

**Tópicos de Ensino de Física – F609**  
**Título: Enclausuramento de uma fonte sonora**

**Relatório Final**

**Aluno:** Rodolfo Thomazelli, RA: 025071  
**Email:** pe.soberbo@gmail.com

**Orientadora:** Stelamaris Rolla Bertoli – FEC UNICAMP  
**Email:** rolla@fec.unicmp.br

**Coordenador da Disciplina:** Prof. Dr. José Joaquín Lunazzi



06 de Junho de 2008

## **Descrição**

Esse projeto consiste em estudar a forma de controle de ruído na fonte sonora, analisando os efeitos do enclausuramento de uma fonte sonora por diversos fechamentos, cada qual com um material diferente. Pretende-se mostrar as diferenças de desempenho desses materiais principalmente quanto a absorção e isolamento acústico. Para isso, usa-se uma fonte de ruído sonoro com nível de pressão sonora elevado e enclausura-se tal fonte com quatro tipos diferentes de fechamentos: volume com parede de madeira inteiramente fechada; volume com parede de madeira e com uma “janela” lateral; volume com parede de espuma; volume com parede de madeira e revestimento interno de espuma. Mede-se para cada situação nível de pressão sonora em função da frequência em bandas de 1/1 oitava, a distância fixa da fonte. Mede-se também o nível da pressão sonora da fonte aberta, e que será adotado com a base de referência para comparação entre os desempenhos.

## **Importância didática do trabalho**

A principal contribuição didática do trabalho é mostrar a influência do desempenho acústico de diferentes fechamentos, considerados acústicos, e a diferença entre absorção e isolamento acústico. Além disso, o experimento mostra também que cada material usado no enclausuramento tem sua eficiência dependente da frequência.

## **Originalidade**

Este é um experimento didático relativamente simples, que já foi construído pela orientadora em seu laboratório (Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada), e que foi baseado em uma apresentação do pesquisador Barry Gibbs da Universidade de Liverpool, num dos congressos da Sociedade Brasileira de Acústica.

## **Bibliografias Consultadas:**

-Gerges, Samir N.Y. Ruído: fundamentos e controle 1ª edição – Imprensa Universitária da Universidade Federal de Santa Catarina 1992;

-Mehta, Madan. Architectural acoustics: principles and design – Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey 1999;

<http://www.feb.unesp.br/jcandido/acustica/Apostila/Capitulo%2010.pdf>;

<http://geodesia.ufsc.br/Geodesia-online/arquivo...rac98/022/022.HTM>;

<http://www.segurancaetrabalho.com.br/download/utilizacao-creppe.doc>;

<http://audiolist.org/forum/>

## **Lista de Materiais**

- Fonte sonora (uma que melhor se adapte ao experimento);
- Madeira e Espuma para construção dos volumes;
- Medidor de nível de pressão sonora modelo 2238 da Bruel&Kjaer;

## Resumo

Esse projeto visa mostrar as diferenças entre isolamento acústico (impedimento da passagem do som por uma superfície) e absorção acústica (redução da parcela refletida do som que incide sobre uma superfície), através do enclausuramento de uma fonte sonora por diferentes tipos de fechamentos, a saber:

- volume com parede de espuma, que é um material poroso bom para a absorção sonora;
- volume com parede de madeira maciça, material denso bom para o isolamento sonoro;
- volume com parede de madeira e com janela lateral, para mostrar a influência de abertura no isolamento do volume;
- volume com parede composta de madeira e espuma;

Serão feitas medidas de nível de pressão sonora em função da frequência em bandas de 1/1 oitava (espectro sonoro), para se fazer assim uma comparação entre o desempenho acústico de materiais e da forma como atua em função da frequência.

Referência: <http://www.abel-acustica.com.br/index.htm>

## Fenomenologia

O projeto em questão trata basicamente de três conceitos da acústica: Nível de pressão sonora, absorção acústica e isolamento acústico aéreo. Tais conceitos serão introduzidos qualitativamente a seguir:

### Nível de pressão sonora:

A quantidade física associada à grandeza do som é a sua intensidade, que é definida como sendo a potência sonora atravessando uma unidade de área, tendo então como unidade  $W/m^2$ . Para o ser humano, a intensidade sonora que corresponde ao limite da audição, e a intensidade sonora correspondente ao limite da dor no ouvido humano foram definidas experimentalmente como sendo, respectivamente,  $10^{-12} W/m^2$  e  $10 W/m^2$ . Ou seja, o ouvido humano responde a uma grande faixa de intensidades, que aborda aproximadamente 13 ordens de grandeza. Sabe-se também que as sensações humanas, entre elas a auditiva são logarítmicas. Portanto, para tratar da intensidade sonora é conveniente se usar a variável chamada de *nível de intensidade sonora*, dado por:

$$I_p = 10 \log \left( \frac{I}{I_{ref}} \right) \quad (1)$$

cuja unidade é o decibel (dB). Na equação,  $I$  é a intensidade sonora e  $I_{ref}$  é a intensidade de referência, dada por  $10^{-12} N/m^2$ .

Porém, para se medir a intensidade sonora ou o nível de intensidade sonora é necessário o uso de equipamentos muito sofisticados, ao contrário da pressão sonora, que é facilmente medida. A intensidade sonora é proporcional ao quadrado da pressão sonora, portanto mede-se na prática o nível de pressão sonora, dado por:

$$L_p = 20 \log \left( \frac{P}{P_{ref}} \right) \quad (2)$$

onde  $P$  é a pressão sonora e  $P_{ref}$  é a pressão de referência, com valor padrão de  $2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$ . O nível de pressão sonora é dado em decibel (dB). O equipamento chamado “medidor de nível de pressão sonora” é empregado para medir o nível de pressão sonora de um ambiente em função de uma faixa de frequência desejada.

#### Absorção acústica:

Quando temos uma onda sonora incidindo em uma superfície, uma parte de sua energia é refletida, uma parte é transmitida e uma parte é absorvida pela superfície.

Um dos mecanismos de absorção acústica (mecanismo resistivo) é aquele que transforma a energia sonora em energia térmica (calor), e a fração de energia que foi absorvida é chamada de coeficiente de absorção. Todos materiais de alguma maneira absorvem o som, alguns mais outros menos. Materiais porosos são exemplos do mecanismo resistivo de absorção e absorvem mais em alta frequência. Outro mecanismo de absorção é conhecido com o mecanismo reativo que baseia no princípio de ressonância. Absorvedores de membrana e absorvedores de volume são exemplos desse mecanismo, funcionam bem numa frequência específica, em geral, em baixa frequência. No atual projeto, o material absorvedor usado é a espuma, que se encaixa na categoria de material absorvedor poroso.

Uma onda sonora incidindo em um material poroso faz com que o ar dentro dos poros vibre, sendo que o atrito entre as partículas de ar e de do material transforma a energia vibracional em energia térmica. Assim, temos a absorção sonora pelo material. O fato de os poros serem de pequenas dimensões faz com que o som absorvido seja de altas frequências.

Isolamento acústico: O isolamento acústico está diretamente ligado com a parte transmitida de uma onda que incide em alguma superfície. Um bom isolamento é aquele cuja fração de energia sonora que é transmitida de um ambiente a outro, separados por uma superfície, é a menor possível.

A transmissão sonora pode ser aérea ou estrutural. No caso de transmissão aérea, materiais mais densos são mais refletivos, pois esses são menos afetados pelas vibrações das partículas de ar. Portanto, materiais mais densos são melhores isolantes acústicos.

## Desenvolvimento Experimental e Resultados

Para a análise do efeito de enclausuramento de uma fonte sonora por diversos fechamentos, um primeiro problema que surge é a escolha da fonte. Três fatores são essenciais na escolha da fonte: ela deve apresentar um som de intensidade relativamente alto comparado com o ruído de fundo (som do ambiente) e com os níveis gerados com os vários enclausuramentos; deve gerar um campo sonoro sem muitas variações de intensidade, para permitir a comparação; e por fim, deve gerar um campo sonoro com diversas frequências, para que se possa perceber as possíveis variações de nível de pressão sonora em função da frequência para os diferentes materiais.

Primeiramente foi pensando como fonte um telefone, que foi logo descartado pelo fato de apresentar baixa intensidade sonora e por exigir um circuito que produz uma tensão específica (tensão da linha telefônica) para funcionar. Posteriormente foi pensando em um rádio ou tocador de mp3 ligado em caixas de som de computador, porém tais fontes apresentam grande variação na intensidade sonora, o que inviabiliza a comparação entre medidas. Finalmente escolheu-se uma campainha residencial do tipo “cigarra”, cuja alimentação é de 127V, cuja foto esta apresentada na Figura 1.



**Figura 1 - Campainha residencial do tipo "cigarra"**

Para avaliar e testar a eficiência do sinal sonoro gerado pela campainha no projeto, efetuou-se medidas de nível de pressão sonora com um aparato experimental que já estava montado no laboratório da orientadora (Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada), cuja fonte sonora é uma furadeira e comparou-se com os resultados substituindo a furadeira pela campainha.

Primeiramente, mediu-se o nível de pressão sonora em função da frequência (como será em todas as medidas) da furadeira “aberta”, a uma distância de  $(140 \pm 1)cm$ , fixa para todas as medidas posteriores.

Essa medida foi feita para verificar se a campainha é compatível com o aparato experimental destinado para a furadeira. Fez-se também a medida do nível de pressão sonora para a campainha aberta, uma vez pendurada em um suporte e outra vez apoiada em uma borracha densa. As medidas foram feitas com um medidor de nível de pressão sonora modelo 2238 da Briel&Kjaer, também denominado pelo fabricante de Mediator. A figura 2 mostra o equipamento utilizado.



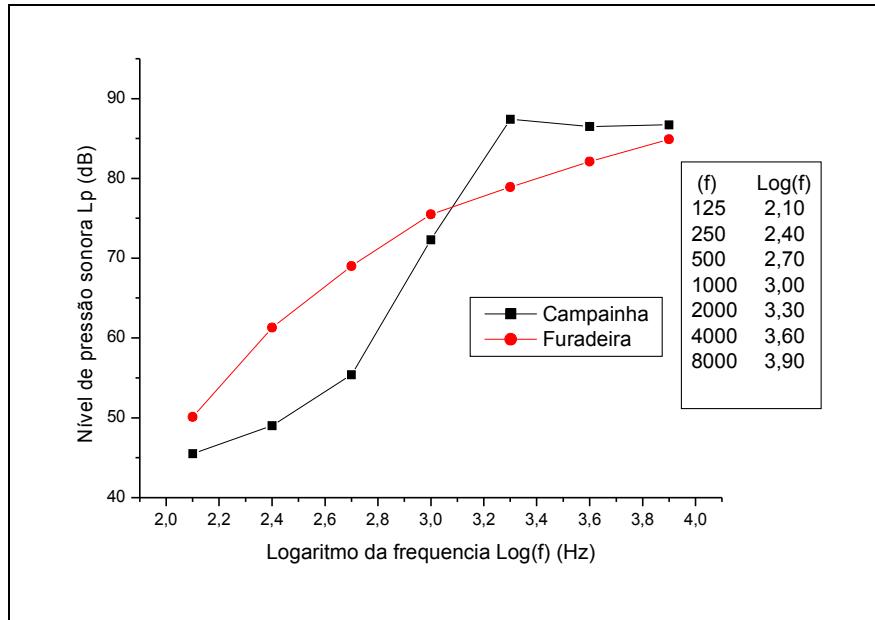
**Figura 2 - Medidor de Nível de pressão Sonora**

Os valores dos níveis de pressão sonora ( $L_p$ ) em função da frequência, obtidos nas medições, estão apresentados na tabela 1:

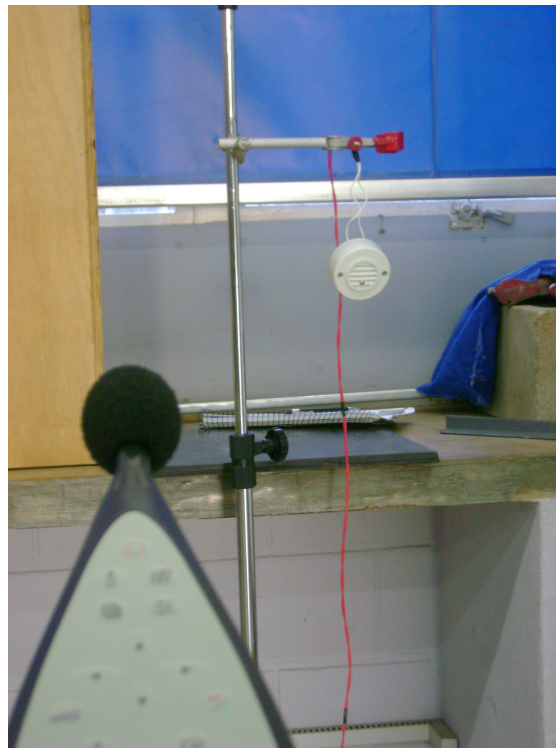
**Tabela 1 - dados para a furadeira e a campainha "abertas"**

Freqüência (Hz)	$L_p$ (dB) furadeira aberta ( $\Delta L_p = \pm 0,1dB$ )	$L_p$ (dB) campainha aberta e pendurada ( $\Delta L_p = \pm 0,1dB$ )	$L_p$ (dB) campainha aberta e apoiada ( $\Delta L_p = \pm 0,1dB$ )
125	50,1	41,9	45,5
250	61,3	48,7	49,0
500	69,0	53,6	55,4
1000	75,5	65,1	72,3
2000	78,9	81,7	87,4
4000	82,1	85,0	86,5
8000	84,9	85,8	86,7

Com esses primeiros resultados, concluiu-se que os parâmetros utilizados no experimento com a furadeira podem ser repetidos para a campainha, pois os valores são semelhantes e compatíveis com a medição. Segue um gráfico que compara a furadeira e a campainha, ambas abertas.



**Gráfico 1 –  $L_p$  (dB) x  $f$  (Hz) para campainha e furadeira, ambas abertas**



**Figura 3 – Medições para a campainha aberta**

O procedimento de medição foi completado efetuando-se medidas de nível de pressão sonora da campainha enclausurada com um fechamento de madeira e depois com um fechamento de espuma, fechamentos esses que foram antes usados no experimento com a furadeira. Além disso, foi medido o nível

de pressão sonora do ruído de fundo, para garantir que o nível sonoro medido corresponde ao da fonte a ser estudada. Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 2:

**Tabela 2 - Medidas com a campainha enclausurada e ruído de fundo**

Frequência (Hz)	Lp (dB) campainha + madeira ( $\Delta L_p = \pm 0,1dB$ )	Lp (dB) campainha + espuma ( $\Delta L_p = \pm 0,1dB$ )	Lp (dB) ruído de fundo ( $\Delta L_p = \pm 0,1dB$ )
125	45,9	45,9	41,8
250	44,9	49,6	37,8
500	48,5	54,6	33,9
1000	60,0	66,6	29,4
2000	73,4	75,1	22,5
4000	68,6	68,7	14,6
8000	69,9	65,0	15,3



**Figura 4(a) – Medições para a campainha enclausurada com madeira**





**Figura 4(b) – Medições para a campainha enclausurada com espuma**

Com os resultados de ruído de fundo pode-se perceber que a campainha é uma fonte sonora com intensidade relativamente alta, apropriada para o experimento em questão.

A diferença do nível de pressão sonora obtido para a campainha pendurada e apoiada pode ser explicada pela alteração da área a ser coberta pelo campo sonoro: com a campainha pendurada, temos um campo esférico, portanto com intensidade  $I = W / 4\pi R^2$  onde  $W$  é a potência sonora da fonte. Quando a campainha está apoiada, apenas metade da esfera sonora é responsável pela emissão do som, sendo que então  $I = W / 2\pi R^2$ , que é uma intensidade maior do que a obtida com a campainha pendurada, conforme pode-se observar nos resultados da tabela 1. Uma análise quantitativa desse fato deve ser feita para o projeto final e a apresentação.

Pelos resultados apresentados na tabela 2 pode-se verificar já alguns conceitos do que foi apresentado na teoria sobre isolamento e absorção. Por exemplo, espuma, que é um material poroso, tem certa capacidade de absorver sons de alta frequência contribuindo no isolamento sonoro para essas frequências.

Para dar continuidade ao projeto, foi construído um fechamento de madeira com uma janela lateral que pode ser fechada ou aberta, e foram cortadas espumas para revestir o fechamento de madeira, sendo que tais espumas também podem ser montadas sozinhas, formando um fechamento de espuma. A madeira utilizada foi um compensado de  $(15 \pm 1)mm$ , e utilizou-se espuma de poliuretano com largura de  $(50 \pm 1)mm$  a  $(55 \pm 1)mm$  (cuja variação deve-se ao corte) e densidade D20 ( $20Kg/m^3$ ). Para montar o fechamento de espuma, utilizou-se armações feitas de jornal e fita adesiva. As figuras 5, 6 e 7 ilustram os fechamentos:



**Figura 5 – Fechamento de madeira**



**Figura 6 – Fechamentos de madeira com revestimento de espuma**



**Figura 7 – Fechamentos de espuma com armação de jornal**

Com os novos fechamentos construídos, foram feitas medidas de nível de pressão sonora, conforme o procedimento anteriormente. Usando o mesmo medidor de nível de pressão sonora, mediu-se novamente o ruído de fundo. Logo depois, à mesma distância de  $(140 \pm 1)cm$ , foram coletadas as medidas relativas à campainha aberta. Esta estava presa com fita adesiva em uma superfície de isopor, que serviu futuramente como uma “tampa inferior” para os fechamentos. Na seqüência foram feitas medidas de nível de pressão sonora para o fechamento de madeira com janela aberta e fechada, para o fechamento de madeira com revestimento de espuma e para o fechamento só de espuma. Os resultados encontrados estão dispostos nas tabelas 3 e 4. Os erros nas medidas de nível de pressão sonora são todos  $\Delta L_p = \pm 0,1dB$ , referentes ao medidor usado.

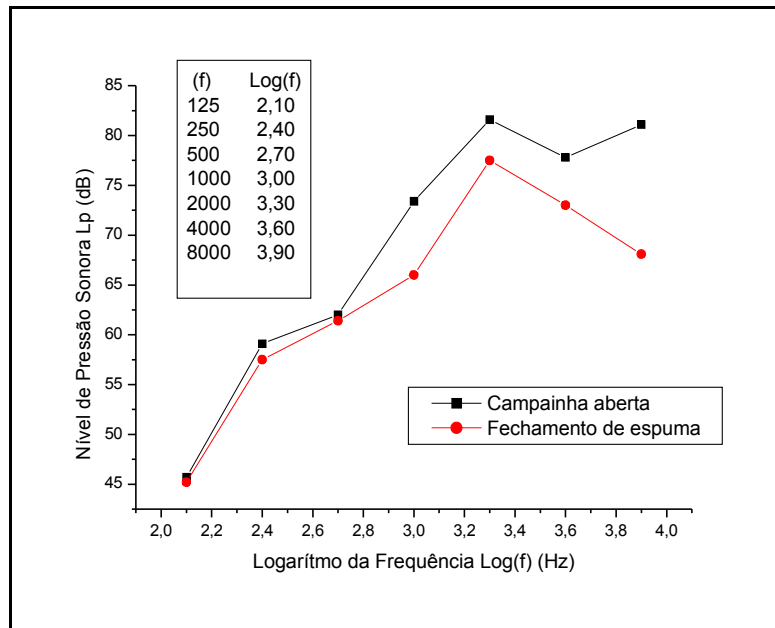
**Tabela 3 - Medidas usando o fundo de isopor (parte 1)**

<b>Frequência f (Hz)</b>	<b>Log( f )</b>	<b>Lp (dB) campainha aberta</b>	<b>Lp (dB) campainha + espuma</b>	<b>Lp (dB) campainha + madeira com espuma</b>
125	2,10	45,7	45,2	45,5
250	2,40	59,1	57,5	58,2
500	2,70	62	61,4	59,7
1000	3,00	73,4	66	59,9
2000	3,30	81,6	77,5	72,1
4000	3,60	77,8	73	69,4
8000	3,90	81,1	68,1	65,4

**Tabela 4 - Medidas usando o fundo de isopor (parte 2)**

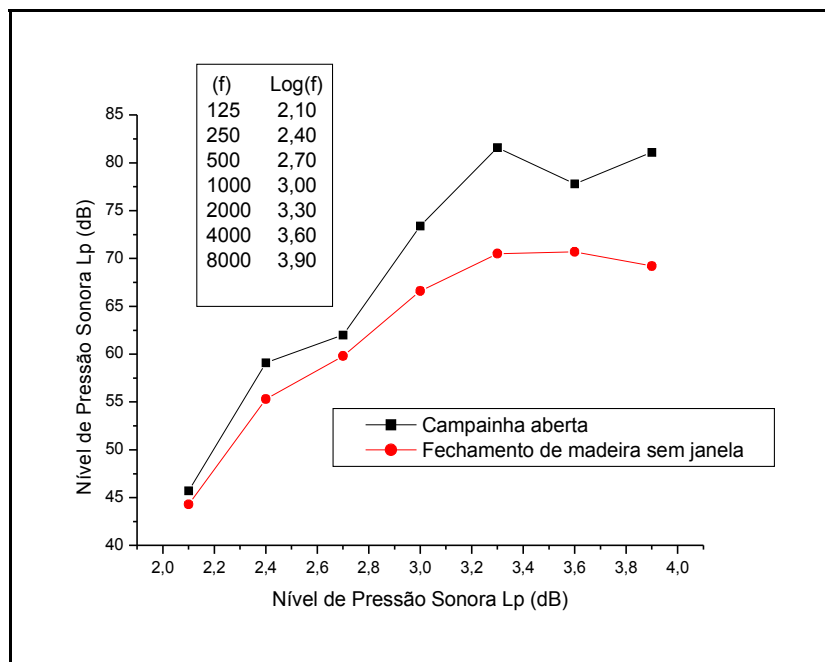
<b>Frequência f (Hz)</b>	<b>Log( f )</b>	<b>Lp (dB) campainha + madeira sem janela</b>	<b>Lp (dB) campainha + madeira com janela</b>	<b>Lp (dB) Ruído de fundo</b>
125	2,10	44,3	54,9	36,4
250	2,40	55,3	62,4	30,7
500	2,70	59,8	60,9	27,8
1000	3,00	66,6	69,6	20,5
2000	3,30	70,5	79,3	17
4000	3,60	70,7	76,3	15,5
8000	3,90	69,2	81,7	15,3

Com os dados foram construídos gráficos para melhor visualização do comportamento das medidas de nível de pressão sonora. O gráfico 2 relaciona nível de pressão sonora e frequência para a campainha aberta e para a campainha com fechamento de espuma.



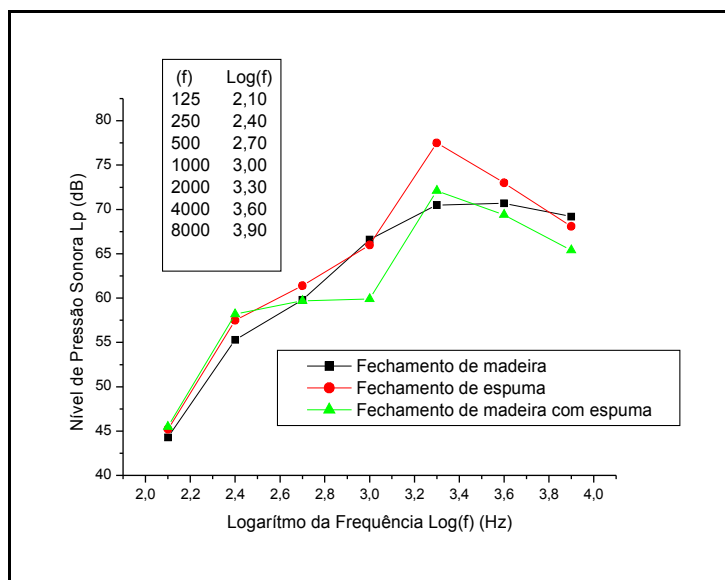
**Gráfico 2 – Lp (dB) x f (Hz) para campanha aberta e fechada com espuma**

Para frequências baixas, a espuma não mostrou influência significativa no isolamento do fechamento. Porém, para frequências altas (a partir de ~500 Hz) nota-se que há um decréscimo no nível de pressão sonora, fenômeno previsto pela teoria. Além disso, note-se um pico do nível de pressão para a frequência de 2000 Hz. O gráfico 3 ilustra o comportamento do nível sonoro do fechamento de madeira sem janela.



**Gráfico 3 – Lp (dB) x f (Hz) para campanha aberta e fechada com madeira sem janela**

Nota-se que o nível de pressão começa ser afetado pela presença do fechamento de madeira logo para frequências baixas. O pico em 2000 Hz é menos acentuado do que para o fechamento de espuma. Nota-se que tanto para espuma quanto para madeira, o pico que havia em 8000 Hz para a campainha aberta some. O gráfico 9 mostra a comparação do comportamento dos fechamentos de madeira, espuma e madeira revestida de espuma.



**Gráfico 4 – Lp (dB) x f (Hz) para campainha fechada com madeira sem janela, com espuma e com madeira revestida de espuma**

Neste gráfico nota-se uma curiosidade. O fechamento de madeira revestida com espuma apresentou valores de nível de pressão maiores do que os apresentados pelo fechamento só de madeira, para frequências baixas e para a frequência de 2000 Hz. Isso pode ter ocorrido por possíveis “vazamentos” através do fundo de isopor, que não parecia ser muito adequado às dimensões dos fechamentos. Para testar essa hipótese, o fundo de isopor foi trocado por um forro absorvedor do fabricante “Armstrong”, chamado “Cirrus Tegular”. A amostra desse forro pertence ao laboratório da orientadora e foi emprestado para fazer as medidas.

As medidas foram repetidas, começando com a campainha aberta apoiada diretamente no forro. Notou-se que o atrito da campainha vibrante contra o forro produzia uma característica oscilante no som, provavelmente pelo fato de o material do forro ser relativamente rígido. Por isso, a campainha foi posteriormente apoiada em um pedaço de isopor. A tabela 5 mostra ambos os comportamentos, juntamente com a medida de ruído de fundo:

**Tabela 5 - Medidas de campainha aberta e ruído de fundo usando o forro**

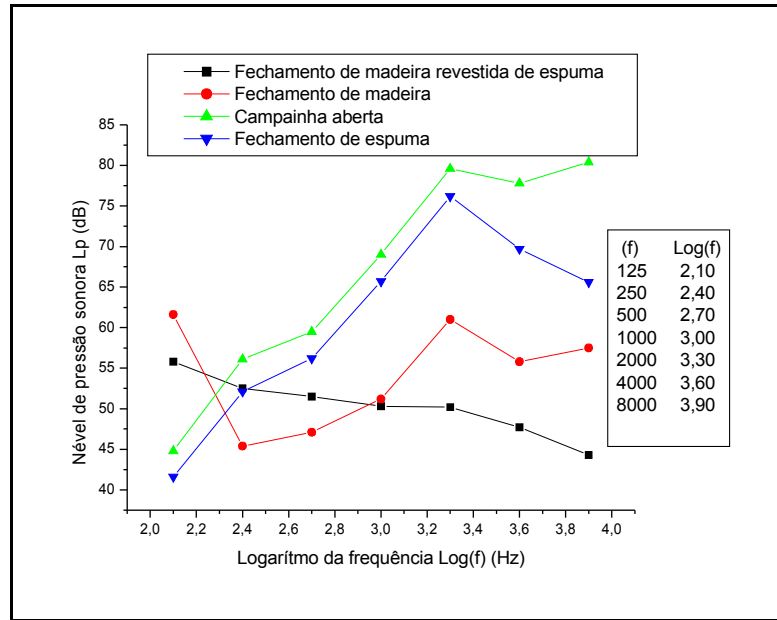
<b>Frequência f (Hz)</b>	<b>log f (Hz)</b>	<b>Lp (dB) campainha aberta (direto no forro)</b>	<b>Lp (dB) campainha aberta (apoio de isopor)</b>	<b>Lp (dB) Ruído de fundo</b>
125	2,10	44,1	44,8	36,4
250	2,40	59	56,1	30,7
500	2,70	63,8	59,5	27,8
1000	3,00	70,9	69	20,5
2000	3,30	81,4	79,6	17
4000	3,60	77,8	77,8	15,5
8000	3,90	80,9	80,4	15,3

Foi escolhido utilizar a campainha apoiada no pedaço de isopor para evitar possíveis variações nas medidas, e efetuou –se o restante das medidas cujos resultados estão apresentados na tabela 6.

**Tabela 6 - Medidas usando o forro absorvedor**

<b>Frequência f (Hz)</b>	<b>log f (Hz)</b>	<b>Lp (dB) campainha +espuma</b>	<b>Lp (dB) campainha + madeira com espuma</b>	<b>Lp (dB) campainha + madeira</b>	<b>Lp (dB) campainha + madeira com janela</b>
125	2,10	41,6	55,8	61,6	63,8
250	2,40	52,1	52,5	45,4	48,4
500	2,70	56,2	51,5	47,1	50,5
1000	3,00	65,7	50,3	51,2	58,9
2000	3,30	76,2	50,2	61	70,3
4000	3,60	69,7	47,7	55,8	71,5
8000	3,90	65,6	44,3	57,5	75,9

O gráfico 5 relaciona o nível de pressão em função da frequência para os fechamentos de espuma, madeira e madeira revestida com espuma, além da campainha aberta e apoiada no isopor.



**Gráfico 5 – Lp (dB) x f (Hz) para campainha fechada com madeira sem janela, com espuma e com madeira revestida de espuma e fundo de forro absorvedor**

Nota-se que ainda assim o fechamento de madeira revestida de espuma apresenta níveis de pressão sonora mais altos do que os níveis do fechamento de madeira, até a frequência de 1000 Hz. Uma nova sugestão para explicar tal fenômeno diz respeito à diferença de material do forro para com o resto do fechamento: Da primeira vez, tínhamos um forro de isopor, e dessa segunda, um forro absorvedor. Para testar essa hipótese, devem ser feitas medidas com um fundo do mesmo material do fechamento, uma placa de madeira compensada.

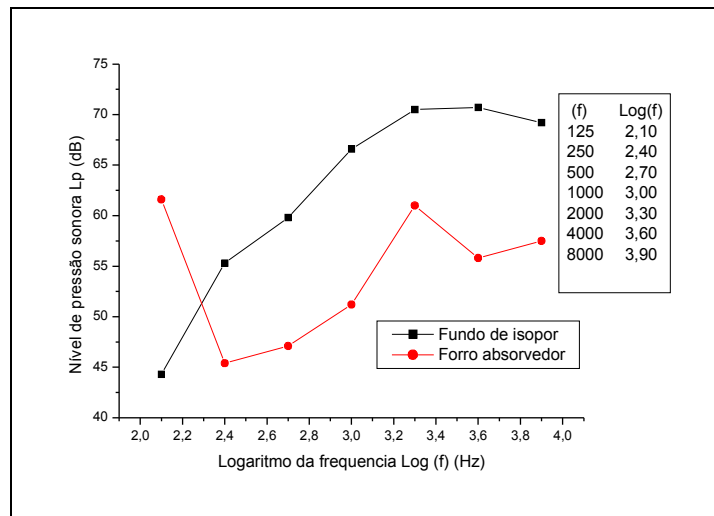
Para 125 Hz observa-se uma elevação do nível de pressão para os fechamentos de madeira e madeira revestida de espuma, mais alto até que a campainha aberta. Apesar deste fenômeno não ter sido observado antes, pode ter ocorrido devido aos modos normais de vibração referentes às dimensões do fechamento de madeira, que por ressonância podem resultar em níveis de pressões sonoras até maiores do que os níveis da própria campainha. O cálculo da frequência dos modos normais de vibração para uma sala retangular é dado pela seguinte expressão:

$$f = \left(\frac{c}{2}\right) \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2}$$

Onde  $c$  é a velocidade do som,  $c=340,29$  m/s à nível do mar,  $n_x$ ,  $n_y$  e  $n_z$  são números inteiros referentes aos modos de vibração, e  $L_x$ ,  $L_y$  e  $L_z$  são as dimensões da sala retangular. Efetuando

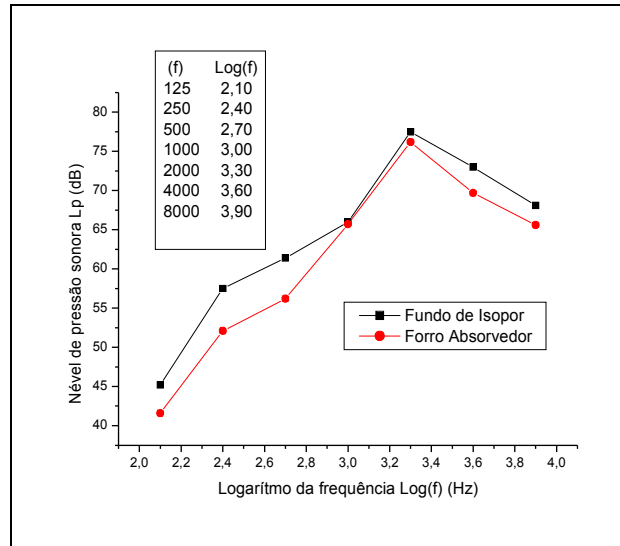
calculo para o fechamento de madeira do experimento, considerando  $n_x = n_y = n_z = 1$ , é obtido  $f \approx 560\text{Hz}$ . Para  $(n_x, n_y, n_z) = (1,0,0)$ , supondo  $L_x = 0,56\text{m}$ , temos  $f \approx 300\text{Hz}$ . Esse é o menor valor que pode ser calculado, e é bem diferente de 125 Hz. Ou seja, a frequência de modos normais de vibração não explicam esse fenômeno, o que nos leva à possibilidade do fundo de material diferente do fechamento também ser a causa dessa discrepância.

Outra diferença entre os fechamentos com fundos distintos é referente à frequência de 8000 Hz. Para o fundo de isopor, o fechamento de madeira fez com que o nível de pressão decrescesse para tal frequência, diferentemente do que foi observado para o fundo de forro absorvedor, que manteve o aspecto da curva para a campainha aberta, embora menos intenso. Os gráficos 6 e 7 mostram as diferenças de comportamentos dos dois fundos, para os fechamentos de madeira e de espuma.



**Gráfico 6 – Lp (dB) x f (Hz) para fechamento de madeira com diferentes fundos**

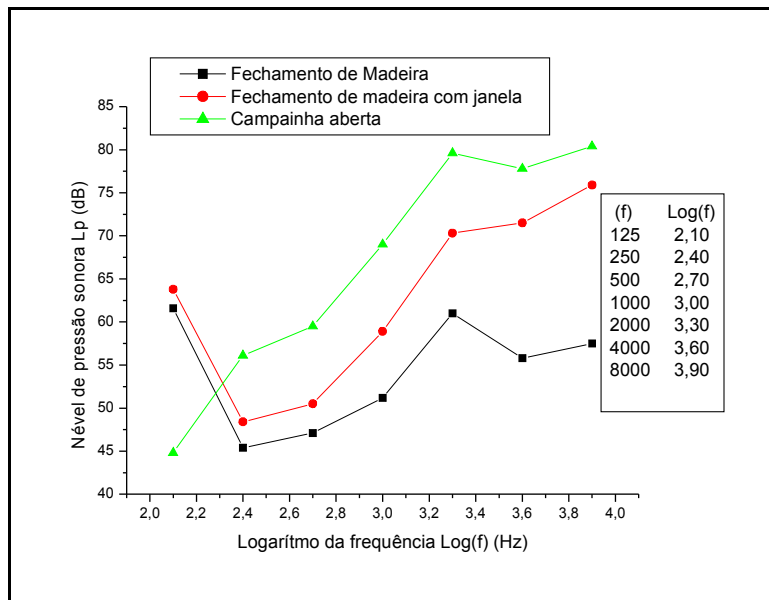




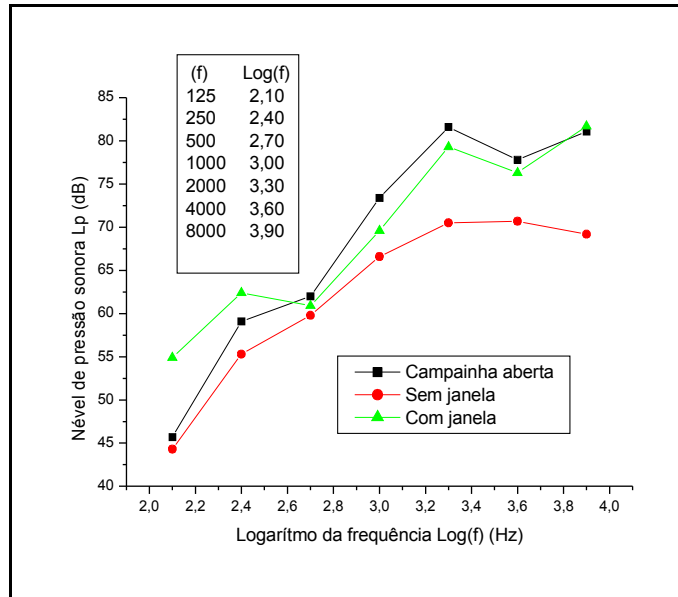
**Gráfico 7 – Lp (dB) x f (Hz) para fechamento de espuma com diferentes fundos**

Em geral, vemos que o fechamento com fundo de forro absorvedor foi mais eficaz do que o fechamento com fundo de isopor, tratando-se de isolamento e absorção.

Os gráficos 8 e 9 mostram os resultados do fechamento de madeira com janela, para ambos fundos:



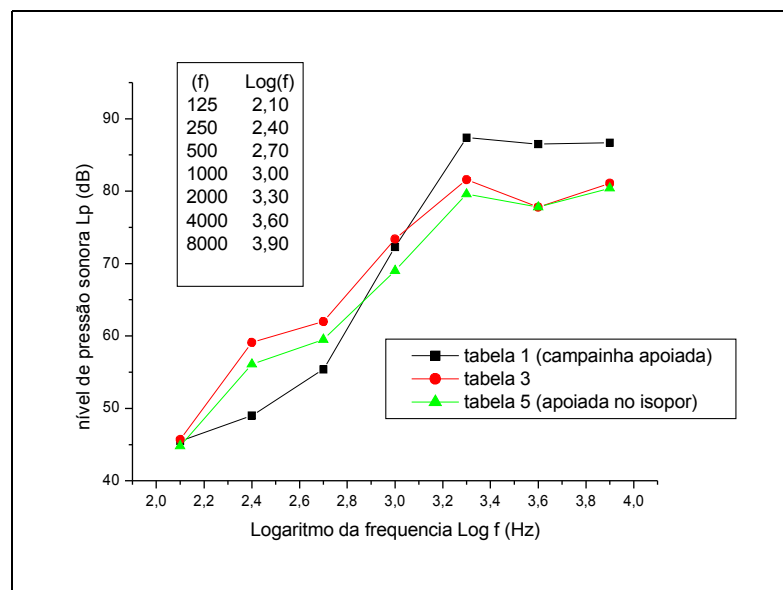
**Gráfico 8 – Lp (dB) x f (Hz) para campanha fechada com madeira com e sem janela (forro absorvedor)**



**Gráfico 9 –  $L_p$  (dB) x  $f$  (Hz) para campanha fechada com madeira com e sem janela (fundo isopor)**

Vemos que, a par dos fenômenos “estranhos” ocorridos com o fundo de forro absorvedor, ambos os gráficos se comportam de maneira semelhante e prevista: Para fechamentos com janela, o nível de pressão é maior que para fechamentos sem janela.

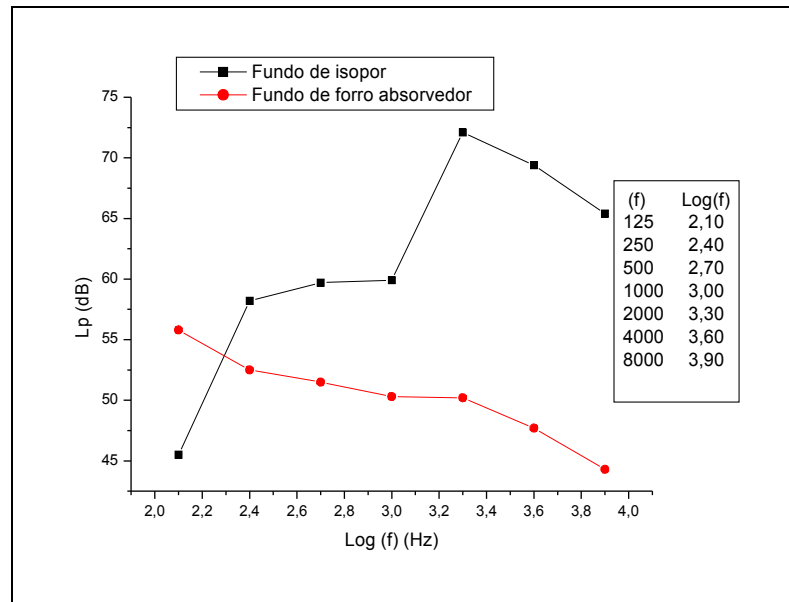
O gráfico 10 com as curvas referentes à campanha aberta apoiada, para as 3 medidas feitas correspondente as tabelas 1, 3 e 5.



**Gráfico 10 –  $L_p$  (dB) x  $f$  (Hz) para campanha aberta em diversas medidas**

Vemos pelo gráfico 10 que em todas medidas aparece uma elevação do nível de pressão para a frequência de 8000 Hz, o que indica uma característica do nível sonoro gerado pela campainha.

O gráfico 11 relaciona o nível de pressão sonora do fechamento de madeira revestida de espuma para ambos os fundos usados:



**Gráfico 11 – Lp (dB) x f (Hz) para madeira revestida de espuma para ambos fundos**

Pelo gráfico 11 notamos que o fechamento de madeira com revestimento de espuma é mais eficaz para o fundo de forro absorvedor, conforme a frequência aumenta. Isso justamente porque o fundo é de material absorvedor comercial, ou seja, feito para absorver altas frequências.

Como o fundo da caixa utilizado foi diferente do material das paredes e tampa optou-se por refazer o experimento com o fundo de madeira igual ao restante da caixa para esclarecer dúvidas sobre a influência desse fundo no comportamento do isolamento do fundo da caixa. Para esse relatório final, versão definitiva, foi construído um fundo do mesmo material da caixa de madeira, ou seja, um compensado de  $(15 \pm 1)mm$  e realizada novo conjunto de medições. Nas tabelas 7 e 8 são apresentados os resultados obtidos.

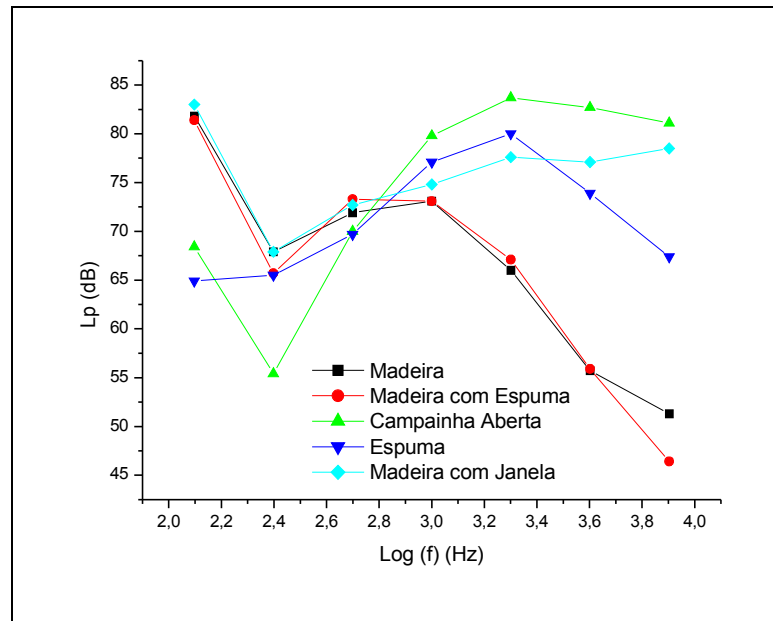
**Tabela 7 - Medidas usando o fundo de madeira**

<b>Frequência f (Hz)</b>	<b>log f (Hz)</b>	<b>Lp (dB) Ruído de fundo</b>	<b>Lp (dB) campainha aberta</b>	<b>Lp (dB) campainha + madeira</b>	<b>Lp (dB) campainha + madeira com janela</b>
125	2,10	27	68,4	81,8	83
250	2,40	22,4	55,4	67,9	67,9
500	2,70	22	70	71,9	72,7
1000	3,00	20,6	79,8	73,1	74,8
2000	3,30	18,3	83,7	66	77,6
4000	3,60	15	82,7	55,7	77,1
8000	3,90	20	81,1	51,3	78,5

**Tabela 8 - Medidas usando o fundo de madeira**

<b>Frequência f (Hz)</b>	<b>log f (Hz)</b>	<b>Lp (dB) campainha+ madeira com espuma</b>	<b>Lp (dB) campainha + espuma</b>
125	2,10	81,4	64,9
250	2,40	65,7	65,5
500	2,70	73,3	69,7
1000	3,00	73,1	77,1
2000	3,30	67,1	80
4000	3,60	55,9	73,9
8000	3,90	46,4	67,4

Com tais resultados foi construído o gráfico 12 mostrando os valores dos níveis de pressão sonora em função da frequência para as diferentes configurações.



**Gráfico 12 – Lp (dB) x f (Hz) para fundo de madeira**

Nota-se que o problema apresentado para os fundos do experimento anterior foi resolvido. Com o fundo de madeira, os fechamentos de madeira e de madeira com espuma apresentaram comportamentos semelhantes, sendo que para a frequência de 8000 Hz, o fechamento de madeira com espuma mostrou-se o mais efetivo, comprovando o fenômeno de que a combinação de isolamento de um material rígido e absorção de um material poroso é mais eficaz.

## Conclusões

Como o projeto é destinado a apresentações, uma primeira preocupação diz respeito à segurança do público alvo. Ondas sonoras são consideradas prejudiciais à saúde humana a partir de um nível de pressão sonora de 85 dB, para uma exposição de no mínimo 8 horas. Como o nível máximo de pressão sonora obtido foi de  $(82,1 \pm 0,1)dB$ , e como as exposições necessárias para se efetuar análises qualitativas e quantitativas da campanha não passam de segundos, não há necessidade de uma atenção específica para esse termo.

Foram observados fenômenos não previstos nas medidas: para os fundos de isopor e de forro absorvedor, os fechamentos de madeira revestida com espuma apresentaram níveis de pressão sonora *maiores* do que os níveis apresentados pelo fechamento de madeira sem janela. Além disso, picos de nível de pressão para a frequência de 125 Hz que não existiam para a campanha aberta foram observados nas medidas com o fechamento de madeira e de madeira revestida com espuma. A primeira hipótese para explicar esse fenômeno refere-se aos modos normais de vibração da caixa de madeira, porém o cálculo desses modos resultou em uma frequência diferente. Usando o fundo de madeira, esses fenômenos se apresentaram de outra maneira: os fechamentos de madeira e de madeira com espuma apresentaram dados semelhantes, e não discrepantes como havia sido obtido para os outros fundos, sendo que a diferença de material entre o fechamento e o fundo pode ser uma explicação para os resultados não previstos. Por outro lado, o pico em 125 Hz agora também apareceu para a campanha aberta, o que pode ser uma consequência de a campanha ter sido apoiada na madeira, um material denso.

Outro fenômeno não previsto foi o pico de nível de pressão sonora para a frequência de 8000 Hz, para os fundos de isopor e de forro absorvedor. O pico sumiu para o fechamento de madeira com fundo de isopor, e não para o fechamento de madeira com fundo de forro absorvedor. Para o fundo de madeira, o pico sumiu mesmo para a campanha aberta, outro fato que talvez possa ser explicado pelo tipo de apoio usado.

Excetuando os pontos apresentados, o experimento se comportou de maneira esperada. Para frequências baixas, a espuma não mostrou influência significativa no fechamento. Porém, para frequências altas (a partir de ~500 Hz) nota-se que há um decréscimo no nível de pressão sonora. Tal fato foi previsto pela teoria, a qual diz que as frequências que são absorvidas por um material poroso são aquelas referentes a pequenos comprimentos de onda, ou seja, altas frequências.

Nota-se que o fechamento de madeira utilizado mostrou-se mais eficaz do que o fechamento de espuma, mostrando o caráter de isolamento sonoro. O fechamento de madeira revestida de espuma se comportou de maneira esperada para altas frequências, tornando-se mais eficaz do que os fechamentos de espuma e de madeira. O fechamento de madeira com janela mostrou-se menos eficaz do que o fechamento de madeira sem janela, como previsto.

Conclui-se então que o experimento é bastante adequado para mostrar o comportamento de materiais isolantes e absorvedores, além de abordar questões básicas da acústica. Um conjunto de

medidas poderá ser feito para a versão definitiva do relatório final, utilizando um fundo de compensado de madeira para os fechamentos. Assim, serão verificadas as hipóteses acerca dos fenômenos não previstos observados até então.

## Referências

- \* <http://www.armstrong.com> (fabricante do forro absorvedor Cirrus Tegular);
  - \* <http://www.music-center.com.br/> (site sobre tecnologia musical, com informações sobre níveis de pressão sonora e acústica em geral);
  - \* [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0034-72992003000600007&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0034-72992003000600007&script=sci_arttext) (artigo sobre exposição sonora e seus danos);
  - \* <http://hermes.ucs.br/ccet/demc/vjbrusam/inst/sonar.pdf> (artigo sobre medidor de distâncias com ultrassom, onde encontra-se informações sobre ondas sonoras);
- \* Mehta, Madan. Architectural acoustics: principles and design – Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey 1999;

**Parecer do orientador ao relatório parcial:** Minha orientadora, a Profa. Dra. Stelamaris Rolla Bertoli concorda com o expressado neste relatório parcial e deu a seguinte opinião:

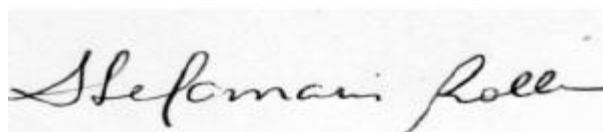
O aluno estudou alguns conceitos importantes para o desenvolvimento do projeto, efetuou medidas e analisou parcialmente os resultados. Considero que o aluno tem capacidade de completar o projeto, fixar conceitos importantes e apresentar um bom trabalho final.

Profa. Dra. Stelamaris Rolla Bertoli  
Orientadora:

**Parecer do orientador ao relatório final (versão prévia):** Minha orientadora, a Profa. Dra. Stelamaris Rolla Bertoli concorda com o expressado neste relatório final (versão prévia) e deu a seguinte opinião:

O aluno Rodolfo Thomazelli, RA 025071, desenvolveu um experimento sobre uma das formas de controle de ruído, denominada controle de ruído na fonte, que consiste em enclausurar a fonte de ruído. A eficiência do enclausuramento depende das escolhas corretas de materiais acústicos, que podem isolar ou absorver o som com potencial diferenciado em função da frequência. O aluno executou a montagem, efetuou as medidas do nível de pressão sonora em função da frequência para diferentes tipos e combinações de materiais e analisou os resultados. Os resultados mostraram os diferentes desempenhos e buscou-se justificar fisicamente esses comportamentos. Alguns resultados ainda não estão totalmente esclarecidos e necessitam de mais testes.

De uma forma geral acho que o objetivo do trabalho foi atingido e o aluno aprendeu novos conceitos.



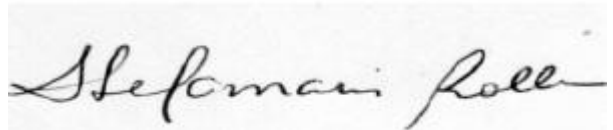
Profa. Dra. Stelamaris Rolla Bertoli  
Orientadora:



**Parecer do orientador ao relatório final (versão definitiva):** Minha orientadora, a Profa. Dra. Stelamaris Rolla Bertoli concorda com o expressado neste relatório final (definitiva) e deu a seguinte opinião:

O experimento desenvolvido pelo aluno Rodolfo Thomazelli, RA 025071, teve por objetivo mostrar uma das formas de controle de ruído, denominada controle de ruído na fonte, que consiste em enclausurar a fonte de ruído. A eficiência do enclausuramento depende das escolhas corretas de materiais acústicos, que podem isolar ou absorver o som com potencial diferenciado em função da frequência. O aluno executou a montagem, efetuou as medidas do nível de pressão sonora em função da frequência para diferentes tipos e combinações de materiais e analisou os resultados. Um novo conjunto de medições esclareceu os resultados que estavam discrepantes. Mostrou-se que um bom isolamento se faz com a combinação de materiais rígidos com materiais porosos para alcançar o melhor desempenho. Para mostrarem os diferentes desempenhos e buscou-se justificar fisicamente esses comportamentos. Alguns resultados ainda não estão totalmente esclarecidos e necessitam de mais testes.

De uma forma geral considero que o objetivo do trabalho foi atingido e o aluno aprendeu técnicas de medida de ruído e novos conceitos.

A handwritten signature in black ink, reading "Stelamaris Rolla". The signature is written in a cursive style with a horizontal line at the end.

Profa. Dra. Stelamaris Rolla Bertoli

Orientadora: