

CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE MODELOS NUMÉRICOS COMPUTACIONAIS DE SILENCIADORES VEICULARES

Marcelo Nunes Murakami - marcelomurakami15@hotmail.com

Pontifícia Universidade Católica do Paraná – Av. Marechal Floriano Peixoto, 495, E-1, Curitiba, Paraná

RESUMO: Para tentar atenuar o ruído emitido pela pulsação de gases dos veículos a níveis aceitáveis faz-se a necessidade de um filtro acústico chamado de silenciador. Os silenciadores são formados por câmaras de expansão, tubos perfurados e ressonadores de Helmholtz. Neste trabalho foi realizado um estudo computacional do desempenho de câmaras de expansão simples, de silenciadores com tubos internos perfurados e de ressonadores de Helmholtz em função da sua perda de transmissão sonora (TL). Nas análises computacionais foram alteradas as características geométricas dos silenciadores verificando os efeitos sobre seus desempenhos. A técnica computacional utilizada nas análises é o Método dos Elementos Finitos (MEF) através de um aplicativo de elementos finitos do Laboratório de Dinâmica da PUCPR. Também foi realizada uma análise experimental através do Método das Duas Cargas de um modelo de ressonador para verificar a precisão dos resultados computacionais.

PALAVRAS-CHAVE: MEF, Silenciador, Perda de Transmissão

ABSTRACT: *In order of trying decrease this levels of noises emitted due to gas pulse of vehicles to acceptable levels it has to use a sound filter, called muffler. The mufflers are made by expansion chambers, perforated pipes and Helmholtz resonators. For this work a computational study was done to analysis the performance of simple expansion chambers, mufflers with perforated pipes and Helmholtz resonators in function of sound transmission loss (TL). In the computational analysis were indicated the muffler geometric technical features checking the effects on their performance. The computational technique used for the analysis was Finite Element Method (FEM), done at PUCPR Dynamics Lab using an application of finite element. Also an experimental analysis was made through Two Load Method of one resonator model to check the precision of computational results. Insert the English version as previously described, except by using italic characters.*

KEYWORDS: *FEM, Muffler, Transmission Loss*

INTRODUÇÃO

O aumento desenfreado dos veículos automotores nas cidades em virtude do aumento do poder aquisitivo da maioria da população fez com que o número de veículos automotores nas grandes cidades se multiplicarem. A frota brasileira de automóveis no ano de 2012 chegou a aproximadamente 38 milhões de veículos. (DENATRAN, 2012). Além disso, somente em 2012 foram fabricados 3,34 milhões de veículos, entre veículos leves, caminhões e ônibus. Como consequência deste crescimento, faz com que os veículos automotores sejam os grandes responsáveis pela poluição sonora urbana. Além disso, decorrente deste problema, a população está sujeita à exposição prolongada a ruídos indesejáveis contínuos e intermitentes que podem causar danos irreversíveis a nossa saúde como: estresse, irritabilidade, insônia, cansaço excessivo, pré-disposição a infecções, etc., (Gerges, 2000). É só imaginar alguém morando ao lado de uma avenida.

Além dos veículos, em nossas casas, multiplicaram-se os eletrodomésticos como geladeiras, freezers e aparelhos de ar condicionado, que devem ser cada vez mais eficientes, compactos e silenciosos. Para tentar atenuar o ruído emitido pela pulsação de gases dos veículos e destes eletrodomésticos a níveis aceitáveis faz-se a necessidade, em muitos casos, de um filtro

acústico chamado de silenciador. Atualmente, os silenciadores possuem as mais diferentes formas, podem alcançar volumes de 140 litros como os silenciadores de caminhões ou 1 milésimo deste valor, como o caso dos silenciadores dos refrigeradores.

Os filtros acústicos podem ser classificados em reativos e dissipativos, (Lima, 2008), Os reativos são formados por câmaras de expansão, labirintos e tubos perfurados e ressonadores de Helmholtz, enquanto que os dissipativos possuem material absorvente em seu interior, Figura 1.

Este trabalho tem como principal objetivo realizar um estudo computacional do desempenho dos filtros acústicos reativos e dos ressonadores de Helmholtz em função da sua perda de transmissão sonora (TL). A técnica computacional utilizada nas análises numéricas é o Método dos Elementos Finitos (MEF). O MEF é utilizado através de um aplicativo desenvolvido em FORTRAN 90/95 pelos professores do Laboratório de Dinâmica da PUCPR: Key Fonseca de Lima, Nilson Barbieri e Renato Barbieri.

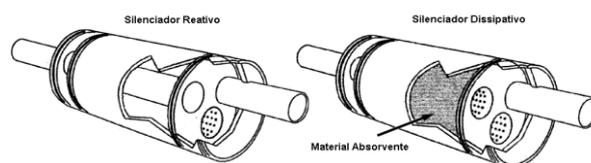


Figura 1. Tipo de Silenciadores, (Lima, 2008)

A análise de propagação de ondas em filtros acústicos para um meio estacionário com o Método dos Elementos Finitos (MEF) começou com Young e Crocker em 1976, na predição da perda de transmissão (TL) de uma câmara de expansão simples. O comportamento deste tipo de silenciador em função da razão de áreas (S_2/S_1) de suas cavidades é mostrado na Figura 2. A expressão analítica para este tipo de silenciador é fornecida pela Eq. 1.

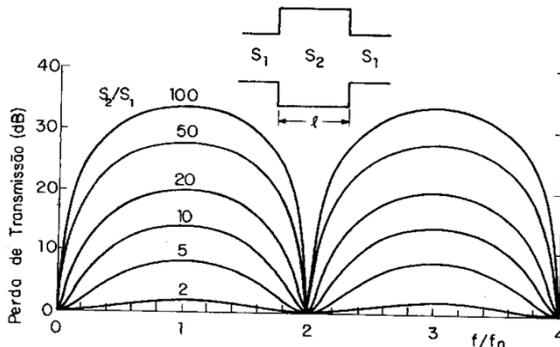


Figura 2. Silenciador de câmara de expansão simples

$$TL = 10 \log \left[\cos^2 \left(\frac{\pi f}{2fn} \right) + \frac{1}{4} * \left(\frac{S_2}{S_1} + \frac{S_1}{S_2} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{\pi f}{2fn} \right) \right] \quad (1)$$

onde :

$$fn = c / (4L),$$

c é a velocidade do som no meio em [m/s];

L é o comprimento da câmara em [m].

f é a frequência da onda em propagação.

Selamet et al. (1995), estudaram analiticamente e experimentalmente o desempenho de ressonadores de Helmholtz variando suas características construtivas, Figura 3. A expressão analítica da TL para este tipo de filtro acústico é fornecida pela Eq. 2.

$$TL = 10 \log \left[1 + \left(\frac{Ac \tan(kLc) + \left(\frac{Av}{Ac} \right) \tan(kL)}{2Ap \left[1 - \left(\frac{Av}{Ac} \right) \tan(kL) \tan(kLc) \right]} \right)^2 \right] \quad (2)$$

onde:

$k = 2\pi f / c$ é o número da onda em propagação;

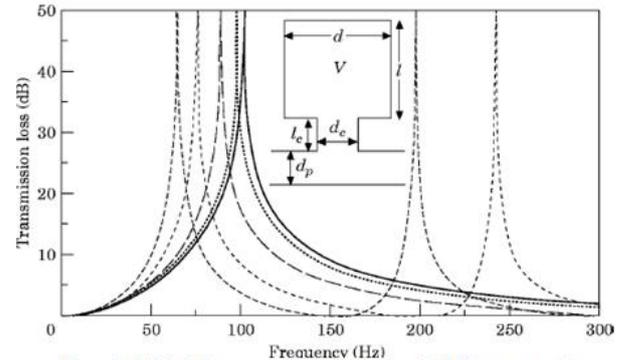
Ac é a área da seção transversal do pescoço do ressonador em [m²];

Ap é a área da seção transversal do duto de entrada em [m²];

Av é a área da seção transversal da cavidade do ressonador em [m²];

Lc é o comprimento do pescoço do ressonador em [m];

L é o comprimento da cavidade do ressonador em [m].



Theoretical Helmholtz resonator transmission loss, including wave motion in the volume (equation (4)) for a number of l/d ; $V=4500 \text{ cm}^3$, $d_p=4.859 \text{ cm}$, $L=8.5 \text{ cm}$ and $d_c=4.044 \text{ cm}$. —, $l/d=0.01$; ····, $l/d=2.0$; ---, $l/d=5.0$; - - - - , $l/d=10.0$; ----, $l/d=15.0$.

Figura 3. Desempenho acústico do ressonador de Helmholtz em função de sua geometria

METODOLOGIA

O trabalho proposto por este projeto de iniciação científica foi desenvolvido em 6 etapas:

1. Estudos de trabalhos na área de filtros acústicos. O projeto foi iniciado com uma revisão bibliográfica de trabalhos na área de filtros acústicos reativos, dissipativos e de ressonadores de Helmholtz aplicados a silenciadores;

2. Estudo numérico computacional de filtros acústicos de natureza reativa. Nesta etapa foi realizada uma análise computacional da eficiência dos silenciadores com câmaras de expansão, tubos perfurados e labirintos. Primeiramente, os modelos computacionais foram construídos num software de CAD (SolidWorks®). Após a criação dos modelos geométricos foi gerada uma malha de elementos tetraédricos lineares de quatro nós num software educacional de CAE (Autodesk Multiphysics®). Objetivo desta etapa é obter as coordenadas nodais e a conectividade, dos elementos gerados pela malha, em arquivos no formato texto (*.txt).

3. Com posse do arquivo texto, foi realizada uma análise da eficiência dos modelos de filtros acústicos com uso de um aplicativo de MEF para análise da eficiência de silenciadores em Fortran 90/95 no Lab. de Dinâmica. Além disso, neste estudo foram modificadas dimensões geométricas básicas dos filtros acústicos para verificar sua influência sobre a TL. O fluxograma da Figura 4 mostra as etapas realizadas nas análises computacionais;

4. Estudo de ressonadores de Helmholtz para baixas frequências através da modificação da geometria de seus elementos construtivos com uso do aplicativo de MEF. O processo de criação dos modelos computacionais segue os mesmos passos descritos no item 2;

5. Para validar a precisão dos resultados computacionais foi construído um modelo físico de um ressonador de Helmholtz, Figura 5 e 6. Este silenciador foi avaliado experimentalmente através do Método das

Duas Cargas desenvolvido por Lung e Doige (1983),
Figura 6.

6. Publicação dos resultados. Os resultados deste projeto serão publicados através deste relatório e estarão disponíveis no Lab. de Dinâmica para consulta e com referência para trabalhos futuros na área de silenciadores.

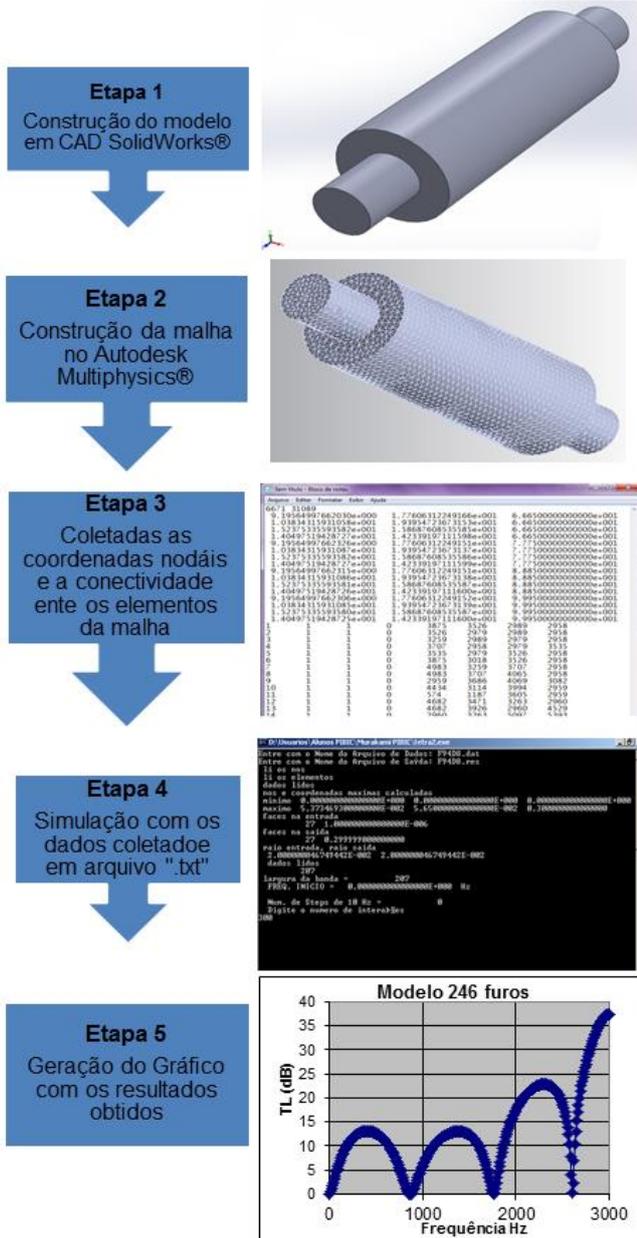


Figura 4. Fluxograma das análises computacionais

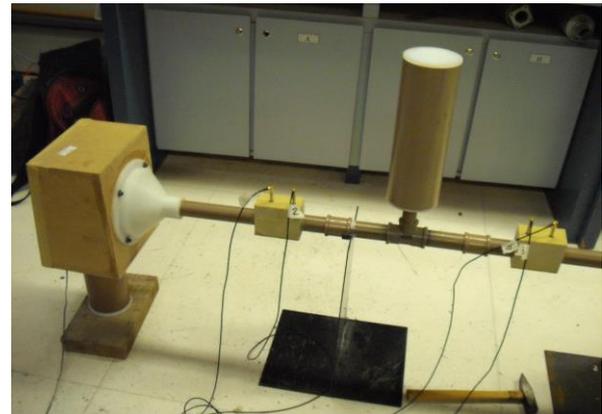


Figura 5. Modelo do ressonador de Helmholtz utilizado para análise experimental

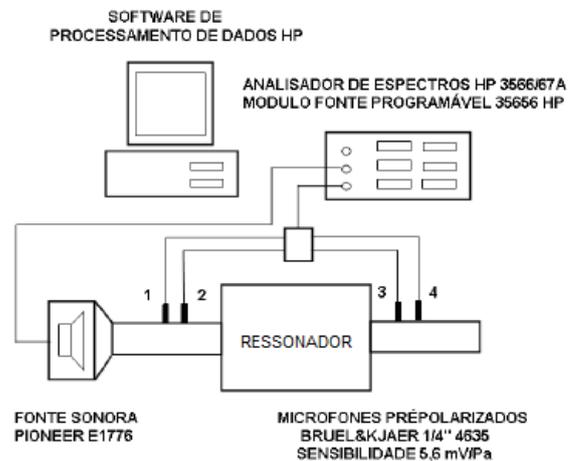


Figura 6. Esquema ilustrativo da bancada de medição

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O início da análise dos silenciadores consiste na modelagem geométrica de um sólido em CAD (*SolidWorks® Student*®, 2011), que represente o fluido dentro do silenciador, nesse caso o ar com densidade $\rho=1,21 \text{ kg/m}^3$ (20°C). Para o estudo de silenciadores veiculares pode-se utilizar o ar como sendo estacionário sem causar erros nas simulações, MUNJAL (1987). A malha de elementos finitos utilizada nas análises computacionais é de elementos tetraédricos lineares de quatro nós. A faixa de frequência avaliada foi de 0 a 3000 Hz.

Silenciadores de câmara de expansão simples

O primeiro modelo estudado foi o de câmara simples, Figura 7. Neste seção foram realizadas 5 análises variando comprimento da câmara (L2) e na relação de áreas das seções transversais entre a câmara simples e do tubo de entrada, Tabela 1. A TL destes modelos são mostradas nas Figuras 8 e 9.

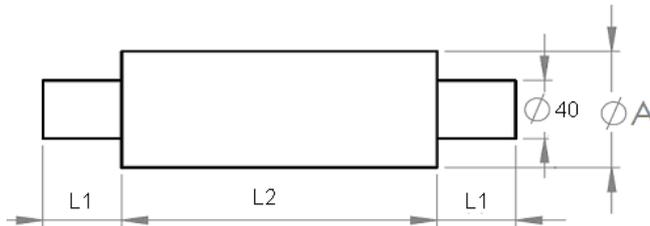


Figura 7. Dimensões básicas do silenciador de câmara de expansão simples

Tabela 1. Modelos de silenciadores de câmaras de expansão simples estudados

Modelo Câmara Simples			
Modelo	L2(mm)	R	ØA(mm)
Mod1	200	4	80
Mod2	200	8	113
Mod3	200	12	138,5
Mod4	100	8	113
Mod5	50	8	113

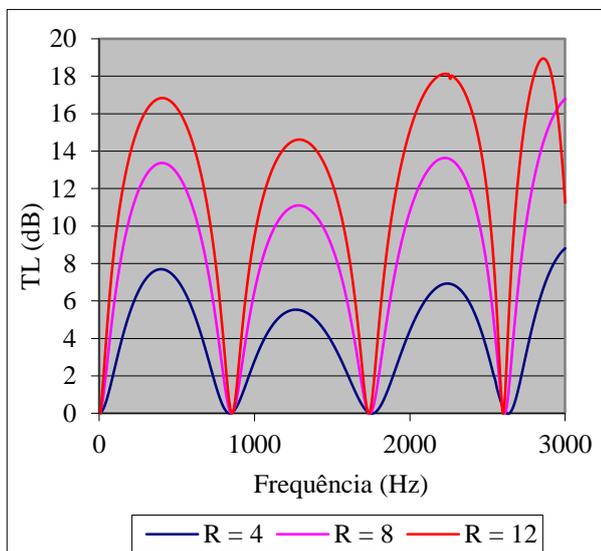


Figura 8. Comparativo entre a TL para três razões de áreas

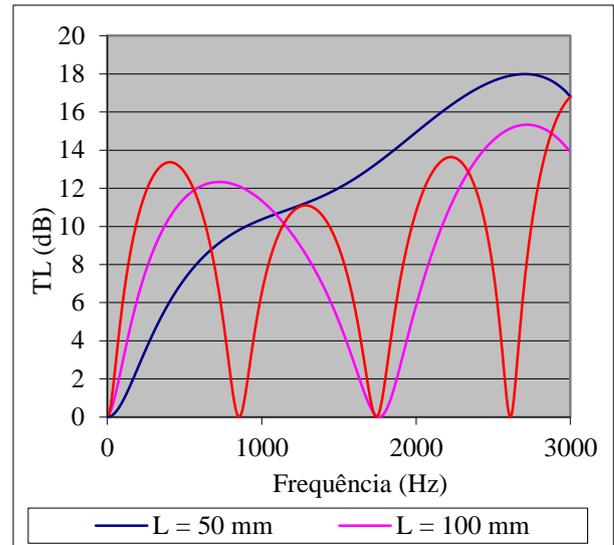


Figura 9. Comparativo entre a TL para três comprimentos de câmaras (L2)

Os resultados da avaliação dos silenciadores de câmara de expansão simples mostraram que quanto maior a razão de áreas (R) entre a seção transversal da câmara e do tubo de entrada/saída maior será a sua eficiência, Figura 8. Em outra análise pode-se verificar que quanto maior o comprimento da câmara há um aumento do número de domos de maior TL, Figura 9. Entretanto, a uma diminuição da TL para frequências baixas. Este comportamento fenômeno também foi observado por Selamet et al (1997) e Lima (2008).

Silenciadores com tubos internos perfurados

Para verificar a influência dos tubos perfurados sobre a TL dos silenciadores foram estudados três modelos conforme mostra a Tabela 2. As diferentes porosidades e a disposição dos furos do duto interno estão mostradas na Figura 10. Os modelos com tubo perfurante passante em seu interior tiveram suas simulações feitas para identificar o desempenho de cada tipo de modelo com diferentes distribuições de furos e porosidades, Tabela 2. Para análise computacional dos tubos o diâmetro de entrada/saída do tubo é constante e igual a 40 mm, assim como o comprimento L2 da câmara e o diâmetro A da câmara, que são 200 mm e 113 mm, respectivamente.

A porosidade relativa é calculada através da Eq. 3. O ângulo entre carreiras é formado entre duas carreiras intercaladas. A porosidade (δ) do silenciador é definida pela razão entre a área total dos furos (STf) e a área lateral do tubo interno (SLi), ou seja (MUNJAL, 1987):

$$\delta = STf / SLi \quad (3)$$

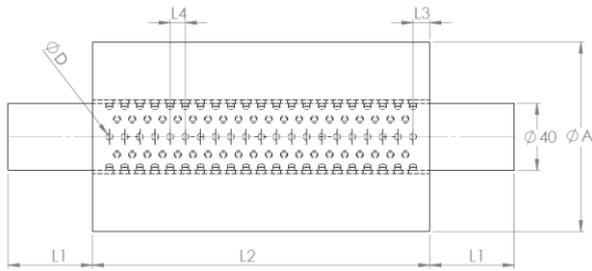


Figura 10. Dimensões básicas do silenciador com duto interno perfurado

Tabela 2. Medidas das geometrias dos modelos de silenciadores com câmaras simples analisados computacionalmente

Nº de Furos	Diâmetro dos Furos (mm)	Nº de Carreiras
165	6	10
264	6	16
360	6	20
Nº de furos por carreira	Porosidade Relativa (%)	Ângulo entre carreiras
5 carreiras x 17 furos 5 carreiras x 16 furos	18,6	36°
8 carreiras x 17 furos 8 carreiras x 16 furos	29,7	22,5°
20 carreiras x 18 furos	40,5	18°

A Figura 11 mostra o efeito do número de furos e das diferentes porosidades sobre a TL considerando o diâmetro dos furos do tubo interno igual 6 mm.

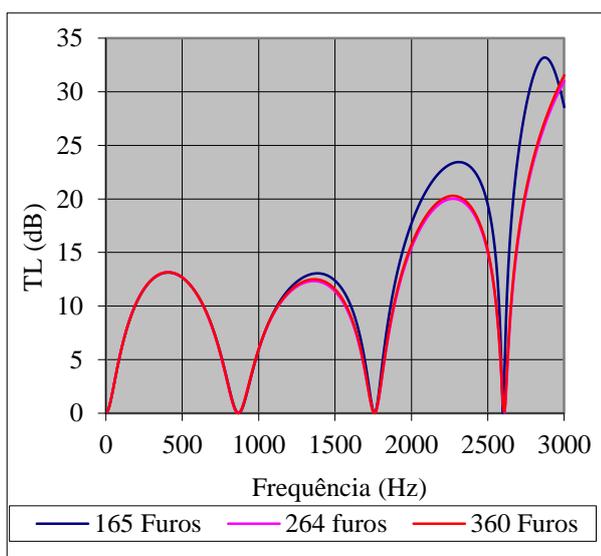


Figura 11 Comparação da TL para tubo perfurado com furo de diâmetro igual 6 mm

O gráfico da Figura 11 mostra que se aumentar a quantidade de furos do tubo interno, o comportamento

da TL do silenciador torna-se muito parecido com a de um silenciador de câmara de expansão simples.

Ressonadores de Helmholtz

O estudo dos ressonadores de Helmholtz seguiram os mesmos procedimentos utilizados nas seções anteriores. Um esquema ilustrativo de um ressonador é mostrado na Figura 12. O que difere este de silenciador dos demais é que ele é uma câmara (volume) morto sem saída. Além dos modelos computacionais elaborados para simulações, foi construído um modelo físico de ressonador para análise experimental com objetivo de verificar a validade das simulações computacionais deste projeto.

Para o estudo da eficiência dos ressonadores foram simulados inicialmente 3 modelos, Tabela 3. Nestas análises foram verificadas a influência da dimensões de sua geometria como altura da cavidade (L), diâmetro da cavidade (D), diâmetro do pescoço (Dc), altura do conector (Lc), diâmetro do tubo principal (Dp) e seção transversal da cavidade sobre a TL. Além da análise computacional, foi utilizada a equação analítica da TL proposta por Selamet et al (1995).

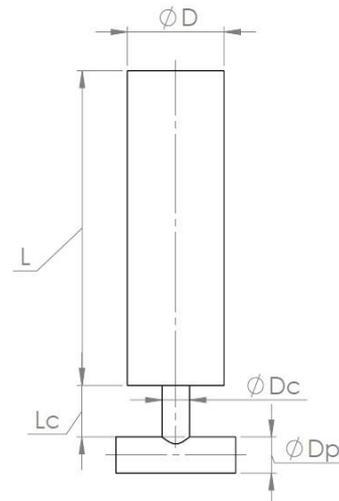


Figura 12. Modelo de ressonador de Helmholtz para análise computacional

Tabela 3. Características geométricas dos ressonadores avaliados

Modelo	L (mm)	D (mm)	Dc (mm)
Helm1	284,0	142	40,4
Helm2	523,2	106,4	27,5
Helm3	830,5	83,0	27,5
Helm4	1088,2	72,5	27,5
Helm6	305	97	27,5
Lc (mm)	Dp (mm)	L/D	Volume (cm³)
85	48,6	2	4500
85	48,6	5	4500
85	48,6	10	4500
85	48,6	15	4500
100	35	3,14	2250

A Figura 13 mostra um comparativo da TL para quatro modelos (Helm1, Helm2, Helm3 e Helm4) com relações de L/D diferentes e com volume de cavidades iguais.

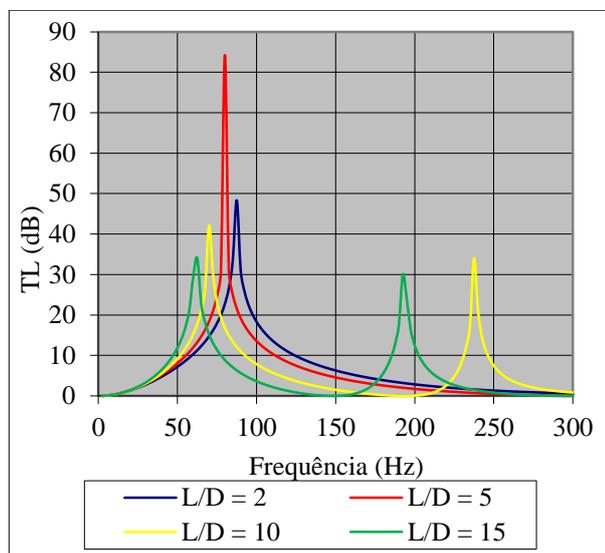


Figura 13. Comparativo da TL com a relação L/D diferentes e com volume de cavidade iguais

Para os modelos de ressonadores de Helmholtz pode-se dizer que há um deslocamento para esquerda dos picos de maior TL quando há um aumento da razão entre o comprimento e diâmetro da cavidade (L/D). Análise feita mantendo-se o volume da cavidade constante, Figura 13. Fato também observado por Selamet et al (1995).

A Figura 14 mostra um comparativo da TL para o modelo Helm6 (ver Figura 5) avaliada computacionalmente e experimentalmente.

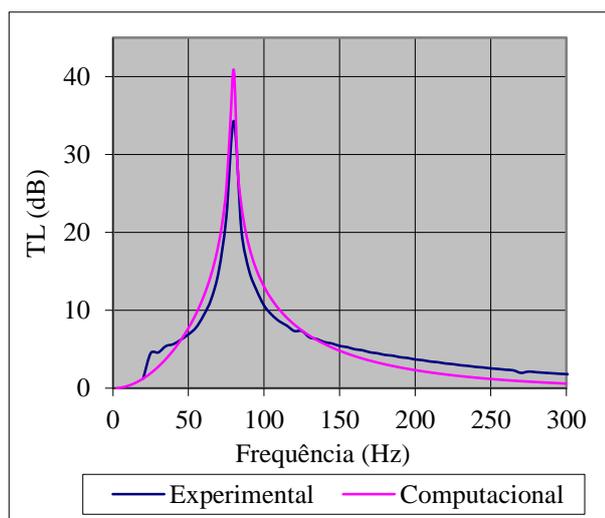


Figura 14. Comparativo da TL para modelo de ressonador (Helm6) avaliada de três maneiras

CONCLUSÃO

O estudo apresentado por Lima (2008) e Selamet et al (1995) tiveram boa concordância com os resultados obtidos computacionalmente descritos nesse trabalho. Portanto pode-se afirmar que os resultados aqui apresentados tem confiabilidade para determinar a perda de transmissão dos silenciadores reativos.

A análise realizada com os modelos de silenciadores diferenciando suas características geométricas revelou diferentes desempenhos em sua TL. Para os silenciadores de câmara de expansão simples as análises mostraram que quanto maior a razão de áreas maior será a sua eficiência e ocorre um aumento do número de domos de maior TL quando o comprimento da câmara é aumentado.

Para os silenciadores com tubo interno perfurado há um aumento da TL quanto maior o número de furos e consequentemente da porosidade no tubo interno.

Para os ressonadores avaliados verificou-se um deslocamento para esquerda do pico de maior TL quando há um aumento da razão entre o comprimento e o diâmetro da cavidade.

Para a validação do estudo feito, realizou-se a verificação experimental de um modelo de ressonador de Helmholtz. O resultado dessa comparação apresentou ótima concordância com o resultado computacional. Portanto o método utilizado com software desenvolvido em elementos finitos possui ótima precisão de acordo com os resultados obtidos comparando-se o resultado experimental e computacional.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao meu orientado Prof. Dr. Key Fonseca de Lima e aos técnicos dos laboratórios de Engenharia Mecânica da PUC-PR.

REFERÊNCIAS

DENATRAN, Frota de veículos: 2012. Disponível em: <http://www.denatran.gov.br/frota.htm>. Acessado em 8 de fevereiro de 2013.

Gerges, S.N.Y, 2000, "Ruído: Fundamentos e Controle". 2ª edição. Florianópolis: Editora NR, 700 p.

Lima, K. F., 2008, "Metodologia de avaliação de filtros acústicos reativos". 120 f, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Selamet, A., Dikey, N. S., Novak, J. M., 1995, "Theoretical, computational an experimental investigation of Helmholtz resonator with fixed volume lumped versus distributed analysis". Journal of Sound and Vibration; volume: 187, p. 358 – 367.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

O autor é o único responsável pelo trabalho aqui apresentado.