

VINICIUS JOSÉ MOREIRA PEIXOTO

ANÁLISE DE VIBRAÇÕES PARA APLICAÇÕES
MUSICAIS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para conclusão do
curso de Graduação (PMC-581)

10,0 (D₁₃)
L G 1 14

São Paulo
2000

VINICIUS JOSÉ MOREIRA PEIXOTO

ANÁLISE DE VIBRAÇÕES PARA APLICAÇÕES
MUSICAIS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para conclusão do
curso de Graduação (PMC-581)

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Francisco Emílio Baccaro Nigro

São Paulo
2000

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Francisco Emílio Baccaro Nigro, que aceitou este tema de trabalho um tanto quanto extravagante.

À Mahle Metal Leve S.A., que disponibilizou seus recursos.

À todos que colaboraram para este trabalho, em especial ao Luis Miguel Valdes Lopez, que muito ajudou no desenvolvimento do modelo.

Àqueles que despertaram em mim a arte de criar sons.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

RESUMO

“ABSTRACT”

1-Introdução	1
2-Revisão Bibliográfica	2
3- Descrição dos parâmetros a serem estudados	3
4- Modelagem de Elementos Finitos desenvolvida	6
4.1 – Hipóteses e simplificações adotadas para a elaboração do modelo	6
4.2 – Modelo 2D x 3D	9
4.3 – Descrição do modelo de elementos finitos desenvolvido	11
5- Calibração do modelo de elementos finitos desenvolvido a partir dos dados obtidos experimentalmente	17
5.1 – Ajuste de parâmetros no modelo de elementos finitos a fim de calibração	18
6 – Estudo paramétrico – Influência do material do casco	22
6.1 – Caso de referência – Red Maple (<i>Acer rubrum</i> L.)	23
6.2 – Silver Maple (<i>Acer saccharinum</i> L.)	28
6.3 – Sugar Maple (<i>Acer saccharum</i>)	29
6.4 – Birch (<i>Betula alleghaniensis</i>)	30
6.5 – Mogno Africano (<i>Khaya ivorensis</i>)	31
6.6 – Spruce (<i>Picea rubens</i>)	32
6.7 – Red Oak (<i>Quercus falcata</i>)	33
6.8 – Redwood (<i>Sequoia sempervirens</i>)	34
6.9 – Comparação entre os diversos tipos de madeira.	35
7 – Estudo paramétrico – Influência da pele de ataque (membrana superior)	38
7.1 – Melinex 539®	39
7.2 – Mylar D®	42
7.3 – Mylar A®	45
7.4 – Comparação entre os diversos tipos de peles de ataque.	48

8 – Estudo paramétrico – Influência da pele de resposta	
(membrana inferior)	.51
8.1 – Mylar D®	.52
8.2 – Mylar A®	.53
8.3 – Comparação entre os diversos tipos de peles de resposta.	.55
9 – Conclusões e recomendações.	57
Referências Bibliográficas.	.59

LISTA DE FIGURAS

Fig. 3.1 – Componentes principais de um tambor.	3
Fig. 3.2 – Engaste de um tambor.	5
Fig. 4.1 – Processo térmico de conformação do filme polimérico.	8
Fig. 4.2 – Esquema dos elementos utilizados no modelo.	12
Fig. 4.3 – Esquema dos elementos utilizados no modelo (II)	13
Fig. 4.4 – Esquema bidimensional e axissimétrico do modelo construído no ANSYS	14
Fig. 4.5 – Detalhe da figura 4.4 (Estrutura)	14
Fig. 5.1 – Disposição dos microfones para aquisição de dados experimentais ...	17
Fig. 6.1 – Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Red Maple)	23
Fig. 6.2 – Mapa de pressão – 20 Hz (Red Maple)	24
Fig. 6.3 – Mapa de pressão – 400 Hz (Red Maple)	25
Fig. 6.4 – Mapa de pressão – 1200 Hz (Red Maple)	25
Fig. 6.5 – Mapa de pressão – 3000 Hz (Red Maple)	26
Fig. 6.6 – Mapa de pressão – 7000 Hz (Red Maple)	26
Fig. 6.7 – Mapa de pressão – 12000 Hz (Red Maple)	27
Fig. 6.8 – Mapa de pressão – 20000 Hz (Red Maple)	27
Fig. 6.9 – Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Silver Maple)	28
Fig. 6.10 – Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Sugar Maple)	29
Fig. 6.11 – Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Birch)	30
Fig. 6.12 – Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Mogno Africano) ..	31
Fig. 6.13 – Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Spruce)	32
Fig. 6.14 – Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Red Oak)	33
Fig. 6.15 – Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Redwood)	34
Fig. 6.16 – Comparação entre madeiras – frequência de maior excitação	35
Fig. 6.17 – Comparação entre madeiras – pressão sonora máxima	36
Fig. 6.18 – Correlação entre Pmax e propriedades do material	37
Fig. 7.1 – Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Melinex 539® - 100 µm)	39

Fig. 7.2 – Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Melinex 539 [®] - 125 μm)	40
Fig. 7.3 – Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Melinex 539 [®] - 175 μm)	40
Fig. 7.4 – Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Mylar D [®] - 75 μm) .	42
Fig. 7.5 – Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Mylar D [®] - 100 μm) .	43
Fig. 7.6 – Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Mylar D [®] - 125 μm) .	43
Fig. 7.7 – Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Mylar A [®] - 75 μm) .	45
Fig. 7.8 – Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Mylar A [®] - 100 μm) .	46
Fig. 7.9 – Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Mylar A [®] - 125 μm) .	46
Fig. 7.10 – Comparação entre peles de ataque – frequência de maior excitação. .	48
Fig. 7.11 – Comparação entre peles de ataque – pressão sonora máxima.	49
Fig. 8.1 – Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Mylar D [®] - 75 μm) .	52
Fig. 8.2 – Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Mylar A [®] - 36 μm) .	53
Fig. 8.3 – Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Mylar A [®] - 50 μm) .	54
Fig. 8.4 – Comparação entre peles de resposta – frequência de maior excitação .	55
Fig. 8.5 – Comparação entre peles de resposta – pressão sonora máxima	56

LISTA DE TABELAS

Tab. 5.1 – Posicionamento dos microfones	17
Tab. 5.2 – Comparação entre valores de calibração – microfone 1	20
Tab. 5.3 – Comparação entre valores de calibração – microfone 2	20
Tab. 5.4 – Comparação entre valores de calibração – microfone 3	20
Tab. 6.1 – Propriedades mecânicas das madeiras	22
Tab. 6.2 – Pressão sonora por faixa de frequência (Red Maple)	23
Tab. 6.3 – Pressão sonora por faixa de frequência (Silver Maple)	28
Tab. 6.4 – Pressão sonora por faixa de frequência (Sugar Maple)	29
Tab. 6.5 – Pressão sonora por faixa de frequência (Birch)	30
Tab. 6.6 – Pressão sonora por faixa de frequência (Mogno Africano)	31
Tab. 6.7 – Pressão sonora por faixa de frequência (Spruce)	32
Tab. 6.8 – Pressão sonora por faixa de frequência (Red Oak)	33
Tab. 6.9 – Pressão sonora por faixa de frequência (Redwood)	34
Tab. 6.10 – Comparação entre madeiras	35
Tab. 7.1 – Propriedades mecânicas dos filmes poliméricos utilizados na membrana superior	38
Tab. 7.2 – Pressão sonora por faixa de frequência (Melinex 539® - 100 µm) ...	41
Tab. 7.3 – Pressão sonora por faixa de frequência (Melinex 539® - 125 µm) ...	41
Tab. 7.4 – Pressão sonora por faixa de frequência (Melinex 539® - 175 µm) ...	41
Tab. 7.5 – Pressão sonora por faixa de frequência (Mylar D® - 75 µm)	44
Tab. 7.6 – Pressão sonora por faixa de frequência (Mylar D® - 100 µm)	44
Tab. 7.7 – Pressão sonora por faixa de frequência (Mylar D® - 125 µm)	44
Tab. 7.8 – Pressão sonora por faixa de frequência (Mylar A® - 75 µm)	47
Tab. 7.9 – Pressão sonora por faixa de frequência (Mylar A® - 100 µm)	47
Tab. 7.10 – Pressão sonora por faixa de frequência (Mylar A® - 125 µm)	47
Tab. 7.11 – Comparação entre peles de ataque	48
Tab. 8.1 – Propriedades mecânicas dos filmes poliméricos utilizados na membrana inferior	51
Tab. 8.2 – Pressão sonora por faixa de frequência (Mylar D® - 75 µm)	52

Tab. 8.3 – Pressão sonora por faixa de frequência (Mylar A [®] - 36 µm)	54
Tab. 8.4 – Pressão sonora por faixa de frequência (Mylar A [®] - 50 µm)	54
Tab. 8.5 – Comparação entre peles de resposta	55

LISTA DE SÍMBOLOS

L : distância livre necessária para a percepção de onda sonora
 λ : comprimento de onda
 θ : ângulo de borda de contato do casco com a pele
 E : módulo de elasticidade
 ν : coeficiente de Poisson
 ρ : massa específica
 E_{radial} : módulo de elasticidade no sentido radial
 E_{axial} : módulo de elasticidade no sentido axial
 G_{radial} : módulo de resistência ao cisalhamento no sentido radial
 G_{axial} : módulo de resistência ao cisalhamento no sentido axial
 β : coeficiente de absorção sonora
 t : espessura do filme polimérico
 v : velocidade sonora
 P_1 : pressão sonora no microfone 1
 P_2 : pressão sonora no microfone 2
 P_3 : pressão sonora no microfone 3
 f : frequência
 P_{max} : pressão sonora máxima

RESUMO

Em se falando de construção de instrumentos musicais, a seleção de materiais, os processos de fabricação, e a procura por novas sonoridades foram desenvolvidos na necessidade e na busca de um instrumento cada vez mais preciso e perfeito. Com o avanço industrial e a popularização que a música ganhou, a produção em massa substituiu os artesãos pelas máquinas, apesar de algumas etapas do processo não permitirem a ausência do controle humano.

Apesar do avanço e refinamento da escolha de materiais e do processo produtivo, poucos estudos dos fenômenos vibroacústicos envolvidos foram efetuados a fim de melhor entender os instrumentos.

O objetivo deste trabalho é estudar estes fenômenos, tendo como particularidade os instrumentos de percussão. São analisadas as influências dos diversos materiais e parâmetros utilizados na construção e as interações entre os mesmos. Um modelo em elementos finitos foi desenvolvido, e, para validação do mesmo, comparações entre os padrões sonoros preditos por este e padrões sonoros reais foram realizadas.

Uma característica apreciável do modelo em elementos finitos desenvolvido é a capacidade da análise do instrumento como um todo e sua interação com o fluido que o cerca (no caso o ar).

Os resultados obtidos são capazes de prever o comportamento das ondas sonoras criadas pelo instrumento e as características que o som produzido terá em qualquer região do espaço, fato este de grande importância não só para o desenvolvimento e aprimoramento de novos produtos, como também para gravações, já que se pode otimizar a escolha e o posicionamento dos microfones, a localização do instrumento dentro da sala e ter um conhecimento prévio das características dos padrões sonoros a serem adquiridos.

ABSTRACT

For the musical instruments manufacturing, the material selection, the manufacturing processes and the quest for new sonorities are being developed to supply the necessity of a perfect instrument. Considering the new industrial technologies and the music popularization, the mass production substitute the luthiers for the machines, even though, some steps do not allow the human lack.

However, all this progress, do not produce a variety of studies of the vibroacoustic phenomena involved in musical instruments, trying to better comprehend their sonority.

The purpose of this work is to study these phenomena, considering, specifically, the percussion instruments. The influence of the material properties and the parameters involved in their building are investigated, and also, their interactions. A finite element model was developed, and, for its validation, comparisons between the obtained results and real sound patterns have been done.

A positive characteristic of the FE model developed is the capacities of analyze the instrument as a whole, and its interaction with the surround fluid (in this case, the air).

The obtained results are capable to predict the sound waves produced by the instrument and the characteristics of the sound in any point of the space. A very important result to develop and improve new products and to aid the recording of these instruments, as it is possible to optimize the selection and the placement of the microphones and the position of the instrument in the recording room.

1 – Introdução e Objetivos

A aplicação dos conceitos abordados pelas ciências básicas da engenharia está presente nos mais diversos ramos de atuação. Durante muitos séculos, verdadeiros artesãos desenvolveram técnicas de construção de instrumentos musicais baseados na experiência adquirida ao longo deste tempo. A seleção de materiais, os processos de fabricação, e a procura por novas sonoridades foram desenvolvidos na necessidade e na busca de um instrumento cada vez mais preciso e perfeito. Com o avanço industrial e a popularização que a música ganhou, a produção em massa substituiu os artesãos pelas máquinas, apesar de algumas etapas do processo não permitirem a ausência do controle humano.

Apesar do avanço e refinamento da escolha de materiais e do processo produtivo, poucos estudos dos fenômenos vibroacústicos envolvidos foram efetuados a fim de melhor entender os instrumentos.

O objetivo deste trabalho é estudar estes fenômenos, tendo como particularidade os instrumentos de percussão. Serão analisadas as influências dos diversos materiais e parâmetros utilizados na construção e as interações entre os mesmos. Um modelo em elementos finitos será desenvolvido, e, para validação do mesmo, comparações entre os padrões sonoros preditos por este e padrões sonoros reais serão realizadas.

2 – Revisão Bibliográfica

Não foi localizada nenhuma informação a respeito de um modelo que contemple o sistema constituído por todos os elementos que constituem o tambor como um todo. Os modelos desenvolvidos até o momento, representando os fenômenos envolvidos neste trabalho, abordam a membrana isoladamente.

Benade [1] e Strutt [4] apresentam modelos genéricos que contemplam a membrana isoladamente. Houmat [9] e Chongbin [12] desenvolveram pesquisas em modelos de elementos finitos, porém, apenas contemplaram a membrana. Hladky-Hennion [7,10] analisa a propagação de ondas sonoras em condutos. Cole III [6] estuda a vibração cascas cilíndricas submersas em fluido.

Desta forma, para a validação e calibração do modelo torna-se necessária a aquisição de padrões sonoros reais, a fim de se comparar os resultados obtidos numericamente.

Para uma percepção válida de uma onda sonora é indicada uma distância livre L , tal que:

$$L = \lambda / 2 \quad (\text{eq. 2.1})$$

onde λ é o comprimento de onda.

3 – Descrição dos parâmetros a serem estudados

Os instrumentos que serão foco principal deste estudo são os tambores utilizados em baterias acústicas. tratam-se de tambores cilíndricos, podendo ou não apresentar membranas em ambos os lados. A figura 3.1 mostra os componentes básicos de um tambor, e que serão considerados neste trabalho.

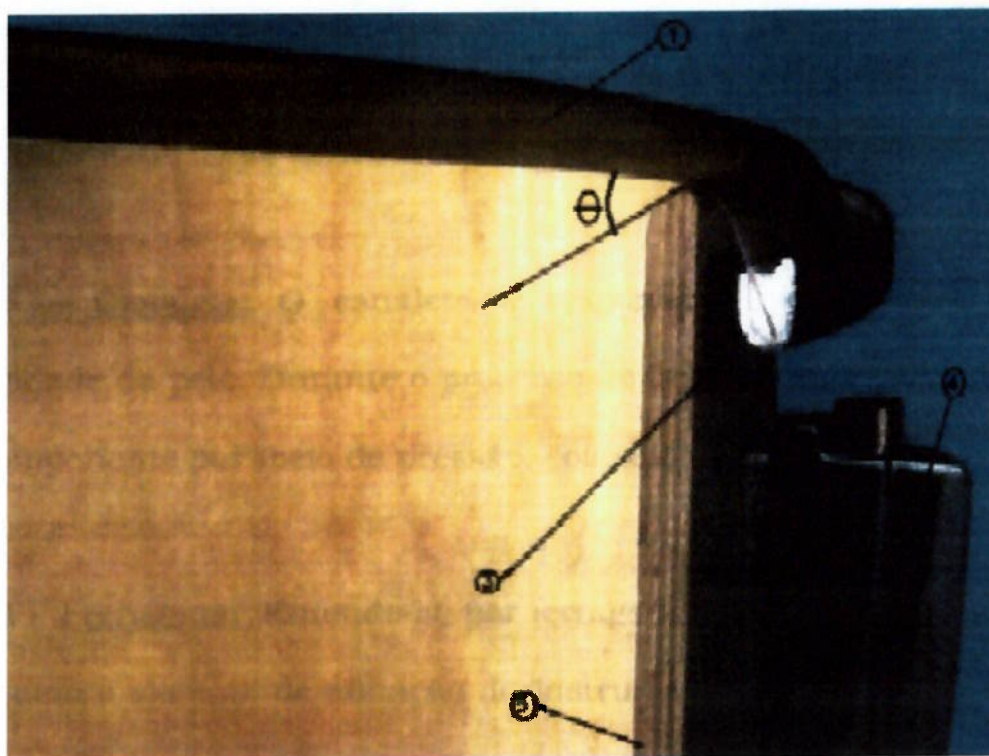


Fig. 3.1 – Componentes principais de um tambor

1 – Pele: A pele é constituída por uma membrana de material polimérico, com características isotrópicas e isodirecionais, o que garante a igualdade das tensões as quais ela está submetida em qualquer direção. A conformação inicial da pele, suas

dimensões, material, número de camadas e massas concentradas adicionais são os fatores principais deste componente.

2- Aro: Não representado na figura, o aro é o componente responsável por distribuir a tensão ao longo da membrana. O contato existente não é entre o aro e a pele, mas sim entre o aro e o canaleta. O aro também é responsável pelo alinhamento da pele com o casco do tambor (5). São fabricados por fundição ou estampagem, condição esta que muito influi na sonoridade final obtida pelo instrumento, já que este componente consiste em uma massa muito influente no sistema e sua rigidez é muito importante.

3- Canaleta: O canaleta é responsável por manter fixa a extremidade da pele. Durante o processo de fabricação, a pele é presa a este componente por meio de pressão, colagem ou conformação.

4- Ferragens: Entende-se por ferragens o conjunto de peças que constituem o sistema de afinação do instrumento, com exceção do aro. Estão contidos neste grupo as *canoas* de afinação, peças acopladas ao corpo do tambor e responsáveis pelo engaste dos parafusos de afinação, e os próprios parafusos de afinação (não representados na figura), os quais tracionam o aro, tracionando conseqüentemente a membrana. Estes componentes também adicionam uma massa significativa ao sistema.

5- Casco: O casco é o tambor propriamente dito. É construído de diferentes materiais: acrílico, aço, latão, fibra de papel, madeira maciça e, principalmente, laminados de madeira. Juntamente com (1), é responsável direto pela sonoridade obtida.

Os componentes (2), (3) e (4) podem ser considerados massas concentradas adicionadas ao casco.

Além destes componentes, ainda estão incluídos no sistema o respiro, que se trata de um orifício no casco de forma a permitir que o ar no interior deste se comunique com o ar externo, e o engaste do tambor, o qual sustentará o mesmo.

O engaste mais comum e o qual será considerado para esta simulação está mostrado na figura 3.2.

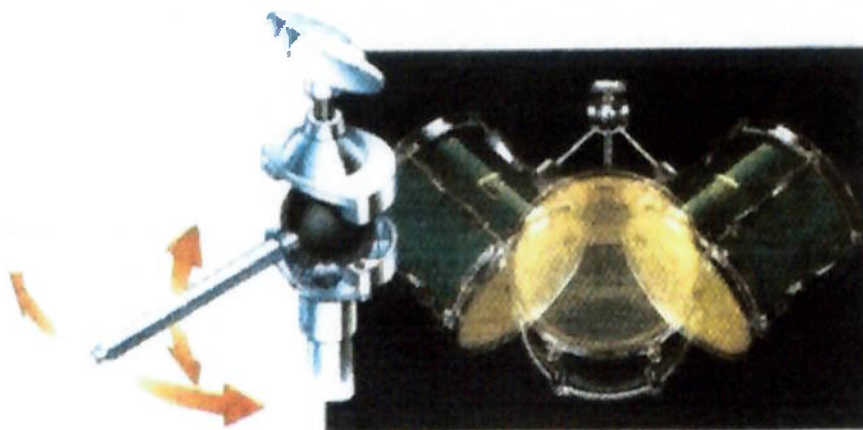


Fig. 3.2 – Engaste do tambor

Como visto acima, os principais parâmetros envolvidos no estudo das vibrações para os instrumentos dizem respeito à rigidez do sistema como um todo, associados às propriedades mecânicas dos componentes e dos materiais neles empregados. Porém, características geométricas também influem. De acordo com Leite [17] e Prak [13], um dos fatores mais importantes, e responsável pelo modo de vibrar das membranas é o ângulo da borda de contato com o casco e a pele (θ). Da mesma forma, diâmetro, comprimento e espessura do casco também são importantes.

4 – Modelagem de Elementos Finitos Desenvolvida

Para a criação o modelo de elementos finitos que representará o sistema real, será utilizado o software de análise e projeto ANSYS.

4.1. – Hipóteses e simplificações adotadas para a elaboração do modelo

As seguintes hipóteses e simplificações foram adotadas para a criação do modelo de elementos finitos:

1-) Os filmes poliméricos empregados na confecção de peles, apesar de buscarem características isodirecionais, apresentam uma certa variação de suas propriedades mecânicas de acordo com o sentido considerado na medição (sentido de máquina ou sentido transversal), sendo esta uma característica inerente aos polímeros. Contudo, para este trabalho, a não homogeneidade das propriedades devido a este fator será desconsiderada, adotando propriedades mecânicas equivalentes em qualquer direção do filme.

Esta aproximação pode ser considerada válida, pois, na prática, a pele é tensionada distintamente por cada parafuso de afinação de forma a se conseguir a mesma afinação ao longo de toda a membrana. Desta forma, tensões diferentes compensam propriedades não homogêneas.

No modelo elaborado, impondo tensões de mesma magnitude à todos os nós da membrana, e considerando a simplificação citada acima, as condições de equivalência de afinação ao longo da membrana, almejada na prática, é contemplada pelo modelo.

2-) Como já mencionado, o casco, na maioria dos instrumentos presentes no mercado, é constituído por diversas camadas de lâminas de madeira sobrepostas. O modelo não contemplará esta característica, apesar do ANSYS ser capaz de aceitá-la e processá-la.

O casco utilizado no modelo será constituído por uma lâmina única de mesma espessura do casco composto por várias lâminas. esta simplificação não afeta de forma significativa o resultado, já que a formação do casco por várias lâminas está relacionada ao processo de fabricação do mesmo.

Porém, não se deve ignorar o fato de que a rigidez do casco utilizado no modelo é ligeiramente maior do que o casco utilizado no instrumento real, considerando este fato na análise final dos resultados.

Para este elemento, as propriedades mecânicas distintas de acordo com o sentido do material (paralelo ou transversal ao veio da madeira) serão consideradas.

3-) O processo de fabricação da pele inclui uma etapa de conformação térmica do filme, de maneira à moldá-lo na forma necessária para sua fixação ao canaleta. A figura 4.1 mostra o esquema deste processo.

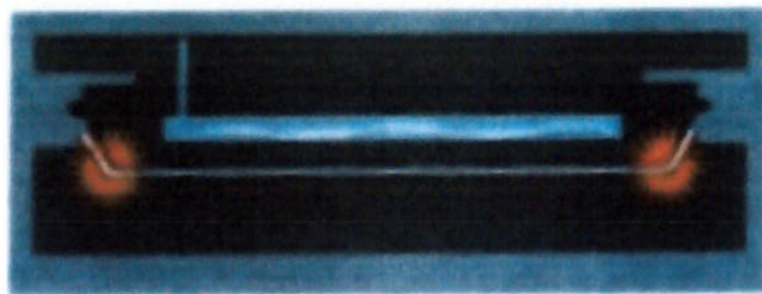


Fig. 4.1 – Processo térmico de conformação do filme polimérico

Durante este processo, o filme sofre alterações de suas propriedades mecânicas nas bordas devido à exposição a altas temperaturas (cerca de 120°C), tornando-se mais rígido e com maior dureza.

O modelo criado ignora esta alteração, tanto por motivos de ordem prática, como de ordem computacional. No caso real, a região que sofre o aquecimento mais intenso será a porção da pele que está engastada ao casco e entre o mesmo e o canaleta. Assim, esta região possui quase nenhuma participação no fenômeno estudado.

Do ponto de vista computacional, o ANSYS não possibilita a criação de um material cujas propriedades são variantes em relação a um eixo. Seria possível criar uma membrana com estas características se fosse criada uma membrana composta por regiões, cada uma com propriedades distintas, ou atribuir a cada nó temperaturas específicas e associá-las a diferentes propriedades mecânicas. Porém, devido à pouca importância destas variações, o aumento de complexidade do modelo não justifica as mudanças.

4-) Tanto o aro, como o canaleta, as ferragens e o casco estão submetidos a tensões. Desta forma, para este tipo de análise, estes componentes apresentam comportamento não-linear. Contudo, como a variação de rigidez devido a tensões destes

componentes face à variação de rigidez das membranas é insignificante, será admitido comportamento linear dos mesmos.

5-) O aro e o canaleta serão considerados como uma única peça, fixa à membrana. Os parafusos de afinação serão ignorados. E as canoas de afinação podem ser como peças fixas ao casco, de forma a representarem massas adicionais ao sistema. A inclusão ou não das canoas é um fato a ser estudado.

6-) Apesar do respiro no casco, o ar armazenado dentro do instrumento pode ser considerado como um sistema quase fechado, onde a renovação do fluido com o meio externo é muito pouca. Desta forma, com o uso do instrumento, o fluido no interior do casco absorve a energia transferida a o sistema pelo impacto, elevando sua temperatura, alterando suas propriedades.

Este aumento de temperatura, apesar de pequeno é significativo quando da utilização de microfones instalados no interior do casco, nos quais o aumento de temperatura interfere no circuito eletrônico do mesmo. Entretanto, no caso estudado, esta alteração na temperatura, e, conseqüentemente, nas propriedades acústicas do fluido é totalmente irrelevante.

Quaisquer outras casuais influências e modificações de caráter termodinâmico serão ignoradas no decorrer deste trabalho.

4.2. Modelos 2D X 3D

A elaboração de um modelo de elementos finitos deve levar em consideração a necessidade e a disponibilidade de recursos. O ideal é desenvolver um modelo o mais

simples possível, que possua acurácia, precisão e confiabilidade de resultados, dentro das limitações conhecidas.

Para o desenvolvimento deste modelo, ambas abordagens foram estudadas. Os seguintes tópicos foram levantados no confronto de uma abordagem ou outra:

- Considerando-se malhas de tamanhos e refinamento equivalentes, o modelo 3D possui um número maior de elementos. Fato este que exige maior tempo de processamento e capacidade computacional.
- Malhas que contém muitos elementos podem também apresentar problemas de convergência.
- Em um modelo 3D é mais difícil o mapeamento e o refinamento da malha. Também torna-se mais complicada a não formação de elementos degenerados (piramidais). Em um modelo 2D, elementos degenerados (triangulares) são facilmente eliminados por um mapeamento e controle na criação da malha.
- No caso específico desta análise, um modelo 2D não é capaz de prever certos harmônicos da membrana ou modos de vibração do conjunto. Da mesma forma também não é capaz de determinar a trajetória espacial das frentes de onda, e, conseqüentemente, obter um gradiente de pressão mais acurado.
- Da mesma forma que o exposto no tópico anterior, é válida as relações citadas para um modelo 2D axissimétrico em relação a um modelo 2D pleno.

Analisando-se todos os tópicos expostos, optou-se pelo uso de um modelo 2D axissimétrico, baseado nos seguintes fatos:

- De acordo com Strutt [4], para uma membrana, apenas os modos de vibrar de ordem igual ou superior à 4, deixam de ser axissimétricos e capazes de serem

representados por um plano. Desta forma, os principais efeitos vibracionais são possíveis de serem preditos pelo modelo, não havendo perda de resultados, já que ordens superiores à 4 possuem influência insignificante face às ordens principais e restrições da modelagem.

- Devido à capacidade computacional exigida pelo modelo 2D estar de acordo com os recursos disponíveis.
- O tempo de solução do modelo ser adequado e possível.
- A análise contempla os principais parâmetros a serem investigados e possibilita a calibração do modelo de elementos finitos a partir dos dados obtidos experimentalmente.
- Como fato negativo agregado a esta escolha, torna-se inviável a inclusão no modelo das canoas de afinação e do engaste.

4.3 – Descrição do modelo de elementos finitos desenvolvido

O ANSYS já possui elementos específicos desenvolvidos para análise acústica. A análise desenvolvida pelo ANSYS envolve o modelamento do meio fluido, no caso, o ar no interior e ao redor do casco, e da estrutura (casco, membranas, ferragens). Resultados típicos obtidos são a distribuição de pressão no fluido, o gradiente de pressão, velocidade sonora, o volume de pressão sonora, assim como a dispersão, difração, transmissão e atenuação das ondas sonoras. o ANSYS é capaz de realizar uma análise acoplada, levando em consideração a interação entre fluido e estrutura, a qual será utilizada neste trabalho.

O ANSYS considera que o fluido é compressível, mas permite apenas pequenas variações de pressão em relação à pressão efetiva. Assume também que não ocorre o escoamento do fluido e a viscosidade do mesmo não possui efeitos dissipativos.

O ANSYS possui três tipos de elementos de acústica a serem empregados:

- Elemento acústico de fluido: podendo ser 2D ou 3D (FLUID29/30 – estrutura ausente (KEYOPT(2)=1)).
- Elemento acústico de interação fluido-estrutura: elemento de fluido em contato com a estrutura, possibilitando a análise acoplada (FLUID29/30 – estrutura presente (KEYOPT(2)=0)).
- Elemento acústico de infinito: elemento acústico de fluido que absorve as ondas de pressão, simulando os efeitos de dispersão em um domínio que se estende dos últimos elementos de fluido até o infinito. A geometria deste elemento deve ser circular (axissimétrica ou não), para o caso 2D ou esférica, para o caso 3D (FLUID129/130).

As figuras 4.2 e 4.3 apresentam um esquema do modo em que os elementos estão distribuídos:

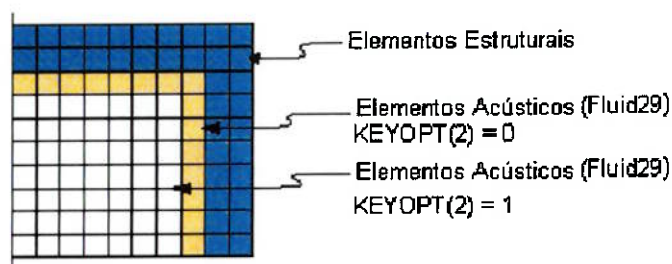


Fig. 4.2 – Esquema dos elementos utilizados no modelo

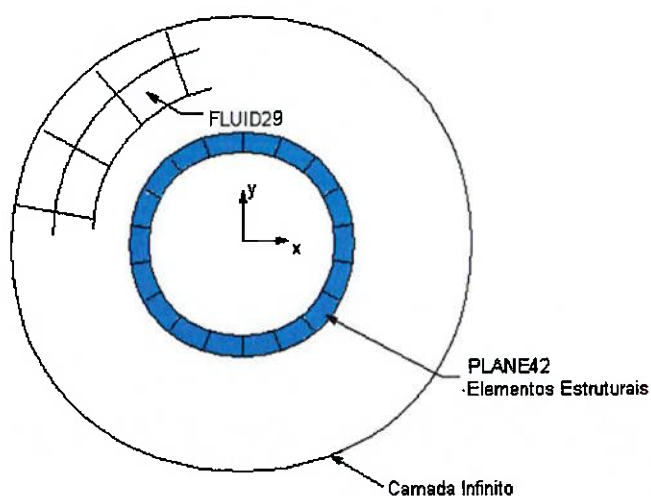


Fig. 4.3 – Esquema dos elementos utilizados no modelo (II)

O raio da esfera que simula o fluido envolvendo o tambor é determinado pela equação 2.1. O comprimento de onda utilizado é o maior comprimento de onda que o tambor estudado é capaz de gerar.

Será utilizado o valor obtido pela equação 2.1, apesar de o ANSYS permitir um raio de no mínimo 0.2λ .

O modelo bidimensional e axissimétrico construído no ANSYS é mostrado nas figuras 4.4 e 4.5, nas quais é possível também a visualização da malha mapeada criada, a fim de minimizar o esforço computacional e a possibilitar a formação de uma malha mais refinada nas regiões de interesse (membranas, casco e proximidades).

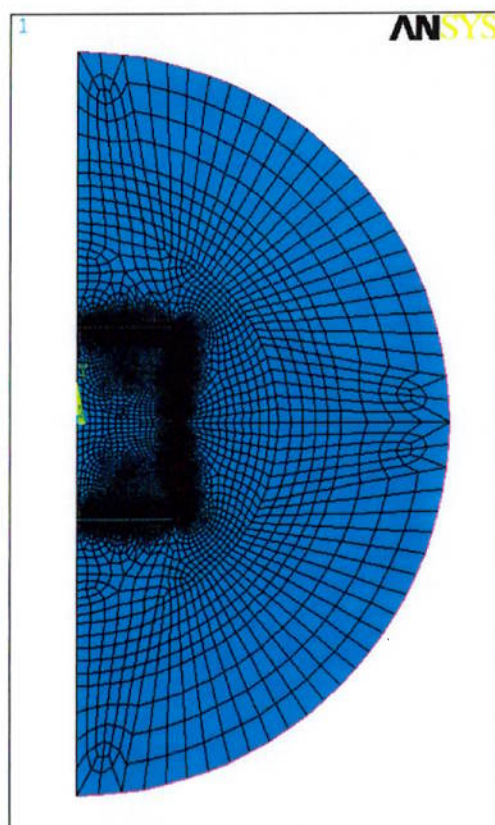


Fig. 4.4 – Esquema bidimensional e axissimétrico do modelo construído no ANSYS

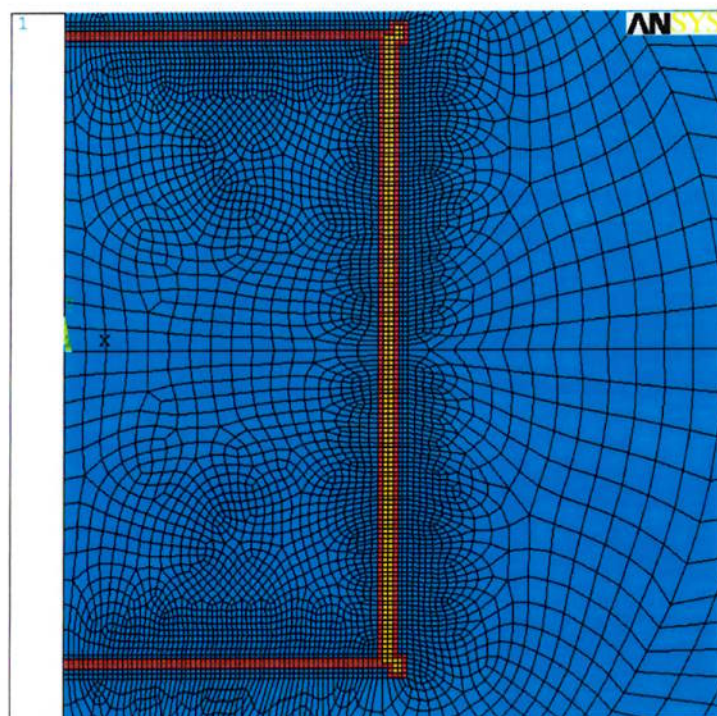


Fig. 4.5 – Detalhe da figura 4.4 (Estrutura)

Para a modelagem das membranas, o elemento utilizado foi um elemento de casca, próprio para análises harmônicas (SHELL61). O casco e o aro foram modelados através do elemento estrutural plano quadrilátero de 4 nós (PLANE42).

5 – Calibração do modelo de elementos finitos a partir dos dados obtidos experimentalmente

Para a calibração do modelo de elementos finitos desenvolvido, dados experimentais foram obtidos através da gravação de padrões sonoros reais.

Para tanto, os seguintes equipamentos e recursos foram utilizados:

- A gravação foi efetuada em uma sala tratada acusticamente e destinada especialmente para este uso. A sala possui dimensões 4,28 x 5,60 x 3,10 m. O instrumento foi posicionado em seu centro a fim de minimizar a influência de reflexões das paredes. Quaisquer outras fontes que pudessem interferir na aquisição dos padrões sonoros foram retiradas da sala ou isoladas.
- O instrumento utilizado foi um ton-ton Mapex Pro-Venus, de altura 10,0 pol. e diâmetro 10,0 pol.. O casco é construído em *Red Maple (Acer Rubrum L.)*, formado por três lâminas coladas, totalizando uma espessura de 4,2 mm. Possui canoas de afinação independentes para cada membrana. Os aros são confeccionados em aço forjado.
- As membranas utilizadas foram as seguintes:
 - pele de ataque (superior): pele RMV Standart, diâmetro de 10,0 pol., espessura de 125 μm . Material : Melinex 539[®].
 - pele de resposta (inferior): Pele Evans Genera Resonant, diâmetro de 10,0 pol., espessura de 50 μm . Material: Mylar A[®].

- Através de um relógio comparador *TAMA tensor watch*, garantiu-se que a tensão fosse a mesma em todos os pontos de cada membrana.
- Para a gravação dos padrões sonoros, utilizou-se três microfones AKG D3500, posicionados de acordo com a figura 5.1 e a tabela 5.1.

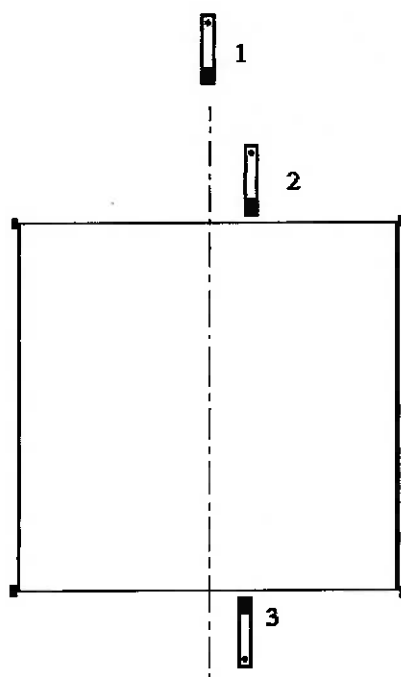


Fig. 5.1 – Disposição dos microfones para aquisição de dados experimentais

Tab. 5.1 – Posicionamento dos microfones

Microfone	Posicionamento vertical	Posicionamento horizontal
1	0.3 m acima da membrana superior	Coincidente com a linha de centro do instrumento
2	0.012 m acima da membrana superior	Afastado radialmente 0.03 m da linha de centro
3	0.012 m abaixo da membrana inferior	Afastado radialmente 0.03 m da linha de centro

- Utilizou-se o software ProTools e seus suplementos para a aquisição e tratamento dos sinais captados.

As gravações efetuadas estão armazenadas em arquivos específicos deste software.

5.1 – Ajuste de parâmetros no modelo de elementos finitos a fim de calibração

Para a validação do modelo de elementos finitos, todos os parâmetros e condições envolvidos na aquisição dos padrões sonoros foram incorporados da maneira mais fiel possível ao mesmo.

As seguintes propriedades dos materiais foram empregadas no modelo:

Aro:

Material: Aço Forjado

$$E = 210,0 \text{ GPa}$$

$$\nu = 0,30$$

$$\rho = 7800,0 \text{ kg/m}^3$$

Casco:

Material: Red Maple (*Acer Rubrum L.*)

$$E_{\text{radial}} = 4,40 \text{ GPa}$$

$$E_{\text{axial}} = 11,40 \text{ GPa}$$

$$G_{\text{radial}} = 2,60 \text{ GPa}$$

$$G_{\text{axial}} = 6,75 \text{ GPa}$$

$$\rho = 610,0 \text{ kg/m}^3$$

$$\beta = 0,30$$

Pele de Ataque (Superior):

Material: Melinex 539[®]

$$E = 230,0 \text{ MPa}$$

$$t = 125 \text{ } \mu\text{m}$$

$$\rho = 1400,0 \text{ kg/m}^3$$

Pele de Resposta (Inferior):

Material: Mylar D[®]

$$E = 200,0 \text{ MPa}$$

$$t = 75 \text{ } \mu\text{m}$$

$$\rho = 1400,0 \text{ kg/m}^3$$

Ar:

$$\rho = 1,29 \text{ kg/m}^3$$

$$v = 308,0 \text{ m/s}$$

O modelo será excitado com uma pressão aplicada numa região específica da membrana superior, no caso, no elemento próximo ao eixo de simetria.

Para a calibração do modelo, os parâmetros a serem modificados são principalmente a rigidez das membranas e a força de excitação aplicada à membrana superior. Também podem ser utilizados como fatores de calibração a rigidez do casco e dos aros, a velocidade sonora no ar e os respectivos amortecimentos atribuídos a cada material.

Como resultados de calibração, serão considerados os valores de pressão sonora captados pelos microfones para cada faixa de frequência e a frequência em que ocorre a melhor resposta do instrumento (maior pressão sonora).

As tabelas 5.2 a 5.4 confrontam os valores obtidos do modelo calibrado com os valores medidos.

Tab. 5.2 – Comparação entre valores de calibração – microfone 1

Microfone 1 - Valores de pressão sonora (dB)							
Frequência (Hz)	20	400	1200	3000	7000	12000	20000
Medido	24,8	26,7	39,4	61,8	50,2	10,8	3,5
Simulado	26,11	22,14	22,28	57,95	47,12	33,43	0
Desvio (%)	5,28%	17,08%	43,45%	6,23%	6,14%	209,54%	-

Tab. 5.3 – Comparação entre valores de calibração – microfone 2

Microfone 2 - Valores de pressão sonora (dB)							
Frequência (Hz)	20	400	1200	3000	7000	12000	20000
Medido	24,8	28,4	40,5	62,1	52,1	14,7	6,1
Simulado	27,33	31,27	43,86	60,55	53,15	43,72	35,14
Desvio (%)	10,20%	10,11%	8,30%	2,50%	2,02%	197,41%	476,07%

Tab. 5.4 – Comparação entre valores de calibração – microfone 3

Microfone 3 - Valores de pressão sonora (dB)							
Frequência (Hz)	20	400	1200	3000	7000	12000	20000
Medido	20,4	24,8	46,2	54,8	48,5	14,5	6,1
Simulado	23,23	26,97	43,11	51,92	24,27	44,89	45,22
Desvio (%)	13,87%	8,75%	6,69%	5,26%	49,96%	209,59%	641,31%

Comparando os valores mostrados nas tabelas acima, vemos que o modelo apresenta uma boa correlação com os valores reais no que diz respeito à pressão sonora nos pontos medidos. O desvio exagerado nas altas frequências deve-se ao fato dos microfones utilizados nas gravações serem destinados ao uso em frequências médias e médio-graves. Ocorrem também, na simulação, valores acentuados para frequências

agudas (12 kHz e 20 kHz) devido à excitação do conjunto aro/canalete, de rigidez muito superior ao casco e às membranas.

Em relação a frequência na qual ocorrem os picos de pressão sonora, o modelo não corresponde fielmente aos valores experimentais, porém, a magnitude da diferença existente entre estes valores não compromete os resultados obtidos. Nos padrões medidos, a máxima pressão ocorre a 2650 Hz, no modelo, a respectiva frequência é em torno de 3200 Hz.

Esta discrepância na resposta de excitação do modelo para a resposta de excitação do instrumento deve-se à diferença de rigidez do modelo para o instrumento real. A utilização de um modelo 2D axissimétrico implica no aumento da rigidez do sistema à medida que ocorre a consideração simétrica de deformações e de esforços e a adição de restrições de graus de liberdade.

6 – Estudo paramétrico – Influência do material do casco

De posse do modelo calibrado, é possível utilizá-lo para averiguar a importância de cada parâmetro no tambor. Para isto, um único parâmetro será alterado, e analisado. Todos os demais parâmetros, assim como as cargas e condições de contorno permanecerão inalteradas.

Para um primeiro grupo de estudo dos parâmetros que influenciam a performance do instrumento serão considerados diferentes materiais para a confecção do casco, no caso, serão estudados diferentes tipos de madeira.

A tabela 6.1 resume as propriedades mecânicas de cada madeira utilizada nas análises.

Tab. 6.1 – Propriedades Mecânicas das Madeiras

Madeira	ρ (kg/m ³)	E axial (GPa)	E radial (GPa)	G axial (GPa)	G radial (GPa)	β (-)
1- Red Maple	610,0	11,40	4,40	6,75	2,60	0,30
2- Silver maple	530,0	7,90	2,63	4,80	1,56	0,30
3- Sugar Maple	710,0	12,60	5,47	7,46	3,24	0,35
4- Birch	690,0	13,90	6,74	8,22	2,58	0,20
5- Mogno Africano	480,0	9,58	3,54	5,80	2,09	0,22
6- Spruce	450,0	10,50	3,40	6,21	2,00	0,25
7- Red Oak	750,0	15,70	6,60	10,00	3,91	0,35
8- Redwood	450,0	9,33	1,39	5,70	1,24	0,30

6.1 – Caso de Referência – Red Maple (*Acer Rubrum L.*)

O primeiro caso a ser estudado diz respeito ao instrumento utilizado como referência para a aquisição dos parâmetros reais.

A figura 6.1 mostra a pressão sonora obtida para cada faixa de frequência analisada, considerando a posição dos microfones 1 a 3. A tabela 6.2 contém os valores obtidos.

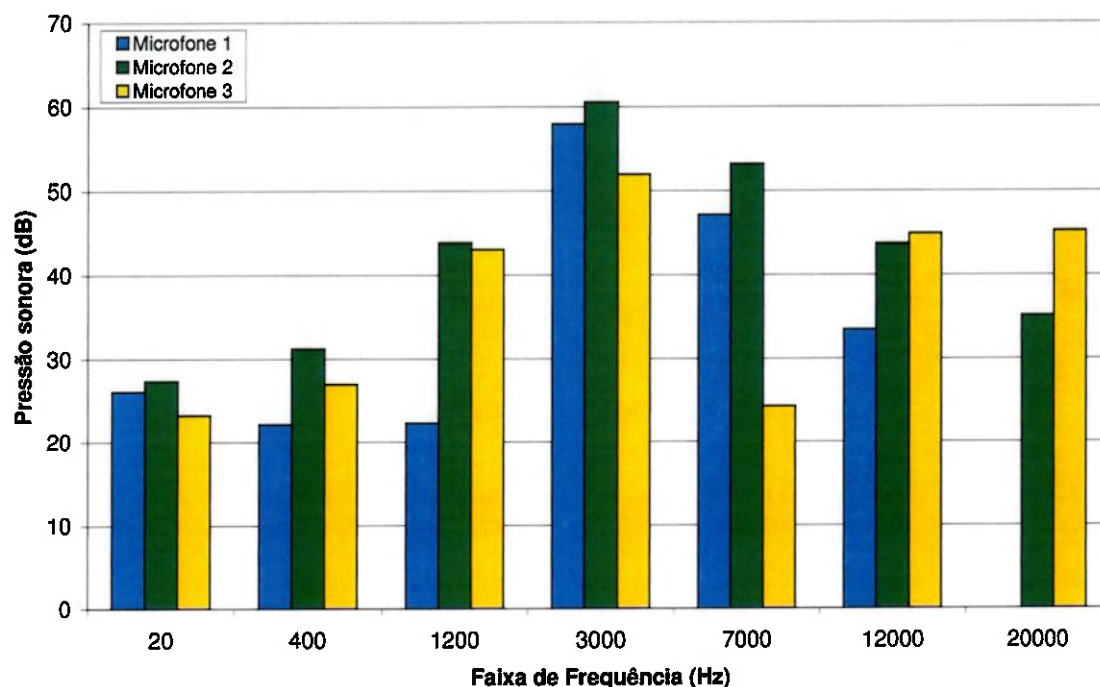


Fig. 6.1 – Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Red Maple)

Tab. 6.2 – Pressão sonora por faixa de frequência (Red Maple)

f (Hz)	P1 (dB)	P2 (dB)	P3 (dB)
20	26,11	27,33	23,23
400	22,14	31,27	26,97
1200	22,28	43,86	43,11
3000	57,95	60,55	51,92
7000	47,12	53,15	24,27
12000	33,43	43,72	44,89
20000	0,00	35,14	45,22

As figuras 6.2 a 6.8 mostram a pressão ao longo de todo o fluido para cada faixa de frequência. A partir destas figuras é possível observar a formação e o comportamento das ondas sonoras, assim como a característica do som captado por um ouvinte num ponto infinito, ou seja, à uma distância maior do que 0,5 m.

Os valores apresentados nas figuras estão em Pa, considerando uma pressão de referência de 20 μ Pa.

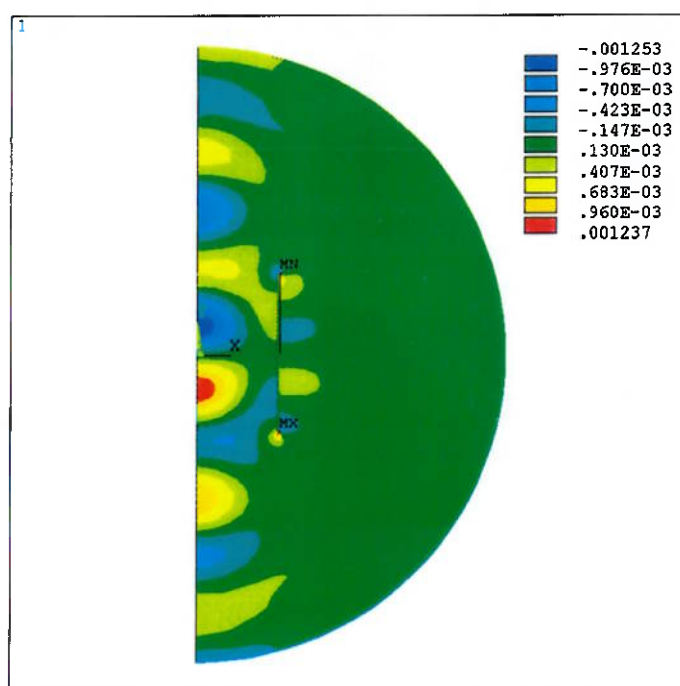


Fig. 6.2 – Mapa de pressão – 20 Hz (Red Maple)

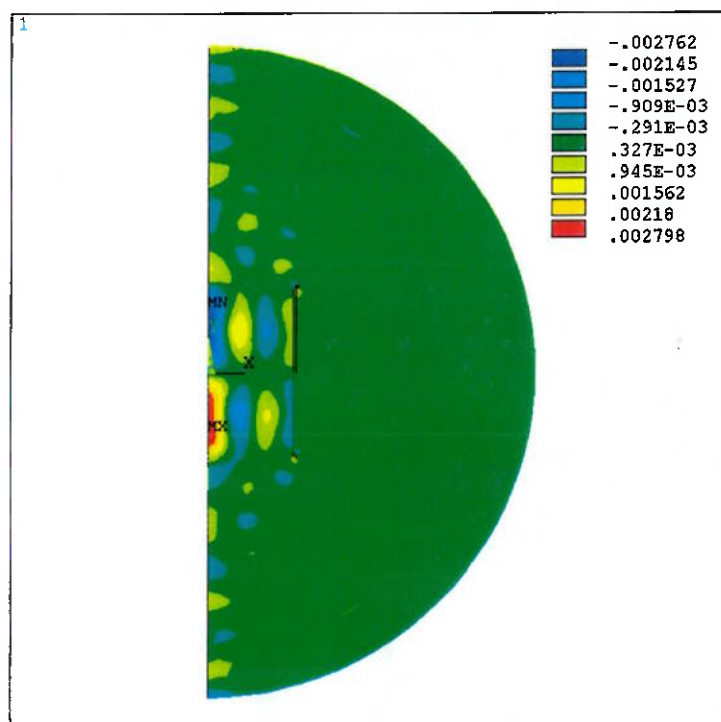


Fig. 6.3 – Mapa de pressão – 400 Hz (Red Maple)

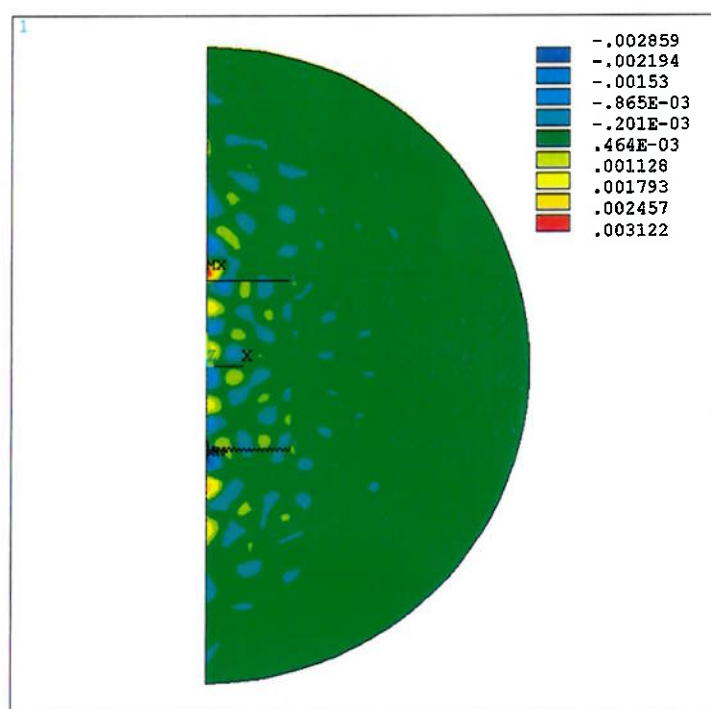


Fig. 6.4 – Mapa de pressão – 1200 Hz (Red Maple)

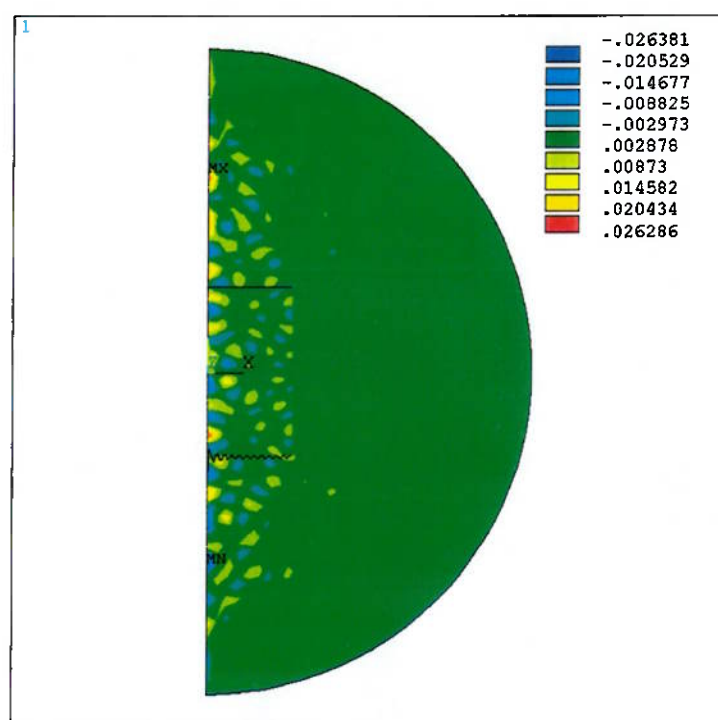


Fig. 6.5 – Mapa de pressão – 3000 Hz (Red Maple)

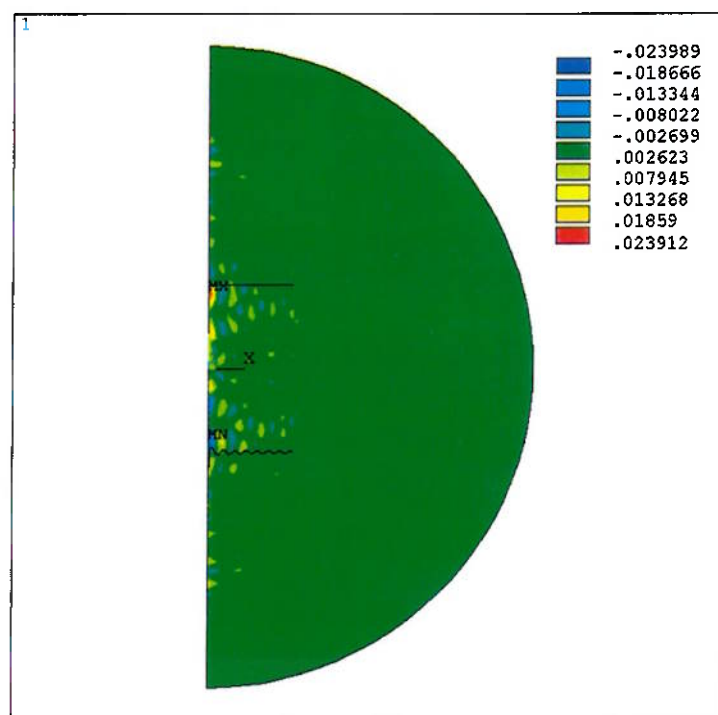


Fig. 6.6 – Mapa de pressão – 7000 Hz (Red Maple)

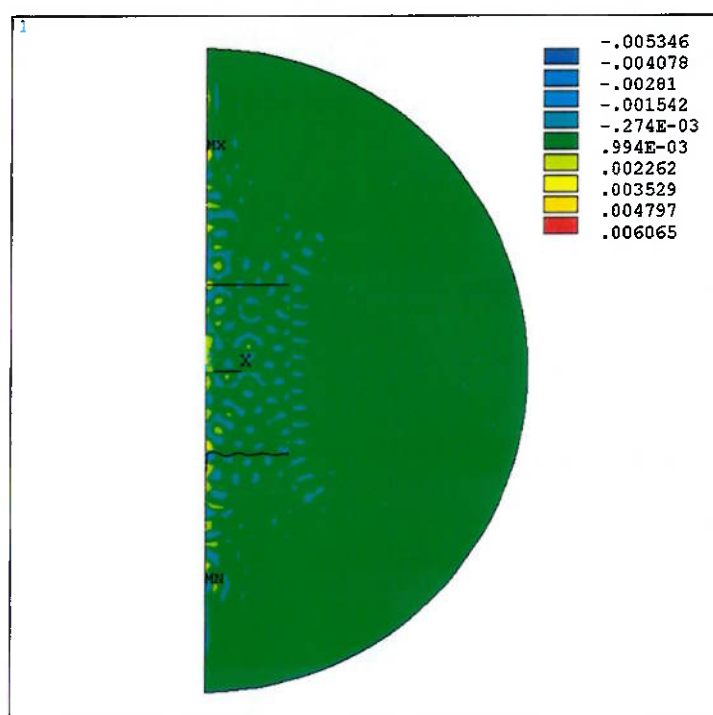


Fig. 6.7 – Mapa de pressão – 12000 Hz (Red Maple)

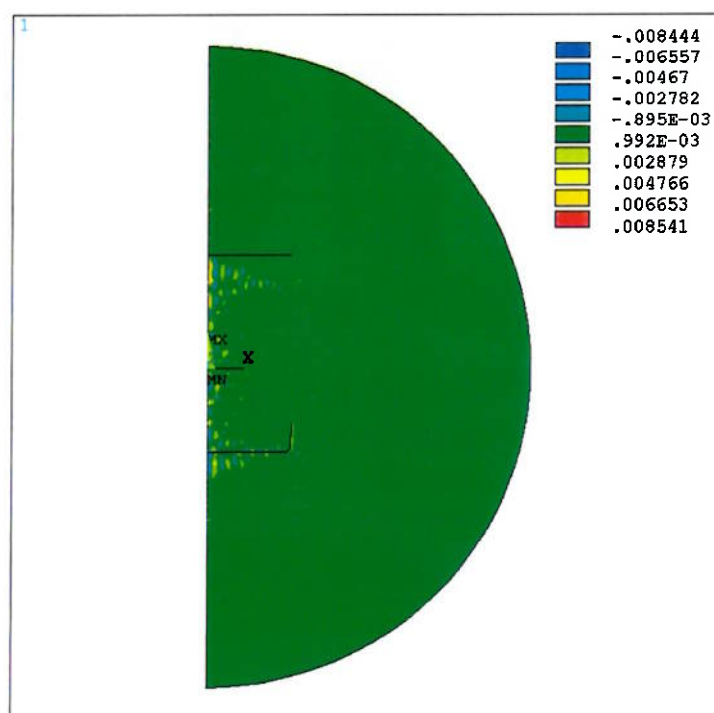


Fig. 6.8 – Mapa de pressão – 20000 Hz (Red Maple)

6.2 – Silver Maple (*Acer Saccharinum L.*)

A figura 6.9 mostra a pressão sonora obtida para cada faixa de frequência analisada, considerando a posição dos microfones 1 a 3. A tabela 6.3 contém os valores obtidos.

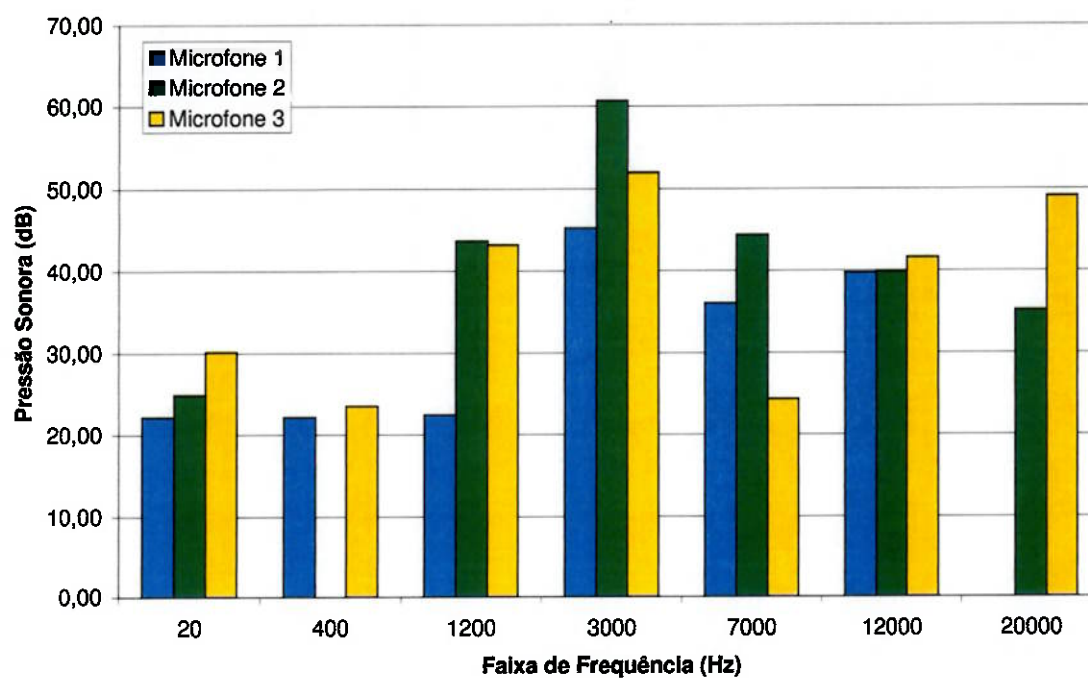


Fig. 6.9 – Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Silver Maple)

Tab. 6.3 – Pressão sonora por faixa de frequência (Silver Maple)

f (Hz)	P1 (dB)	P2 (dB)	P3 (dB)
20	22,18	24,91	30,16
400	22,18	0,00	23,55
1200	22,44	43,67	43,19
3000	45,23	60,63	52,00
7000	36,06	44,39	24,38
12000	39,78	39,91	41,67
20000	0,00	35,22	49,13

6.3 - Sugar Maple (*Acer Saccharum*)

A figura 6.10 mostra a pressão sonora obtida para cada faixa de frequência analisada, considerando a posição dos microfones 1 a 3. A tabela 6.4 contém os valores obtidos.

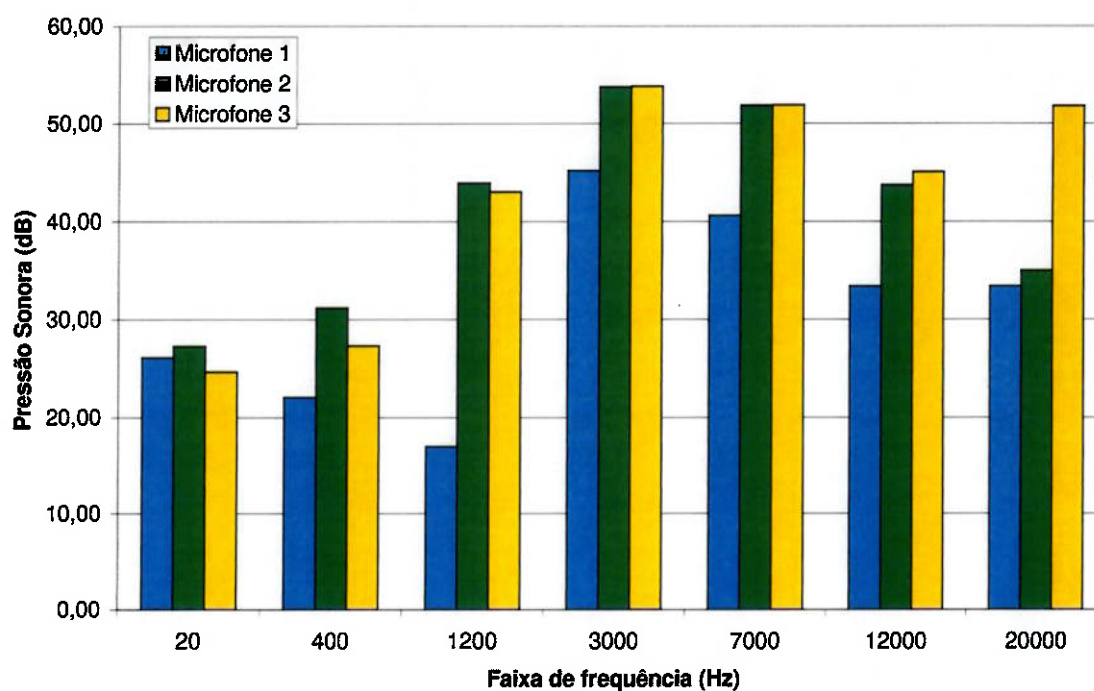


Fig. 6.10 – Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Sugar Maple)

Tab. 6.4 – Pressão sonora por faixa de frequência (Sugar Maple)

f (Hz)	P1 (dB)	P2 (dB)	P3 (dB)
20	26,13	27,29	24,65
400	22,11	31,19	27,31
1200	16,96	43,89	42,98
3000	45,18	53,82	53,87
7000	40,63	51,91	51,95
12000	33,44	43,69	45,03
20000	33,44	35,04	51,84

6.4 – Birch (*Betula Alleghaniensis*)

A figura 6.11 mostra a pressão sonora obtida para cada faixa de frequência analisada, considerando a posição dos microfones 1 a 3. A tabela 6.5 contém os valores obtidos.

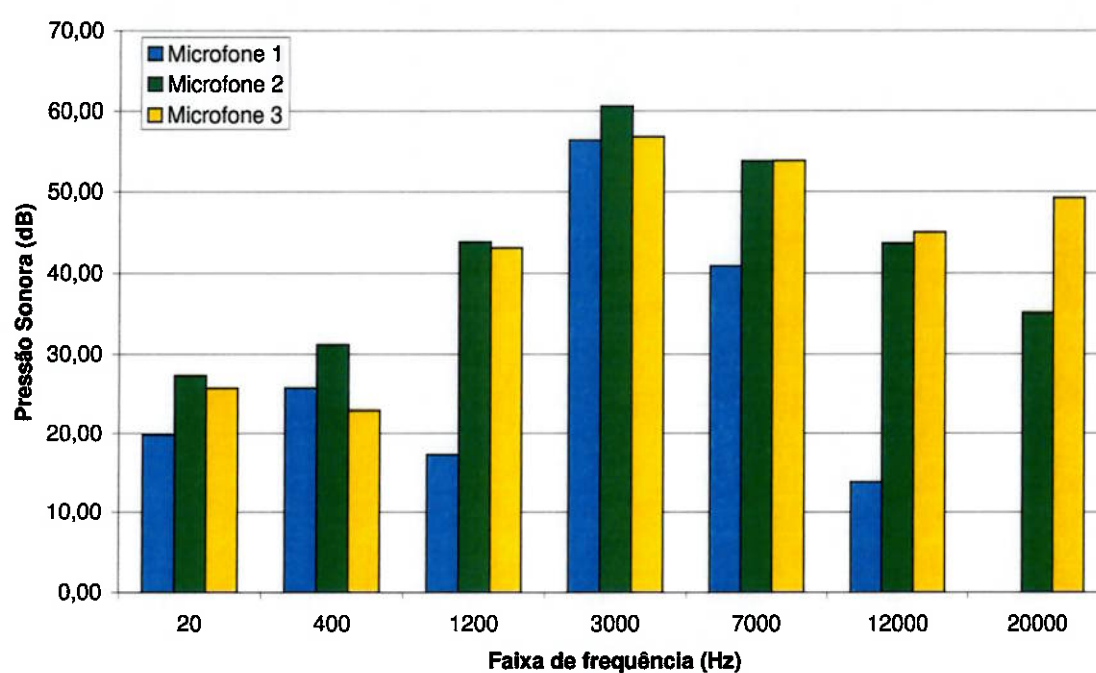


Fig. 6.11 – Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Birch)

Tab. 6.5 – Pressão sonora por faixa de frequência (Birch)

f (Hz)	P1 (dB)	P2 (dB)	P3 (dB)
20	19,78	27,29	25,67
400	25,73	31,17	22,89
1200	17,27	43,86	43,14
3000	56,40	60,57	56,82
7000	40,89	53,83	53,87
12000	13,83	43,69	45,03
20000	0,00	35,12	49,29

6.5 – Mogno Africano (*Khaya ivorensis*)

A figura 6.12 mostra a pressão sonora obtida para cada faixa de frequência analisada, considerando a posição dos microfones 1 a 3. A tabela 6.6 contém os valores obtidos.

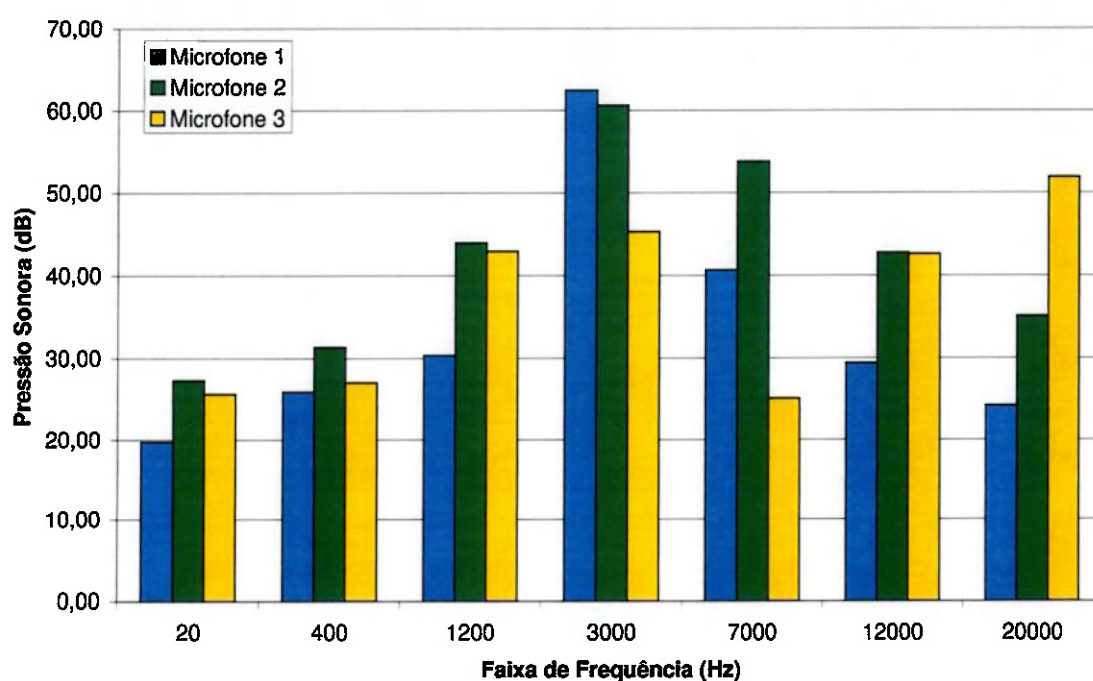


Fig. 6.12 – Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Mogno Africano)

Tab. 6.6 – Pressão sonora por faixa de frequência (Mogno Africano)

f (Hz)	P1 (dB)	P2 (dB)	P3 (dB)
20	19,78	27,31	25,58
400	25,85	31,36	26,99
1200	30,36	43,95	42,91
3000	62,47	60,62	45,27
7000	40,67	53,87	25,03
12000	29,40	42,73	42,57
20000	24,14	35,19	51,91

6.6 – Spruce (*Picea rubens*)

A figura 6.13 mostra a pressão sonora obtida para cada faixa de frequência analisada, considerando a posição dos microfones 1 a 3. A tabela 6.7 contém os valores obtidos.

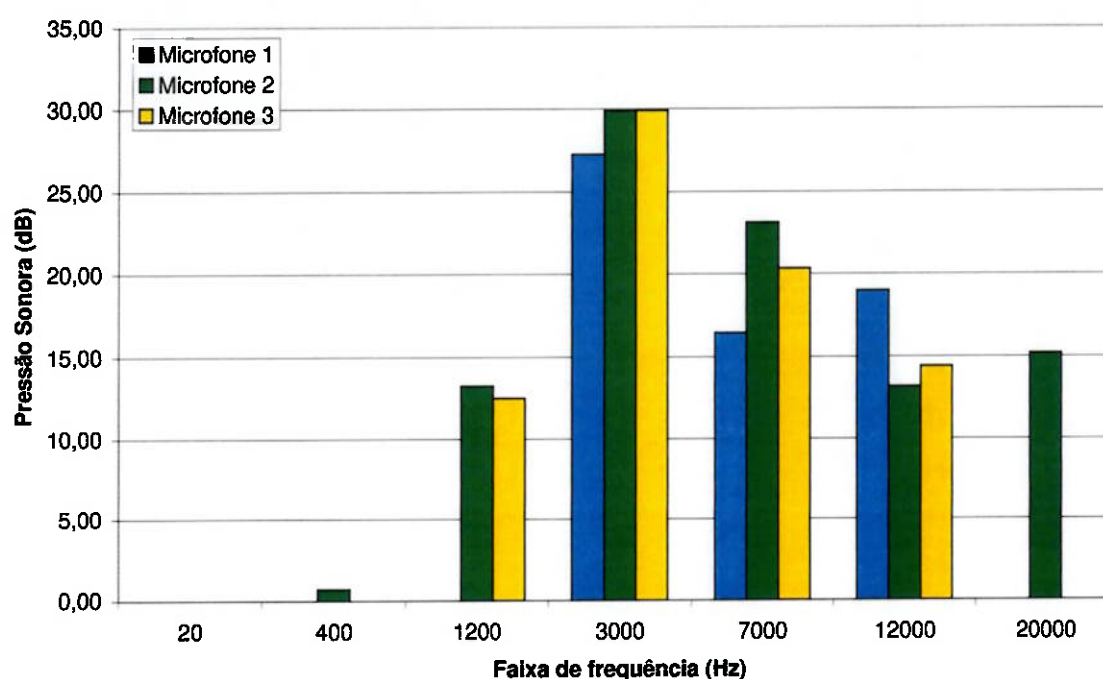


Fig. 6.13 – Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Spruce)

Tab. 6.7 – Pressão sonora por faixa de frequência (Spruce)

f (Hz)	P1 (dB)	P2 (dB)	P3 (dB)
20	0,00	0,00	0,00
400	0,00	0,67	0,00
1200	0,00	13,24	12,48
3000	27,27	29,91	29,94
7000	16,46	23,14	20,34
12000	18,99	13,16	14,40
20000	0,00	15,19	0,00

6.7 – Red Oak (*Quercus falcata*)

A figura 6.14 mostra a pressão sonora obtida para cada faixa de frequência analisada, considerando a posição dos microfones 1 a 3. A tabela 6.8 contém os valores obtidos.

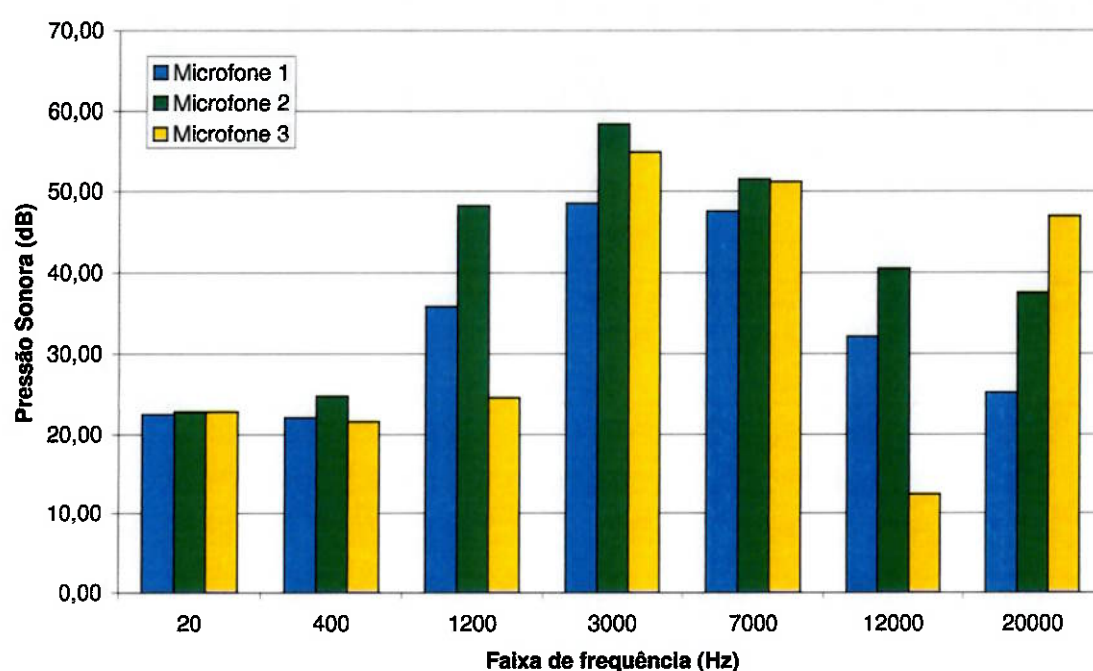


Fig. 6.14 – Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Red Oak)

Tab. 6.8 – Pressão sonora por faixa de frequência (Red Oak)

f (Hz)	P1 (dB)	P2 (dB)	P3 (dB)
20	22,50	22,80	22,80
400	22,11	24,70	21,60
1200	35,80	48,21	24,50
3000	48,54	58,41	54,87
7000	47,57	51,54	51,24
12000	32,14	40,50	12,40
20000	25,14	37,51	46,95

6.8 – Redwood (*Sequoia sempervirens*)

A figura 6.15 mostra a pressão sonora obtida para cada faixa de frequência analisada, considerando a posição dos microfones 1 a 3. A tabela 6.9 contém os valores obtidos.

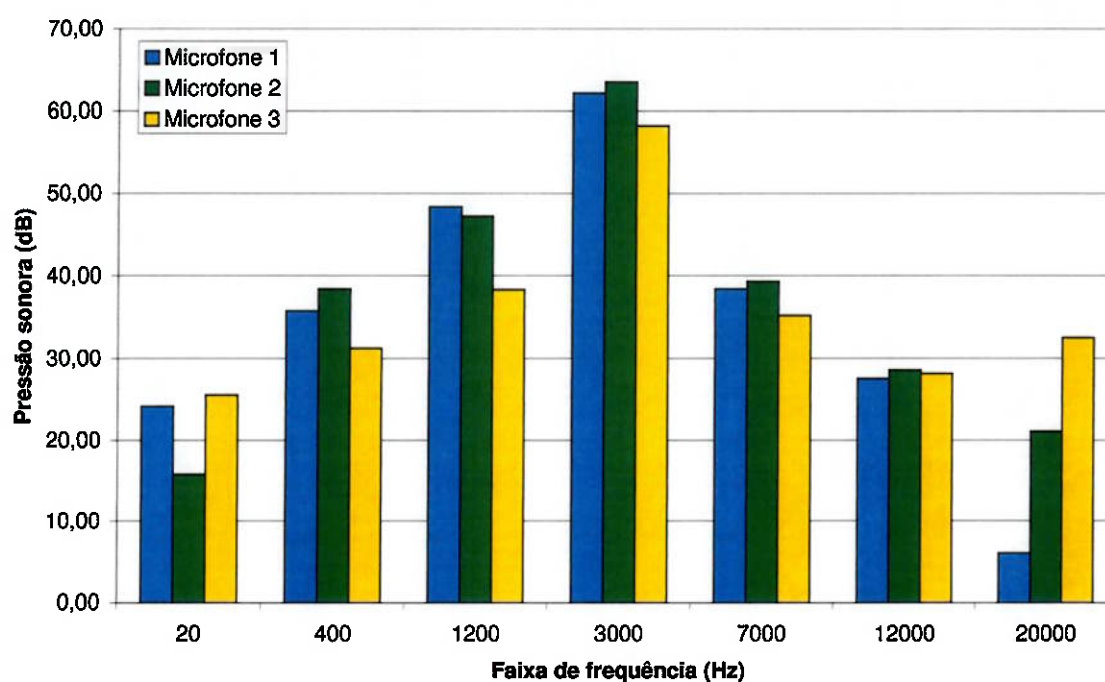


Fig. 6.15 – Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Redwood)

Tab. 6.9 – Pressão sonora por faixa de frequência (Redwood)

f (Hz)	P1 (dB)	P2 (dB)	P3 (dB)
20	24,12	15,80	25,47
400	35,81	38,42	31,24
1200	48,32	47,21	38,29
3000	62,15	63,50	58,20
7000	38,40	39,28	35,28
12000	27,51	28,54	28,12
20000	6,00	21,08	32,54

6.9 – Comparação entre os diversos tipos de madeira

Com base nos resultados obtidos nos itens 6.1 a 6.8, pode-se determinar a influência de cada tipo de madeira na performance do instrumento.

As figuras 6.16 e 6.17 a tabela 6.10 mostram, para cada madeira, a frequência de máxima excitação do instrumento (frequência na qual se obtém maior pressão sonora) e a respectiva pressão sonora gerada.

Tab. 6.10 – Comparação entre madeiras

Madeira	f (Hz)	Pmax (dB)
1- Red Maple	3180	72,92
2- Silver maple	3060	69,99
3- Sugar Maple	4270	62,08
4- Birch	4510	63,48
5- Mogno Africano	3410	64,65
6- Spruce	4100	52,49
7- Red Oak	4640	65,24
8- Redwood	2760	64,78

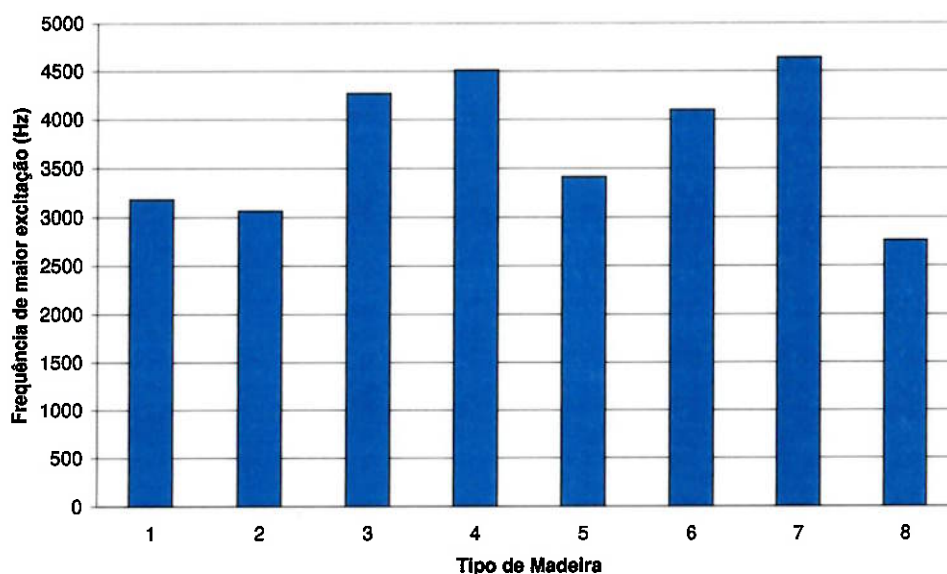


Fig. 6.16 – Comparação entre madeiras – frequência de maior excitação

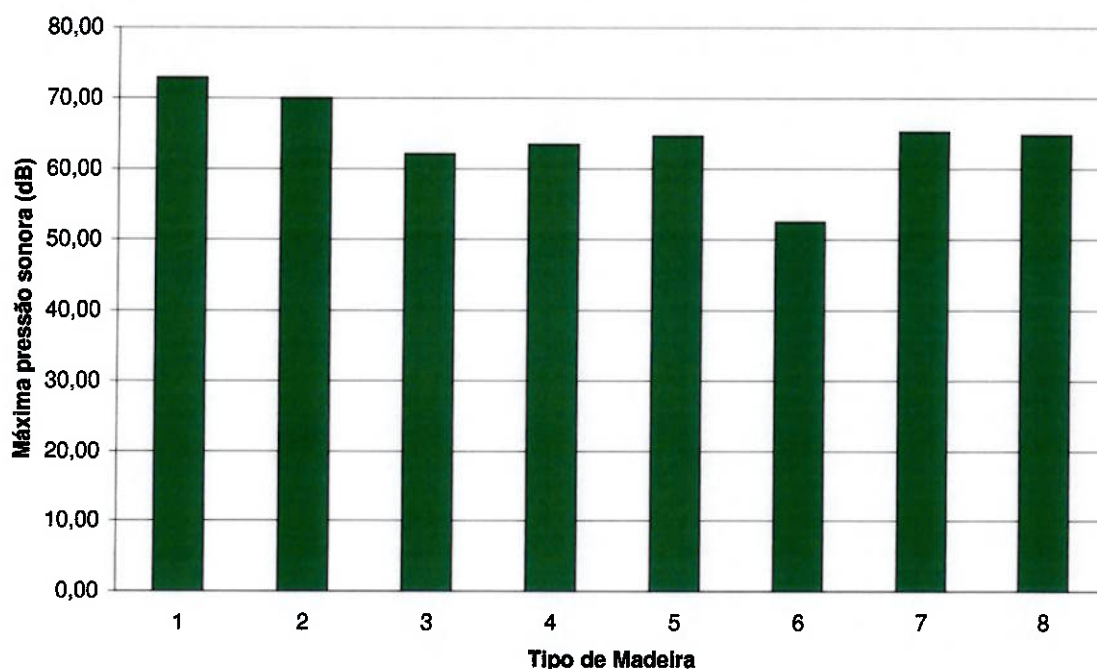


Fig. 6.17 – Comparação entre madeiras – pressão sonora máxima

Pelas figuras 6.1 a 6.17, pode-se concluir que, dentre as madeiras analisadas:

- As duas variedades de Maple mais utilizadas pelo mercado, o Red Maple e o Silver Maple são as madeiras que produzem um maior volume sonoro, fato este comprovado pelos maiores valores de pressão encontrados e por uma das menores diferenças entre os valores obtidos para os microfones 1 e 2.
- O Spruce mostrou-se o material de características sonoras mais pobres para esta aplicação. Dentre as madeiras estudadas é a que possui menor volume e menor riqueza na resposta à frequências de excitação distintas. Pela figura 6.13 e pela tabela 6.7 é possível notar a inexistência de resposta a baixas frequências.
- A membrana é o componente de maior influência na frequência de máxima excitação do instrumento, já que possui a menor rigidez.

Porém, considerando as peles com a mesma rigidez, como foi estudado neste trabalho, cada madeira responderá com uma frequência distinta próxima ao valor determinado pela membrana, atribuindo comparativamente, características sonoras mais graves ou agudas. O Redwood produzirá padrões sonoros com características mais graves, ou seja, possui a menor frequência de excitação. O Birch e o Sugar Maple respondem bem aos médios, sendo que o Birch possui, dentre todas as madeiras analisadas, o melhor equilíbrio entre graves, médios e agudos. O Red Oak é a madeira de características mais agudas.

- Através da figura 6.18 pode-se verificar uma tendência de um comportamento inversamente proporcional da pressão sonora máxima em relação ao parâmetro $(E/\rho)^{1/2}$ do material do casco.

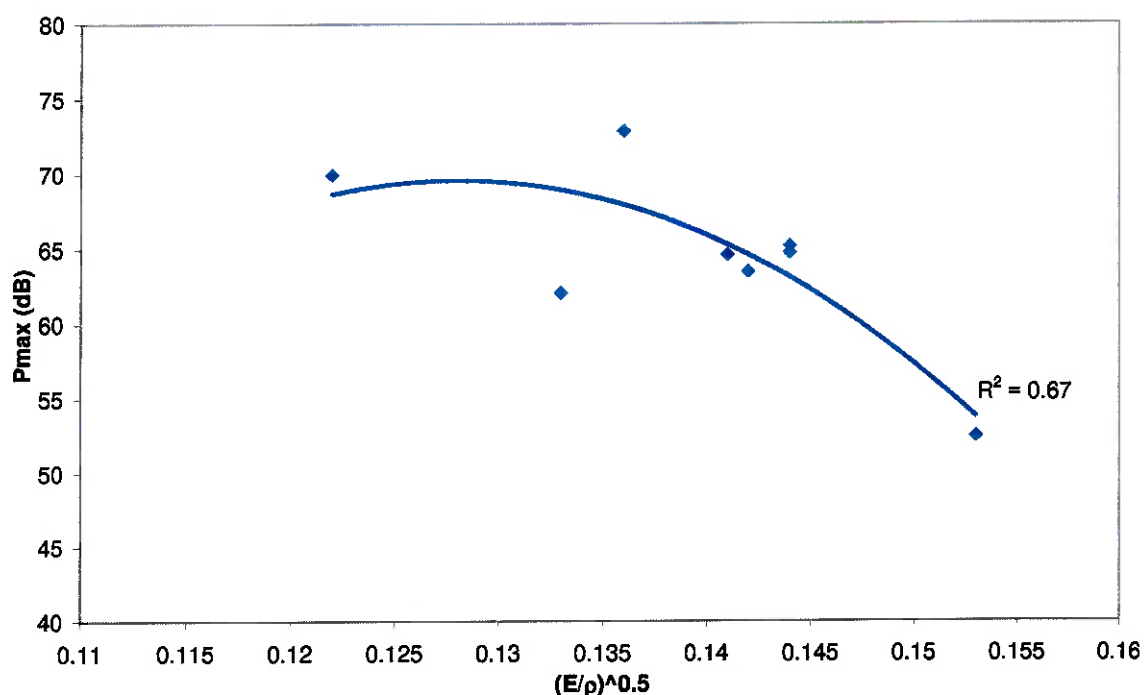


Fig. 6.18 – Correlação entre P_{max} e propriedades do material

7 – Estudo paramétrico – Influência da pele de ataque (membrana superior)

O segundo parâmetro a ser verificado como influência na performance do instrumento é o uso de diferentes peles na parte superior do tambor. Serão analisados os três principais tipos de filmes poliméricos empregados na confecção das peles: Mylar A®, Mylar D® e Melinex 539®. Também serão analisadas as diferentes espessuras de filme utilizadas pelo mercado.

Será considerado no modelo as mesmas condições da membrana utilizada na calibração (afinação) para gerar a rigidez das diversas peles analisadas.

A tabela 7.1 resume as propriedades dos filmes utilizadas nas análises.

Tab. 7.1 – Propriedades mecânicas dos filmes poliméricos utilizados na membrana superior

Filme	t (μm)	E (MPa)	ρ (kg/m ³)
1- Melinex 539	100,0	230,0	1400,0
2	125,0	230,0	1400,0
3	175,0	230,0	1400,0
4- Mylar A	75,0	205,0	1524,0
5	100,0	195,0	1524,0
6	125,0	200,0	1524,0
7 - Mylar D	75,0	200,0	1400,0
8	100,0	200,0	1400,0
9	125,0	200,0	1400,0

7.1 – Melinex 539®

O filme Melinex 539® é o material mais empregado pela indústria brasileira na confecção das peles. É fabricado pela Teijin Films e muito utilizado na indústria gráfica para a produção de fotolitos. É um filme translúcido, utilizado nas espessuras de 100 μm , 125 μm e 175 μm .

As figuras 7.1 a 7.3 e as tabelas 7.2 a 7.4 mostram a pressão sonora para cada faixa de frequência para o filme Melinex 539®, considerando as três espessuras analisadas.

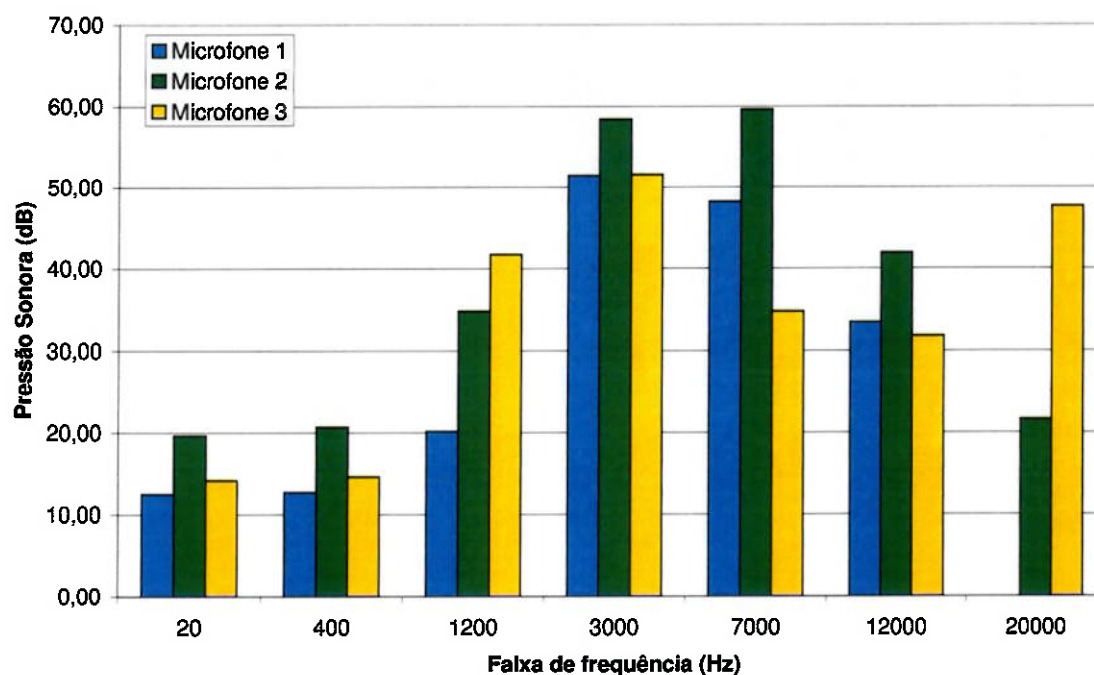


Fig. 7.1 - Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Melinex 539® – 100 μm)

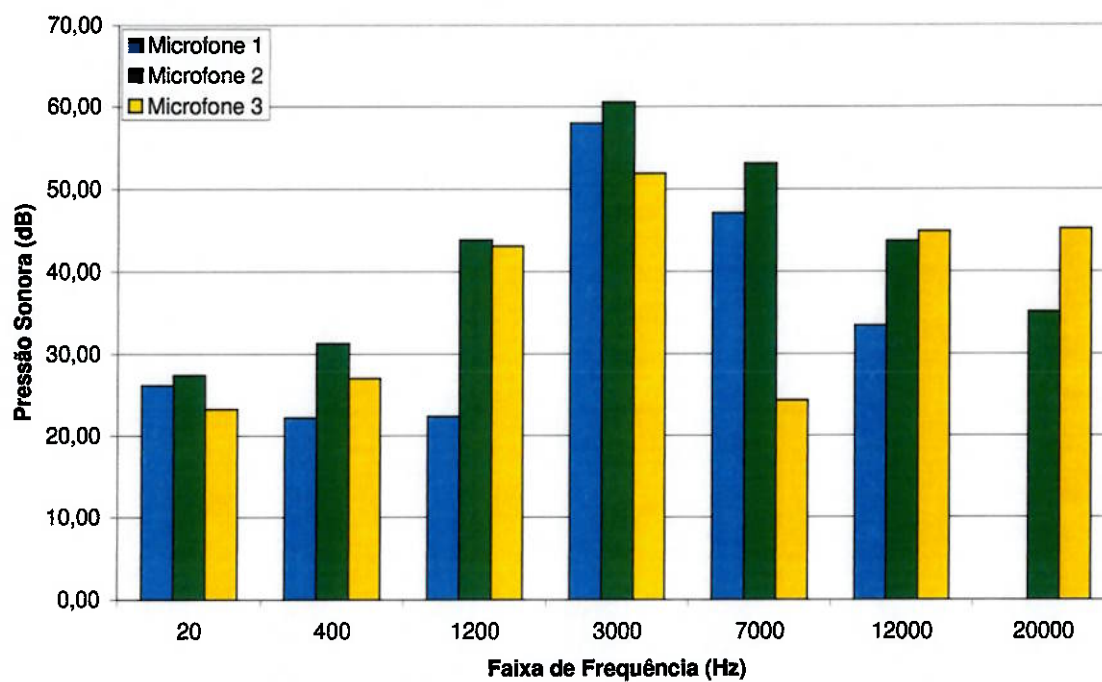


Fig. 7.2 - Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Melinex 539[®] – 125 µm)

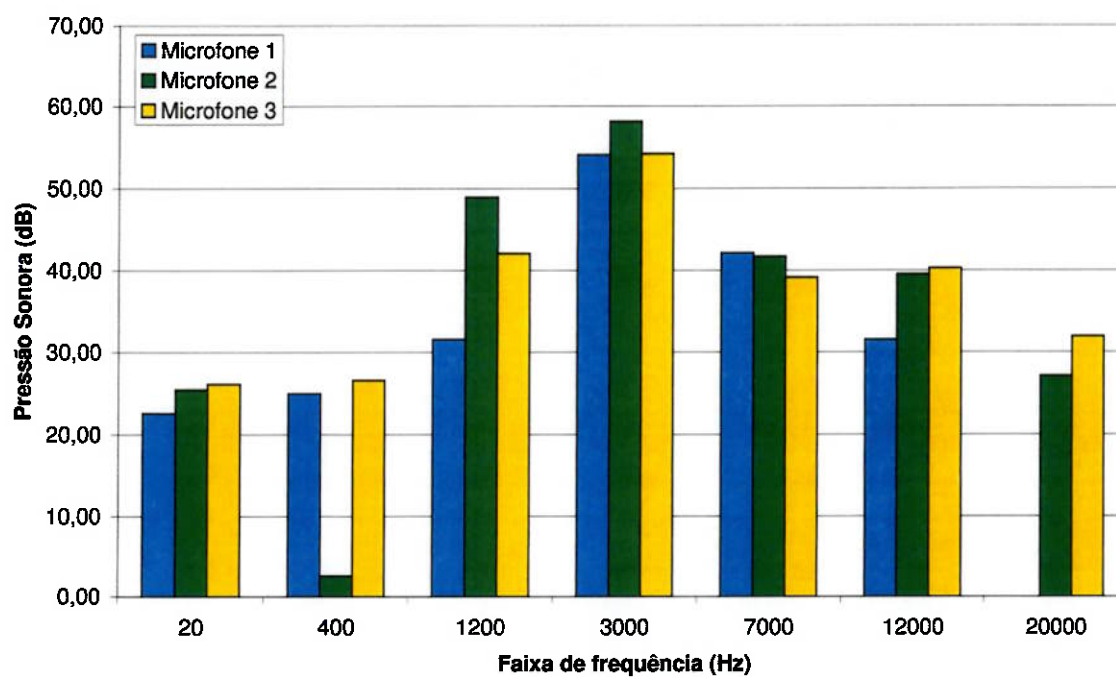


Fig. 7.3 - Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Melinex 539[®] – 175 µm)

Tab. 7.2 – Pressão sonora por faixa de frequência (Melinex 539® – 100 µm)

f (Hz)	P1 (dB)	P2 (dB)	P3 (dB)
20	12,50	19,65	14,21
400	12,74	20,70	14,65
1200	20,14	34,86	41,70
3000	51,47	58,43	51,60
7000	48,17	59,64	34,82
12000	33,48	41,90	31,84
20000	0,00	21,60	47,58

Tab. 7.3 – Pressão sonora por faixa de frequência (Melinex 539® – 125 µm)

f (Hz)	P1 (dB)	P2 (dB)	P3 (dB)
20	26,11	27,33	23,23
400	22,14	31,27	26,97
1200	22,28	43,86	43,11
3000	57,95	60,55	51,92
7000	47,12	53,15	24,27
12000	33,43	43,72	44,89
20000	0,00	35,14	45,22

Tab. 7.4 – Pressão sonora por faixa de frequência (Melinex 539® – 175 µm)

f (Hz)	P1 (dB)	P2 (dB)	P3 (dB)
20	22,59	25,48	26,14
400	25,00	2,60	26,58
1200	31,58	48,95	42,10
3000	54,12	58,14	54,23
7000	42,15	41,69	39,15
12000	31,54	39,54	40,28
20000	0,00	27,10	31,95

7.2 – Mylar D®

O filme Mylar D® é o material equivalente ao Melinex 539®, e é empregado pelas indústrias americanas e européias. É fabricado pela DuPont Films e também utilizado na indústria gráfica para a produção de fotolitos. É um filme translúcido, utilizado nas espessuras de 125 μm , 100 μm e 75 μm .

As figuras 7.4 a 7.6 e as tabelas 7.5 a 7.7 mostram a pressão sonora para cada faixa de frequência para o filme Mylar D®, considerando as três espessuras analisadas.

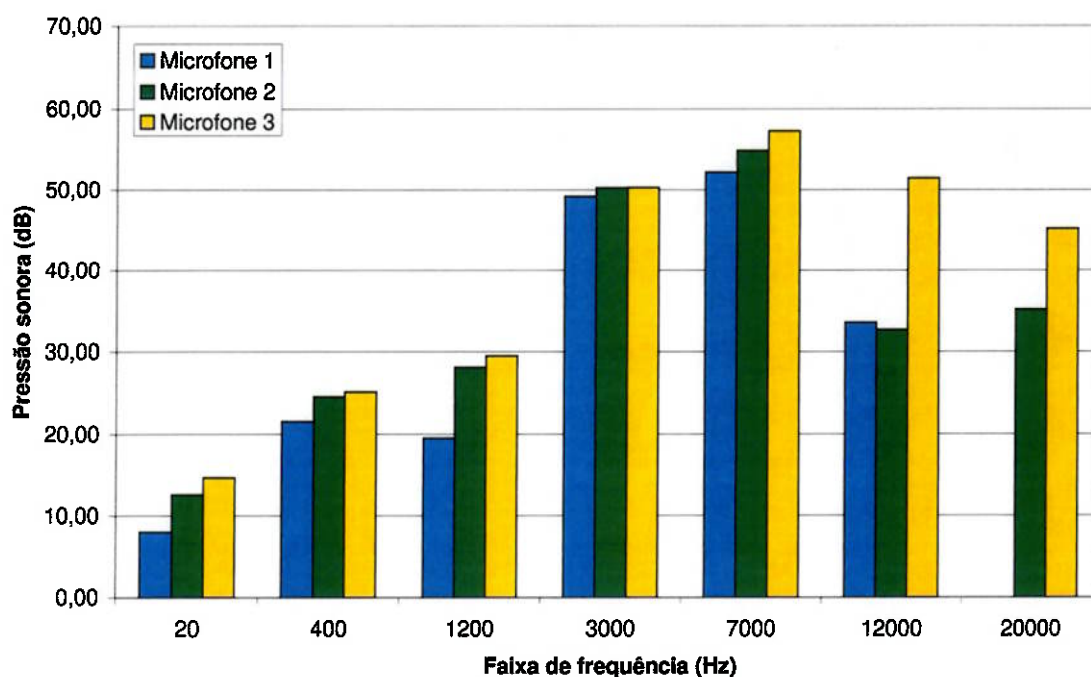


Fig. 7.4 - Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Mylar D® –75 μm)

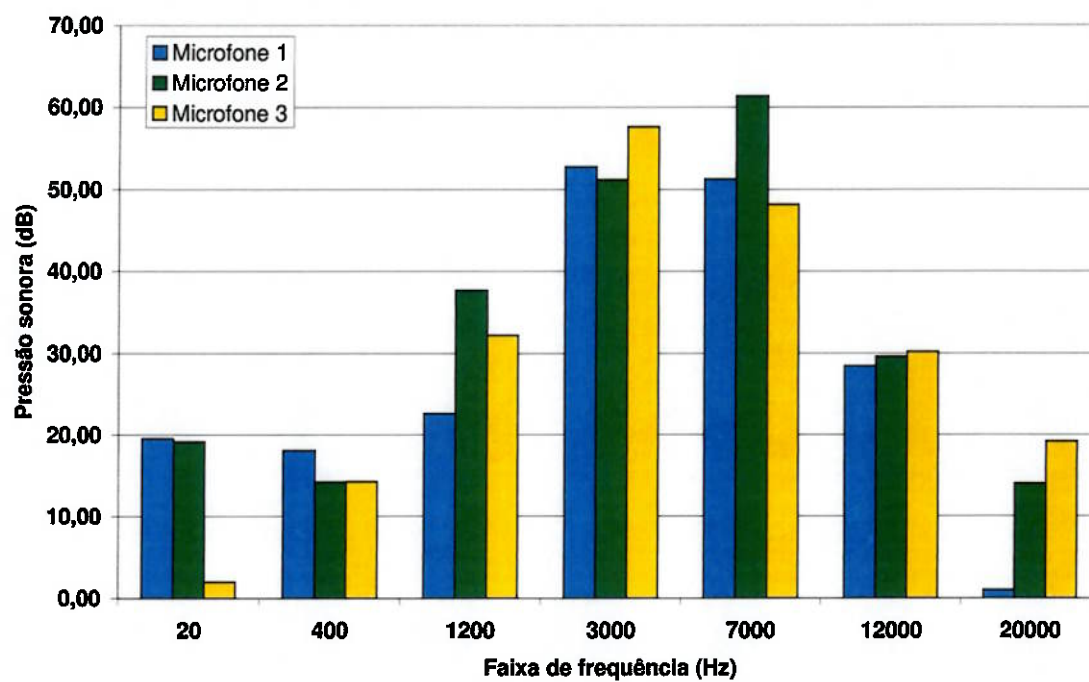


Fig. 7.5 - Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Mylar D[®] -100 μm)

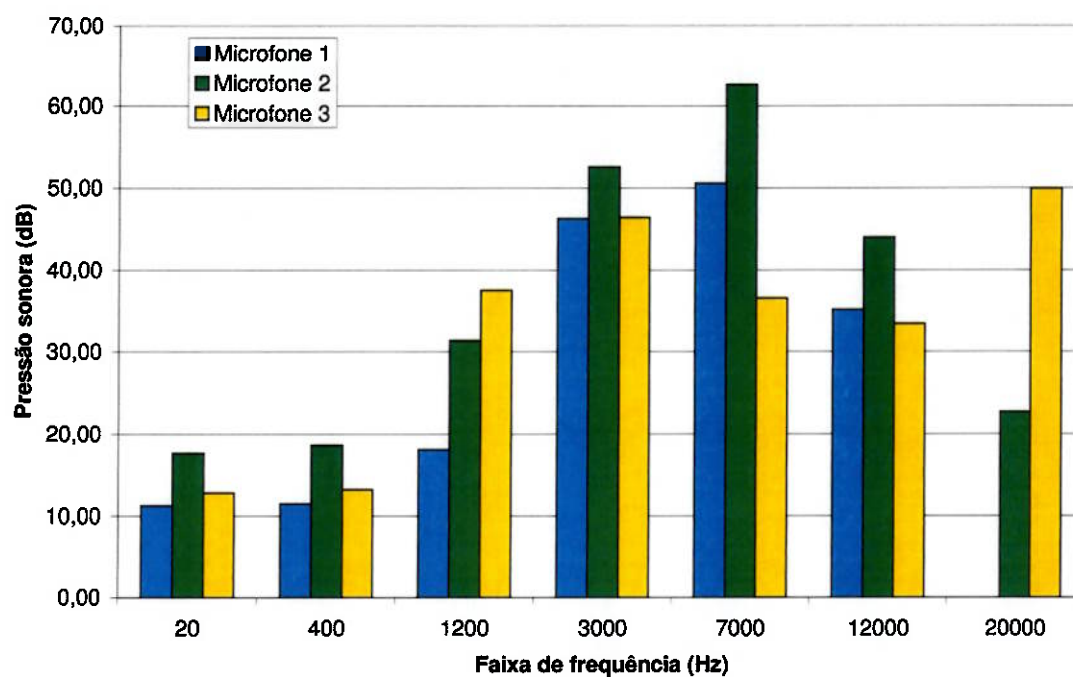


Fig. 7.6 - Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Mylar D[®] -125 μm)

Tab. 7.5 – Pressão sonora por faixa de frequência (Mylar D[®] –75 µm)

f (Hz)	P1 (dB)	P2 (dB)	P3 (dB)
20	8,00	12,54	14,65
400	21,58	24,58	25,14
1200	19,54	28,14	29,49
3000	49,17	50,26	50,27
7000	52,19	54,84	57,26
12000	33,51	32,65	51,47
20000	0,00	35,14	45,22

Tab. 7.6 – Pressão sonora por faixa de frequência (Mylar D[®] –100 µm)

f (Hz)	P1 (dB)	P2 (dB)	P3 (dB)
20	19,54	19,14	2,00
400	18,10	14,21	14,26
1200	22,59	37,65	32,18
3000	52,78	51,20	57,65
7000	51,28	61,35	48,15
12000	28,41	29,58	30,18
20000	1,00	14,02	19,20

Tab. 7.7 – Pressão sonora por faixa de frequência (Mylar D[®] –125 µm)

f (Hz)	P1 (dB)	P2 (dB)	P3 (dB)
20	11,25	17,69	12,79
400	11,47	18,63	13,19
1200	18,13	31,37	37,53
3000	46,32	52,59	46,44
7000	50,58	62,62	36,56
12000	35,15	44,00	33,43
20000	0,00	22,68	49,96

7.3 – Mylar A[®]

O filme Mylar A[®] foi o primeiro material utilizado na confecção de peles de bateria. Atualmente é muito empregado no Brasil para a confecção de peles para instrumentos de Escolas de Samba. É fabricado pela DuPont Films. É um filme de cor branca leitosa, utilizado nas espessuras de 75 μm , 100 μm e 125 μm .

As figuras 7.7 a 7.9 e as tabelas 7.8 a 7.10 mostram a pressão sonora para cada faixa de frequência para o filme Mylar A[®], considerando as três espessuras analisadas.

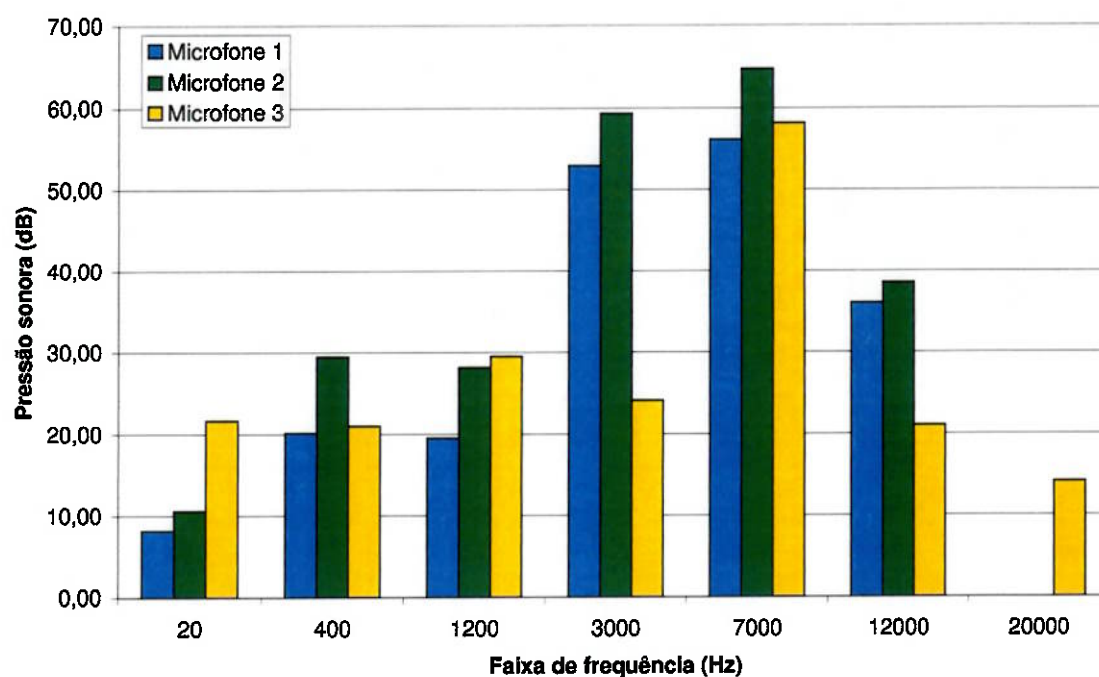


Fig. 7.7 - Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Mylar A[®] – 75 μm)

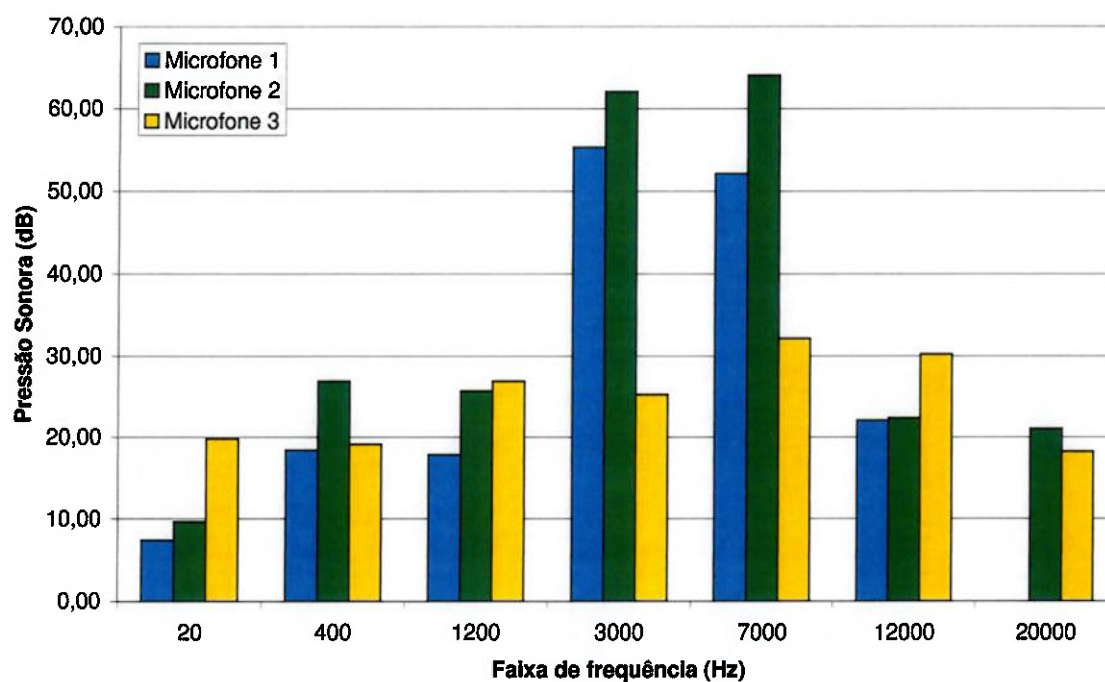


Fig. 7.8 - Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Mylar A[®] -100 μm)

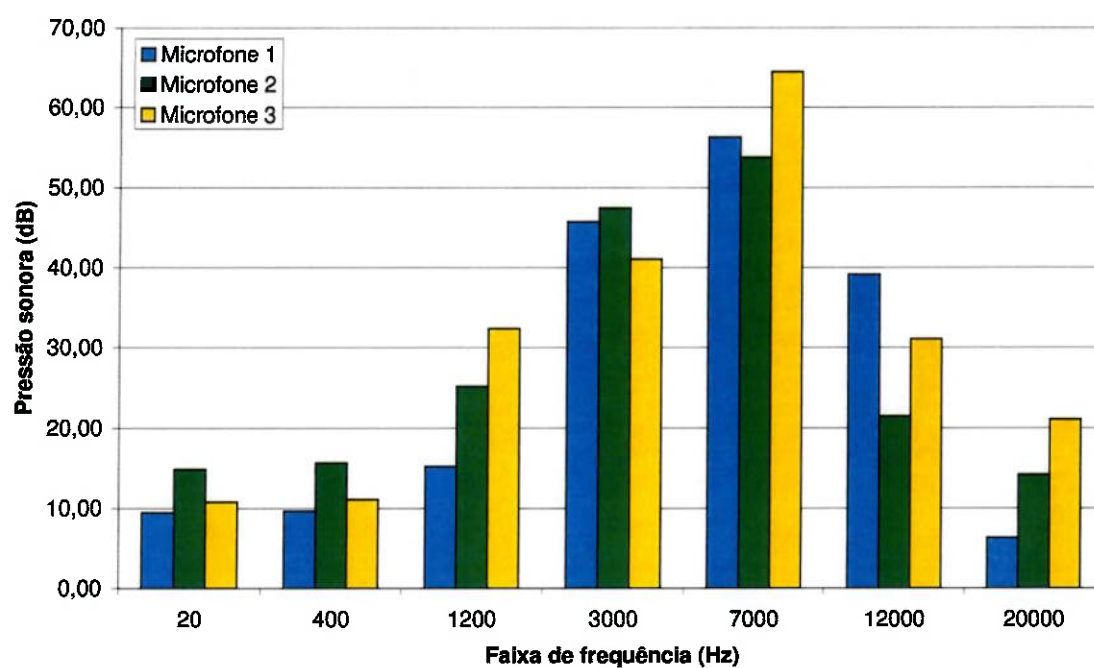


Fig. 7.9 - Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Mylar A[®] -125 μm)

Tab. 7.8 – Pressão sonora por faixa de frequência (Mylar A® –75 µm)

f (Hz)	P1 (dB)	P2 (dB)	P3 (dB)
20	8,14	10,57	21,70
400	20,17	29,46	21,00
1200	19,54	28,14	29,49
3000	52,86	59,31	24,10
7000	56,11	64,71	58,16
12000	36,03	38,53	21,04
20000	0,00	0,00	14,08

Tab. 7.9 – Pressão sonora por faixa de frequência (Mylar A® –100 µm)

f (Hz)	P1 (dB)	P2 (dB)	P3 (dB)
20	7,42	9,64	19,79
400	18,40	26,87	19,15
1200	17,82	25,66	26,89
3000	55,35	62,09	25,23
7000	52,14	64,10	32,18
12000	22,05	22,35	30,25
20000	0,00	21,00	18,24

Tab. 7.10 – Pressão sonora por faixa de frequência (Mylar A® –125 µm)

f (Hz)	P1 (dB)	P2 (dB)	P3 (dB)
20	9,47	14,89	10,77
400	9,65	15,69	11,10
1200	15,26	25,14	32,40
3000	45,78	47,50	41,08
7000	56,34	53,84	64,42
12000	39,16	21,45	31,06
20000	6,32	14,21	21,08

7.4 – Comparação entre os diversos tipos de peles de ataque

Com base nos resultados obtidos nos itens 7.1 a 7.3, podemos determinar a influência de cada tipo de pele de ataque na performance do instrumento.

As figuras 7.10 e 7.11 e a tabela 7.11 mostram, para cada pele, a frequência de máxima excitação do instrumento (frequência na qual se obtém maior pressão sonora) e a respectiva pressão criada.

Tab. 7.11 – Comparação entre peles de ataque

Pele	f (Hz)	Pmax (dB)
1	3240	74,20
2	3180	72,92
3	2910	71,24
4	4870	68,12
5	4520	66,04
6	4100	62,49
7	4020	64,20
8	3980	72,05
9	3850	73,14

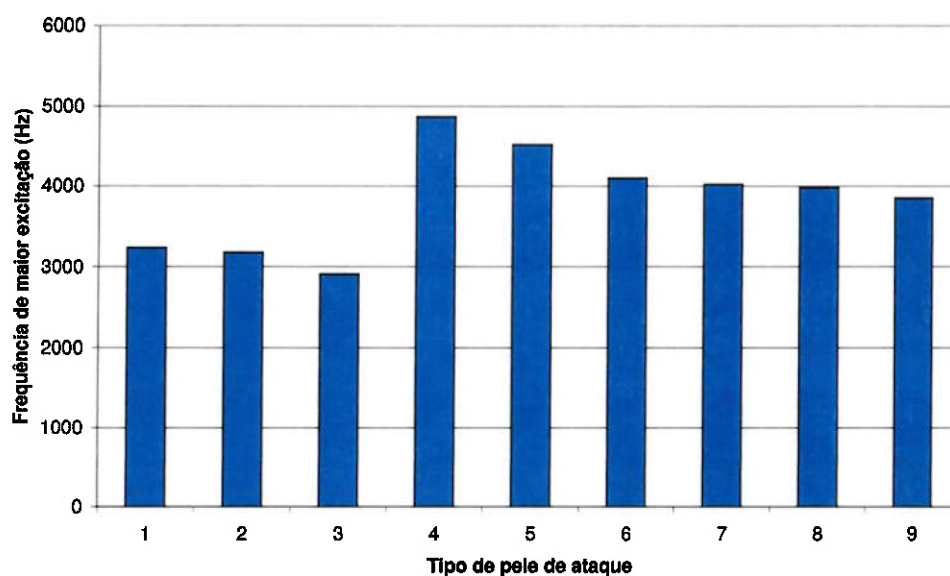


Fig. 7.10 – Comparação entre peles de ataque – frequência de maior excitação

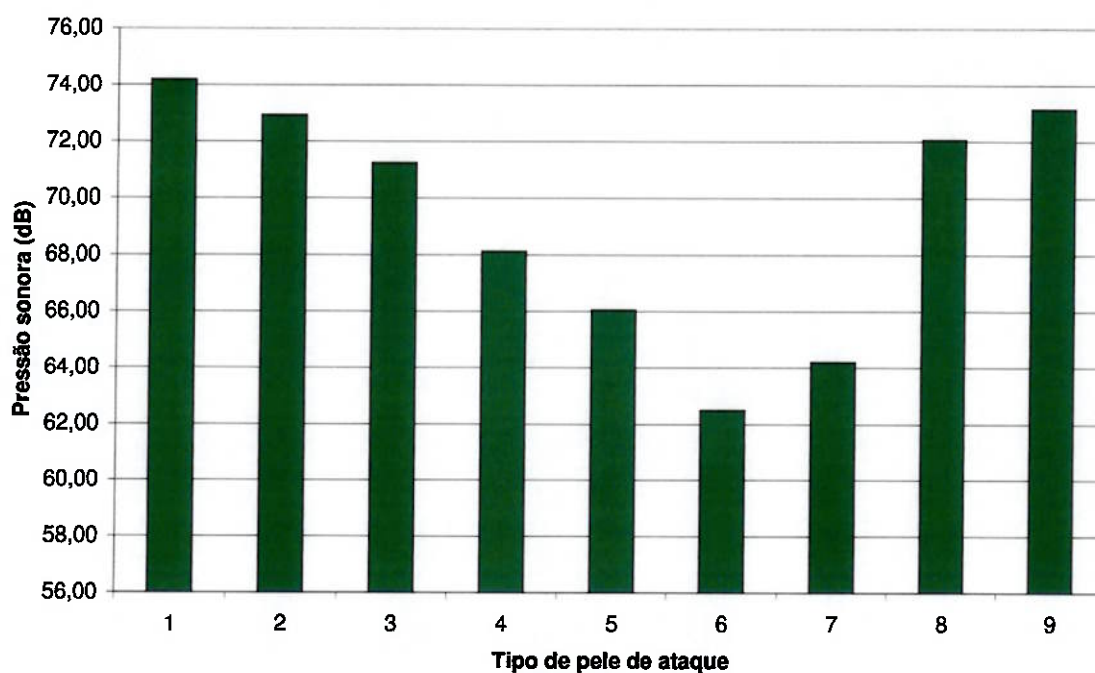


Fig. 7.11 – Comparação entre peles de ataque – pressão sonora máxima

Pelas figuras 7.1 a 7.11, pode-se concluir para as diversas peles de ataque analisadas, que:

- A pele de ataque (membrana superior) é um componente de vital importância na sonoridade do instrumento, já que possui a menor rigidez do sistema.
- O filme Melinex 539[®] produz o maior volume sonoro, porém, apresenta comportamento semelhante para diversas faixas de frequência (figs. 7.1 a 7.3). Desta forma, pode-se concluir que este filme não possui sonoridade definida, sendo dificultada a afinação do instrumento.
- O filme Mylar A[®] é, dentre os três, o que produz menor pressão sonora, porém, responde à uma faixa restrita de frequências, sendo assim, de fácil afinação.

- Considerando uma mesma tensão aplicada ao filme, como nos casos aqui apresentados, a espessura do mesmo possui influência significativa na frequência de maior excitação, determinando assim, a adequabilidade de um filme ou outro para cada tipo de padrão sonoro desejado. Em relação à pressão sonora gerada, a espessura do filme não influencia de modo significativo.

8 – Estudo paramétrico – Influência da pele de resposta (membrana inferior)

O terceiro parâmetro a ser verificado como influência na performance do instrumento é o uso de diferentes peles na parte inferior do tambor. Serão analisados os dois principais tipos de filmes poliméricos empregados na confecção das peles: Mylar D[®] e Mylar A[®]. O Melinex 539[®] não é empregado neste caso. Também serão analisadas as diferentes espessuras de filme utilizadas pelo mercado.

Será considerado no modelo as mesmas condições da membrana utilizada na calibração (afinação) para gerar a rigidez das diversas peles analisadas.

A tabela 8.1 resume as propriedades dos filmes utilizadas nas análises.

Tab. 8.1 – Propriedades mecânicas dos filmes poliméricos utilizados na membrana inferior

Filme	t (μm)	E (MPa)	ρ (kg/m³)
1 -Mylar A	50,0	215,0	1524,0
2	36,0	220,0	1524,0
3 - Mylar D	75,0	200,0	1400,0

8.1 – Mylar D®

O filme Mylar D® é utilizado para peles de resposta na espessura de 75 µm.

A figura 8.1 e a tabela 8.2 mostram a pressão sonora para cada faixa de frequência para o filme Mylar D®.

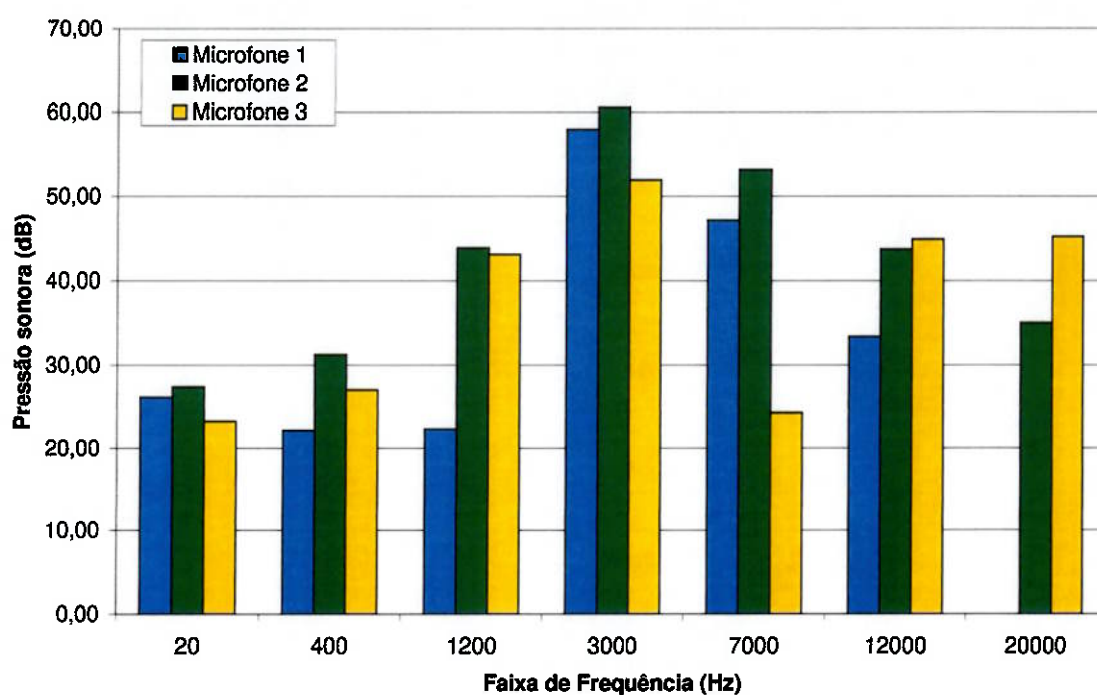


Fig. 8.1 - Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Mylar D® –75 µm)

Tab. 8.2 – Pressão sonora por faixa de frequência (Mylar D® –75 µm)

f (Hz)	P1 (dB)	P2 (dB)	P3 (dB)
20	8,00	12,54	14,65
400	21,58	24,58	25,14
1200	19,54	28,14	29,49
3000	49,17	50,26	50,27
7000	52,19	54,84	57,26
12000	33,51	32,65	51,47
20000	0,00	35,14	45,22

8.2 – Mylar A®

O filme Mylar A® é utilizado para peles de resposta na espessura de 36 μm e 50 μm .

As figuras 8.2 e 8.3 e as tabelas 8.3 e 8.4 mostram a pressão sonora para cada faixa de frequência para o filme Mylar A®, considerando as espessuras analisadas.

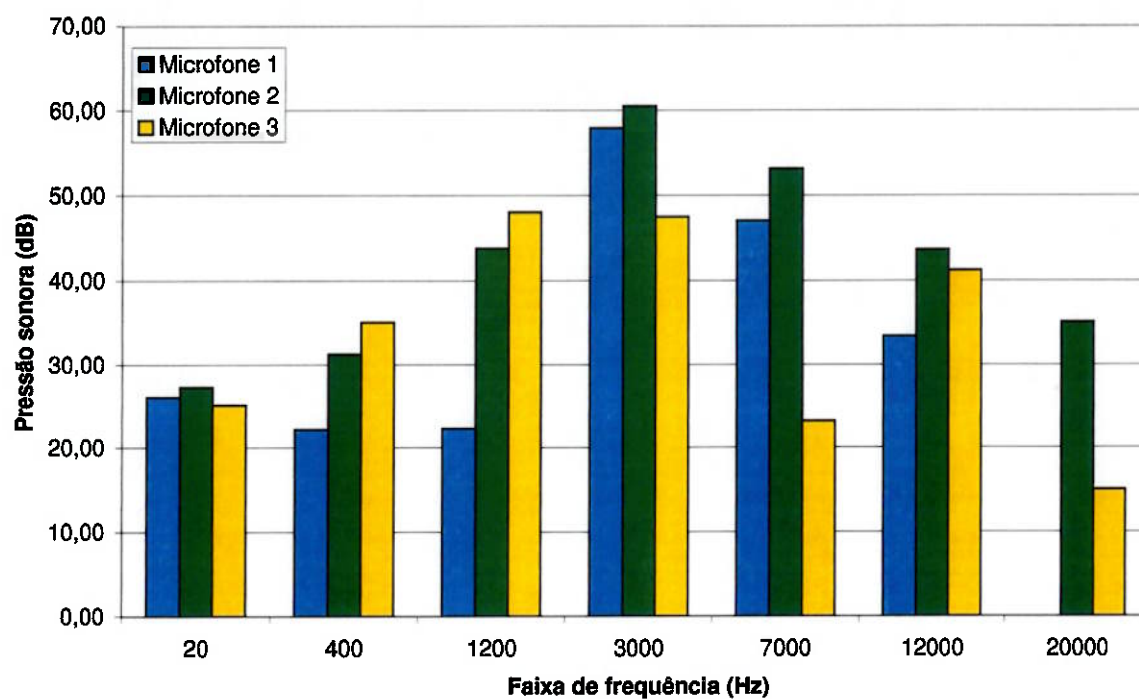


Fig. 8.2 - Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Mylar A® – 36 μm)

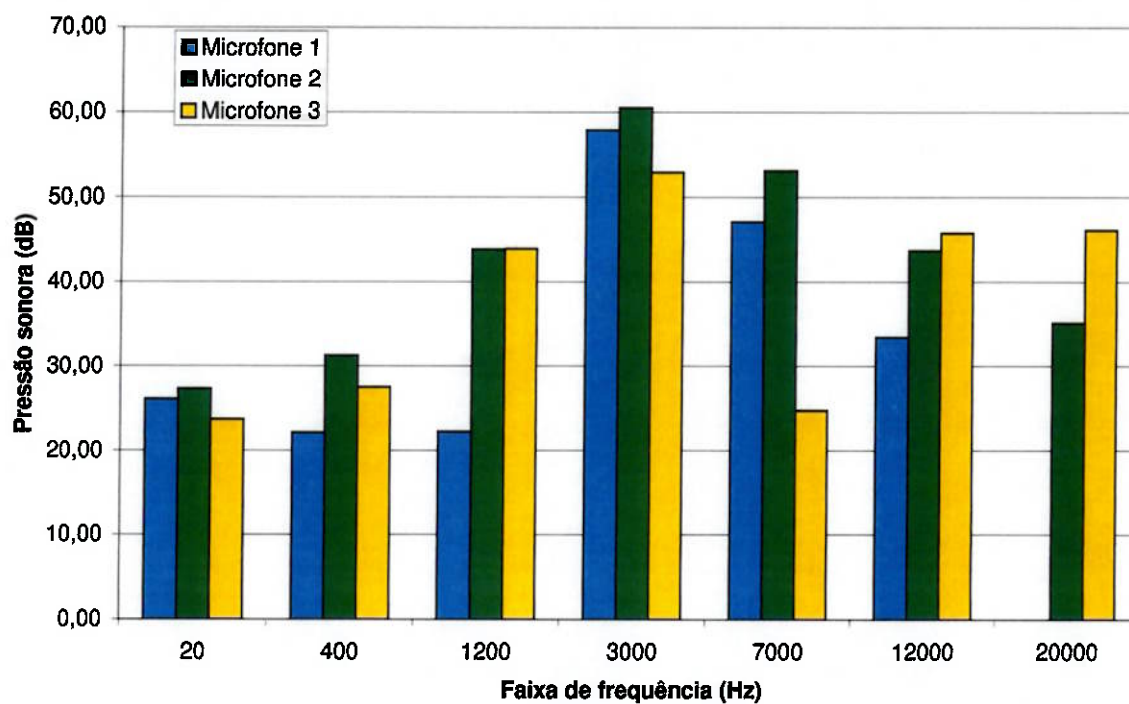


Fig. 8.3 - Mapa de pressão sonora por faixa de frequência (Mylar A® -50 µm)

Tab. 8.3 – Pressão sonora por faixa de frequência (Mylar A® -36 µm)

f (Hz)	P1 (dB)	P2 (dB)	P3 (dB)
20	26,11	27,33	25,14
400	22,14	31,27	35,10
1200	22,28	43,86	48,10
3000	57,95	60,55	47,59
7000	47,12	53,15	23,18
12000	33,43	43,72	41,26
20000	0,00	35,14	15,04

Tab. 8.4 – Pressão sonora por faixa de frequência (Mylar A® -50 µm)

f (Hz)	P1 (dB)	P2 (dB)	P3 (dB)
20	26,11	27,33	23,69
400	22,14	31,27	27,51
1200	22,28	43,86	43,97
3000	57,95	60,55	52,96
7000	47,12	53,15	24,76
12000	33,43	43,72	45,78
20000	0,00	35,14	46,12

8.3 – Comparação entre os diversos tipos de peles de reposta

Com base nos resultados obtidos nos itens 8.1 e 8.2, podemos determinar a influência de cada tipo de pele de resposta na performance do instrumento.

As figuras 8.4 e 8.5 e a tabela 8.5 mostram, para cada pele, a frequência de máxima excitação do instrumento (frequência na qual se obtém maior pressão sonora) e a respectiva pressão gerada.

Tab. 8.5 – Comparação entre peles de resposta

Pele	f (Hz)	P_{max} (dB)
1	2970	72,87
2	3020	72,81
3	3180	72,92

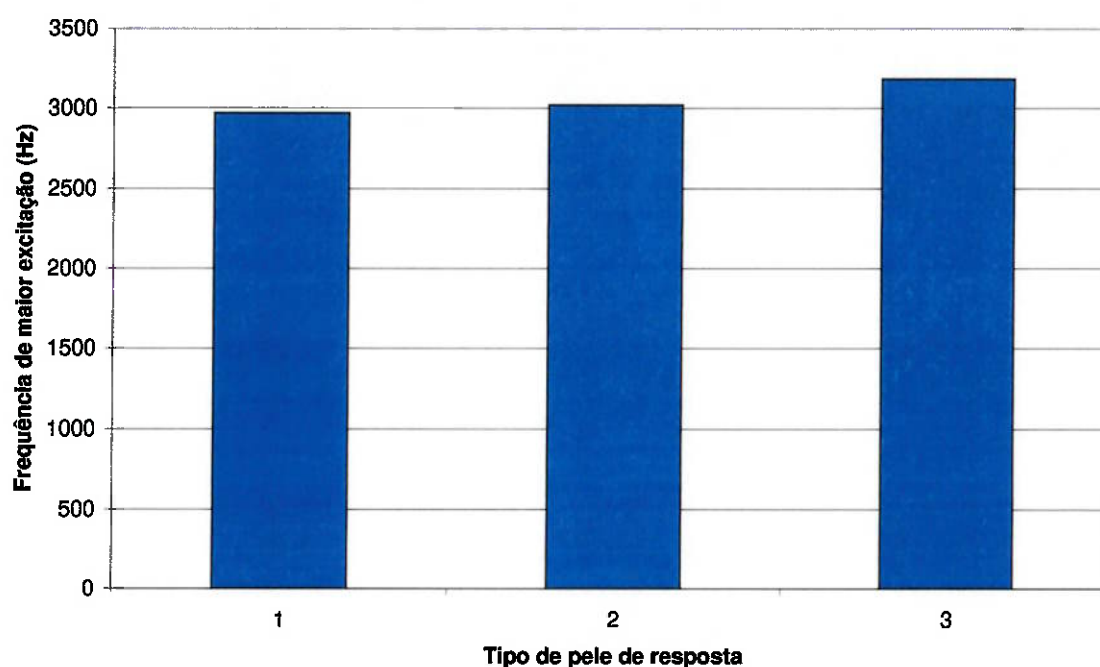


Fig. 8.4 – Comparação entre peles de resposta – frequência de maior excitação

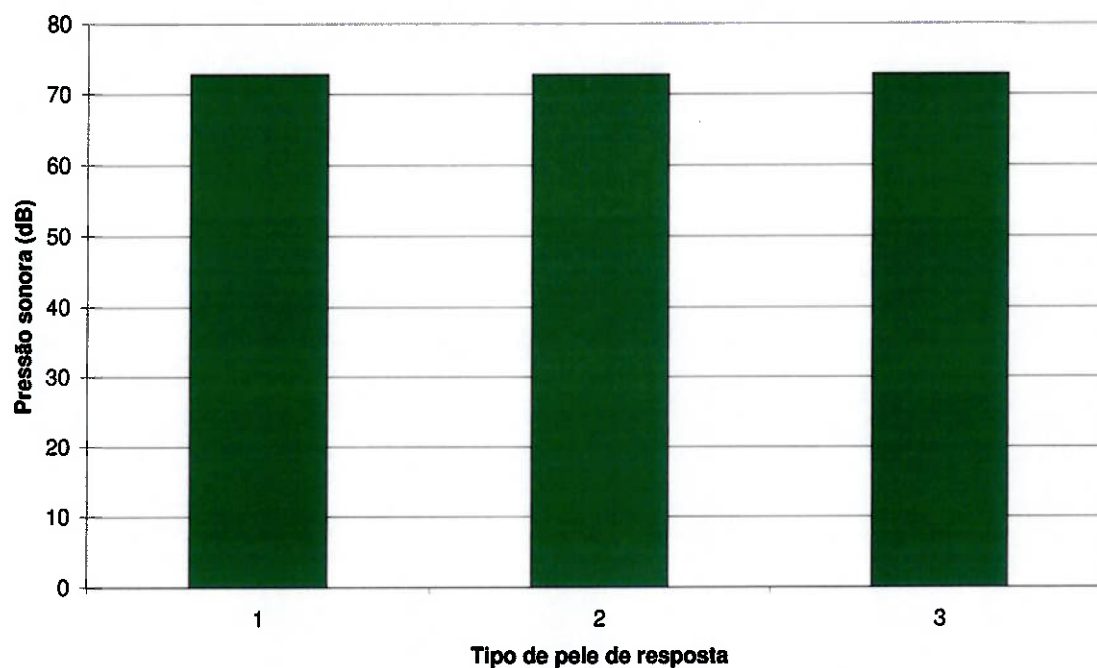


Fig. 8.5 – Comparação entre peles resposta – pressão sonora máxima

A partir dos resultados pode-se concluir que a pele de resposta (membrana inferior) tem pouca influência no volume sonoro do instrumento, assim como na resposta a cada faixa de frequência. A pele de resposta altera de forma mínima a frequência de maior excitação e os valores de pressão sonora, contribuindo para um controle do timbre do instrumento, característica esta que não pode ser avaliada pelo modelo desenvolvido.

9 – Conclusões e Recomendações

O trabalho desenvolvido mostrou-se de grande serventia para o estudo da influência dos diversos parâmetros que influenciam a qualidade e a performance sonora de um tambor de bateria. Os parâmetros eleitos para análise foram o material que compõe o casco, a pele de ataque (membrana superior) e a pele de resposta (membrana inferior).

Uma característica apreciável do modelo em elementos finitos desenvolvido é a capacidade da análise do instrumento como um todo e sua interação com o fluido que o cerca (no caso o ar).

Os resultados obtidos são capazes de prever o comportamento das ondas sonoras criadas pelo instrumento e as características que o som produzido terá em qualquer região do espaço, fato este de grande importância não só para o desenvolvimento e aprimoramento de novos produtos, como também para gravações, já que se pode otimizar a escolha e o posicionamento dos microfones, a localização do instrumento dentro da sala e ter um conhecimento prévio das características dos padrões sonoros a serem adquiridos.

A título de aprimoramento deste trabalho, propõe-se uma sequência no desenvolvimento do modelo de elementos finitos desenvolvido.

Juntamente com o modelo 2D axissimétrico aqui exposto, um modelo 3D também fora desenvolvido, porém, abandonado devido ao seu alto custo computacional e problemas de convergência. Este modelo pode ser retomado como objeto de estudo, sendo capaz de incorporar elementos que foram desconsiderados pelo modelo

axissimétrico, tais como : o respiro, as canoas e parafusos de afinação e o engaste do tambor.

A necessidade da criação de uma malha mapeada limitou o estudo das características geométricas do instrumento, já que o fator tempo foi limitante neste trabalho.

Também podem ser acoplados ao modelo características outras das membranas tais como: múltiplas camadas, tensões distintas para cada ponto e massas concentradas.

Referências Bibliográficas

1. BENADE, A. H. , *Fundamentals of Musical Acoustics*. Dover, New York, 1976 (2.^a ed.)
2. CYSNE, L. F. O , *Áudio: Engenharia e Sistemas*. H. Sheldon, Rio de Janeiro, 1989 (4.^a ed.)
3. *Sound Book: Um guia para consulta e aprendizagem* , Publicação promocional da Philips Eletronics N. V. , São Paulo, 1996
4. STRUTT, J. W. , *The Theory of Sound (2 vols.)*, Dover, New York, 1945 (2.^a ed.)
5. *ANSYS Tutorial Guide* , ANSYS Publications , 1999
6. COLE III, J. E. , *Vibrations of a framed cylindrical shell submerged in and filled with acoustic fluid: Spectral solution* , Computers & Structures, 65, No 3 pp. 385-393, 1997
7. HLADKY-HENNION, A C. , *Finite element analysis of the propagation of acoustic waves in waveguides* , Journal of Sound and Vibration, 194 (2), pp 119-136, 1996
8. GAUTIER, F. , TAHANI, N. , *Vibroacoustic behaviour of a simplified musical wind instrument*, Journal of Sound Vibration, 213(1), pp 107-125, 1998
9. HOUMAT, A , *Hierarchical finite element analysis of the vibration of membranes*, Journal of Sound and Vibration, 201(4), pp 465-472, 1997
10. HLADKY-HENNION, A C. , LANGLET, P. , de BILLY, M. , *Finite element analysis of the propagation of acoustic waves along waveguides immersed in water*. Journal of Sound and Vibration , 200(4), pp 519-530, 1997
11. CHAKRAVORTY, D. , BANDYOPADHYAY, J. N., SINHA, P. K., *Vibrational analysis of point supported laminated composite cylindrical shells*, Journal of Sound and Vibration, 1995
12. CHONGBIN, Z., STEVEN, G. P., *A practical error estimator for finite element predicted natural frequencies of membrane vibration problems*, Journal of Sound and Vibration, 195(5), pp 739-756, 1996
13. PRAK, A, *The Physics of djembe sounds*. 1997
14. *Evans Drumheads*, catálogo de produtos, 2000
15. *Pearl: the Master Series*, catálogo de produtos, 1999

16. LEITE, M., *Afinação de bateria: um assunto complexo*, Batera, n.º 24, pp 28-30, 1999
17. LEITE, M., *Afinação de bateria (parte 2)*, Batera, n.º 25, pp 24-26, 1999
18. LEITE, M., *Afinação de bateria: as peles*, Batera, n.º 26, pp 42-43, 1999
19. LEITE, M., *Afinação de bateria: (parte 4)*, Batera, n.º 27, pp 52-54, 1999
20. SUMMITT, R., SLIKER, A. , *Handbook of Materials Science, Vol. IV: Wood*. CRC Press, Boca Raton, 1980.