# AVALIAÇÃO TEÓRICA E NUMÉRICA DE SILENCIADORES ACÚSTICOS

# THEORETICAL AND NUMERICAL EVALUATION OF MUFFLERS

**1º autor(a) – Vitoria Nabosne Yudesneider**
E-mail: vitoria50951@unifatecpr.com.br

**2º autor(a) – Roni Vanello Lopes**
E-mail: roniI31905@unifatecpr.com.br

**3º autor(a) – Alfredo Cielo Borges**
E-mail: alfredo53903@unifatecpr.com.br

**Orientador(a) – Fernando Jun Hattori Terashima**
E-mail: fernando.terashima@unifatecpr.com.br

**Coorientador(a) – Ana Mendonça Mansur**
E-mail: ana.mansur@unifatecpr.com.br

Instituição: Centro Universitário de Tecnologia de Curitiba (UNIFATEC) Endereço: 449, R. Itacolomi, Portão, Curitiba - PR, CEP: 81070-150

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar silenciadores através de resultados teóricos e numéricos. Para isso, foi desenvolvido cinco modelos de silenciadores, nos quais foram geradas malhas específicas para a obtenção dos resultados de atenuação sonora a partir do método dos elementos finitos. Foram realizadas simulações em um software comercial, variando parâmetros como o diâmetro dos dutos da câmara de expansão e o comprimento do silenciador, a fim de avaliar seus efeitos na atenuação sonora. Os resultados demonstraram boa correspondência entre os valores simulados e teóricos, confirmando a correlação dos silenciadores em uma determinada faixa de frequência. Vale destacar que os silenciadores desempenham um papel fundamental na preservação da saúde, uma vez que a exposição prolongada a ruídos elevados pode causar sérios danos auditivos e outros problemas relacionados ao bem-estar humano.

**Palavras-chave:** Silenciador acústico; Atenuação sonora; Simulações computacionais; Perda de transmissão sonora; Saúde acústica.

**ABSTRACT**

This study aims to analyze silencers through theoretical and numerical results. To achieve this, five silencer models were developed, for which specific meshes were generated to obtain sound attenuation results using the finite element method. Simulations were carried out in commercial software, varying parameters such as the diameter of the ducts in the expansion chamber and the length of the muffler, in order to evaluate their effects on sound attenuation. The results showed good agreement between the simulated and theoretical values, confirming the correlation of the silencers within a certain frequency range. It is worth noting that silencers play a fundamental role in preserving health, as prolonged exposure to high noise levels can cause serious hearing damage and other issues related to human well-being.

**Keywords:** Muffler; Sound attenuation; Computational simulations; Transmission Loss; Acoustic health.

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de silenciadores acústicos é de extrema importância para o controle da poluição sonora, tanto na área urbana como também na industrial. Os seres humanos podem desencadear uma série de problemas na saúde quando expostos excessivamente a ruídos como, por exemplo: aumento da pressão arterial, taquicardia, estresse, crise do pânico, entre outros (GERGES, 2014). Pessoas com Transtorno do Espectro Autista apresentam sensibilidade a ruídos, o que torna ainda mais importante o desenvolvimento de silenciadores para o controle de ruídos (GOMES, 2008).

O controle de ruído, visando garantir uma saúde auditiva, é um cuidado exigido pelas normas NBR 10151 e NBR 10152. Desse modo, as áreas de engenharia das empresas buscam atender essas normas para bem-estar do consumidor. Silenciadores acústicos tem como finalidade reduzir os ruídos gerados, sendo muito utilizados em motores de veículos de combustão interna, sistemas produtivos, equipamentos pesados, sistema de ar-condicionado, entre outros.

Davis, *et al.* (1954) realizaram um estudo aprofundado sobre a performance de tipos distintos de silenciadores. A análise dos resultados referentes à atenuação sonora dos silenciadores foi conduzida sob abordagens teórica e experimental, permitindo uma avaliação comparativa entre os dados simulados e os observados em testes práticos. Para essa pesquisa, foram realizados testes com 77 diferentes configurações para os silenciadores e, também, apresentada equações de atenuação com relação as dimensões dos silenciadores.

Young e Crocker (1975) estudaram a perda de transmissão sonora através do método de elementos finitos. O método utilizado no trabalho foi aplicado em silenciadores simples, mas também pode ser utilizada para avaliar sistemas complexos. As simulações e resultados realizados foram condizentes com os testes efetuados em baixa frequência. Há, também, a descrição de uma formulação variacional para explicar o funcionamento do campo acústico nos sistemas de silenciadores, destacando a relevância da utilização de métodos numéricos para melhorar o desempenho da atenuação sonora dos silenciadores.

Bugaru e Vasile (2007) executaram uma análise sobre o Método da Matriz de Transferência (TMM) em relação ao desempenho acústico de silenciadores. O TMM foi praticado em um silenciador de câmara simples, obtendo boa convergência dos

resultados. Desse modo, é possível obter resultados e análises sem a realização de testes complexos.

Lima (2018) analisou o impacto do aumento de frotas de veículos no Brasil em relação a poluição sonora urbana e, por meio da utilização de computadores, avaliou o desempenho de filtros acústicos reativos e ressonadores de Helmholtz. Em modelos de filtros acústicos com tubos perfurados notou-se que há o aumento da eficiência quando há o aumento da porosidade. Já em ressonadores de Helmholtz, os picos de perda de transmissão sonora em frequências menores são deslocados quando há o aumento da razão entre o comprimento e o diâmetro da cavidade.

Visando construir e otimizar um silenciador automotivo com o intuito de ser utilizado na Formula Student, os estudantes Piccini, *et al.* (2020) tinham como objetivo equilibrar a atenuação de ruído tendo a menor perda possível de potência do motor. De acordo com os testes realizados, foi concluído que efetuar a combinação de elementos dissipativos e reativos acarreta uma melhor atenuação do ruído, contribuindo para a otimização de sistemas de exaustão em veículos de competição estudantis.

A partir da complexidade envolvida no comportamento acústico de silenciadores que realizam a combinação de elementos dissipativos e reativos, é necessário a utilização de ferramentas computacionais que permitam simular e prever o desempenho desses dispositivos com precisão. Nesse contexto, o método dos elementos finitos (MEF) é utilizado para a análise de problemas acústicos, especialmente em geometrias complexas e situações produtivas realistas.

Os elementos finitos são utilizados como um método para a resolução de equações diferenciais. Em resumo, o domínio de análise é dividido em pequenos elementos com o intuito de facilitar a solução de problemas complexos. As etapas de uma análise de elementos finitos são: possuir o domínio a se avaliar, realizar a malha de elementos, definir as forças e condições de contorno, resolver a análise e, por fim, verificar os resultados. Esse método foi aplicado por Braga (2003) na modelagem numérica de um silenciador automotivo, permitindo simular o comportamento acústico do componente e validar os resultados por meio de ensaios experimentais. No trabalho, o método dos elementos finitos foi essencial para analisar a propagação das ondas acústicas no interior do silenciador, além de auxiliar no desenvolvimento de soluções mais eficientes para o controle de ruído veicular.

Este trabalho possui como objetivo estudar a eficiência dos silenciadores acústicos, apresentando como foco a análise de Perda de Transmissão Sonora (*Transmission Loss* – TL) em diferentes configurações. A pesquisa tem como base a concepção de um modelo 3D de silenciador que será utilizado para realizar simulações computacionais e, em seguida, medir a eficiência da atenuação sonora em uma faixa de frequência determinada.

## 2. METODOLOGIA

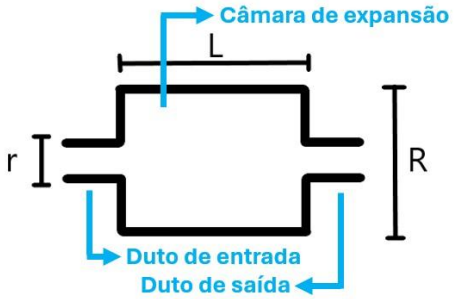
Foram desenvolvidos cinco modelos de silenciadores acústicos com dimensões diferentes para realizar a análise de supressão de ruído. Com o intuito de avaliar como as diferentes dimensões influenciam a eficiência do silenciador na redução de níveis sonoros, cada modelo foi projetado com modificações nas medidas em relação ao tamanho. Na Tabela 1, são apresentadas as dimensões de cada modelo de silenciador desenvolvido. A Figura 1 ilustra a identificação de cada uma dessas dimensões em relação às partes do silenciador. Nessa representação, r corresponde ao diâmetro dos dutos de entrada e saída, R ao diâmetro da câmara central, e L ao comprimento da câmara.

Tabela 1: Dimensão dos modelos.

| | r [mm] | R [mm] | L [mm] |
|---|---|---|---|
| MODELO 1 | 17,5 | 45 | 230 |
| MODELO 2 | 17,5 | 30 | 230 |
| MODELO 3 | 17,5 | 60 | 230 |
| MODELO 4 | 17,5 | 45 | 115 |
| MODELO 5 | 17,5 | 45 | 345 |

Fonte: Os autores

Figura 1: Dimensão dos modelos.




Fonte: Os autores

Com relação aos cinco modelos de silenciadores foram realizados cálculos teóricos para obtenção dos valores de Transmission Loss (TL). Para isso, utilizou-se a seguinte equação:

$$TL = 10 \cdot \log_{10}\left(1 + \frac{1}{4}\left(m - \frac{1}{m}\right)^2 \cdot \text{sen}^2(k - L)\right) \quad (1)$$

Essa equação permite que seja determinado o desempenho acústico de cada silenciador, considerando parâmetros como a razão de área (m) e as dimensões dos silenciadores. Nesse contexto, k (rad/m) é definido como k = (2πf)/c, onde f é a frequência

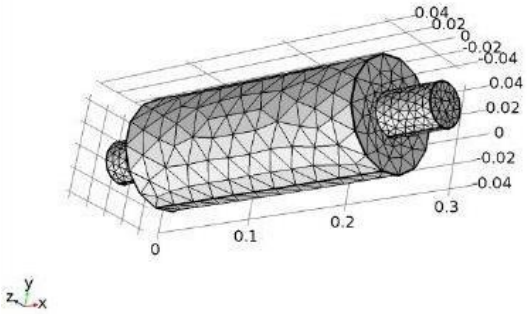
(Hz) e c é a velocidade do som no meio (m/s), e L representa o comprimento da câmara do silenciador (mm).

Os resultados obtidos com base nessa expressão fornecem uma estimativa teórica da atenuação sonora proporcionada por cada modelo, permitindo realizar comparações entre suas eficiências.

A equação apresentada para o cálculo do Transmission Loss (TL) foi derivada a partir da aplicação do método de Galerkin sobre a equação de Helmholtz, utilizada na modelagem de problemas acústicos. Essa junção das equações apresenta como objetivo minimizar os erros e limitações relacionados à formulação tradicional de elementos finitos, o que gera mais precisão do comportamento das ondas sonoras em sistemas com geometrias complexas, como os silenciadores.

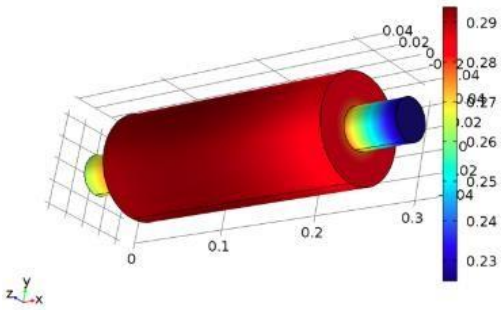
Nesse estudo, foi realizado uma simulação aplicando um modelo completo para a geração de uma malha de elementos finitos utilizando o elemento tetraédrico com 4 nós. O procedimento para obter os resultados das malhas envolve um custo computacional significativo como tempo de processamento, memória e armazenamento. Inicialmente, foi aplicada uma malha grosseira para visualizar de maneira geral o funcionamento dos silenciadores e, posteriormente, foi realizado o refino da malha de forma progressiva com o intuito de aumentar a precisão dos resultados. O processo de refino, necessário para a realização da análise de convergência, demanda maior capacidade de processamento, assim também como um tempo de execução mais elevado para garantir a precisão dos resultados simulados. A Figura 2 ilustra a malha de elementos finitos do Modelo 1 utilizada na simulação, enquanto a Figura 3 apresenta o campo de pressão sonora obtido a partir dessa malha refinada, evidenciando a distribuição da pressão ao longo do domínio analisado, considerando uma condição de entrada de 1 Pascal. Para a obtenção dessa malha final, foi realizado um processo de refino progressivo até que, ao aplicar um refino ainda mais detalhado, não foram observadas diferenças significativas nos resultados. Dessa forma, optou-se por utilizar essa malha como referência nas simulações.

Figura 2 – Malha de elementos finitos do modelo 1



Fonte: Os autores

Figura 3 – Campo de pressão sonora



Fonte: Os autores

Na Tabela 2, são apresentadas a quantidade de elementos tetraédricos de cada modelo, assim como o número de nós e o tempo de processamento correspondente a cada um. As simulações numéricas foram realizadas em um computador com as seguintes características: processador Intel(R) Core(TM) i7-2640M CPU @ 2.80GHz, 12,0 GB de memória RAM, armazenamento em SSD de 256 GB, e placa de vídeo NVIDIA GeForce GT 640M com 996 MB de memória dedicada.

Tabela 2: Tempo de processamento e elementos dos modelos.

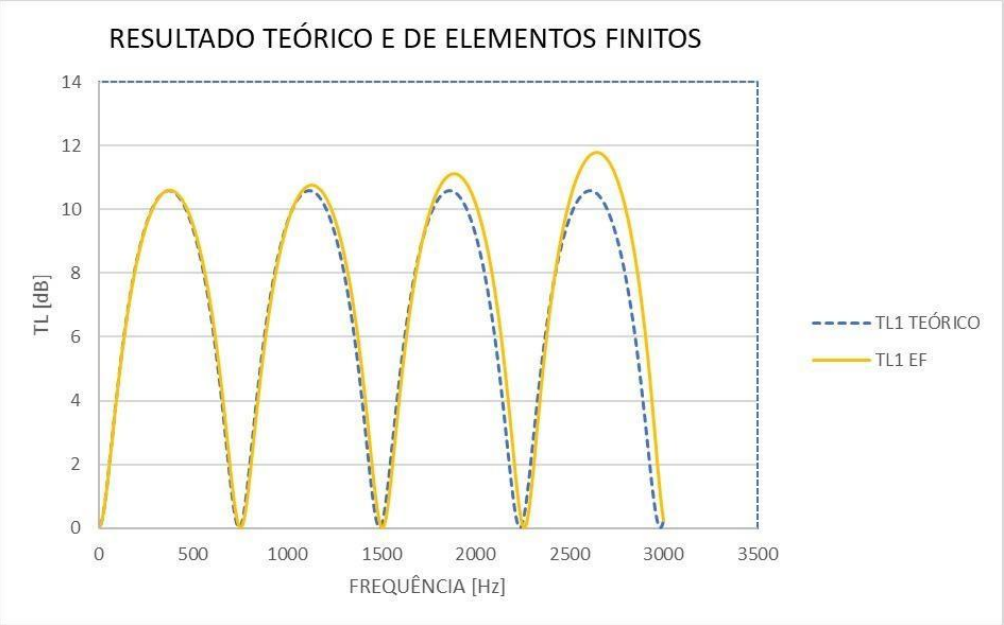
| | Modelo 1 | Modelo 2 | Modelo 3 | Modelo 4 | Modelo 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| Elementos Tetraédricos | 3915 | 3545 | 4652 | 4170 | 4173 |
| Número de nós | 6348 | 5964 | 7355 | 6655 | 6872 |
| Tempo de Processamento | 1min47s | 1min33s | 2min13s | 2min2s | 1min52s |

Fonte: Os autores

## 3. RESULTADOS

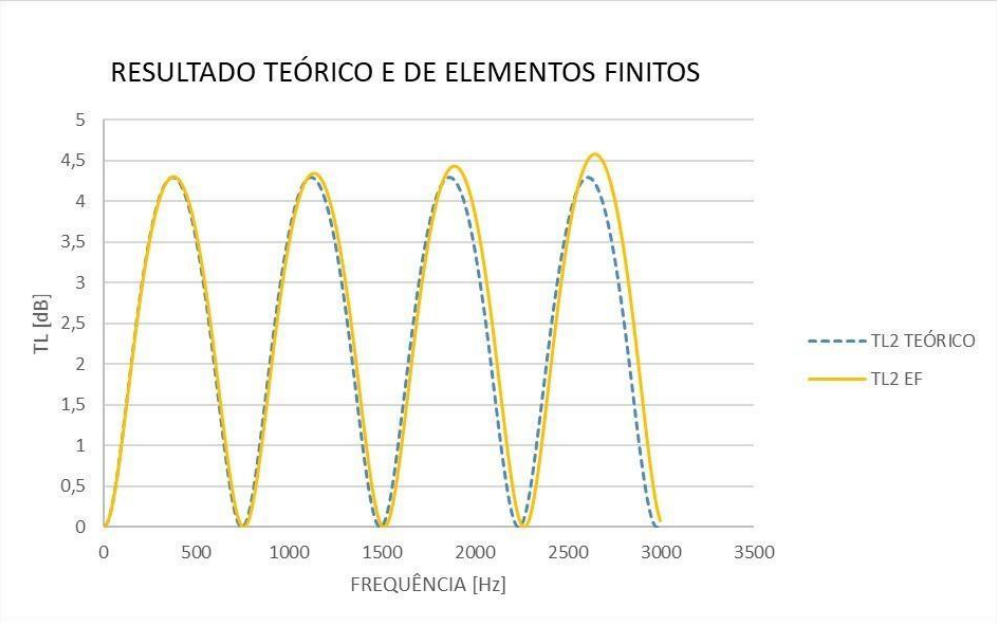
Com o auxílio de um software comercial, foram realizadas simulações de cada um dos modelos de silenciadores acústicos propostos. Dessa forma, foi possível realizar a avaliação de quais silenciadores apresentaram melhor desempenho na atenuação do ruído.

Figura 4 - TL1. Modelo de silenciador 1



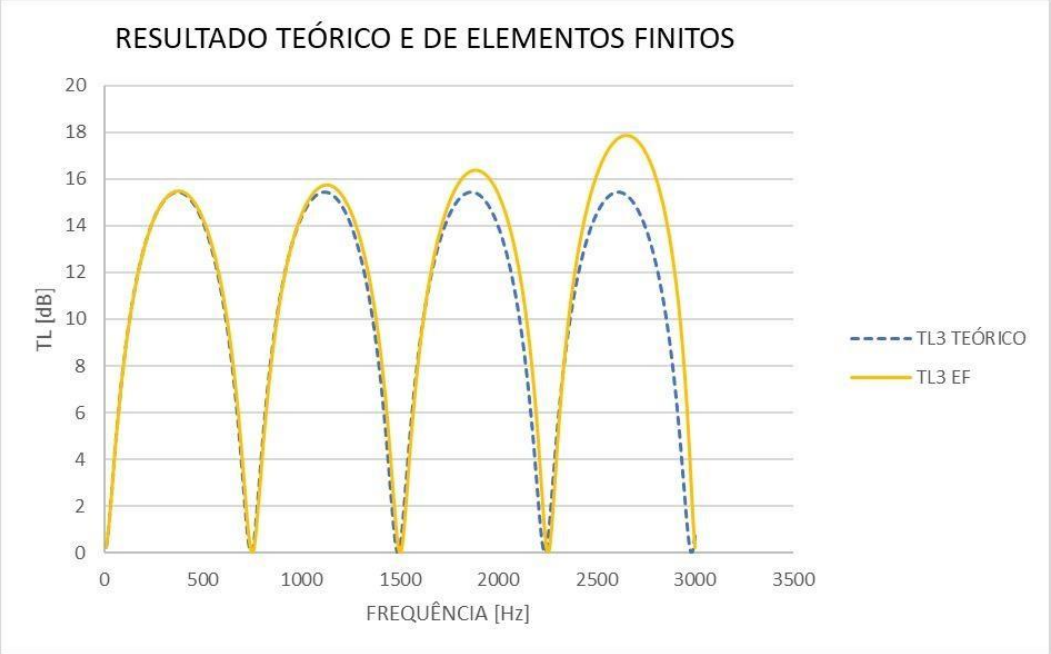

Fonte: Os autores

Figura 5 - TL2. Modelo de silenciador 2.



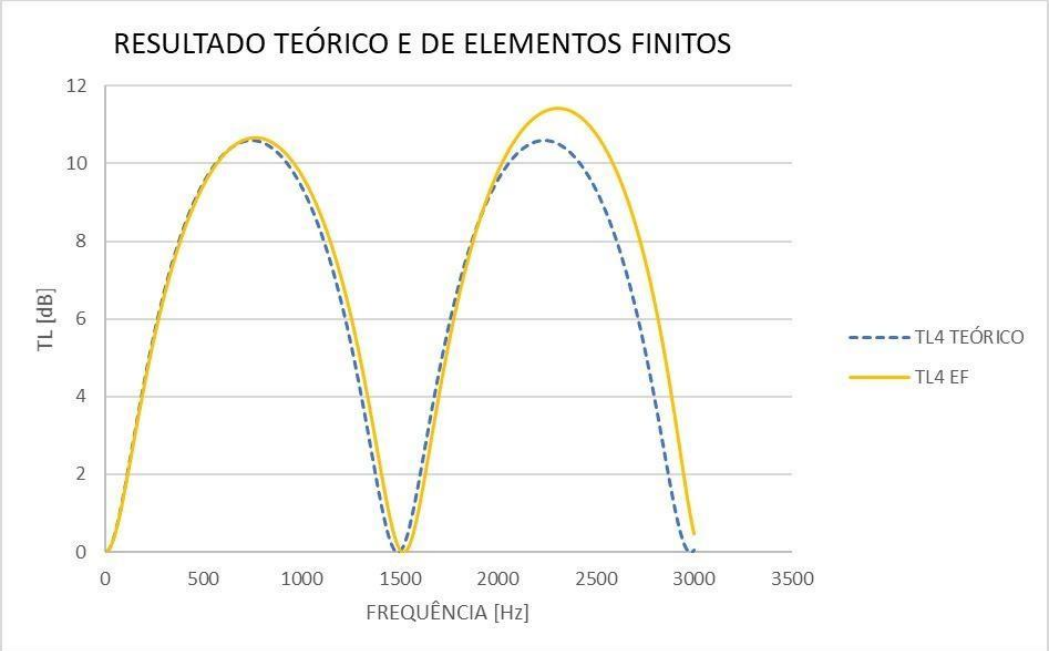

Fonte: Os autores

Figura 6 – TL3. Modelo de silenciador 3.



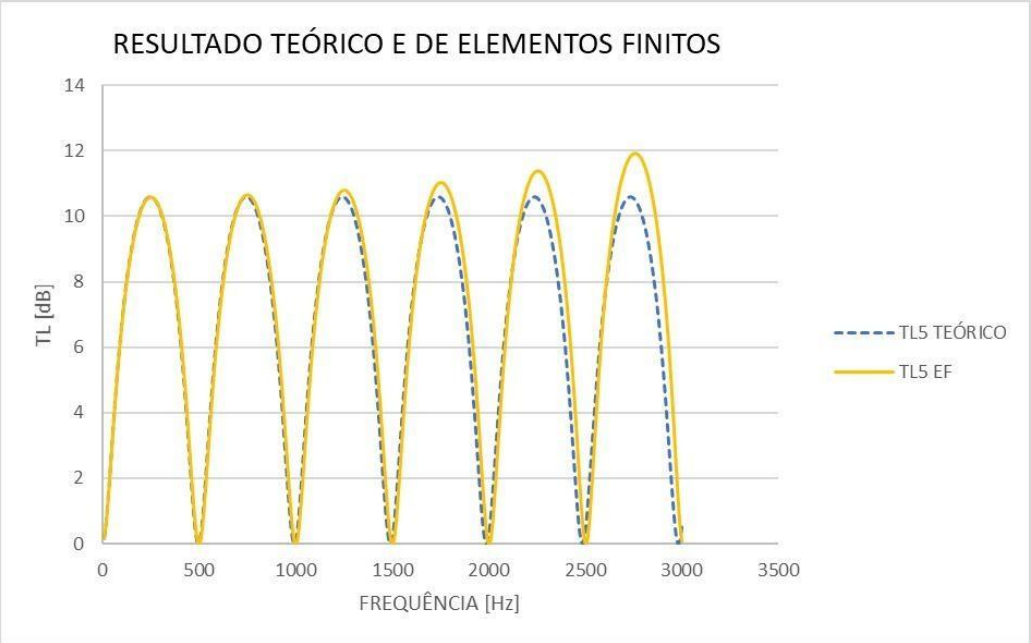

Fonte: Os autores

Figura 7 - TL4. Modelo de silenciador 4.




Fonte: Os autores

Figura 8 – TL5. Modelo de silenciador 5.




Fonte: Os autores

A atenuação sonora promovida por um silenciador acústico pode ser quantificada por meio da perda de transmissão (Transmission Loss – TL), que representa a diferença, em decibéis (dB), através da energia sonora incidente e a transmitida. Para avaliar o desempenho acústico de diferentes configurações de silenciadores, foram realizados estudos comparativos entre os resultados obtidos por modelos teóricos (linhas tracejadas) e por simulações numéricas com o método dos elementos finitos (linhas contínuas) realizados com auxílio de um software comercial, considerando uma faixa de frequência de 0 a 3000 Hz.

Os cinco casos analisados (TL1 a TL5) representam diferentes geometrias do silenciador. Em todos os gráficos, observa-se boa concordância entre os métodos teórico e numérico, com ambos capturando as principais características dos dispositivos, como picos de ressonância, sendo as frequências de máxima atenuação, e vales, definidos pelas frequências de mínima atenuação.

Para o caso do TL1 (FIGURA 4), há uma repetição de padrões harmônicos, com quatro máximos dentro da faixa analisada de 0–3000 Hz. A curva de elementos finitos acompanha com boa concordância o modelo teórico, apresentando leve elevação nos picos.

No caso do TL2 (FIGURA 5), verifica-se um comportamento semelhante, porém com os picos ocorrendo em frequências ligeiramente mais altas que no caso do TL1. O desvio entre os métodos ainda é mínimo, mantendo a consonância com a simulação. Os resultados de TL apresentam valores menores que o do TL1, ocasionado pela diminuição do diâmetro do silenciador.

Já no caso do TL3 (FIGURA 6), é possível visualizar um aumento notável na amplitude dos picos já que chegam a atingir valores acima de 18dB, visível entre 2000 e 3000 Hz, evidenciando uma maior capacidade de atuação sonora em relação ao TL2 e TL1. O modelo de elementos finitos continua acompanhando a tendência teórica, mas mostra maior divergência nos picos.

Para o caso do TL4 (FIGURA 7), notou-se a largura dos domos, com dois máximos principais. A linha de elementos finitos mantém boa concordância na forma, mas apresenta picos ligeiramente mais elevados em comparação com a curva teórica.

Por fim, no caso do TL5 (FIGURA 8), observa-se um padrão com 5 máximos, que também possui o resultado dos elementos finitos concordando com o resultado teórico e apresentando uma leve elevação em relação ao teórico.

É importante destacar, a partir dos resultados obtidos, que o diâmetro e o comprimento do silenciador influenciam diretamente o comportamento da TL, uma vez que afetam o número de modos de propagação das ondas sonoras e a atenuação acústica do sistema. Silenciadores com maior diâmetro tendem a apresentar maiores perdas na transmissão sonora. Observa-se ainda que, no último domo dos gráficos, há uma diferença mais significativa entre os resultados teóricos e numéricos. Isso ocorre porque, com o aumento da frequência, o comprimento de onda diminui, exigindo uma maior quantidade de elementos por comprimento de onda para manter a precisão dos resultados. Dessa forma, torna-se necessário um refino da malha. Além disso, em frequências mais altas, o comportamento das ondas sonoras deixa de ser plano, o que também contribui para a discrepância entre os métodos teórico e numérico já que o teórico considera apenas a propagação de ondas planas

Os resultados obtidos indicam que o método dos elementos finitos é uma ferramenta eficaz para prever o desempenho acústico de silenciadores, apresentando boa concordância em relação ao modelo analítico teórico em toda faixa de frequência estudada. Essa abordagem contribui para o desenvolvimento e a otimização de projetos, permitindo análises detalhadas antes da fabricação do dispositivo.

## 4. CONCLUSÃO

Com a realização deste trabalho, foi possível atingir o objetivo proposto, que consistia em analisar o desempenho dos 5 modelos de silenciadores acústicos por meio de simulações e comparações com resultados teóricos. As simulações que foram realizadas no software permitiram observar como o diâmetro e o comprimento do silenciador influenciam diretamente na atenuação sonora. Os resultados obtidos neste trabalho convergem com os de Braga (2003), que também evidenciou, por meio de modelagem numérica e ensaios experimentais, a influência significativa dos parâmetros geométricos no desempenho acústico de silenciadores. Além disso, o estudo reforça a importância dos silenciadores como ferramentas eficazes no controle da poluição sonora, contribuindo para ambientes mais saudáveis e confortáveis, tanto em aplicações industriais quanto urbanas.

## 5. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10151: Acústica – Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10152: Acústica – Níveis de pressão sonora em ambientes internos. Rio de Janeiro, 2017.

BUGARU, Mihai; VASILE, Ovidiu**.** Transfer matrix method for a single-chamber muffler. Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on Applied Mathematics, Dallas, Texas, USA, 2007.

BRAGA, Marcelo Starling. Modelagem numérica e ensaio experimental do silenciador de um veículo. 2003. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2003.

DAVIS, Don D., Jr.; STOKES, George M.; MOORE, Dewey; STEVENS, George L., Jr. Theoretical and experimental investigation of mufflers with comments on engine-exhaust muffler design. Langley Aeronautical Laboratory, National Advisory Committee for Aeronautics, 1954.

GERGES, Samir. Ruído: Fundamentos e Controle. São Paulo: Blucher, 2014.

GOMES, E.; PEDROSO, F. S.; WAGNER, M. B. Hipersensibilidade auditiva no transtorno do espectro autístico. Pró-Fono Revista de Atualização Científica, 2008.

LIMA, Gabriel Alves de. Implementação de sistemas de controle ativo de ruído acústico para ambientes automotivos. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia da Computação) – Universidade de Pernambuco, Recife, 2018.

PICCINI, Alexandre; MAREZE, Paulo Henrique; MARTINS, Mario; FONSECA, William D'Andrea. Desenvolvimento e otimização de silenciador automotivo orientado a protótipos Formula Student. Acústica e Vibrações, 2020.

YOUNG, Cheng-I. James; CROCKER, Malcolm J. Prediction of transmission loss in mufflers by the finite-element method. Journal of the Acoustical Society of America, 1975.