



COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA A CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE TUBOS

Fernando Basílio Felix

fernandobasiliofelix@gmail.com

UFMG - DEES

Av. Antônio Carlos 6627, Escola de Engenharia - Bloco 1 – 4º andar, CEP 31270.901, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Max de Castro Magalhães

max@dees.ufmg.br

UFMG - DEES

Guilherme de Souza Papini

papini@demec.ufmg.br

UFMG - DEMEC

Resumo. Este trabalho compara resultados experimentais à simulações realizadas em elementos finitos e à resultados alcançados utilizando equações presentes na literatura para cálculo de frequências naturais acústicas. É possível obter, nesta literatura, equações para realizar o cálculo das frequências naturais acústicas de um tubo, de acordo com suas condições de contorno. Desta forma foram obtidos valores considerados como referência para esta característica física. Outro meio de se obter frequências naturais é a partir de simulações nas quais se utilize elementos finitos, empregando também as condições de contorno inerentes ao problema e as propriedades do meio acústico como densidade e modulo de Bulk. Uma terceira possibilidade de se realizar o levantamento das frequências naturais é pelo método experimental. Neste trabalho foi utilizada a estimativa da função de resposta em frequência para se observar as frequências naturais. Como excitação foi utilizado um sinal em varredura emitido por um alto-falante posicionado ao início do tubo e sendo captado em seu final por um microfone a resposta do meio. Para realizar a estimativa da FRF foi utilizado como grandeza de entrada a aceleração de volume imposta e como saída foi registrada a pressão sonora. Por fim para a identificação das frequências naturais foi construído o diagrama de estabilização. Ao final foram comparadas as respostas dos três métodos onde foi possível verificar boa aproximação entre eles.

Keywords: Frequências naturais acústica; FRF; MEF.

1 INTRODUÇÃO

Ao se confinar uma fonte sonora ocorre o fenômeno de ressonância em determinadas frequências que dependem das dimensões da estrutura e da velocidade do som no meio (Beranek, 1996). A causa desse fenômeno se deve à reflexão do som entre duas ou mais paredes da estrutura que enclausura a fonte sonora e também é conhecida como frequências naturais. A caracterização desta propriedade acústica se mostra importante uma vez que excitações de mesma frequência causam grandes amplitudes.

A literatura apresenta formulações capazes de expressar as frequências naturais de estruturas simples como encontradas em dutos de seções constantes (Kinsler, 1982; Beranek, 1996; Gerges, 2000; Bistafa, 2006). Quando a planta de estudo apresenta geometria complexa seu equacionamento é dificultoso, sendo então mais prático realizar a caracterização utilizando metodologias experimentais ou simulações. Desta forma é importante validar tais metodologias garantindo resultados fidedignos em situações onde confirmações por outros métodos não é possível.

A comparação de resultados obtidos por diferentes meios pode ser realizada com a finalidade de se validar tais meios. Neste trabalho será comparado uma metodologia experimental à uma simulação realizada com elementos finitos e à valores encontrados utilizando formulações clássicas. Em decorrência busca-se validar tais metodologias para assegurar sua aplicabilidade em situações onde não exista tais formulações.

Realizando este tipo de comparação é possível observar boa aproximação entre os resultados alcançados através do método experimental e pela simulação. Quando a comparação é feita considerando os resultados obtidos através de equações é possível ver um distanciamento dos demais resultados o que pode ser explicado por incompatibilidade plena entre a geometria da planta estudada em relação a geometria cuja a equação utilizada visa descrever.

2 METODOLOGIA

Este trabalho utilizou um tubo construído em PVC de seção circular de diâmetro de 150mm e 4,2m de comprimento como objeto de teste. A identificação das frequências naturais foi realizada por três diferentes métodos sendo o primeiro analítico estimando as frequências naturais através de equações presentes na literatura, uma simulação utilizando elementos finitos e experimentalmente. Nas três situações foram consideradas frequências abaixo da frequência de corte, ou seja, ondas planas.

Para a identificação analítica foi considerado o tubo aberto em uma de suas extremidades e fechado em outra. Esta consideração foi tomada para se aproximar da situação presente na caracterização experimental onde uma das extremidades do tubo foi fechada pela caixa acústica como será descrito posteriormente. Desta forma, segundo Kinsler (1982), a equação adequada para o cálculo dos modos normais nesta situação é:

$$f_n = \frac{n \times c_0}{4L} \quad (1)$$

Sendo que f_n denota o valor da frequência natural em Hertz (Hz), n denota a frequência natural a ser calculada sendo utilizado apenas números naturais positivos, c_0 denota a velocidade de propagação do som, L denota o comprimento do tubo. Assim, atribuindo as características geométricas do tubo é possível calcular suas frequências naturais variando o parâmetro n pelos valores 1, 2, 3, ...

Para a simulação, utilizando elementos finitos, primeiramente foi modelado o meio acústico a ser considerado em um software CAD. O software Abaqus 6.13 teve a função de gerar a malha de elementos finitos e também a função de solver, onde foi considerado como propriedades do meio acústico a densidade e módulo de Bulk com os valores de $1.276E-009$ kg/mm³ e 143 N/mm² respectivamente sendo referentes ao ar. Como condição de contorno foi considerado que o tubo apresentava paredes rígidas e sendo fechado em uma de suas extremidades como já mencionado. A malha foi gerada utilizando elementos tetraédricos somando um total de 6.596 elementos e 1.743 nós tendo um espaçamento máximo entre os nós de 115mm, como pode ser observado na Figura 1. A simulação teve como situação de parada quando a frequência natural excedesse o valor de 300 Hertz. A geometria apresentada na Figura 1 corresponde a forma da planta real onde é possível observar uma derivação em ângulo devido esta planta ser utilizada em outros experimentos.

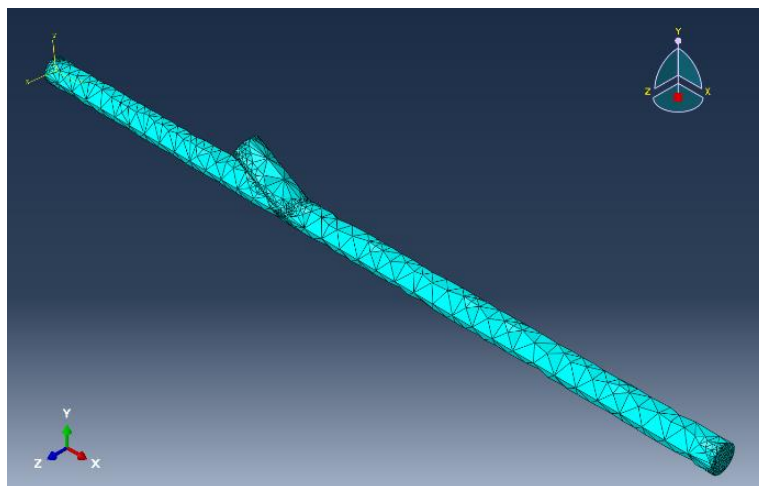


Figura 1. Malha em elementos finitos de tubo circular.

Para a caracterização experimental foi utilizada uma metodologia que consiste em identificar a função de resposta em frequência (FRF) da planta e após realizar a extração modal. De acordo com Rossetto (2000) utilizando a aceleração de volume como dado de entrada e a pressão sonora como dado de saída é possível obter melhores resultados de coerência entre os sinais da FRF. Desta forma, a estimativa H_1 , é descrita na Equação 2 como sendo a razão entre a densidade espectral cruzada s_{xy} e a densidade espectral de potência de entrada (Napolitano, 2016). As Equação 3 e 4 apresentam as definições da correlação cruzada (S_{xy}) e da densidade espectral de potência (S_{xx}) respectivamente.

$$H_1(f) = \frac{s_{xy}}{s_{xx}} \quad (2)$$

$$S_{xy}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (3)$$

$$S_{xx}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (4)$$

Como excitação do meio foi utilizado um sinal do tipo varredura linear iniciando em 40 Hz até 1000Hz com duração de 12 segundos. O sinal de áudio foi amplificado por um amplificador da marca Hot Sound modelo Hs 1500 SX e reproduzido por um alto-falante da marca Bravox BA6SSP posicionado em uma das extremidades do tubo. Um microfone BSWA modelo MA 211 foi posicionado na outra extremidade do tubo sendo conectado a uma placa de aquisição de dados National Instruments modelo NI USB 8452 contendo um módulo NI 9234. Como grandeza de excitação do meio foi medido a aceleração de volume sendo calculada utilizando um acelerômetro da marca Dytran modelo 3225F1 posicionado ao centro do cone do alto-falante sendo então calculada a aceleração de volume multiplicando a aceleração indicada pelos dados do acelerômetro pela área do cone do alto-falante.

Após ser calculada a estimativa H1 foi construído o diagrama de estabilização que consiste em combinar diferentes soluções de modelos da estimativa H1 de diferentes ordens (Kerschen e Golinval, 2006). Para se recriar a estimativa podem ser utilizadas diferentes metodologias, neste caso foi utilizado o método exponencial complexo de mínimos quadrados. Incrementando a ordem do modelo utilizado para recriar a estimativa da FRF pode surgir modos espúrios que são erros numéricos e não representam características reais de caracterização do sistema acústico. Para distinguir modos reais de modos numéricos é verificado a variação do parâmetro modal que se deseja obter à medida em que se altera a ordem do modelo utilizado. Modos reais tendem a se manter estáveis a medida em que se aumenta a ordem do modelo, diferentemente os modos espúrios apresentam maior variação (Peeters et al, 2004).

Observando a variação de parâmetros como amortecimento, rigidez e a própria frequência natural obtidas através destes modelos é possível identificar os modos espúrios decorrentes de erros numéricos. Para este trabalho mostra-se importante observar frequências naturais que possuem pouca variação a medida em que se aumenta a ordem dos modelos utilizados, retornando assim uma resposta mais segura em relação aos valores destas frequências (Peeters et al, 2004).

De posse dos resultados das três metodologias é possível avaliar a diferença entre elas e neste trabalho será tomado como referência os resultados obtidos pelo método analítico para comparar as respostas dos demais métodos.

3 RESULTADOS

Tomando como maior frequência de interesse o valor de 300 Hz serão então apresentados nesta seção os dados obtidos pelas diferentes metodologias para a identificação das frequências naturais de um tubo circular. Primeiramente serão apresentados os resultados obtidos pela simulação em elementos finitos onde foram obtidas as frequências naturais acústicas e também os modos relativos a estas frequências. É possível observar na Figura 2 parte A o primeiro modo acústico que apresenta frequência de 39,7Hz e na parte B desta mesma figura pode ser observado o modo acústico da última frequência natural considerada neste trabalho, 268,9Hz.

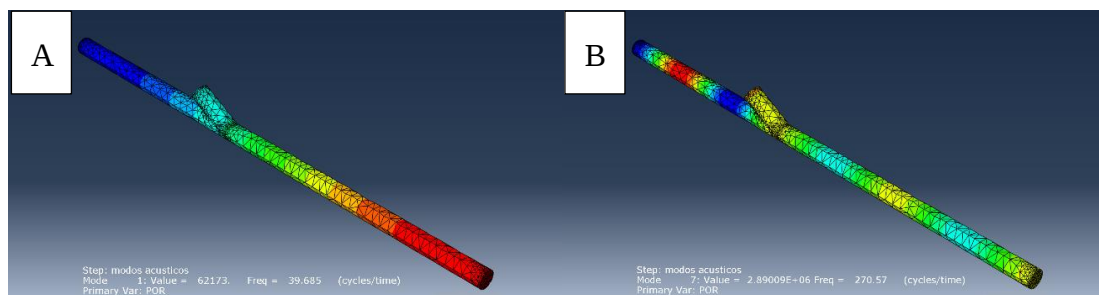


Figura 2. Representação do primeiro e último modo analisado.

Da metodologia experimental foi obtida a FRF da planta apresentada na Figura 3 onde é possível observar uma boa coerência do sinal de saída em relação ao sinal de entrada. Realizando o diagrama de estabilização apresentado na Figura 4 é possível identificar as frequências de maior intensidade presente na medição. Nesta análise foi utilizado um modelo com critério de estabilidade aceitando uma variação máxima de 1% para as frequências.

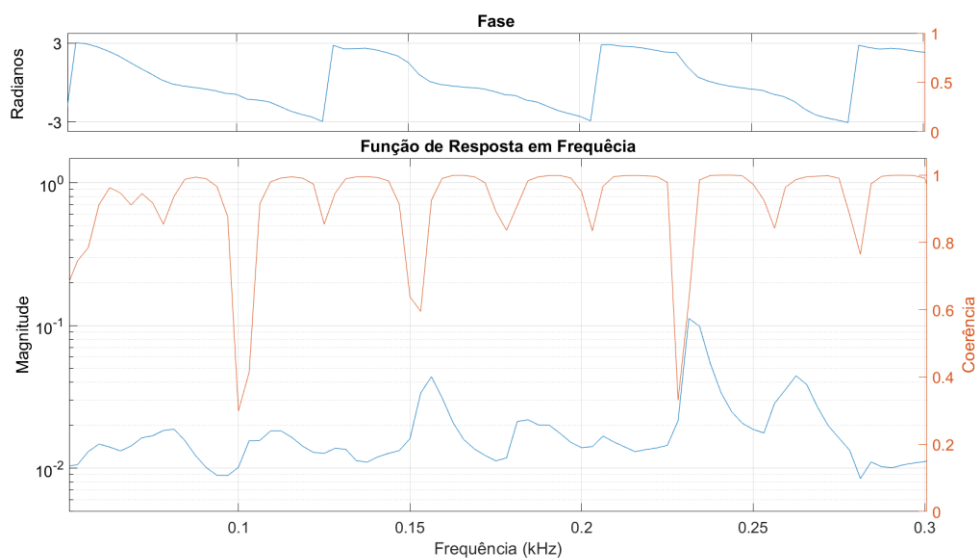


Figura 3. FRF de tubo circular.

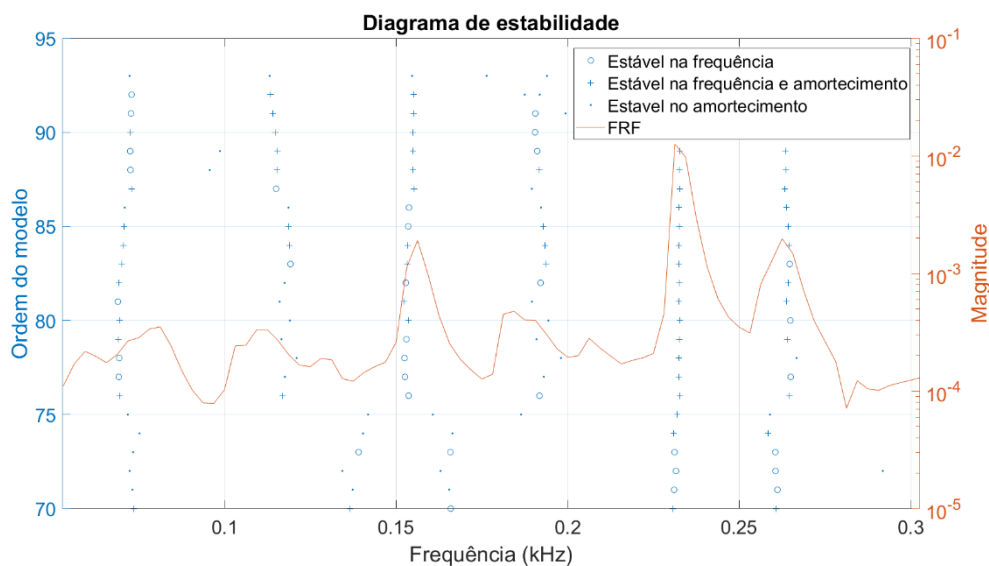


Figura 4. Diagrama de estabilização para FRF do tubo.

A Tabela 1 reúne os resultados obtidos pelos três métodos sendo possível notar a ausência de valor para a primeira frequência de método experimental. A impossibilidade de se identificar uma frequência próxima a 40Hz ocorre pelo fato do alto-falante utilizado ter baixo rendimento para baixas frequências causando uma excitação com baixa intensidade para esta frequência. A Tabela 1 também apresenta em porcentagem o erro calculado da metodologia experimental e a simulação em relação aos resultados obtidos analiticamente.

Tabela 1: Frequências naturais do tubo obtidas por diferentes métodos.

Modo	Frequência natural (Hz)				
	Analítico	Experimental	Erro Experimental (%)	Simulação	Erro Simulação (%)
1	40.1	-	-	39.9	0
2	80.2	73	-9	75.5	-5.9
3	120.3	113.4	-5.7	113.5	-5.6
4	160.3	155	-3.3	160	0
5	200.4	190.6	-4.9	185.3	-7.5
6	240.5	232.6	-3.3	235.9	-1.9
7	280.6	264.1	-5.9	268.9	-4.2

Observando os dados da Tabela 1 é possível constatar que o maior erro na faixa de frequência observada é referente ao método experimental que mostrou valor abaixo do calculado analiticamente 9%. Uma hipótese para o erro ocasionado entre os valores

experimentais e numéricos em relação aos resultados analíticos é a de que a equação utilizada não levou em consideração a real configuração do tubo.

4 CONCLUSÃO

A caracterização vibro-acústica experimental pode apresentar-se complexa o que impede a utilização de metodologias simples de extração modal como “*peak picking*” e *circlefit*. Decorrente ao grande número de modos com frequências próximas, os dois métodos citados iriam apresentar baixa confiabilidade, uma vez que necessita de grande intervenção do usuário. O método que utilizou o levantamento da FRF do sistema e posterior análise pelo diagrama de estabilidade, obteve resposta mais segura do ponto de vista dos possíveis erros ocasionados pelo usuário, por necessitar apenas de parâmetros iniciais para se realizar as avaliações. As simulações realizadas no software Abaqus mostraram respostas próximas aos ensaios experimentais revelando boa representatividade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o importante apoio da agência de pesquisa brasileira FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais).

BIBLIOGRAFIA

BERANEK, LEO L. “*Acoustics*.” American Institute of Physics, Inc. New York. 1996.

BISTAFA, SYLVIO R. “*Acústica aplicada ao controle do ruído*.” São Paulo. Blucher. 2006.

GERGES, S. N. “*Ruído: fundamentos e controle*.” Segunda edição. NR Editora. Florianópolis, SC. 2000. 675p.

KERSCHEN, G; GOLINVAL, J., C.; “*Experimental Modal Analysis*”. 2006. Disponível em <http://www.ltas-vis.ulg.ac.be/cmsms/uploads/File/Mvibr_notes.pdf>, acessado em 16/04/2017.

KINSLER L.E., FREY A.R., COPPENS A.B., SANDERS J.V., “*Fundamentals of Acoustics*”, 3rd Edition, ISBN 978-0-471-02933-5, Wiley, New York, 1982.

NAPOLITANO, K. L. “*Using Singular Value Decomposition to Estimate Frequency Response Functions*.” Topics in Modal Analysis & Testing, Volume 10. 2016

PEETERS B., AUWERAER H. V., GUILLAUME P., LEURIDAN J. “*The PolyMAX frequency-domain method: a new standard for modal parameter estimation?*”. Shock and Vibration 11 (2004) 395–409. IOS Press

Rossetto G. D., Arruda J. R. F., Huallpa B. N. “*Experimental modal analysis of a cavity using a calibrated acoustic actuator*”. 2000.