar nas medições, pois as duas

somadas não passam de 4% da massa do tampo. Os dados foram adquiridos a uma taxa de 10.000 pontos por segundo, durante 5 s em cada teste, e a seguir processados em um computador utilizando-se o programa do fabricante da placa, onde foram calculados, para cada um dos dois canais, a FFT e a fase da FFT do sinal de aceleração, e a magnitude da Transmissibilidade entre os dois canais, juntamente com seu ângulo de fase. Para uma maior confiabilidade dos dados, a Função de Coerência foi também calculada em cada teste, chegando-se a valores sempre muito próximos de 1, garantindo, portanto, que os dois sinais foram excitados pela mesma fonte. Além disso, para cada situação avaliada foram realizados dois testes, para posterior comparação da repetitividade das medições. A figura a seguir mostra o desenho esquemático do aparato de medição utilizado e os pontos de tomada de sinal.

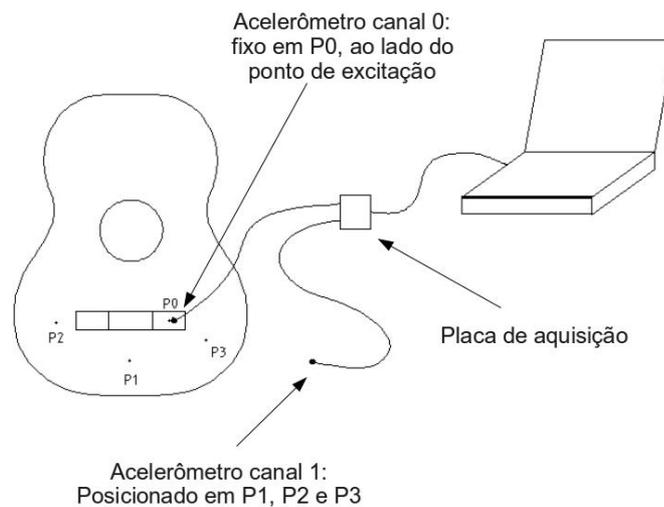


Figura 2 – Desenho esquemático do aparato de medição

4. DESCRIÇÃO DO MODELO ESTUDADO

Para a realização dos testes foram utilizados, para os três tampos, uma mesma caixa acústica com lateral e fundos de jacarandá brasileiro, tendo suas formas, dimensões, espessuras e estrutura construídos ao estilo Torres (1859), assim como um mesmo braço com encaixe tipo “rabo-de-andorinha”, preso à caixa através de parafusos, e as mesmas duas travessas de cedro paraguaio de 12 mm de altura por 7 mm de largura, sendo uma acima e outra abaixo da abertura, todos os três em alerce do Chile (ano do corte: 1975). As cordas, modelo/marca D'Addario EJ27M, foram tensionadas até a afinação de 440 Hz para o Lá em corda solta, sendo as restantes afinadas pelo esquema tradicional Mi-Lá-Ré-Sol-Si-Mi. Para um melhor isolamento das vibrações estruturais do ambiente, o conjunto foi suspenso por uma corda de nylon presa às duas tarraxas da ponta da mão, como pode-se observar na imagem a seguir (esquerda). Também na Figura 2 (direita) apresenta-se a nomenclatura do Violão Clássico (com os termos mais comumente utilizados no Brasil) adotada neste texto.

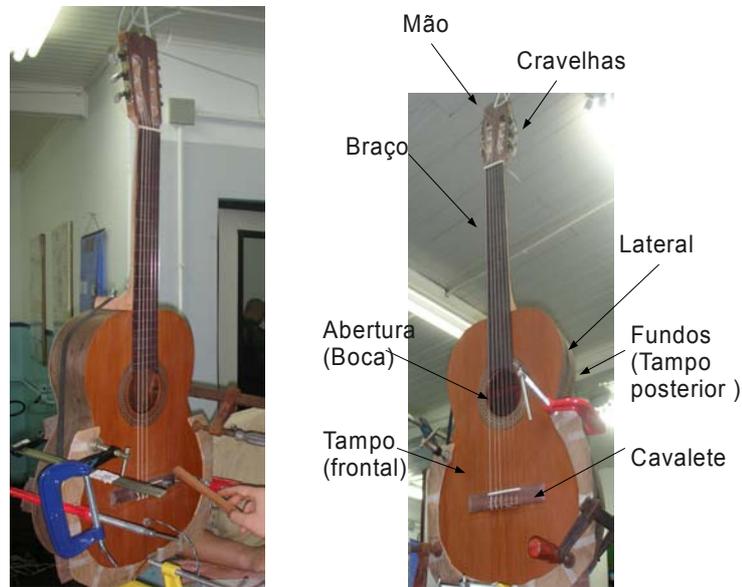


Figura 3 – Conjunto de medição e nomenclatura do Violão Clássico

4.1. *Tampo convencional – TC*

Tampo de 1,8 mm de espessura abaixo da travessa inferior (na parte mais larga da caixa), e 2,8 mm acima da travessa superior (parte mais estreita da caixa), reforçado com madeira de abeto alemão em leque de 3 mm de altura por 5 mm de largura, sendo ambos, dimensões e reforço, construídos ao estilo Torres (1859), pesando 195 g, conforme ilustra a figura a seguir.



Figura 4 – Detalhe do padrão de reforço do TC

4.2. *Tampo reforçado com treliça de balsa e fibra de carbono – TFC*

Tampo de 1,5 mm de espessura abaixo da travessa inferior, e 2,5 mm acima da travessa superior, reforçado com treliça de sanduíche de cedro canadense e tecido de fibra de carbono poli-direcional ao modo Greg Smallman, porém sem enrijecimento extra da região acima da

boca. Peso: 200 g. O espaçamento entre barras é 33 mm, formado por duas séries de fileiras dispostas em um ângulo de 45° para cada lado do eixo longitudinal (formando um ângulo reto entre si). Cada barra é composta por 3 mm de largura e 2 mm de altura de madeira junto ao tampo, seguida pela fibra de carbono, e após por um segundo filete de madeira, resultando em uma altura total de aproximadamente 3 mm no lado dos agudos e 2 mm no lado dos graves, como pode-se observar nas imagens abaixo.

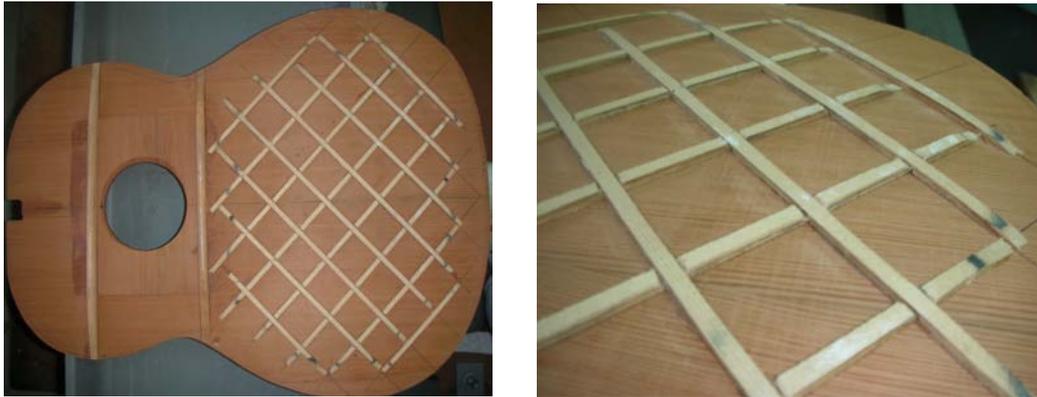


Figura 5 – Detalhe do tampo reforçado com fibra de carbono

O aglutinante utilizado entre a madeira e o tecido de fibra é cola vinílica marca Titebond; fibra de carbono: 220 gramas x 1 m² poli-direcional da marca Delta-Glass.

4.3. Tampo reforçado com colmeia de Nomex® em matriz de epóxi – TN

Tampo de 1,2 mm de espessura abaixo da travessa inferior, e 3 mm acima da travessa superior, reforçado com de fibra de aramida em colmeia (Nomex®) contida em matriz de epóxi LNE 1000 – rápido, de baixa viscosidade e sem solvente (*Pot life* 12 minutos), ao estilo Dammann/Wagner, pesando 405 g. Após a aplicação, a espessura total (tampo+reforço) foi rebaixada até 2,5 mm, conforme imagem abaixo.



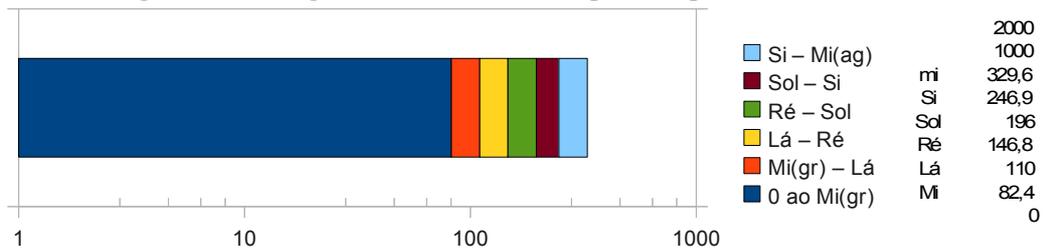
Figura 6 – Detalhe do tampo reforçado com Nomex®

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

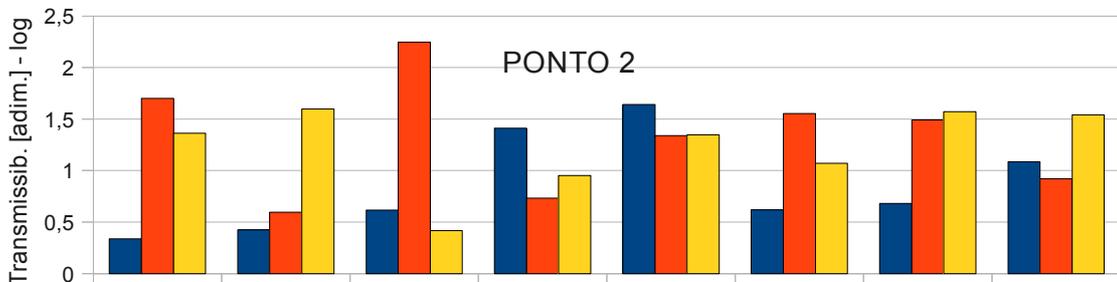
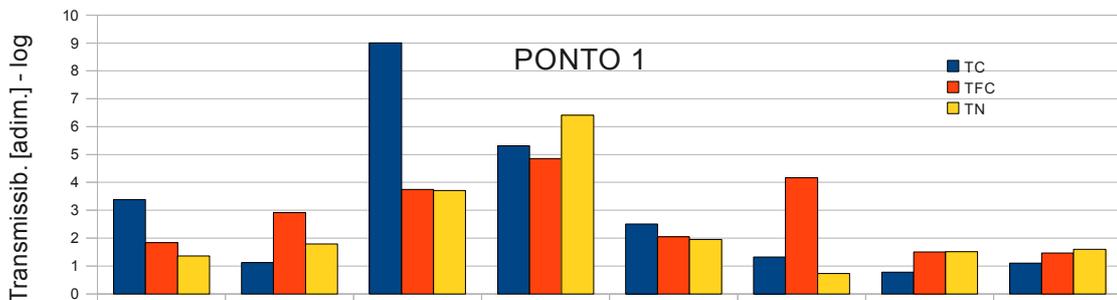
5.1. Transmissibilidade

Para uma primeira análise do grande volume de dados gerado, optou-se pelo cálculo das médias da Transmissibilidade, dividindo-se primeiramente em faixas por frequência de corda solta, entre P0 e cada um dos três pontos em observação. A largura de cada faixa encontra-se no gráfico abaixo, de 0 ao Mi grave, passando pelas faixas de cordas soltas, e além até 2 kHz.

Figura 7 – Largura das faixas de frequência por corda solta



Apesar das diferenças entre o comportamento dos tampos, é preciso levar em consideração também as diferenças resultantes do ponto avaliado. Segundo Caldersmith (1986), determinados modos, com suas correspondentes frequências naturais, são altamente atenuados em consequência da posição do cavalete próximo a uma linha nodal, sendo o principal exemplo os modos bipolares que ocorrem entre 250 e 400 (com possíveis pequenas variações de instrumento para instrumento). Nos gráficos abaixo apresenta-se a Transmissibilidade para os três pontos, onde pode-se notar que P1, de um modo geral, é sensivelmente mais amplificado que os outros pontos.



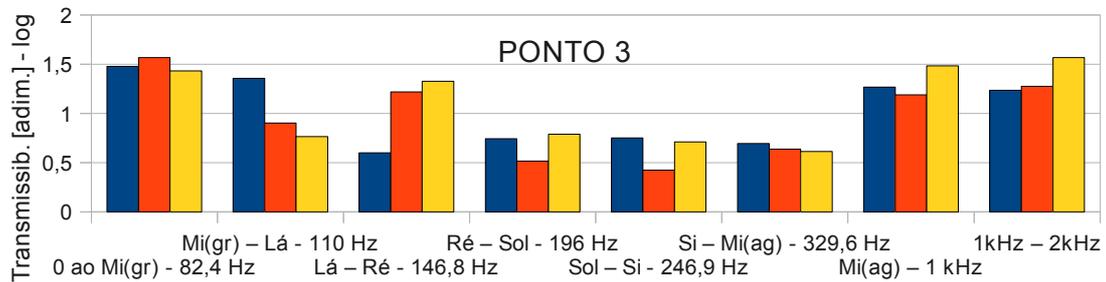


Figura 8 – Médias da Transmissibilidade por faixa de frequência entre cordas soltas

Também, nestes mesmos gráficos, é possível ter uma primeira noção de como os tampos se destacam nas diferentes frequências: acima de 1000 Hz percebe-se uma predominância do TN para os três pontos, já o TC se destaca nos médios, amplificando pouco nos extremos, principalmente nos agudos. Para o TFC, apesar deste não se destacar (em relação aos outros dois) em muitas faixas de frequência, pôde-se reconhecer uma homogeneidade maior da sua amplificação ao longo de todas as faixas, com uma amplificação média significativa (relativamente aos outros dois).

Com o intuito de se conseguir observar melhor os picos isolados, ou seja, sem diluí-los tanto no cálculo da média, foram também traçados os gráficos da Transmissibilidade por faixa de semitom em semitom. A tabela a seguir apresenta a frequência correspondente a cada nota.

Tabela 1 – Frequência de cada semitom (nota) – do limite da audição à 8 kHz

	Dó	Dó#	Ré	Ré#	Mi	Fá	Fá#	Sol	Sol#	Lá	Lá#	Si
0					20,60	21,83	23,13	24,50	25,96	27,50	29,14	30,87
1	32,70	34,65	36,71	38,89	41,20	43,65	46,25	49,00	51,91	55,00	58,27	61,74
2	65,41	69,30	73,42	77,78	82,41	87,31	92,50	98,00	103,83	110,00	116,54	123,47
3	130,81	138,59	146,83	155,56	164,81	174,61	185,00	196,00	207,65	220,00	233,08	246,94
4	261,63	277,18	293,66	311,13	329,63	349,23	369,99	392,00	415,30	440,00	466,16	493,88
5	523,25	554,37	587,33	622,25	659,26	698,46	739,99	784,00	830,61	880,00	932,33	987,77
6	1046,50	1108,70	1174,70	1244,50	1318,50	1396,90	1480,00	1568,00	1661,20	1760,00	1864,70	1975,50
7	2093,00	2217,50	2349,30	2489,00	2637,00	2793,80	2960,00	3136,00	3322,40	3520,00	3729,30	3951,10
8	4186,00	4434,90	4698,60	4978,00	5274,00	5587,70	59,19	6271,90	6644,90	7040,00	7458,60	7902,10

A determinação da nota (para a escala musical de Bach – Rameau) respeita uma escala logarítmica em função da frequência, e pode ser determinada a partir da seguinte fórmula [FRENCH, 2009]:

$$f_n = r^n \cdot f_0 \quad (13)$$

onde f_0 é frequência de uma nota qualquer, f_n é a frequência de uma nota n semitons acima (ou abaixo), e r é uma razão definida a partir da determinação de que quando se duplica a frequência de uma nota, se chega à “mesma” nota, porém um “nível”, acima. A este nível se chama Oitava, porém (no ocidente) se divide o intervalo entre oitavas em 12 notas, de modo que r pode ser calculado da seguinte maneira:

$$r = \sqrt[12]{2} = 1.0594631 \quad (14)$$

Abaixo então (Figura 9), encontram-se os gráficos por faixa de semitom, desde imediatamente abaixo das frequências fundamentais dos três tampos até aproximadamente 2 kHz (Dó7), somente para P1, pois este ponto apresentou uma amplificação geral significativamente do maior que os outros dois, e então foi tomado como referência.

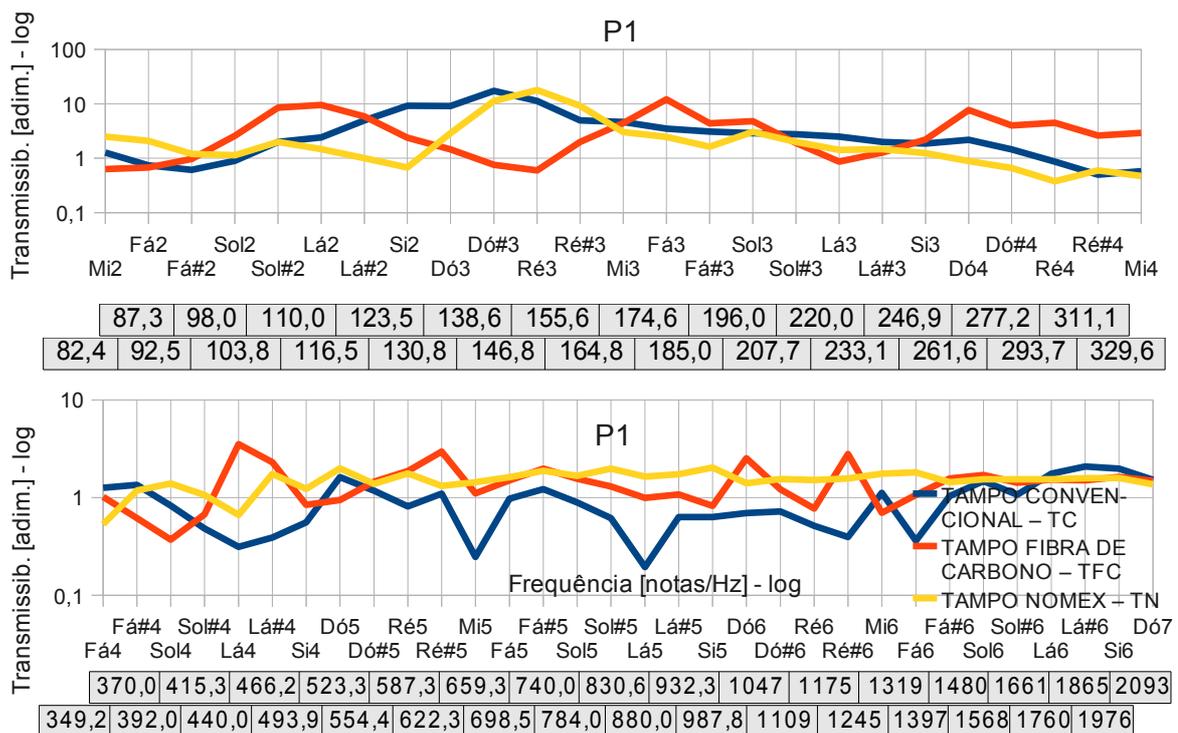


Figura 9 – Médias da Transmissibilidade por faixa de semitom

Para uma possibilitar uma visualização ainda mais precisa dos resultados, o APÊNDICE A apresenta uma tabela contendo todos os valores da Transmissibilidade acima de 50 vezes, para todos os pontos e para cada tampo. No APÊNDICE B é possível encontrar a Transmissibilidade para o P1, com todos os pontos medidos na faixa de frequências que abrange as fundamentais, e no ANEXO A apresentam-se os resultados obtidos por Caldersmith, 1986, como termo de comparação aos registros experimentais deste trabalho.

5.2. Amortecimento

Utilizando-se a metodologia de cálculo exposta anteriormente, foi possível estimar os valores da Razão de Amortecimento para cada um dos tampos, juntamente com suas respectivas Frequências Fundamentais. Estes resultados estão expostos na tabela abaixo.

Tabela 2 – Razões de Amortecimento medidas no P0

	Fundamental	Transmissib.	ζ
TC	80,2	11,99	0,0419
TFC	76,8	7,8	0,0646
TN	80,8	5,71	0,0889

Os picos de Transmissibilidade utilizados nos cálculos da tabela acima foram obtidos nos gráficos apresentados no APÊNDICE B, e os gráficos correspondentes, da FFT da aceleração e de Aceleração X Tempo, encontram-se nos apêndices C e D, respectivamente.

Os resultados acima permitem prever, a princípio, maiores tempos de *sustain* para o TC, na região próxima à fundamental.

6. CONCLUSÕES

Foram traçadas, para os três tipos de materiais de reforço estudados, a Transmissibilidade a partir do sinal de aceleração capturado sobre os tampos, gerando resultados que apontam para diferenças significativas entre estes tipos de construção.

Do ponto de vista da projeção foi possível verificar um bom desempenho da forma de construção tradicional nas frequências médias, sendo superado, porém, pelos novos tipos de construção nas frequências extremas, principalmente nos agudos, com notável performance do tampo de fibra de aramida.

Para uma comunicação mais direta com as pessoas ligadas à música, foram traçadas as Funções de Transferência por faixas de cordas soltas e de semitons, facilitando possíveis alterações futuras de melhoria no projeto dos componentes do violão, e permitindo uma busca mais direcionada e mais precisa neste sentido.

Também foi avaliado o parâmetro *sustain* através da Razão de Amortecimento, calculada através da identificação da frequência fundamental e correspondente valor de Transmissibilidade. Com isso verificou-se uma Razão de amortecimento significativamente menor para o tampo convencional na região das baixas frequência.

Como sugestão de trabalhos futuros fica a ideia de se comparar as medições estruturais com a medição da pressão sonora e velocidade de partícula em câmara anecoica, possibilitando assim o cálculo da energia sonora irradiada pelo tampo. Também vale mencionar o propósito de aproximação entre os trabalhos técnico/científicos e a bancada de trabalho dos *luthiers*, tentando entender suas reais necessidades e buscas sonoras para, aí sim, propor e testar soluções. Como exemplo do que poderia ser feito neste sentido, destaca-se a pesquisa de quais alterações trariam benefícios para cada sonoridade desejada, conectando a projeção específica de certas bandas de frequência com a região correspondente do tampo e com as características construtivas que seriam então necessárias para cumprir esta função determinada.

REFERÊNCIAS

BOULLOSA, Ricardo R.; ORDUÑA-BUSTAMANTE, Felipe; LOPEZ, A. Perez. Tuning characteristics, radiation efficiency and subjective quality of a set of classical guitars : Applied Acoustics 56, 183 – 197, ELSEVIER, 1999.

CALDERSMITH, Graham. Vibration Geometry and Radiation Fields in Acoustic Guitars: Acoustics Australia 14, 2 – 47, Australian Acoustical Society, 1986.

CHRISTENSEN, Ove; VISTISEN, Bo B. Simple model for low-frequency guitar function : Journal of the Acoustical Society of America 68, No. 3, 1980.

ELEJABARRIETA, M. J. ; EZCURRA, A. ; SANTAMARÍA, C. Coupled modes of the resonance box of the guitar: *Journal of the Acoustical Society of America* 11, No. 5, 2002.

FRENCH, M. Structural modification of stringed instruments: *Mechanical Systems and Signal Processing* 2, 98–107, 2007.

FRENCH, M. *Engineering the Guitar – Theory and Practice*: Springer Science+Business, 2009.

GOMES, Herbert M. *Notas de aulas de Medições Mecânicas*, Porto Alegre, Programa de Pós Graduação em engenharia Mecânica, PROMEC, UFRGS, 2009.

GROEHS, Ademar G. *Mecânica Vibratória*: Ed. Unissinos, São Leopoldo – RS, 2001.

HILLER, Jonathan, *Carbon Fiber vs. Wood as an Acoustic Guitar Soundboard*: PHYS 207, term paper, primavera de 2006.

ONO, Teruaki; OKUDA, Akira. Acoustic characteristics of guitars with a top board of carbon fiber-reinforced composites: *Acoustical Science & Technology* 28, The Acoustical Society of Japan, 2007.

RAYLEIGH, Baron John W. S.; Lindsay, Robert B. *The Theory of Sound*: Cambridge University Press, 1887.

SUZUKI, Hideo, *Vibration and sound radiation of a piano soundboard*: CBS Technology, Stanford, 1986.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

CLOUGH, Ray, PENZIEN, W. Joseph. *Dynamics of Structures : Computers & Structures, Inc.*, 2003.

MIGUEL, Leticia F. F. *Notas de aula – Vibrações I*: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Picos de Transmissibilidade acima de 50 vezes para todas as configurações

APÊNDICE B – Transmissibilidade no P1 – frequências fundamentais

APÊNDICE C – Espectros Aceleração X Frequência

APÊNDICE D – Sinal da Aceleração X Tempo no P1

APÊNDICE A – Picos de Transmissibilidade acima de 50 vezes para todas as configurações

Tampo Convencional			Tampo Fibra de Carbono			Tampo Nomex		
Nota (Aprox.)	Freq. [Hz]	Transm. [adim.]	Nota (Aprox.)	Freq. [Hz]	Transm. [adim.]	Nota (Aprox.)	Freq. [Hz]	Transm. [adim.]
Funções Transmissibilidade acima de 50 vezes no Ponto 1								
Dó3	127.41	53.09		4.60	86.19		151.61	54.22
Lá#6	1917.68	113.26	Si2	121.00	51.82	Dó5	553.42	50.56
Dó7	2043.28	58.21	Fá3	175.61	63.47	Dó6	1039.64	56.94
Ré7	2309.69	57.21	Dó#4	270.01	103.44	Ré7	2348.89	155.86
Ré#7	2533.10	80.08	Ré4	330.61	109.18	Fá7	2777.11	55.05
Sol7	3192.93	58.56	Ré#4	634.63	62.69	Lá7	3513.14	52.14
Sol7#	3289.53	53.63	Dó6	1060.04	94.09	Lá7	3622.15	53.03
Lá7	3463.74	78.60	Dó#6	1089.04	85.33	Lá#7	3710.15	64.09
Lá7	3482.14	93.69	Ré#6	1264.85	68.05	Dó#8	4588.78	63.20
Lá#7	3780.15	51.78	Ré#6	1275.65	60.63			
			Mi6	1288.05	104.41			
			Sol#6	1683.27	51.98			
			Dó#7	2241.89	56.07			
			Ré7	2388.10	51.42			
			Mi7	2702.91	50.12			
			Ré#8	4891.60	51.96			

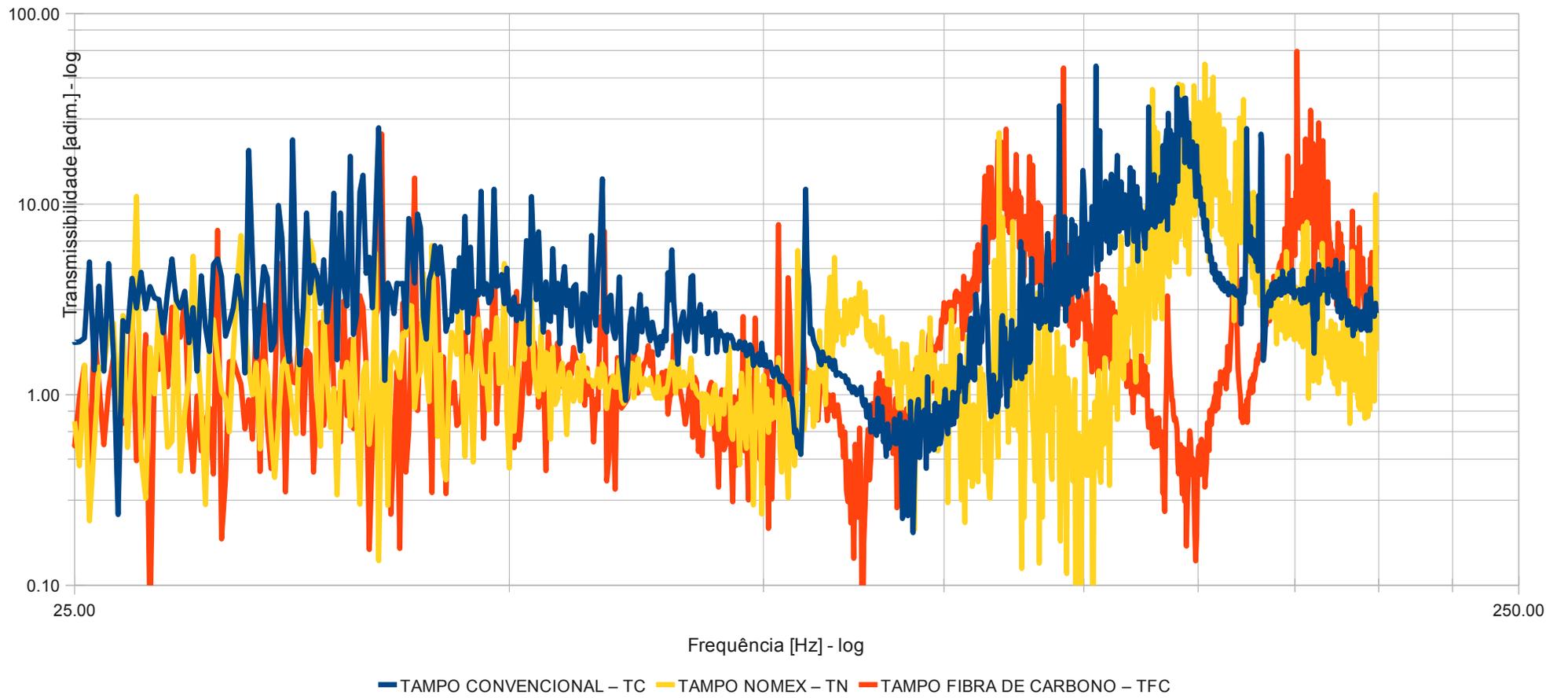
Funções Transmissibilidade acima de 50 vezes no **Ponto 2**

Tampo Convencional			Tampo Fibra de Carbono			Tampo Nomex		
Ré7	2306.29	78.80	Si3	249.01	55.08	Dó5	523.82	109.64
Fá7	2761.11	60.71	Fá5	707.03	62.31	Sol6	1605.06	166.17
Fá#7	2916.32	54.32	Lá#6	1912.88	152.48	Lá#6	1890.08	76.01
Dó8	4142.77	70.07	Lá#6	1957.08	77.23	Dó7	2099.08	56.43
			Si6	2090.48	57.02	Dó#7	2274.09	70.99
			Ré7	2457.10	52.99	Mi7	2704.51	60.30
			Sol#7	3517.74	59.61	Fá7	2848.51	71.18
			Lá7	3563.94	66.67	Sol#7	3406.54	82.85
			Lá7	3636.95	53.93	Sol#7	3428.94	96.92
			Lá7	3680.15	50.47	Lá#7	3867.36	59.47
			Si7	4177.97	61.29	Dó8	4377.58	61.97
			Dó8	4193.97	96.19	Dó8	4400.98	65.43
			Dó8	4399.38	87.97	Dó#8	4560.18	78.75
			Ré8	4812.39	58.27	Ré8	4731.99	84.79

Funções Transmissibilidade acima de 50 vezes no **Ponto 3**

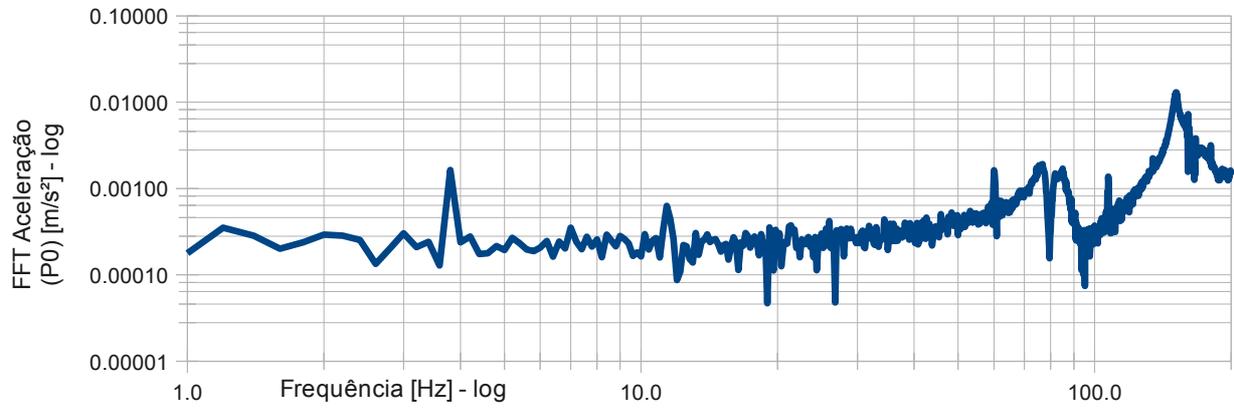
Dó#6	1156.05	172.94	Dó#6	1140.05	84.80	Mi5	686.03	80.75
Fá7	2918.92	107.26	Mi6	1322.05	54.18	Sol#5	848.43	63.51
Fá#7	2984.92	51.85	Fá#7	2965.12	116.55	Mi7	2723.31	57.81
Lá7	3649.55	62.93	Fá#7	3045.92	74.57	Fá7	2858.31	56.87
			Sol7	3173.93	52.83	Fá7	2896.52	71.91
			Sol7	3299.73	68.28	Fá7	2948.92	521.44
			Si7	3955.76	65.64	Lá#7	3731.15	106.11
			Si7	3983.96	130.49	Lá#7	3810.15	51.08
			Ré8	4879.60	58.21	Dó8	4381.98	52.38
						Dó8	4404.58	79.55
						Dó#8	4508.38	67.27
						Ré8	4894.40	106.52

APÊNDICE B – Transmissibilidade no P1 – região das frequências fundamentais

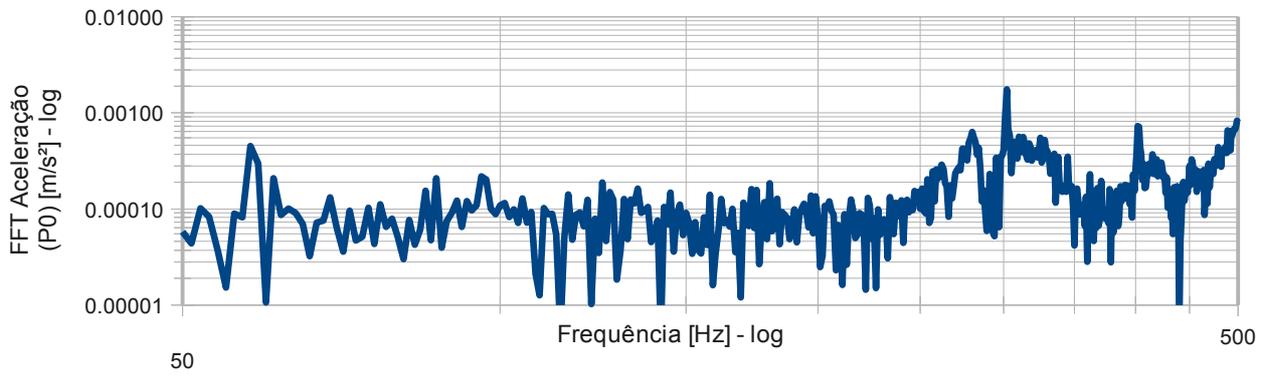


APÊNDICE C – Espectros Aceleração X Frequência

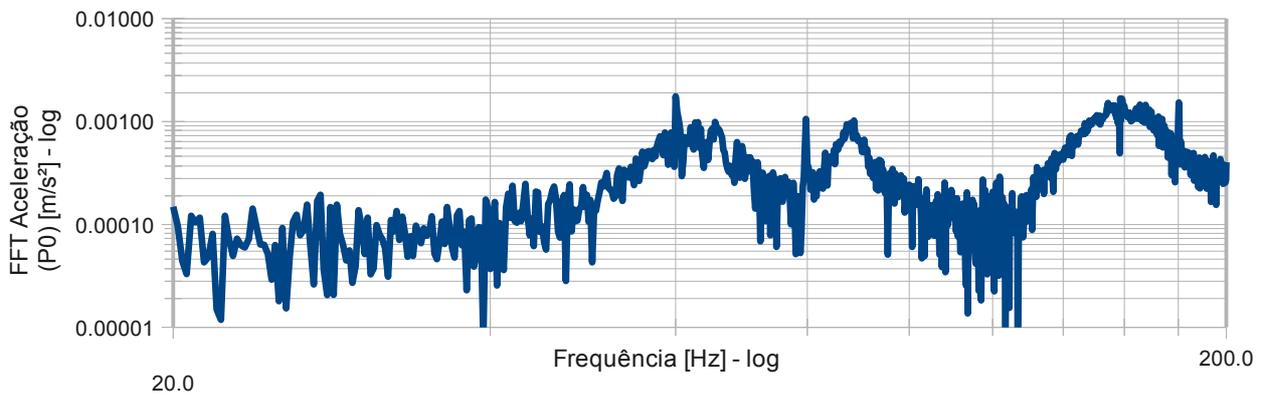
Tampo Convencional



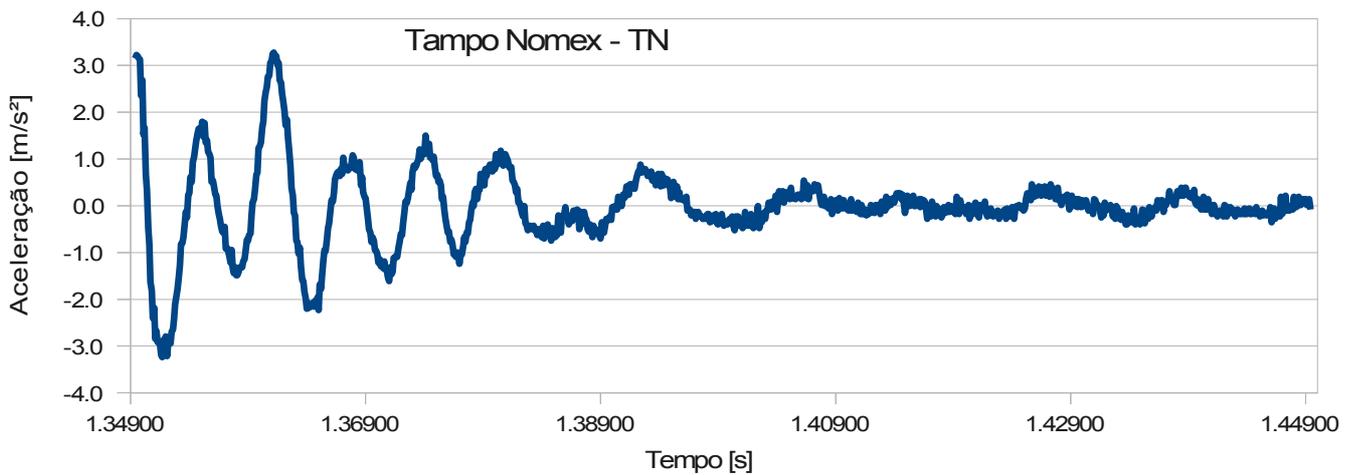
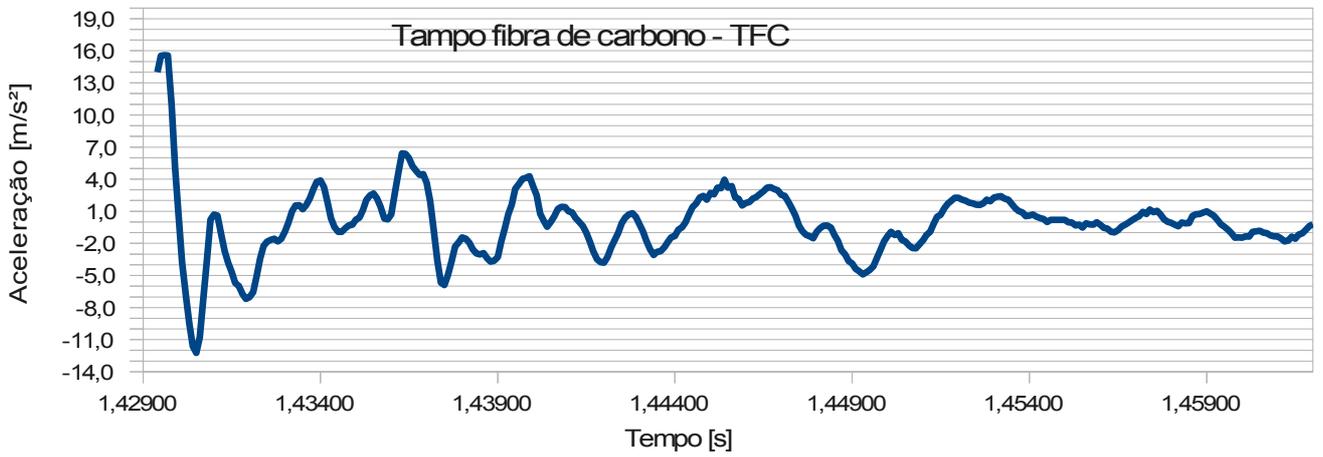
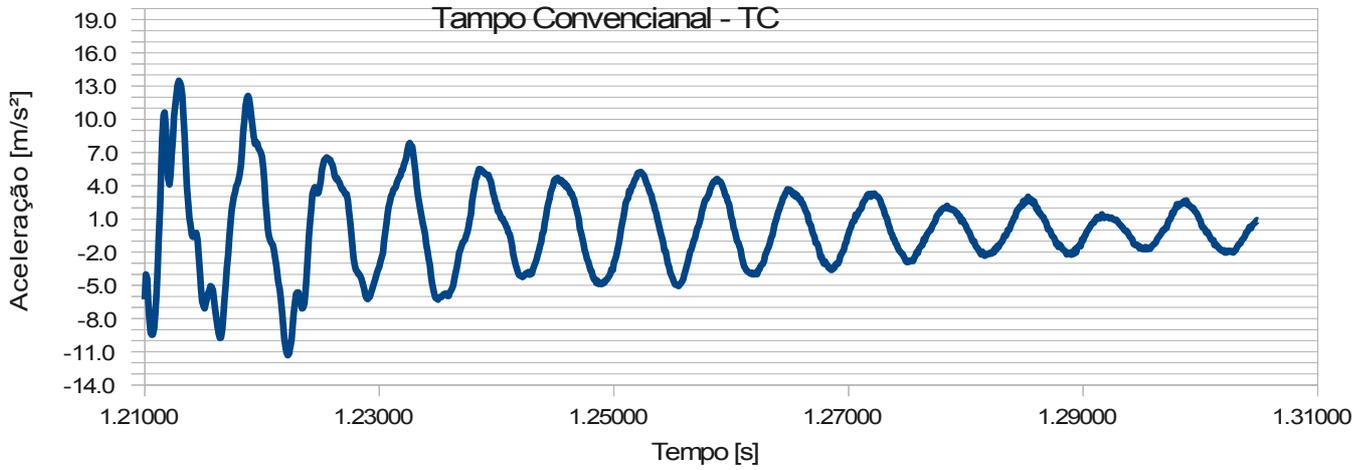
Tampo Fibra de Carbono



Tampo Nomex



APÊNDICE D – Sinal da Aceleração X Tempo no P1



ANEXOS

ANEXO A – Resultados experimentais obtidos por Caldersmith, 1986.

ANEXO A – Resultados experimentais obtidos por Caldersmith, 1986.

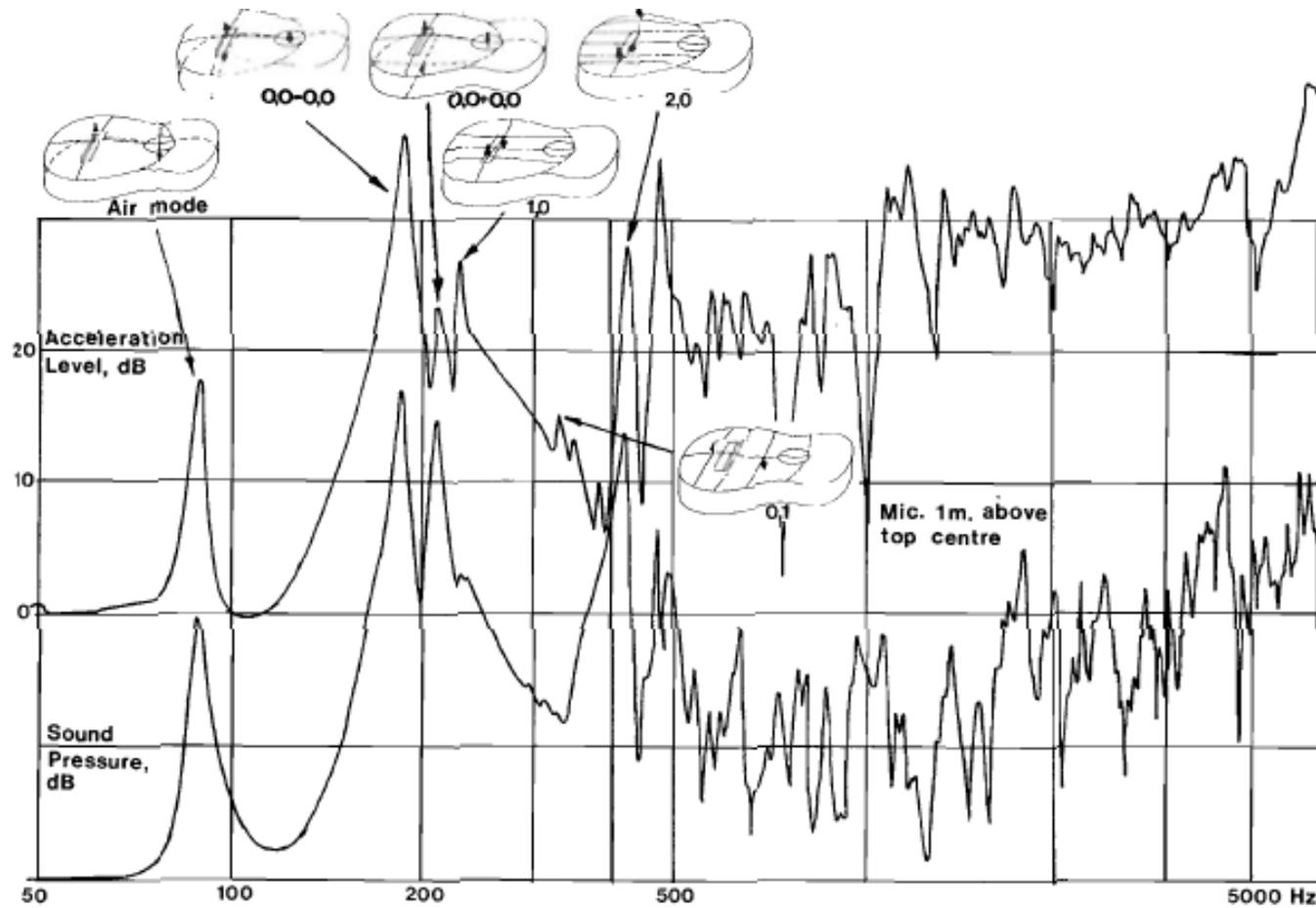


Figure 2: Frequency response curves produced by a guitar driven sinusoidally with constant force at the bridge between the two top strings (E and B). The upper response curve (the "input") is that recorded by an accelerometer attached to the bridge just behind the driver: Acceleration Level. The lower response curve (the "output") is the sound pressure level recorded 1 m above top centre. The lower peaks are those of the resonances of modes identified and sketched near the peaks.