

Desenvolvimento de uma bancada para medição de perda de transmissão de sistemas de escapamento automotivo

Pedro Henrique Fehlauer¹ (IC), Prof. Dr. Glauber Zerbini Costal (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá – campus Itabira.

Palavras-chave: Acústica em dutos. Bancada experimental. Perda de transmissão. Sistemas de exaustão.

Introdução

Carros com motores a combustão queimam uma mistura de combustível e ar para o seu funcionamento. Os produtos deste processo são gases quentes de exaustão e ruído. Nos veículos, estes gases precisam ser descartados de forma segura, sem que penetrem a cabine nem danifiquem o veículo pelas altas temperaturas. Além dos gases, a combustão também gera ruído. Este ruído precisa ser atenuado cessando qualquer tipo de desconforto ao se utilizar o veículo e para atender às normas vigentes que limitam o ruído máximo emitido por um carro. Para isso, existe o sistema de escapamento (ou sistema de exaustão).

O desenvolvimento destes sistemas atualmente se dá por meio da aplicação mista de softwares de simulação e coleta de dados experimentais. Formando um ciclo entre simular novas peças, produzir um protótipo e medir a performance acústica experimentalmente. Devido à falta de modelos teóricos consagrados para comparações teórico experimentais, esse processo resulta em várias iterações até atingir a performance esperada. (NETO, 2019)

O som emitido pelo sistema de escapamento é uma combinação de diferentes frequências e, no ciclo de desenvolvimento apresentado acima, é usual o teste de diferentes alterações das estruturas internas de silenciadores a fim de atenuar estas diferentes frequências.

Existem metodologias para avaliar o comportamento acústico de um silenciador a fim de apontar o quão eficaz o silenciador é para atenuar o som em algumas frequências. THIEME (2000) apresenta três metodologias: a perda de inserção (*Insertion Loss*) em que é avaliada a diferença na potência sonora emitida por um sistema de exaustão, quando medido com e sem os silenciadores, ou seja, é necessário produzir um sistema de exaustão sem os silenciadores e outro sistema com os silenciadores; a redução de ruído (*Noise Reduction*) em que se analisa a diferença no nível de pressão sonora entre dois pontos no sistema de exaustão, normalmente avalia-se um ponto antes e outro depois do silenciador utilizando a fonte sonora real da aplicação que, no caso de sistemas de exaustão, seria a instalação de um microfone radialmente no tubo de escape, devem ser adequados as

altas temperaturas devido à exposição aos gases quentes, e; a perda de transmissão (TL, do inglês *Transmission Loss*), na qual, diferentemente dos outros dois métodos, a medição é realizada em uma bancada específica (a qual foi desenvolvida neste trabalho) na qual somente o silenciador é exposto a uma fonte sonora genérica, como uma caixa de som, e avalia-se a razão entre o nível de potência sonora medida antes e depois do silenciador. (MUNJAL, 2014)

A metodologia de TL é definida pela norma ASTM E2611 (2009) na qual a bancada, é composta apenas por uma fonte sonora, dois tubos que servem de suporte e guia para os microfones e duas terminações (uma anecóica e outra reflexiva). A TL é calculada pelo método da matriz de transferência com o uso de duas cargas (as duas terminações). A matriz de transferência é a matriz de dados que transpõe as características do sinal medido na entrada com a saída, ou seja, carrega em si todas as características acústicas da amostra estudada. Por isso, os termos da matriz são utilizados para calcular a TL da amostra. (MUNJAL, 2014)

O objetivo deste trabalho é construir uma bancada para o teste de TL que consiga medir um sistema de escapamento aplicado a veículos de passeio. Este trabalho foi desenvolvido em uma empresa no interior do estado de São Paulo que desenvolve e produz escapamentos para veículos leves de passeio e, com a técnica de TL, é possível realizar a caracterização da performance de silenciadores sem a necessidade de se conhecer as características acústicas da fonte sonora. A bancada desenvolvida para as medições utiliza uma fonte sonora genérica, e, desta forma, será possível comparar peças desenvolvidas para diferentes motorizações.

A acústica em dutos é uma área de estudo da acústica geral e, em ambas as áreas, as ondas sonoras são as mesmas entre as duas áreas, porém, na primeira, estão restritas no interior de um volume. MUNJAL (2014) cita que o comportamento da onda se altera quando dentro de um duto. A onda sonora pode ser modelada de forma mais simples quando se propaga em tubos, em relação a onda sonora que se propaga em espaços amplos, pois forma uma frente de onda uniforme, o que MUNJAL (2014) denomina onda plana.

O estabelecimento da propagação de ondas planas depende da geometria do tubo e da frequência da onda

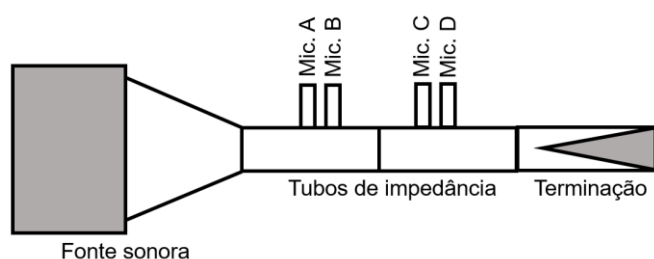
sonora que se propaga em seu interior. A norma ASTM E2611 (2009) define equações para o dimensionamento dos tubos e do posicionamento dos suportes dos microfones, fatores que limitam a faixa de frequência de trabalho da bancada experimental.

Metodologia

O primeiro estudo necessário para a realização deste trabalho foi a leitura da norma ASTM (2009). Então, observou-se a necessidade da definição da faixa de frequência de trabalho. Segundo MUNJAL (2014), o som gerado por um motor a combustão é uma função da sua rotação, o que define a frequência máxima de trabalho. A frequência mínima foi definida em decorrência da limitação do sistema de aquisição e da fonte sonora, visto que frequências menores que 10 Hz estão fora das faixas factíveis de geração pela fonte sonora e de aquisição pelo sistema disponível.

A estrutura de uma bancada para teste de perda de transmissão é apresentada na norma ASTM (2009) e pode ser vista na Figura 1.

Figura 1 – Desenho esquemático de uma bancada de perda de transmissão.



Fonte: Elaboração própria.

Estabelecida a faixa de frequência, foi definido o diâmetro dos tubos de impedância e das terminações, pois o diâmetro da tubulação defini a frequência máxima da bancada. Como cita MUJAL (2014), para o estabelecimento de onda plana, o diâmetro da tubulação deve corresponder à metade do comprimento de onda da frequência máxima medida na bancada, assim como a distância entre os microfones, segundo a norma ASTM (2009), ela não pode ser maior que metade do comprimento de onda da frequência máxima de interesse, ao mesmo tempo que é maior que 1% do comprimento de onda da frequência mínima.

A empresa tinha a disposição tubos de inox 439, com diâmetros variados entre 35 e 65mm. Os suportes dos microfones foram usinados utilizando nylon de forma a não danificá-los por conta da manipulação frequente que essa bancada necessita.

O próximo passo foi a construção das terminações, em especial a terminação anecóica a qual deve absorver todo

o som emitido pela fonte. O interior de uma terminação anecóica precisa ser projetada para absorver e dissipar a energia sonora. A terminação rígida precisa refletir o máximo de som e sem absorver consideravelmente parte dele, sendo seu projeto mais simples, compreendendo apenas uma superfície plana e rígida.

A fonte sonora para o teste de perda de transmissão é uma caixa acústica, que teve que ser construída para atender a faixa de frequência pretendida. A empresa já dispunha de um subwoofer Pioneer TS-W307D4 que foi utilizado (Figura 2).

A aquisição de dados e processamento foram realizados com o sistema de aquisição Siemens SCADAS XS. O processamento dos dados foi realizado por meio do programa Siemens Testlab (SIEMENS LMS, 2022). O programa já possui módulo para cálculo para medições de TL. Os microfones utilizados foram PCB HT378B02, microfones de precisão de 1/2".

Figura 2 – Fonte Sonora da bancada de TL: Subwoofer Pioneer TS-W307D4.



Fonte: Elaboração própria.

Com a bancada construída, foi realizada uma medição de TL sem a introdução de nenhuma peça. Para esta etapa deste tipo de medição, o resultado esperado é encontrar uma perda nula de transmissão. Essa medição testa o sistema de aquisição com um resultado previsto, além de avaliar a performance da bancada completa. Este teste foi dirigido pela norma ASTM (2009) e pelo passo a passo presente no programa Testlab. O teste se dá da seguinte maneira: montagem dos microfones calibrados em seus lugares; instalação de uma das terminações; acionamento da fonte sonora reproduzindo ruído branco e medição no programa Testlab; repetição do processo com a outra terminação. A partir da medição com as duas terminações o programa calcula a perda de transmissão em cada frequência.

Resultados e discussão

A construção da bancada (Figura 3) dependeu da definição da faixa de frequência de trabalho, considerando um motor a combustão de quatro cilindros com uma rotação máxima de 6500 rpm (parâmetros

comuns para um motor moderno). A partir da rotação máxima foi calculada uma frequência máxima de 1000 Hz, que, utilizou-se para calcular o maior diâmetro recomendado da tubulação de 180mm de diâmetro. Porém, essa medida é excessivamente grande em relação aos tubos utilizados para a construção de sistemas de escapamento, o que obrigaria o uso de adaptadores grandes, já que a norma ASTM (2009) limita a razão do cone da adaptação. Por isso foi o diâmetro da tubulação foi adaptado para medidas presente na empresa, foi escolhido o tubo com diâmetro de 65mm, assim, considerando o tubo escolhido, calculando a frequência máxima em função do diâmetro. A frequência máxima resultou em aproximadamente 3000 Hz.

Figura 3 – Bancada construída e montada sem uma peça de teste.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 4 – Terminação anecóica (acima) e terminação reflexiva (abaixo).



Fonte: Elaboração própria.

Figura 5 – Detalhe da lâ de vidro inserida na terminação anecóica.

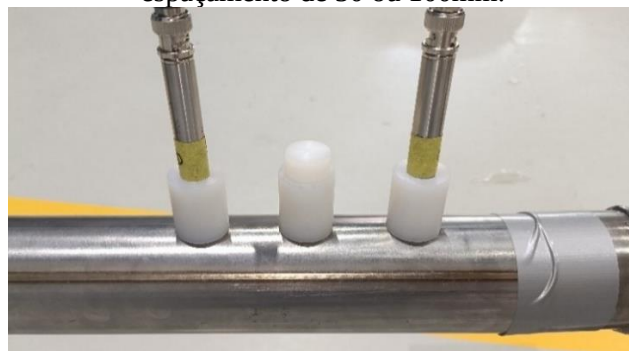


Fonte: Elaboração própria.

As terminações são construídas com o mesmo material dos tubos de impedância (Figura 4). A terminação anecóica foi construída com um tubo de 1000mm de comprimento fechado em uma das extremidades. Em seu interior foi inserido 1000g de fio contínuo de lâ de vidro expandido, dividido em duas partes iguais, como material

fonoabsorvente. A primeira parte foi densamente inserida no fundo do tubo, cerca de 350 mm do comprimento total do tubo, e os 500 g restantes a frente com menos compactação, assumindo o restante do comprimento do tubo, cerca de 550 mm (Figura 5). Isso foi realizado como uma tentativa de absorver o som, sem criar uma parede reflexiva no início da lâ de vidro no interior do tubo.

Figura 6 – Suporte de microfone, duas opções, espaçamento de 50 ou 100mm.



Fonte: Elaboração própria.

Os suportes de microfone (Figura 6) são coroa cilíndricas com um rasgo para anel de borracha no diâmetro interno, este anel age como uma vedação na grade frontal do microfone, vedando o microfone ao meio externo. Foi escolhido vedar na grade frontal para facilitar a instalação e remoção do microfone, já que a grade frontal possui um diâmetro maior que o restante do microfone.

A fonte sonora (Figura 7) foi construída com o *subwoofer* adquirido anteriormente na empresa. A caixa acústica, amplificador e fonte de alimentação, foram adquiridos de uma empresa que fabrica som automotivo. O cone de adaptação para a tubo de impedância foi fabricado na empresa e segue as recomendações da ASTM (2009).

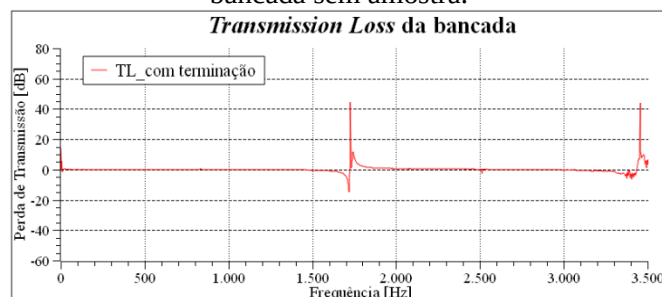
Figura 7 – Caixa acústica com amplificar, fonte de alimentação e cone adaptador.



Fonte: Elaboração própria.

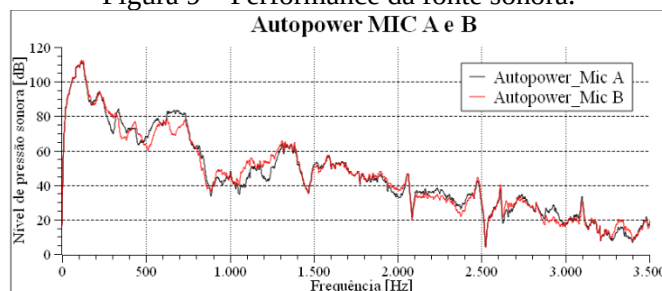
Por meio da medição realizada com a bancada sem nenhuma peça instalada, foi obtido o resultado conforme a Figura 8, em que a bancada apresentou perda de transmissão nula em quase toda a faixa de frequência, apresentando um pico em 1700 Hz, que pode ser devido ao comprimento da bancada e a formação de ondas estacionárias. Além disso, foi analisado a pressão sonora emitida pela fonte (Figura 9). Esta apresentou uma resposta insatisfatória, não sendo uma resposta plana em toda a faixa, como esperado. Além disso, a fonte sonora precisa produzir uma pressão sonora acima do som ambiente em 10dB, pois a sala utilizada possui certificação de ruído de fundo em 35dB. A faixa de frequência útil da bancada observada por esta medição foi de 20Hz a 850Hz.

Figura 8 – Resultado de perda de transmissão da bancada sem amostra.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 9 – Performance da fonte sonora.



Fonte: Elaboração própria.

Conclusões

O objetivo de construir uma bancada para medição da perda de transmissão foi atingido com aberturas para trabalhos futuros. Com este trabalho foi proposto um procedimento para construção e operação de uma bancada, possibilitando o seu estudo em trabalhos futuros, assim como o melhoramento da bancada atual. O primeiro ponto a se melhorar é a investigação da ressonância que aparece como um pico no gráfico de perda de transmissão, com a bancada sem a amostra, em 1700 Hz, este provavelmente deve ser relacionado, ou ao comprimento dos tubos de impedância ou de uma ineficiência da terminação anecóica naquela frequência.

Outro ponto importante de melhoramento é a fonte sonora que não atende toda a faixa de frequência desejada, entregando uma faixa de trabalho de 20 a 850Hz. As alternativas para o futuro são, ou trabalhar em uma nova fonte sonora ou em um amplificador que consiga ajustar a equalização do som, de forma a moldar o sinal de saída da fonte para um sinal mais uniforme, de forma a atingir a faixa de frequência de trabalho de 20 a 1000Hz ou até mesmo o limite superior da bancada de 3000Hz.

Porém, mesmo não atingindo toda a faixa desejada, a bancada funciona para a faixa reduzida de 20 a 850Hz e é referência para trabalhos futuros, podendo produzir resultados de perda de transmissão confiáveis dentro da faixa reduzida de trabalho.

Agradecimentos

Primeiramente agradecimentos a empresa Marelli por ter cedido os equipamentos utilizados no estudo e também as suas instalações. E também, agradecimentos a Universidade Federal de Itajubá pelo apoio técnico para a execução deste trabalho, em especial a pessoa do professor orientador.

Referências

- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E2611-09**: Standard Test Method For Measurement Of Normal Incidence Sound Transmission Of Acoustical Materials Based On The Transfer Matrix Method. ASTM International. West Conshohocken, 2009.
- MUNJAL, M. L. **Acoustics of Ducts and Mufflers**. 2ª. ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2014.
- NETO, Bruno G. **Metodologia de avaliação da performance acústica experimental e virtual do sistema de exaustão automotivo**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2019.
- SIEMENS LMS. **Siemens SCADAS data acquisition system**. Siemens Product Lifecycle Management Inc. [S.l.], 2022.
- THIEME, Fábio A. **Atenuação de ruído em silenciadores automotivos**: Análise numérica pelo método das matrizes de transferência e verificação experimental. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2000.