

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

INFLUÊNCIA DE POROS CONTROLADOS NA ABSORÇÃO SONORA EM ESPUMA  
DE POLIURETANO RÍGIDA

por

Giordano Demoliner

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

Porto Alegre, Novembro de 2013

INFLUÊNCIA DE POROS CONTROLADOS NA ABSORÇÃO SONORA EM ESPUMA  
DE POLIURETANO RÍGIDA

por

Giordano Demoliner

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

Prof. Thamy Cristina Hayashi  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Letícia Fleck Fadel Miguel

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas

Prof. Dr. Rogério José Marczak

Prof. Dr. Juan Pablo Raggio Quintas

Porto Alegre, 11 de novembro de 2013.

## AGRADECIMENTOS

Após 7 anos de estudos intensos chego ao fim da minha graduação. Em alguns momentos pensei em desistir mas pessoas especiais, as quais venho agradecer agora, ajudaram-me a manter o caminho e me proporcionar a grande felicidade que sinto hoje.

Primeiramente agradeço a Universidade Federal do Rio Grande do Sul por me proporcionar mais do que o acesso ao conhecimento de qualidade, mas a oportunidade de conhecer pessoas incríveis. Agradeço aos colegas de engenharia Mecânica Bernardo Barcelos, Maurício Armani e Pedro Schaan pela amizade. Queria agradecer a minha orientadora professora Letícia Fleck Fadel Miguel por todo o apoio para desenvolver este trabalho.

Queria agradecer a toda equipe do Laboratório de Cerâmicos (LACER) por terem me acolhido como uma segunda família e por todo o conhecimento adquirido. Principalmente ao professor Carlos Pérez Bergmann pela ajuda prestada neste trabalho. E aos amigos Caio Marques, Antonio Takimi e ao bolsista Mauricio Heberle por me ajudar no desenvolvimento da parte experimental do trabalho.

Seguindo, queria agradecer a toda equipe do Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA) da UFSC por terem me recebido no laboratório para realização dos ensaios experimentais que formam a parte principal deste trabalho. Agradeço principalmente ao professor Arcanjo Lenzi por ter disponibilizado o espaço do LVA e a doutoranda Ana Maria Borges Horonato e ao mestrando Marcos Ricardo de Souza por me ajudarem a realizar os ensaios.

Na sequência agradeço aos amigos da minha terra natal, Capão da Canoa. Aí estão Lucas Nunes, Bruno Mota, Thiago Mota, Marcelo Medeiros, José Tiago, Rodrigo Gonçalves e os parceiros da banda Trevoáh. Pessoas incríveis, companheiros de música e conselheiros. Um agradecimento especial ao amigo, ou melhor, um quase irmão Gregório de Castilhos. Parceiro de discussões e pensamentos sobre a engenharia, a humanidade e a vida.

Bom, também queria agradecer especialmente a algumas pessoas que conheci em Porto Alegre que agregaram muito na minha vida. Ao grande amigo Guaracy Dias, Ari Liano, Julya Santos e a Zulima Beheregaray, uma família incrível. As amigas Cristiane Maia e Brenda Fernandes, e os amigos Guilherme Sieben, Lorenzo Bastos e Pablo Dias.

Finalmente agradecer a minha família e principalmente aos meus pais, Maria Ângela Cardoso Demoliner e Valmor Demoliner que sempre me apoiaram em todas minhas escolhas e nunca mediram esforços para que eu realizasse minhas aspirações. Este diploma eu dedico a eles.

“A persistência é o menor caminho do êxito.”

Charles Chaplin

DEMOLINER, G. **Influência de poros controlados na absorção sonora em espuma de poliuretano rígida**. 2013. 15 páginas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

## RESUMO

Neste trabalho buscou-se determinar a relação entre o coeficiente de absorção sonora e a variação de poros propositais gerados em uma espuma de poliuretano rígida. Utilizaram-se métodos experimentais, onde se produziram corpos de prova de espuma de poliuretano rígida a partir de processos de expansão. Determinaram-se os coeficientes de absorção sonora dos corpos de prova utilizando-se ensaios de impedância acústica para baixas frequências. As curvas de absorção sonora encontradas nos ensaios mostraram grande similaridade com as curvas de absorção de equipamentos como painéis ressonantes e ressonadores de membrana.

**PALAVRAS-CHAVE:** Espuma rígida, Absorção sonora.

DEMOLINER, G. **Influence of controlled pores in sound absorption of rigid polyurethane foam**. 2013. 15 pages. Monograph (Final paper in Mechanical Engineering) – Mechanical Engineering Department, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

## ABSTRACT

In this work we sought to determine the relationship between the sound absorption coefficient and the variation of pores purposeful generated in rigid polyurethane foam. Experimental methods were used, which produced test bodies of rigid polyurethane foam from expansion processes. The sound absorption coefficients of the specimens were determined using acoustic impedance testing for low frequencies. The sound absorption curves found in trials showed great similarity with the curves for resonant absorption panels and resonators membrane.

**KEYWORDS:** Rigid foam, Sound absorption.

## ÍNDICE

1.	Introdução .....	1
2.	Objetivos .....	1
3.	Revisão bibliográfica .....	1
4.	Fundamentação teórica.....	1
4.1.	Coeficiente de absorção sonora .....	1
4.2.	Sistema massa-mola .....	2
4.3.	Mecanismo de absorção sonora .....	3
5.	Procedimento experimental.....	3
5.1.	Fabricação da matriz .....	3
5.2.	Fabricação dos corpos de prova.....	4
5.2.1.	Fabricação dos corpos de prova controle .....	5
5.2.2.	Fabricação dos corpos de prova com poros controlados .....	6
5.3.	Ensaio de impedância acústica.....	8
6.	Resultados e discussão .....	10
7.	INcertezas .....	14
8.	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros .....	14
8.1.	Sugestões para trabalhos futuros .....	14
9.	Referências bibliográficas .....	14
	Anexo 1.....	16
	Apêndice 1 .....	18
	Apêndice 2.....	19

## LISTA DE SÍMBOLOS

Variável	Descrição	Unidade
$c_0$	Velocidade do som no ar	m/s
$d$	Diâmetro	m
$E_{abs}$	Energia absorvida	J
$E_{inc}$	Energia incidida	J
$E_{dis}$	Energia dissipada	J
$E_{ref}$	Energia refletida	J
$E_{tra}$	Energia transmitida	J
$f_c$	Frequência de corte	Hz
$f_{min}$	Frequência mínima	Hz
$f_n$	Frequência natural	Hz
$k$	Rigidez	N/m
$m$	Massa	kg
$s$	Distância entre os microfones	m

## 1. INTRODUÇÃO

Espumas de poliuretano (PU) são largamente utilizadas na indústria nas mais variadas aplicações comerciais, desde espumas para travesseiros a espumas para tratamentos acústicos e aplicações automobilísticas. As espumas de PU são apresentadas basicamente de três formas: espumas flexíveis, semi-flexíveis e rígidas. As espumas normalmente utilizadas para tratamento acústico são do tipo flexível. Essas espumas apresentam ótima absorção sonora para altas frequências. As espumas comerciais utilizadas para absorção sonora só apresentam boa atenuação para baixas frequências quando possuem grandes espessuras [Vilar, 1999, Adaptado].

A motivação para o desenvolvimento deste trabalho deve-se ao fato de existirem poucas referências na literatura quanto ao estudo de espumas de PU rígidas para aplicação em tratamentos acústicos para baixas frequências bem como a influência da mudança de parâmetros de porosidade nas suas propriedades de absorção sonora.

## 2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo, através de procedimentos experimentais, quantificar o comportamento do coeficiente de absorção sonora em baixas frequências para uma espuma rígida de PU através da geração de poros controlados na mesma. Esses poros são variados de duas formas: porcentagem de poros com relação ao volume total do corpo de prova e diâmetro do poro.

A principal contribuição deste trabalho está em relacionar as curvas de absorção sonora da espuma rígida estudada com as curvas de ressonadores de Helmholtz e de painéis ressonantes.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Rayleigh, 1896, apresentou estudos pioneiros para teoria de propagação e atenuação sonora em meios porosos rígidos.

Em 1999, Lima, estudou o comportamento do coeficiente de absorção sonora para espumas de poliuretano revestidas.

Em 2009, Allard e Atalla, apresentaram uma série de modelos analíticos para comportamento acústico de materiais porosos. Neste estudo foram descritos alguns mecanismos de absorção com relação ao tamanho dos poros para baixas e altas frequências.

Mareze, 2013, desenvolveu na sua tese de doutorado, métodos para caracterização de materiais porosos de estrutura rígida a serem utilizados como absorvedores sonoros. Mareze utilizou métodos experimentais e buscou a validação dos mesmos através de modelos matemáticos para materiais porosos de estrutura rígida.

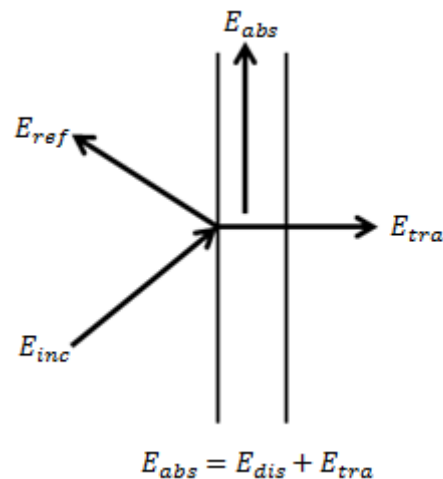
## 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seguir apresenta-se uma breve fundamentação teórica sobre alguns conceitos utilizados no presente estudo.

### 4.1. Coeficiente de absorção sonora

Segundo Bistafa, 2006, em recintos fechados, a propagação da onda a partir da fonte sofre interferência das ondas que são refletidas nas superfícies que delimitam o recinto – paredes, teto e piso.





**Figura 4.1 – Balanço energético do som incidindo sobre uma superfície.**

De acordo com a Figura 4.1, ao incidir sobre uma superfície, parte da onda sonora é refletida, parte é absorvida e o restante é transmitido através da superfície.

A capacidade de uma superfície absorver a onda sonora é dada pelo coeficiente de absorção sonora,  $\alpha$ , que é definido pela Equação 4.1.

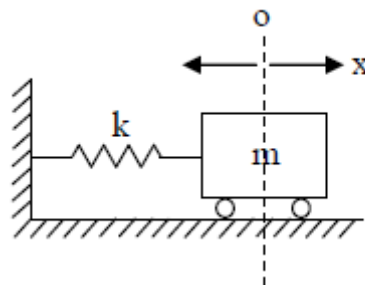
$$\alpha = \frac{E_{abs}}{E_{inc}} = \frac{E_{inc} - E_{ref}}{E_{inc}} = 1 - \frac{E_{ref}}{E_{inc}}, \quad (4.1)$$

onde:

$E_{abs}$  é a energia sonora absorvida ;  
 $E_{dis}$  é a energia sonora dissipada;  
 $E_{inc}$  é a energia sonora incidente.  
 $E_{ref}$  é a energia sonora refletida; e  
 $E_{tra}$  é a energia sonora transmitida.

#### 4.2. Sistema massa-mola

Segundo Miguel, 2006, um sistema massa-mola com um grau de liberdade (1 GDL) sem amortecimento pode ser representado pela Figura 4.2 e sua frequência natural dada pela Equação 4.2.



**Figura 4.2 – Sistema massa-mola com 1 GDL sem amortecimento.**

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.2)$$

onde:

$f_n$  é a frequência natural do sistema em Hz;

$k$  é a rigidez da mola em N/m; e

$m$  é a massa em kg.

#### 4.3. Mecanismo de absorção sonora

No controle de ruído, os materiais porosos utilizados possuem duas fases: fase sólida (estrutura do material) e a fluida (ar no interior dos poros). A dissipação da energia ocorre basicamente através da interação das duas fases do material, ocorrendo a transformação da onda sonora em calor [Fahy, 2000].

Segundo Mareze, 2013, o mecanismo de absorção sonora em materiais absorvedores se deve principalmente à conversão de energia através do movimento organizado das partículas do meio fluido, resultante do movimento imposto no interior do material.

Mareze, 2013, diz que as três formas básicas de dissipação da energia sonora em uma espuma são as seguintes:

1) Dissipação viscosa: acontece através das camadas de contorno viscosas geradas pelo cisalhamento do fluido em regiões próximas à superfície do material;

2) Dissipação térmica: acontece através das camadas de contorno térmicas geradas por fluxos de calor irreversíveis na interface sólido/fluido; e

3) Dissipação estrutural: acontece devido ao movimento da estrutura do material.

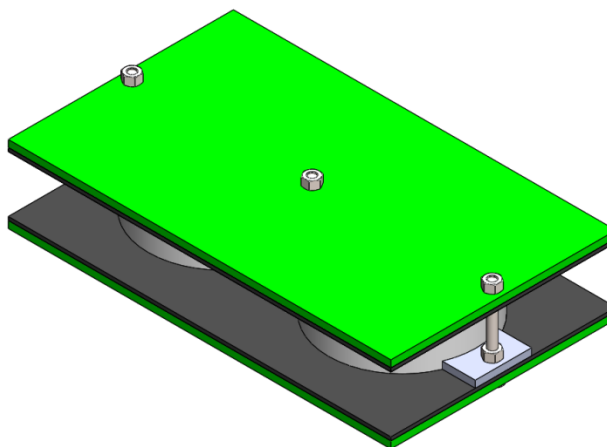
Mareze, 2013, também comenta que em baixas frequências surgem outros mecanismos de absorção sonora. Um destes mecanismos trata-se da compressão isotérmica do ar.

## 5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A seguir apresentam-se as principais etapas para a confecção dos corpos de prova e realização dos ensaios experimentais.

### 5.1. Fabricação da matriz

A primeira etapa desenvolvida foi o projeto 3D da matriz para fabricação dos corpos de prova, a qual foi realizada através do *software Solidworks*. Na Figura 5.1 pode-se observar a vista isométrica do projeto da matriz.



**Figura 5.1-Vista isométrica do projeto da matriz realizado em *Solidworks*.**

A partir da modelagem 3D realizou-se a construção da matriz utilizando-se os materiais listados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1-Materiais utilizados na fabricação da matriz.

Quantidade	Descrição do material
2	Chapa de acrílico (240 x 180 x 5) mm
2	Chapa de borracha (240 x 180 x 3) mm
3	Parafuso M5 x 40
6	Porca M5
2	Tubo PVC com diâmetro de 100 mm e 40 mm de comprimento
4	Chapa de acrílico (20 x 20 x 5) mm

Após a fabricação, a matriz ficou conforme a Figura 5.2. A confecção da matriz seguiu o projeto, exceto com uma modificação na forma de fechamento. Foram utilizadas porcas “borboleta” ao invés de porcas normais para agilizar o fechamento e a abertura da mesma.



Figura 5.2-Matriz após a confecção.

As chapas de borracha foram utilizadas para interface de vedação entre os tubos e as chapas de acrílico.

## 5.2. Fabricação dos corpos de prova

Foram fabricados corpos de prova controle sem poros controlados e corpos de prova com poros controlados. Na Tabela 5.2 seguem as quantidades de corpos de prova fabricados e ensaiados, totalizando 24 corpos de prova. Buscou-se fabricar mais de um corpo de prova da mesma formulação para possibilitar o cálculo do coeficiente de absorção médio utilizado na apresentação dos resultados no Capítulo 6.

Tabela 5.2-Corpos de prova fabricados e ensaiados.

Poros controlados	Diâmetros dos poros		
	20 mm	25 mm	30 mm
5%	2	2	2
10%	2	2	2
15%	3	3	3
Corpos de prova controle			3

### 5.2.1. Fabricação dos corpos de prova controle

Fabricaram-se os corpos de prova através do processo de expansão de uma mistura bicomponente de fácil manuseio, disponível no mercado para obtenção de espuma de poliuretano rígida. Essa mistura é formada pelos componentes descritos na Tabela 5.3. Mais informações sobre os reagentes estão disponíveis no Apêndice 1.

**Tabela 5.3-Componentes da mistura.**

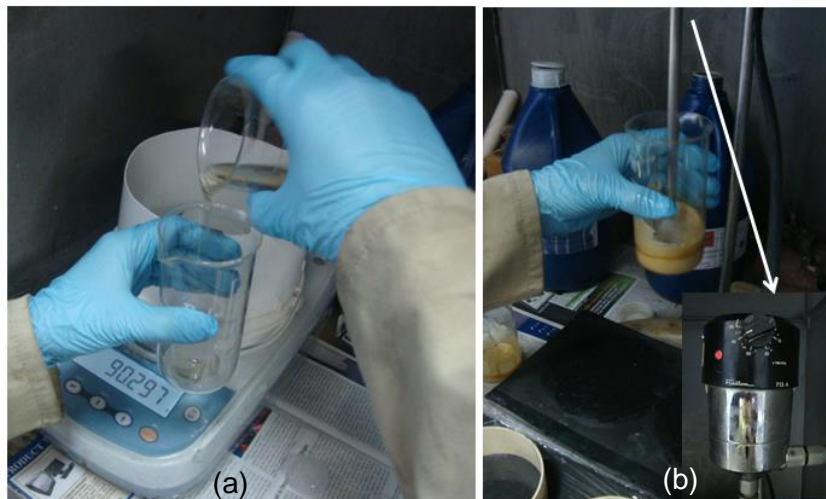
Componente	Breve Descrição
A-Mistura de polióis e poliésteres	Líquido viscoso e inflamável
B-Isocianatos (agente expensor)	Líquido pouco viscoso não inflamável

Os dois componentes foram misturados em um *Becker* na proporção em massa de 11(A):10(B) de acordo com a especificação do fabricante. A proporção em massa do corpo de prova controle pode ser observada na Tabela 5.4.

**Tabela 5.4-Massas dos reagentes do corpo de prova controle.**

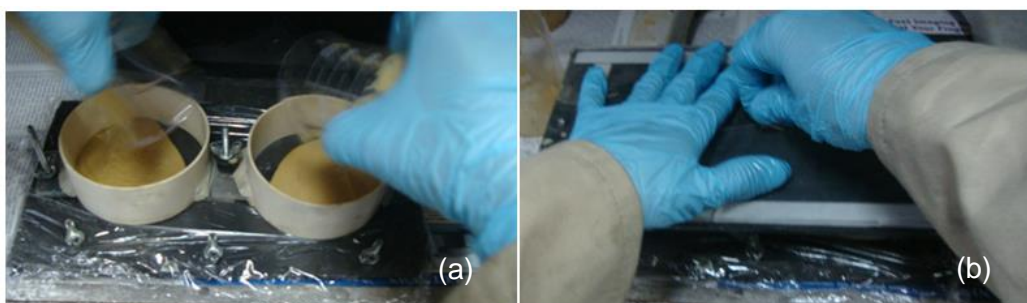
Massa total (gramas)	Reagente A (gramas)	Reagente B (gramas)
33	15,7	17,3

Essa proporção foi verificada através de uma balança de precisão. Após a mistura os componentes foram agitados durante 7 segundos a 4000 RPM. Na Figura 5.3 (a) e (b) visualizam-se estas etapas do processo.



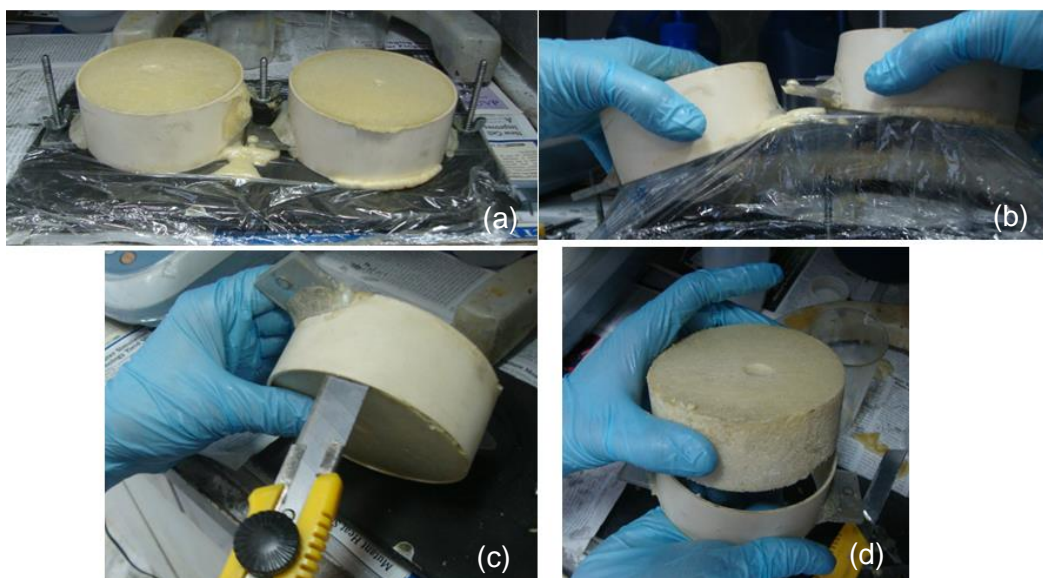
**Figura 5.3 - Mistura dos componentes: (a) mistura e pesagem dos componentes, (b) agitação dos componentes. Em detalhe o motor do agitador.**

Após a agitação, a mistura foi envasada na matriz previamente coberta com um filme PVC na parte inferior e lubrificada com vaselina. Realizou-se o fechamento da mesma da forma mais rápida possível evitando o vazamento da espuma durante a expansão. Estas etapas do processo podem ser visualizadas na Figura 5.4 (a) e (b).



**Figura 5.4 - Introdução da mistura na matriz: (a) envasamento da mistura, (b) fechamento da matriz.**

Pode-se constatar que o tempo de crescimento da espuma especificado pelo fabricante estava correto e era de aproximadamente 4 minutos. Esperava-se em torno de 10 minutos para desmoldar o corpo de prova, tempo que o mesmo já apresentava boa estabilidade dimensional. Detalhes do processo de desmolde podem ser visualizados na Figura 5.5 (a), (b), (c) e (d).



**Figura 5.5 – Desmolde do corpo de prova: (a) espuma após expansão, (b) retirada dos corpos de prova da base, (c) detalhe do desmolde do corpo de prova, (d) corpo de prova desmoldado.**

Como pode ser observado na Figura 5.5, os corpos de prova foram desmoldados com o auxílio de um estilete. A matriz foi limpa com acetona e remontada para fabricação dos corpos de prova posteriores.

### 5.2.2. *Fabricação dos corpos de prova com poros controlados*

A fabricação dos corpos de prova com poros controlados diferiu-se da fabricação dos corpos de prova controle em dois quesitos: adição de isopor na formulação da espuma e dissolução do mesmo com acetona após a polimerização completa da espuma.

Os poros controlados foram criados através da adição de bolas de isopor de três diâmetros diferentes que foram seccionadas ao meio. Algumas foram lixadas para atender a quantidade de poros requerida. As porcentagens de isopor nos corpos de prova podem ser observadas na Tabela 5.5.



**Tabela 5.5-Proporção de poros controlados nos corpos de prova.**

Diâmetro do poro (mm)	Volume ocupado isopor (%)	Quantidade de poros	Massa total (gramas)	Reagente A	Reagente B
20	5	7,5	31,4	14,9	16,4
	10	15	29,7	14,1	15,6
	15	22,5	28,1	13,4	14,7
25	5	3,8	31,4	14,9	16,4
	10	7,7	29,7	14,1	15,6
	15	11	28,1	13,4	14,7
30	5	2,2	31,4	14,9	16,4
	10	4,4	29,7	14,1	15,6
	15	6,7	28,1	13,4	14,7

Na Tabela 5.5 também se observam as quantidades dos reagentes A e B utilizados para cada formulação de poros controlados. Essas diferentes proporções foram calculadas com base na quantidade de reagentes utilizados na fabricação dos corpos de prova controle.

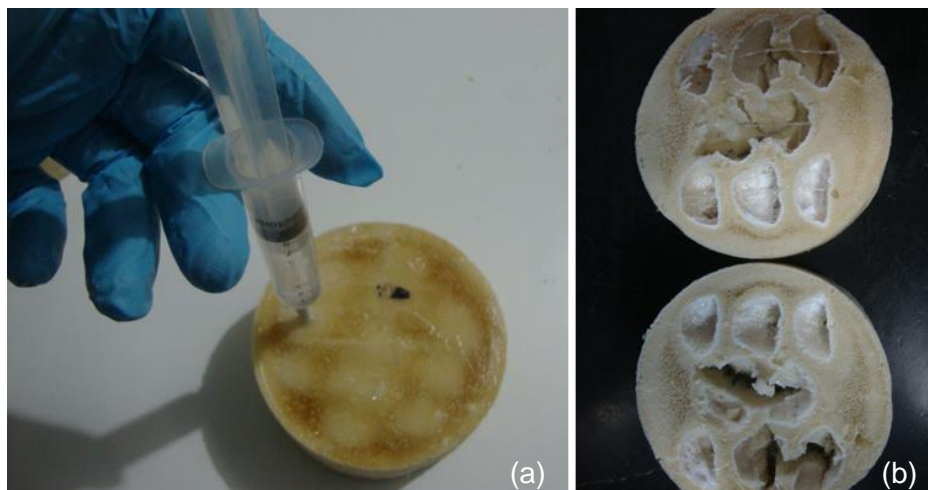
O procedimento utilizado para distribuição do isopor nos corpos de prova pode ser observado na Figura 5.6.



**Figura 5.6 – Distribuição do isopor nos corpos de prova: (a) bolas são presas em um fio de *nylon*, (b) bolas de 25 mm de diâmetro, 15% de distribuição, (c) bolas de 20 mm de diâmetro, 15% de distribuição.**

Observa-se na Figura 5.6 (a) que as bolas foram distribuídas no corpo de prova com auxílio de uma linha de *nylon* que ficou presa nas paredes da matriz. Buscou-se uma distribuição espaçada entre as bolas para que a expansão da espuma sofresse a menor interferência possível.

Com a polimerização completa da espuma, em torno de 24 horas, foi realizado o procedimento de dissolução, através da adição de acetona, do isopor alojado no interior do corpo de prova para obtenção dos poros controlados. Este procedimento pode ser observado na Figura 5.7 (a), bem como o resultado final do mesmo observado na Figura 5.7 (b).



**Figura 5.7 – Procedimento de obtenção dos poros: (a) dissolução do isopor, (b) corpo de prova seccionado mostrando os poros obtidos.**

Como se pode observar na Figura 5.7 (a), a dissolução do isopor foi realizada com o auxílio de uma seringa.

A aferição das massas dos corpos de prova foi realizada com a mesma balança que foi utilizada para medir as massas dos reagentes.

### 5.3. Ensaios de impedância acústica

As propriedades acústicas de materiais absorventes, como coeficientes de reflexão e absorção sonora, podem ser determinadas em câmara reverberante, tubo de impedância ou em campo livre simulado [Lima, 1999].

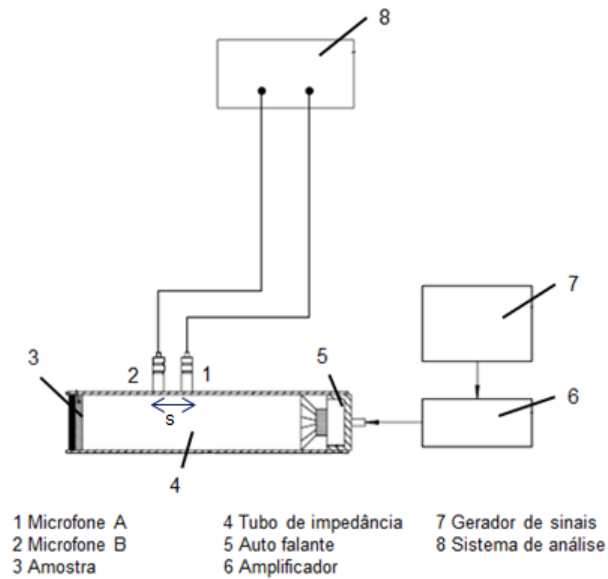
A determinação do coeficiente de absorção sonora em tubos de impedância possui como principal vantagem o tamanho da amostra. As amostras para ensaio de impedância acústica são tipicamente pequenas, com diâmetros menores que 0,120 m dependendo do equipamento, enquanto num ensaio em câmara reverberante a amostra deve possuir área de 10m<sup>2</sup>. A principal desvantagem dos ensaios em tubos de impedância é que os mesmos avaliam apenas o coeficiente normal de absorção enquanto que os ensaios em câmara reverberante avaliam o coeficiente de absorção sonora aleatória.

Os ensaios de impedância acústica foram realizados nas dependências do Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

O método para determinação do coeficiente de absorção sonora em tubos de impedância está descrito nas Normas ISO 10534-2 (1998) e norma ASTM-1050 (1990). O funcionamento do tubo de impedância baseia-se na propagação de ondas planas e na aferição de dois níveis de pressão sonora (NPS) em duas posições do tubo. Os equipamentos utilizados estão descritos na Figura 5.8 e Tabela 5.6.

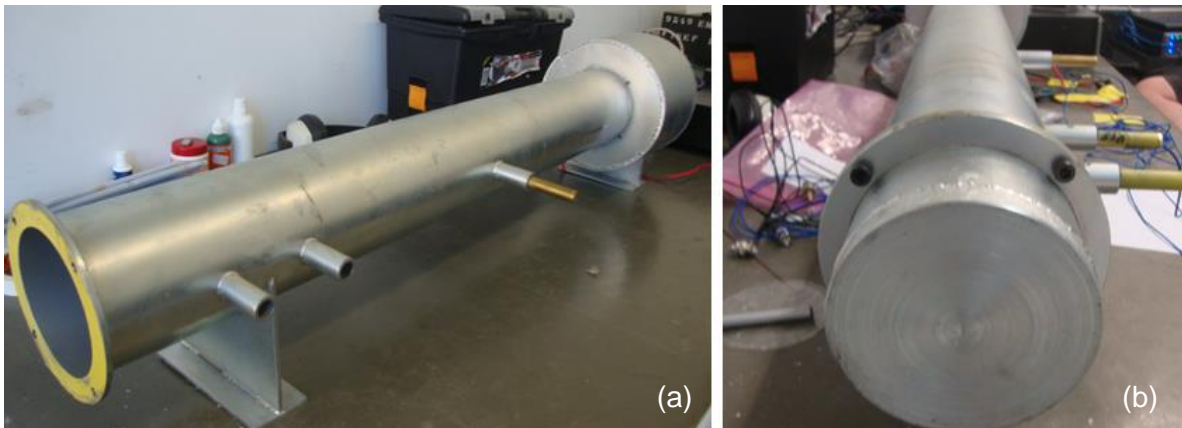
**Tabela 5.6 – Equipamentos utilizados nos ensaios em tubo de impedância.**

Item	Descrição
Analizador de sinais	<i>Scadas mobile</i>
Computador	<i>Notebook com software Scadas</i>
Amplificador	B&K 2619
Microfone A	1/4 " sensibilidade 0.85mV/Pa
Microfone B	1/4 " sensibilidade 0.88mV/Pa



**Figura 5.8 - Ilustração da instrumentação utilizada nos ensaios de impedância acústica.**

Os ensaios foram realizados em um tubo de impedância com diâmetro  $d = 0,109$  m. Na Figura 5.9 (a) e (b) pode-se observar este tubo de impedância.



**Figura 5.9 – Tubo de impedância do LVA: (a) Tubo de impedância desmontado, (b) Tubo de impedância montado com porta amostra e microfones.**

Este tubo opera em baixas frequências. O limite superior de análise é dado pela frequência de corte do tubo,  $f_c$ , que é função da velocidade do som no ar,  $c_o = 343$  m/s, e do diâmetro do tubo. O limite inferior de análise é limitado pelo espaçamento dos microfones e pela precisão do equipamento utilizado. A frequência de corte é dada pela Equação 5.1, conforme a Norma ISO 10534-2 [Mareze, 2013, Adaptado].

$$f_c = \frac{0,58c_o}{d} \quad (5.1)$$

Assim,  $f_c=1825$  Hz. O limite inferior de análise,  $f_{min}$ , segundo a Norma ISO 10534-2 é dado pela Equação 5.2.

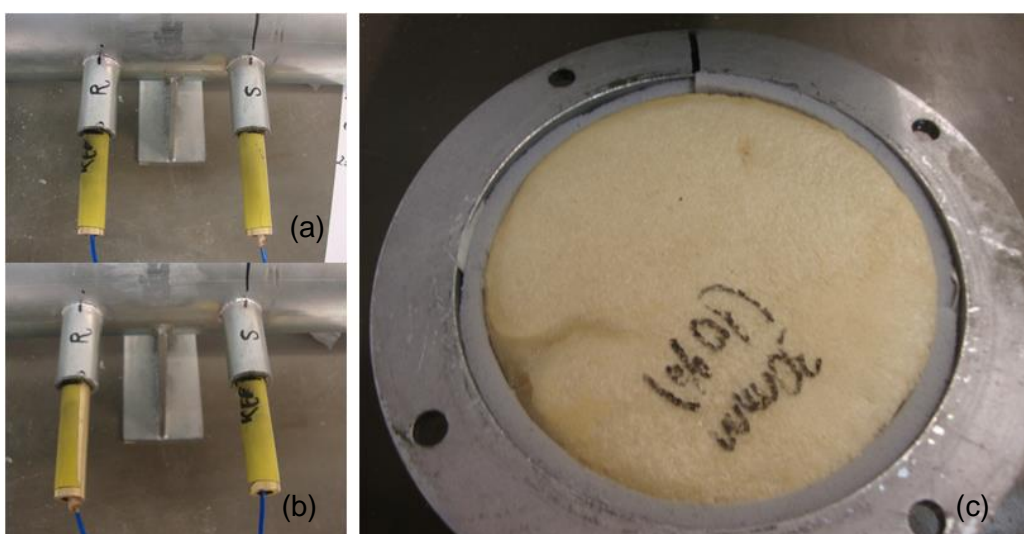
$$f_{min} = \frac{0,05c_o}{s} \quad (5.2)$$



Sendo  $s = 0,124$  m a distância entre os microfones, tem-se que  $f_{min} = 138$  Hz. Desta forma definiu-se a faixa de frequência dos ensaios de 138 Hz até 1825 Hz.

A montagem dos microfones foi realizada conforme a figura abaixo (Figura 5.10 (a) e (b)) e o posicionamento da amostra conforme a Figura 5.10 (c). Para cada ensaio foram tomadas duas medidas de pressão com cada microfone: Primeiramente posicionou-se o microfone de referência (REF) na posição R e o outro microfone na posição S (Figura 5.10 (a)). Após inverteu-se a posição dos microfones (Figura 5.10 (b)). Este procedimento previsto na Norma ISO 10534-2 é de grande importância, pois minimiza erros do ensaio e dispensa a calibração do sistema que exige microfones de alto custo.

Na realização do ensaio incide sobre a amostra um ruído branco na faixa de 1 Hz até 6,4 kHz, sendo que nos resultados finais apenas são levados em consideração os obtidos na faixa de frequência previamente estabelecida.



**Figura 5.10 – Montagem dos microfones e posicionamento da amostra: (a) Microfone A montado na posição de referência, (b) Microfone A montado na posição inversa, (c) Amostra posicionada no porta amostra.**

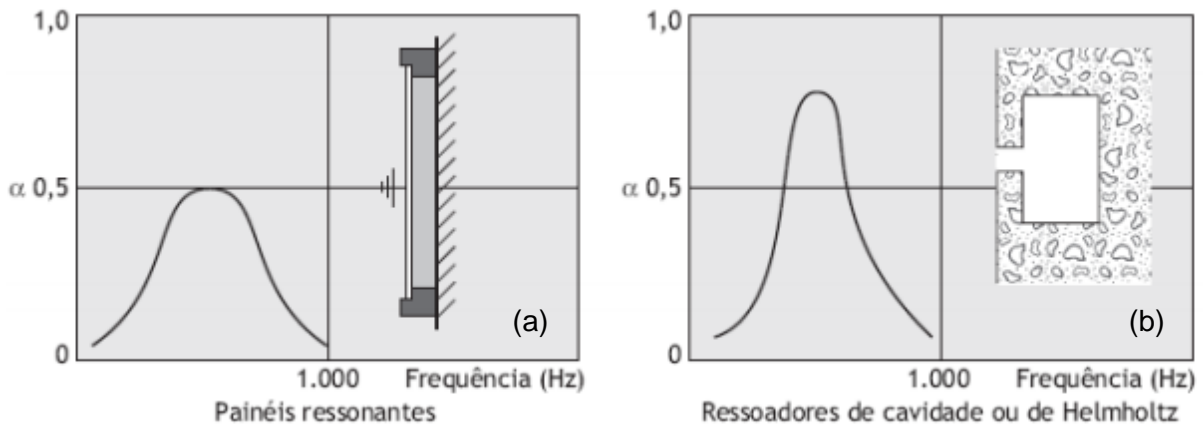
A partir das aferições de pressão obtidas nos microfones nas posições originais e em posições invertidas foram calculadas duas funções de transferência no *software MATLAB*. Mais informações sobre a rotina de cálculo no Anexo 1. A partir dessas funções de transferência obtiveram-se os valores de  $\alpha$ . Estes valores foram tratados no *software Excel* onde foram gerados os gráficos do Capítulo 6.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segundo Mareze, 2013, em baixas frequências surgem outros mecanismos de absorção sonora. Um destes mecanismos trata-se da compressão isotérmica do ar.

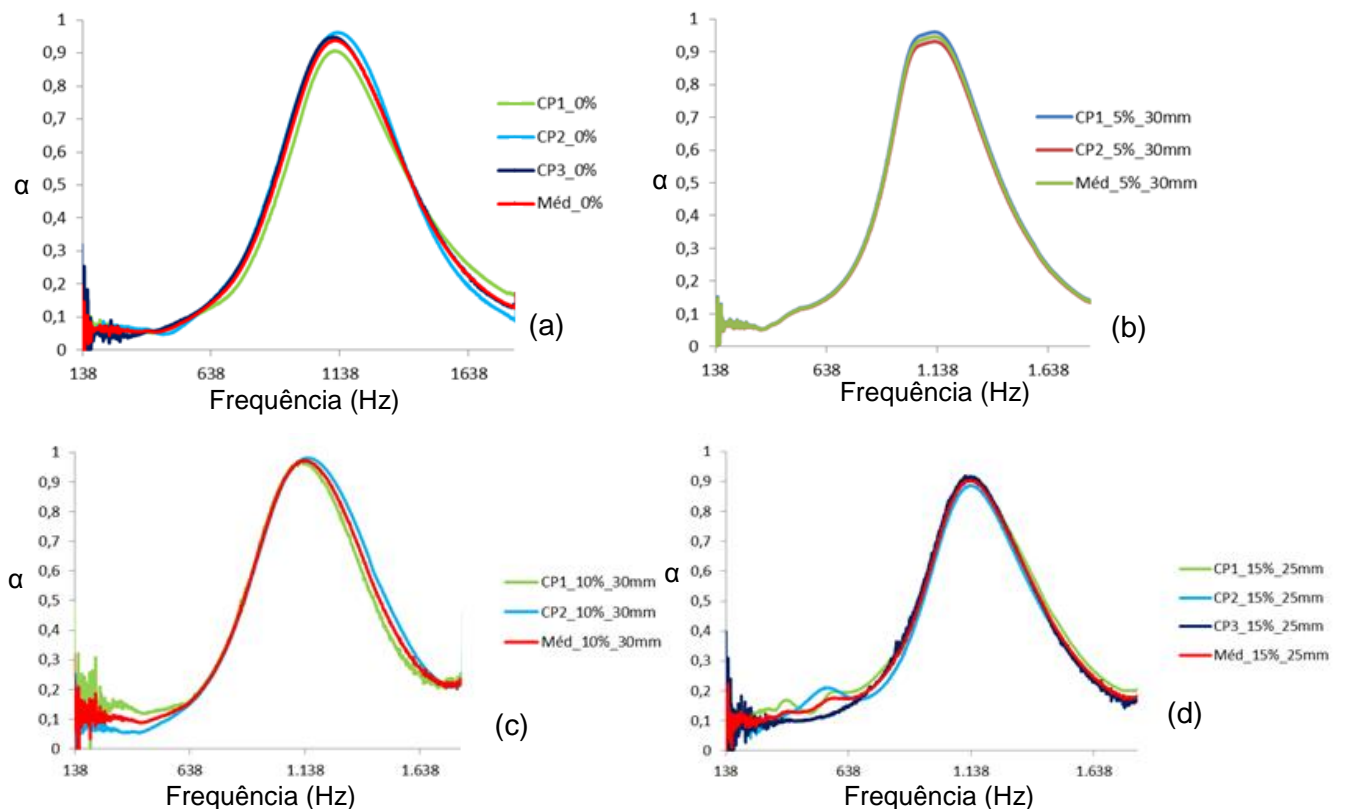
No mecanismo de absorção sonora por compressão isotérmica o ar comporta-se como uma espécie de mola e o corpo de prova como uma massa, formando um sistema massa-mola (Seção 4.2). O mecanismo de compressão isotérmica do ar é utilizado em dispositivos como painéis ressonantes e ressonadores de Helmholtz.

Segundo Bistafa, 2006, a Figura 6.1 (a) e (b) representa as curvas de absorção sonora para um painel ressonante típico e um ressonador de Helmholtz, respectivamente.



**Figura 6.1 – Curvas de absorção sonora: (a) Painel ressonante, (b) Ressonador de Helmholtz [Bistafa, 2006].**

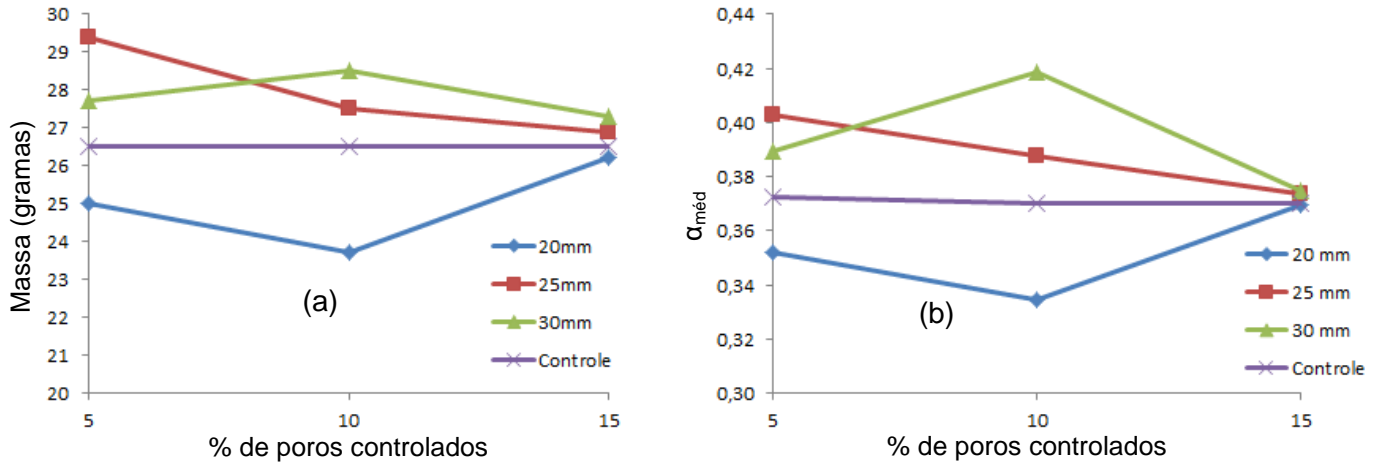
Alguns dos resultados obtidos para quatro das formulações ensaiadas podem ser observados na Figura 6.2 (a), (b), (c) e (d). Os demais resultados podem ser observados no Apêndice 2.



**Figura 6.2 – Curvas de absorção sonora para formulação: (a) sem poros controlados, (b) 5% de poros controlados com 30 mm de diâmetro. (c) 10% de poros controlados com 30 mm de diâmetro, (d) 15% de poros controlados com 25 mm de diâmetro.**

As curvas de absorção sonora obtidas nos ensaios são muito semelhantes às curvas para painéis ressonantes e ressonadores de cavidade (Figura 6.1 (a) e (b)). Este comportamento ocorre devido ao surgimento do mecanismo de compressão isotérmica do ar, mecanismo de absorção característico em baixas frequências como citado na Seção 4.3.

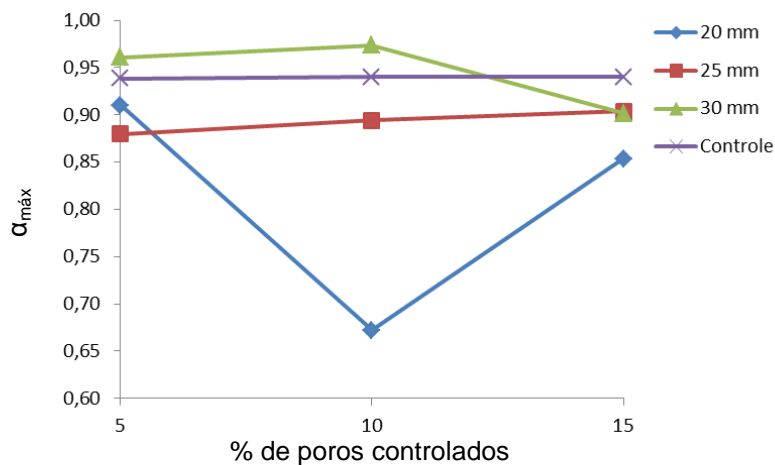
Na Figura 6.3 (b) pode-se observar que o valor médio do coeficiente de absorção sonora,  $\alpha_{méd}$ , seguiu a mesma tendência da curva das massas dos corpos de prova (Figura 6.3 (a)).



**Figura 6.3 – Curvas representando as massas e o  $\alpha_{méd}$ : (a) curva representando a média das massas, (b) curva representando  $\alpha_{méd}$ .**

Este comportamento não linear, observado na Figura 6.3 (a) e (b), dos valores de  $\alpha_{méd}$  deve-se ao controle difícil da massa da espuma e ao método empregado para dissolver o isopor contido nos corpos de prova.

Onde ocorreram os valores de máxima absorção sonora,  $\alpha_{máx}$ , para as diferentes formulações podem ser observados na Figura 6.4.



**Figura 6.4 – Valores de  $\alpha_{máx}$  para as diferentes formulações.**

Observam-se nas Figuras 6.3 (b) e 6.4 que os corpos de prova com poros de 30 mm ocupando 10% do volume do corpo de prova foram os que apresentaram melhores resultados tanto para  $\alpha_{méd}$  quanto para  $\alpha_{máx}$ . Já os corpos de prova com poros de 20 mm, em geral, apresentaram os piores resultados para  $\alpha_{méd}$  e  $\alpha_{máx}$ .

Um comportamento interessante observado nos resultados é a ocorrência dos valores de  $\alpha_{máx}$  em torno da frequência de 1130 Hz para todos os corpos de prova ensaiados. Tal comportamento pode ser visualizado na Figura 6.5.

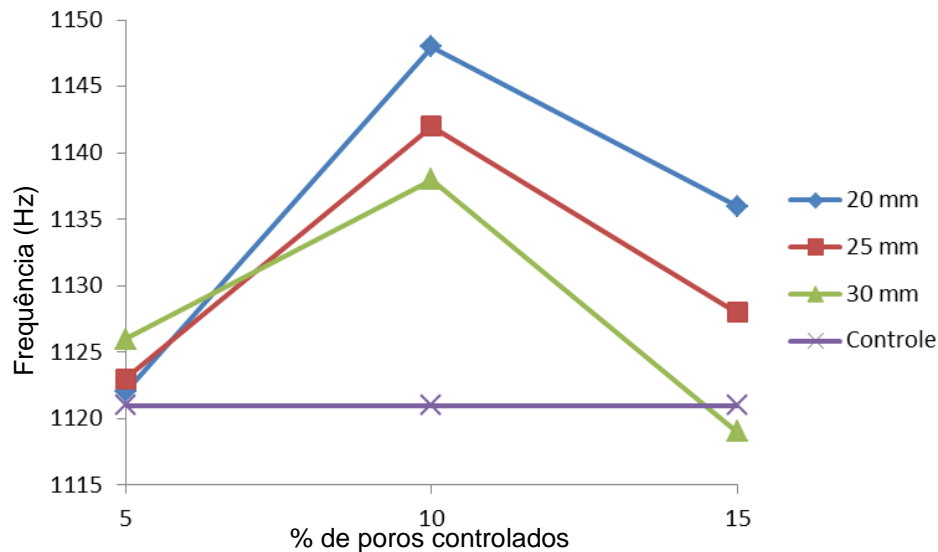


Figura 6.5 – Frequências de ocorrência do  $\alpha_{m\acute{a}x}$  para as diferentes formulações.

Este comportamento ocorreu devido à proximidade dos valores das massas dos corpos de prova e o mecanismo de absorção sonora para baixas frequências ser próximo a um sistema massa-mola. A relação da massa com a frequência natural do sistema pode ser observada na Equação 4.2.

Painéis ressonantes e ressonadores de cavidade são tipicamente projetados para atenuarem frequências de ressonância da ordem de 40 Hz até 600 Hz. Já as espumas flexíveis disponíveis no mercado para tratamentos acústicos, espumas *Sonex*, por exemplo, apresentam em geral boa atenuação em frequências acima de 2000 Hz. Curvas de absorção sonora de alguns tipos de espuma *Sonex* podem ser observadas na Figura 6.6.

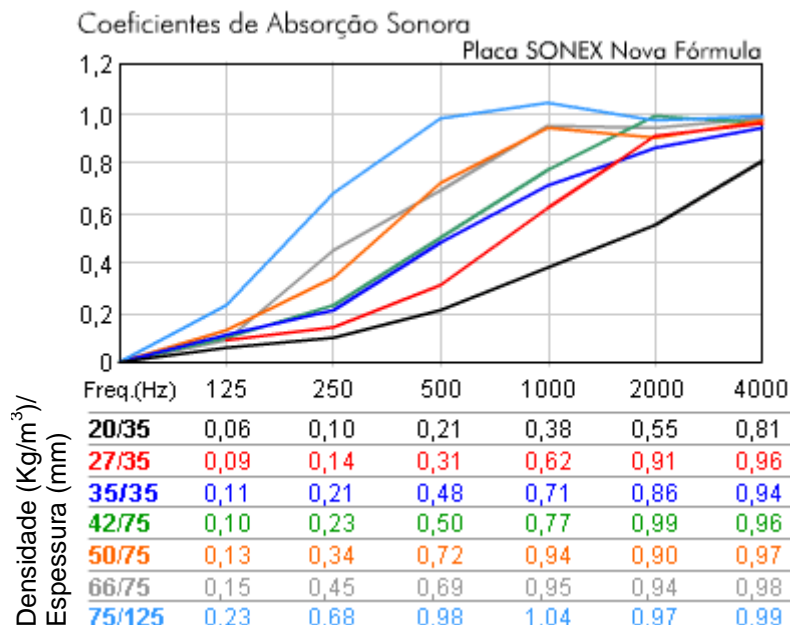


Figura 6.6 – Curvas de absorção sonora de espumas *Sonex* [RAComercial,2013].

Na Figura 6.6 pode-se observar que essas espumas apresentam boa atenuação para baixas frequências somente quando possuem espessuras e densidades elevadas, tornando inviável economicamente a aplicação das mesmas para tal fim.

## 7. INCERTEZAS

Segundo a Norma ISO 10534-2 a incerteza para determinação do coeficiente de absorção em tubos de impedância é de 1% utilizando os microfones recomendados. O tubo de impedância do LVA/UFSC foi confeccionado segundo as recomendações da referida norma.

## 8. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foram apresentadas algumas relações entre o coeficiente de absorção sonora e as variações de porosidades controladas produzidas. Observou-se nos resultados obtidos que as variações de massa foram muito significativas nos resultados, obtendo-se uma relação muito clara da variação das mesmas com o coeficiente de absorção sonora médio.

Também foram encontrados ótimos valores de absorção sonora em torno de uma frequência específica para a espuma utilizada nos procedimentos experimentais, sugerindo para estudos posteriores o aproveitamento da mesma para aplicações comerciais.

### 8.1. Sugestões para trabalhos futuros

Primeiramente sugere-se desenvolver um método de geração de poros controlados mais eficiente e menos trabalhoso.

Pode-se também analisar as influências da geração de poros controlados na absorção sonora em espumas de poliuretano rígida para altas frequências.

Tem-se como sugestão realizar a análise da geração de poros controlados na absorção sonora em espumas de poliuretano flexíveis para altas e baixas frequências.

Pode-se avaliar a viabilidade de aplicação da espuma utilizada neste trabalho como absorvedor sonoro para frequências em torno de 1130 Hz.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allard J., Atalla N. "**Propagation of Sound in Porous Media: Modeling Sound Absorbing Materials**" Wiley, United Kingdom, 2009.

ASTM E1050: 90. "**Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones, and a Digital Frequency Analysis Method**", American Society for Testing and Materials, USA, 1990.

Bistafa, S. R. "**Acústica Aplicada ao Controle do Ruído**", Edgard Blücher, Brasil, 2ª edição, 2006.

Fahy, F. J. "**Foundations of Engineering Acoustics**", Academic Press, USA, 1<sup>st</sup> edition, 2000.

Miguel, L. F.F. "**Introdução ao Estudo de Vibrações-Notas de Aula de Eng03374-Vibrações I**", Brasil, 1ª edição, 2006.

ISO 10534-2: 98. "**Acoustics - Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes**" - Part 2: Transfer-function, Multiple. Distributed through American National Standards Institute (ANSI), USA, 1998.

Lima, P. G. "**Absorção Sonora em Materiais Revestidos**", Tese de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1999.

Mareze, P. H. "**Análise da Influência Microgeometria na Absorção Sonora de Materiais Porosos de Estrutura Rígida**", Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

RAComercial, "**Sonex Nova Fórmula**", [http://www.racomercial.com.br/nova\\_formula.html](http://www.racomercial.com.br/nova_formula.html), Acessado em 03/11/2013.

Rayleigh, J. W. S. "**The Theory of Sound**", reprinted by Dover Publications in 1945, New York, USA, 2<sup>nd</sup> edition, 1896.

Vilar, W.D. "**Química e Tecnologia dos Poliuretanos**", Vilar Consultoria, Brasil, 2<sup>a</sup> edição, 1999.

## ANEXO 1

```

%% Cálculos para Coeficiente de Absorção de Material Acústico
% Os cálculos referentes à esta seção foram baseados nas teorias passadas
% pela matéria "Métodos Experimentais em Vibrações e Acústica", ministrada
% pelo professor Arcanjo Lenzi

%

%% Programação Inicial
% limpar tela, declarar variáveis, pré-programação
clc
clear all
%close all
%chamar arquivos de medições
%C:\Users\Ana\Tubo_Imped_Melamina_03-10-12_mic_PCB
file_path=
'C:\Users\Ana\Documents\MATLAB';%C:\Users\Ana\Tubo_Imped_Melamina_03_10_12_mic_PCB;%
%file_path= 'C:\Users\Ana\tubodeimpedancia14deagosto';
c_0 = 340;

%% Importação dos Dados das Medições
% Amostras COM 40MM DE ESPESSURA , MEDIDA EM PORTA AMOSTRA DE 109MM
% AMOSTRAB. MEDIÇÃO DIRETA.
% a seguir, carregamos toda a informação do arquivo .txt separando somente
% o cabeçalho dos dados a serem utilizados pelos cálculos
% [header, raw_data1]=mhdrload(strcat(file_path,'\melamina_1A_dir03_10.txt'));%melamina_1A_dir.txt
%%DIRETA
[~, raw_data1] = mhdrload('melamina25mmpa25mmdiretahj.txt');
%aqui vc trocapelo nome do arquivo
Re1 = raw_data1(:,3);
Im1 = raw_data1(:,4);
%.....
%primeira função transferência
H_12I_amostra_1 = Re1+1i*Im1;

% O mesmo será feito para as outras funções transferência (perceba que a
% diferença está nos nomes dos arquivos/informações carregadas)
%
raw_data11]=mhdrload(strcat(file_path,'\melamina_1A_inv_3_03_10.txt'));%melamina_1A_inv.txt [header,
[~, raw_data11] = mhdrload('melamina25mmpa25mmindiretahj.txt');
Re01 = raw_data11(:,3);
Im01= raw_data11(:,4);
%.....
%Segunda função transferência
H_12II_amostra_1 = Re01+1i*Im01;
%freq
freq_1 = raw_data1(:,2);

%%
%% Preparações para os Cálculos
% Amostra1
% abaixo será realizada uma correção de fase entre os microfones,
% intercalando as duas medições I e II de cada ensaio

%Aqui divide se as funções transferência
H_12_1 = (H_12I_amostra_1.^5)./(H_12II_amostra_1.^5);

```





## APÊNDICE 1

 <b>ECO BLASTER INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE RESINAS LTDA</b> Avenida Alexandre Biagi, 400 - Bairro da Estiva - CEP 13.290-000, Louveira-SP. PABX (19) 3878-7447      ecoblaster@ecoblaster.com.br					
Louveira, 19 de setembro de 2013					
<b>CERTIFICADO DE ANÁLISE</b>					
<b>CLIENTE</b>		<b>GIORDANO</b>			
<b>NOTA FISCAL</b>	<b>PRODUTO</b>	<b>CÓDIGO</b>	<b>LOTE</b>	<b>COLORAÇÃO DO SISTEMA</b>	<b>FABRICAÇÃO</b>
11845	Sistema	1720	132302	INCOLOR	19/09/13
		<b>A</b>	<b>B</b>		
<b>PROPORÇÃO DE MISTURA (PESO)</b>		100	110		
<b>ESPECIFICADO</b>					
<b>PARÂMETRO</b>	<b>UNIDADE</b>	<b>MINIMO</b>	<b>MAXIMO</b>	<b>ENCONTRADO</b>	
Tempo de Creme	Segundos	45"	55"	45"	
Tempo de Gel	m/s	2'50"	3'10"	3'	
Tempo de Crescimento	m/s	3'25"	3'55"	3'48"	
Peso Especifico	Kg/m <sup>3</sup>	38	42	42	

Figura A1.1 – Certificado de análise com dados utilizados na elaboração da espuma.

## APÊNDICE 2

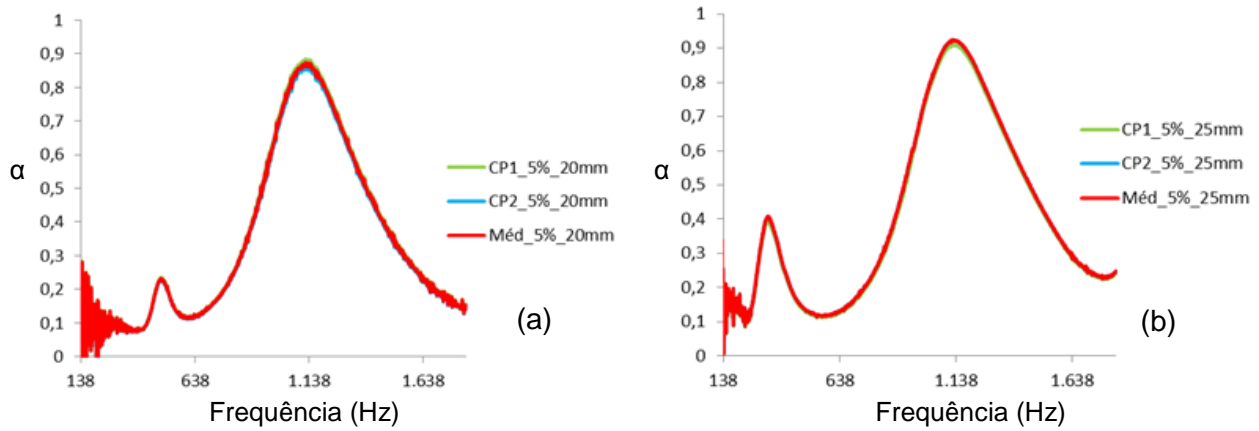


Figura A2.1 – Curvas dos coeficientes de absorção sonora para 5 % de poros controlados: (a) 20 mm de diâmetro, (b) 25 mm de diâmetro.

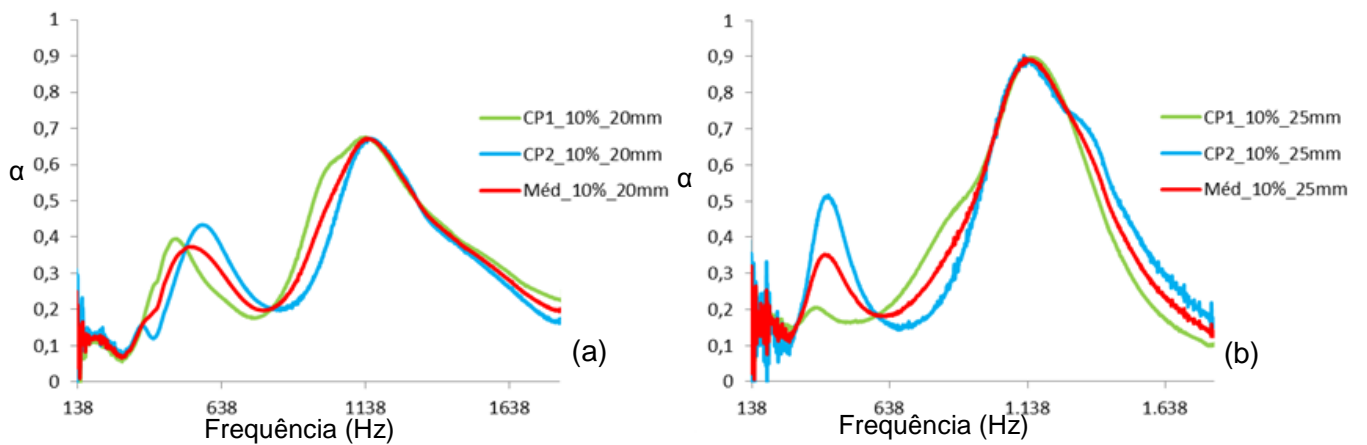


Figura A2.2 – Curvas dos coeficientes de absorção sonora para 10 % de poros controlados: (a) 20 mm de diâmetro, (b) 25 mm de diâmetro.

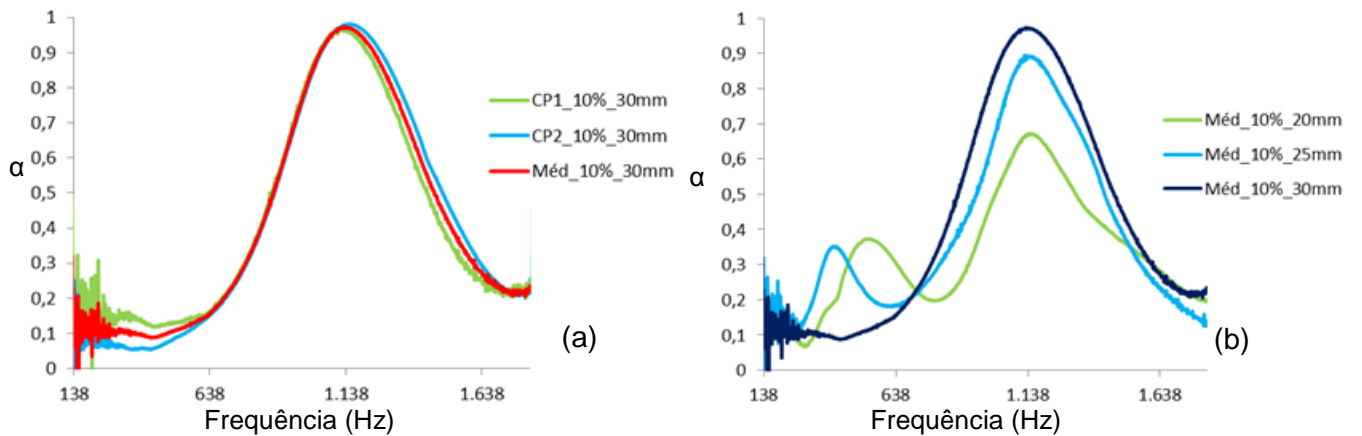
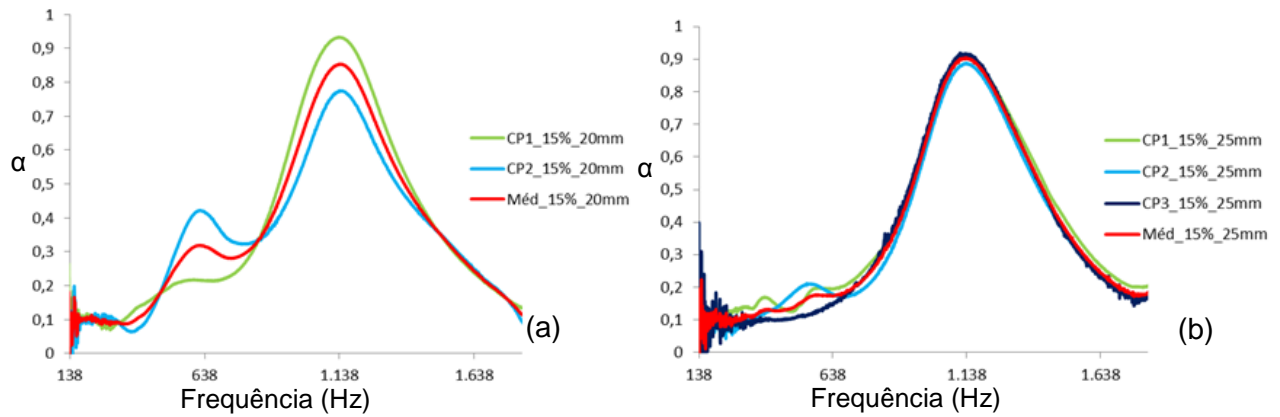
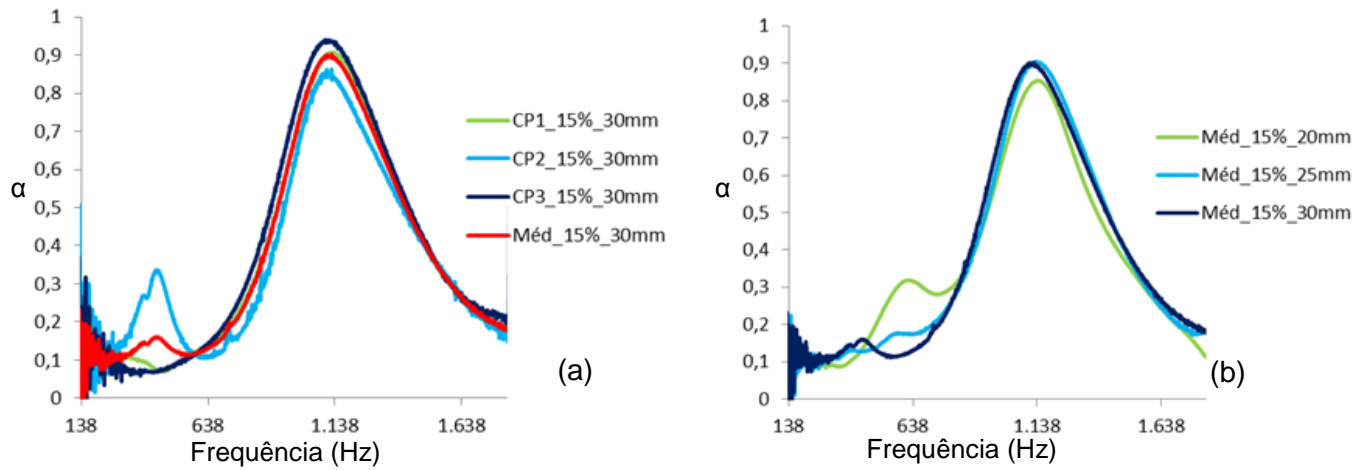


Figura A2.3 – Curvas dos coeficientes de absorção sonora para 10 % de poros controlados: (a) 30 mm de diâmetro, (b) médias dos diâmetros de 20 mm, 25 mm e 30 mm sobrepostas.



**Figura A2.4 – Curvas dos coeficientes de absorção sonora para 15 % de poros controlados: (a) 20 mm de diâmetro, (b) 25 mm de diâmetro.**



**Figura A2.5 – Curvas dos coeficientes de absorção sonora para 15 % de poros controlados: (a) 30 mm de diâmetro, (b) médias dos diâmetros de 20 mm, 25 mm e 30 mm sobrepostas.**