



SIMULAÇÃO ACÚSTICA DE RUÍDO EM DUTOS UTILIZANDO O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Marco Antônio da Costa Filho

Instituto Luterano de Ensino Superior de Itumbiara, Av. Beira Rio, 1001, Nova Aurora (Departamento de Matemática), CEP 75523-200
macosta@mecanica.ufu.br

Marcus Antônio Viana Duarte

Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, s/n, (Departamento de Engenharia Mecânica), CEP 38400-000.
mvduarte@mecanica.ufu.br

Resumo: *Com o aumento das exigências relativas ao baixo nível de ruído em locais de trabalho e ambientes hospitalares, faz-se necessário de se estudar a acústica de dutos de modo a torná-los menos ruidosos. Neste trabalho apresenta-se o estudo do comportamento acústico e do desempenho de algumas configurações de dutos de condicionadores de ar central. Utiliza-se da análise computacional através de um aplicativo, que usa como ferramenta o método de Elementos Finitos. O aplicativo avalia os níveis de ruído gerado por um ventilador centrífugo acoplado na extremidade do duto, fazendo a análise com elementos bidimensionais. A validação do método foi realizada com a determinação experimental dos níveis de pressão sonora um duto composto por segmentos retos e bifurcações.*

Palavras-chave: *Elementos Finitos, dutos, medição, intensidade sonora.*

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento industrial e tecnológico tem gerado situações que com frequência tem criado problemas de grandes incômodos tais como poluição do ar, da água e deposição de detritos no solo. Entre as várias fontes de poluição, o ruído só mais recentemente tem recebido atenção como aspecto de suma importância contra o conforto e bem estar dos ocupantes de várias indústrias, anfiteatros, salas de cirurgia e unidades de terapia intensiva. Um sistema merece especial atenção quanto ao aspecto de ruído gerado: o sistema de condicionamento de ar e ventilação. Um dos grandes problemas encontrados é que o nível de ruído emitido pelo mecanismo de ventilação / exaustão seja atenuado para níveis aceitáveis na saída dos dutos. Faz-se necessário inserir filtros acústicos no duto do sistema de ventilação. Entretanto, nos sistemas de condicionamento de ar e ventilação usados em salas de cirurgia e unidades de terapia intensiva o uso de silenciadores é proibido.

O presente trabalho tem como finalidade realizar uma simulação acústica em dutos, determinando propriedades tais como níveis de pressão sonora e perda de transmissão sonora através de análise numérica e de métodos experimentais. A ferramenta numérica utilizada neste trabalho, é o método dos elementos finitos (FEM).

Toda análise experimental é feita baseada em estudos realizados por Abom (1988) e Baker (1975), que utilizaram a técnica de medição de intensidade sonora para determinação das propriedades

acústicas em dutos. A técnica de medição de intensidade sonora também foi utilizada por Fahy (1977). Em 1980, Chung e Blaser apresentaram uma expressão para determinação do coeficiente de reflexão complexo utilizando a função de transferência entre dois microfones. Em 1984, Fahy demonstrou a possibilidade de obter a função de transferência com apenas um microfone. Dois anos mais tarde, Chu (1986) aplicou a técnica de um microfone para medição de outras propriedades envolvendo medições de intensidade sonora. Samir, em 1985, na análise do desempenho de silenciadores em dutos utilizou um método de medição de pressão sonora em quatro pontos para avaliação da perda de transmissão em silenciadores, juntamente com o método de elementos finitos na simulação.

2. O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A propagação de ondas em um meio estacionário e incompressível é governado pela equação diferencial da onda tridimensional de Helmholtz:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

onde c e p são a velocidade do som no meio e a perturbação da pressão sonora, respectivamente e t é o tempo.

O operador Laplaciano em coordenadas cartesianas é:

$$\nabla^2 = \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right\} \quad (2)$$

e em coordenadas cilíndricas é dado por:

$$\nabla^2 = \left\{ \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right\} \quad (3)$$

Considerando uma distribuição uniforme da pressão sonora no volume V , a Eq. (1) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (4)$$

que é a equação de Helmholtz para um campo sonoro harmônico.

O método que será utilizado para a obtenção da solução da Eq. (1) será o método de Galerkin. A idéia básica do método de Galerkin consiste em minimizar o erro residual da equação governante. A solução da Eq. (1) é dada por:

$$([M] - k^2 [k])\{p\} = -jp\omega[F] \quad (5)$$

onde,

$k = \frac{\omega}{c}$ é o número de onda;

ω é a frequência de excitação do meio;

$\{p\}$ é o vetor de pressão nodais;
 $[M] = \sum [M]_e$ é a matriz de massa do fluido;
 $[k] = \sum [k]_e$ é a matriz de rigidez do fluido;
 $[F] = \sum \{F\}_e$ é o vetor força.
 $j =$ é a unidade imaginária.

Os vetores e matrizes são montados para todos os elementos (e), que são avaliados por:

$$[M]_e = \int_{V_e} \{\nabla N\} \{\nabla N\}^T dV_e \quad (6)$$

$$[k]_e = \int_{V_e} \{N\} \{N\}^T dV_e \quad (7)$$

$$[F]_e = \int_{S_u} \{u_n\} \{N\}^T ds \quad (8)$$

onde,

$\{N\}$ é o vetor de funções de interpolação;
 $\{u_n\}$ é o vetor de velocidade da partícula normal a superfície do elemento;
 S_u é a superfície sobre a qual a velocidade u é definida;
 V_e é o volume do elemento em questão.

3. ASPECTOS COMPUTACIONAIS

A análise computacional deu-se através de um aplicativo comercial denominado ANSYS[®]. Esta análise foi executada através de 3 etapas para cada modelo, conforme o fluxograma apresentado na Fig.(1).

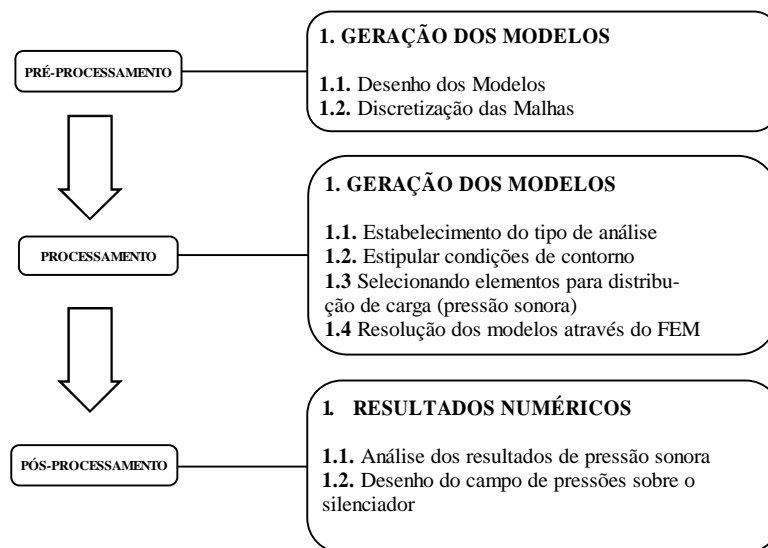


Figura 1. Fluxograma de resolução dos modelos via o Método dos Elementos Finitos.

3.1. Etapa 1 – Pré-processamento

No método de elementos finitos, o objeto de estudo é subdividido em um número finito de pequenas partes, chamadas elementos finitos. Estes elementos são interconectados entre si por pontos nodais discretos, denominados nós. O conjunto dos elementos é conhecido como malha de elementos finitos que, na realidade é o domínio matemático discretizado, isto é, a região espacial, no qual se representa o problema físico. Foram gerados modelos em 2D, utilizando elementos denominados fluido acústico 29 conforme mostra a Fig.(2). Este elemento possui 4 nós no espaço tridimensional, sendo utilizado o grau de liberdade pressão. As propriedades do material usado para este tipo de elemento foram as propriedades do ar, ou seja: densidade do ar de $1,21 \text{ Kg}/\text{m}^3$ e velocidade do som no ar de 343 m/s .

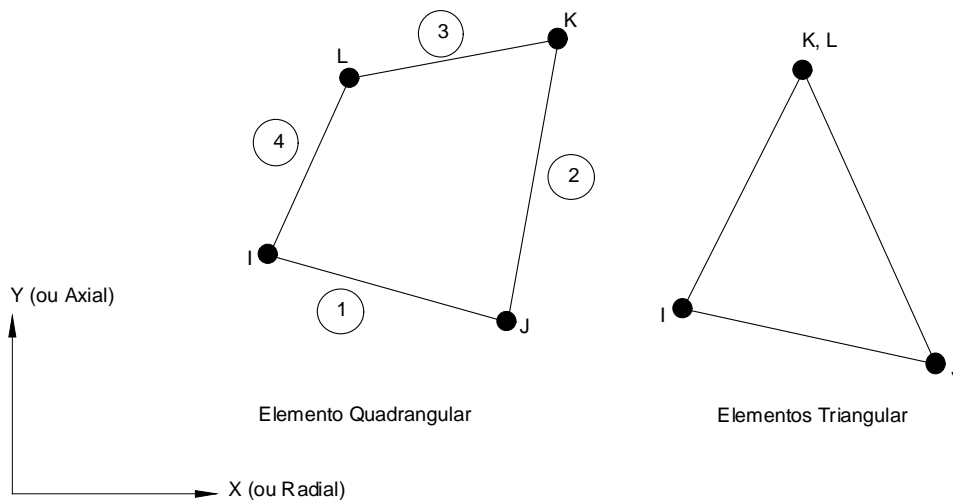


Figura 2. Elemento acústico fluido 29 utilizado na construção do modelo.

3.2. Etapa 2 – Processamento

Com o modelo discretizado, cada elemento possui um conjunto de equações governantes para as quais assume-se uma solução geral. A solução específica para cada elemento é função de valores nodais desconhecidos. Desta forma, as condições de contorno devem ser transformadas em quantidades nodais; pressões concentradas e deslocamentos são aplicados diretamente nos pontos nodais, enquanto carregamentos distribuídos devem ser convertidos a valores nodais equivalentes. O processamento (simulação numérica) utiliza as equações de cada elemento, montando uma matriz global que é formada pelas matrizes de rigidez e de massa. Tal método também foi utilizado por Pereira (1995), obtendo ótimos resultados.

3.3. Etapa 3 – Pós-processamento

Após o processamento do modelo, é realizada a análise dos resultados, fornecendo graficamente o campo de pressões sobre todo o domínio do duto.

4. TÉCNICA DE MEDIÇÃO

A técnica consiste basicamente em excitar o duto com um ruído “branco” de banda larga e medir com um microfone a pressão sonora no seu interior, em quatro posições, na saída, para se ter um valor médio. Os microfones são posicionados perpendicularmente a superfície de saída do duto, e os sinais captados são processados por um analisador digital de frequência, com dois canais, através do qual se determina a curva dos níveis de pressão sonora. A técnica utilizada para a medição da pressão sonora é válida somente para ondas planas e propagando no interior do duto, o que é conseguido operando-se abaixo da frequência de corte do duto.

A frequência de corte de um duto de seção transversal quadrada é dada por:

$$f_c = \frac{c}{2w} \tag{9}$$

onde,

w é a largura do duto em metros;

Para os dutos quadrados analisados, a frequência de corte é aproximadamente 400 Hz. Assim as medições foram feitas abaixo da frequência de corte, visto que valores superiores não têm significado físico.

4.1 Medição do Ruído de Fundo

As medições acústicas são afetadas pelo ruído de fundo presente no ambiente de medição gerado pelos próprios equipamentos (ruído eletrônico). Desta forma, a fim de se evitar a interferência do ruído de fundo no processamento de sinal, tomaram-se alguns cuidados:

– No período da realização de todas as medições, verificou-se o nível de ruído de fundo no interior do duto. Comparou-se o espectro do ruído de fundo com o espectro do campo acústico, nas posições de medição.

– Verificou-se que normalmente o ruído de fundo apresentava diferenças iguais ou superiores a 30 dB em relação aos níveis apresentados pelos espectros do campo acústico no interior do duto. Estes valores são suficientes para evitar qualquer interferência de ruído nas medições.

5. ANÁLISE NUMÉRICA

Para validação dos resultados numéricos executou-se a modelagem dos dutos conforme a Fig.(3).

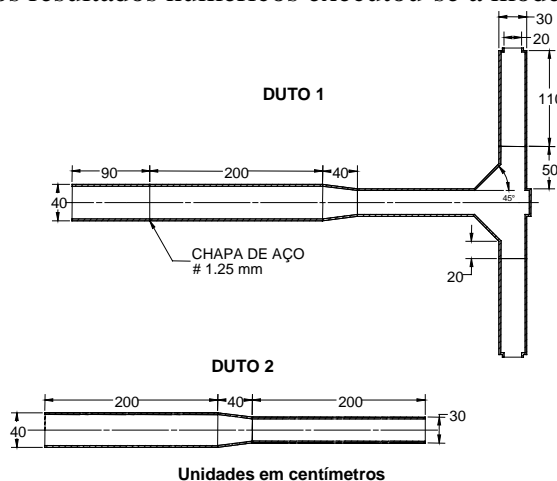


Figura 3. Dimensões dos modelos utilizados

Os modelos foram tratados como sendo bidimensionais e a análise através do método de elementos finitos será feita utilizando-se elementos quadráticos de 4 nós.

A chapa metálica foi modelada com o elemento sólido “plane 42” de 4 nós e o fluido interno foi modelado com o elemento de fluido “fluido 29”. A simetria existente nos modelos possibilitou a discretização de apenas a metade dos mesmos.

6. ANÁLISE EXPERIMENTAL

A técnica de medições a ser utilizado é a descrita no item 4. Todas as medições foram realizadas a temperatura ambiente de 27 °C, com pressão de referência de $2 \cdot 10^{-6}$ Pa .

Os dutos foram ensaiados nas mesmas dimensões mencionadas no item 5. Foram utilizados apoios de aproximadamente 1,5 m de altura. Os equipamentos utilizados foram: fonte de ruído B&K tipo 4224, os microfones B&K tipo 4165 e analisador digital de sinal portátil B&K tipo 2145.

6.1. Procedimento Experimental

Para a medição da pressão sonora, excita-se a fonte de ruído com um “ruído branco” em quatro posições na saída do duto conforme indicado na Fig.(4).

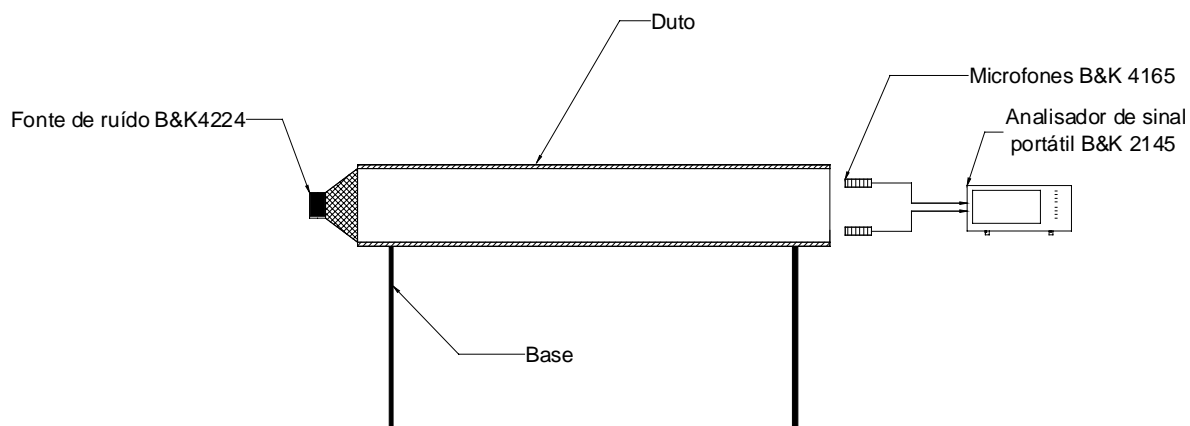


Figura 4. Esquema ilustrativo da medição de pressão sonora.

7 RESULTADOS

As Figs.(5) e (6), contém o comparativo entre os resultados obtidos para os dois modelos. Os gráficos das figuras, contém também a resposta encontrada via método analítico desenvolvida por Atkins, em 1975. Este método analítico é formado por um conjunto de dados de atenuações proporcionadas por vários componentes de dutos. Em um sistema complexo, basta subtrair da potência sonora da fonte, as atenuações dos componentes de dutos até na saída. Em dutos com várias expansões e/ou bifurcações, o método analítico apresenta erros consideráveis. Os resultados serão apresentados em banda de oitava.

Nas Figs.(7) a (10), mostra-se o campo de pressão sonora e as isolinhas (linhas de mesma pressão sonora) no interior dos dutos (duto 1 e duto 2), para as frequências de 250 Hz e 2360 Hz. Na Tabela 1 temos as propriedades dos modelos de elementos finitos utilizados na análise computacional. O computador utilizado foi um K6 II – 400 MHz com 64 Mbytes de memória RAM e 13 GBytes de capacidade de disco rígido.

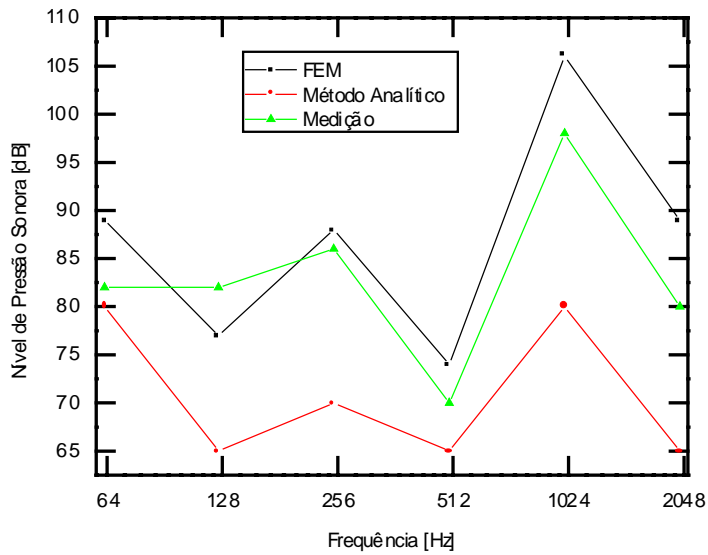


Figura 5. Gráfico comparativo dos níveis de pressão sonora para o duto 1, entre os resultados experimentais, analíticos e o FEM.

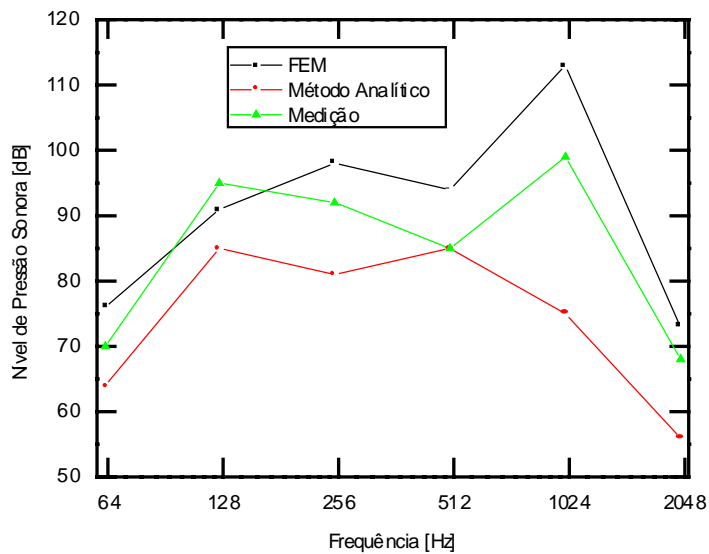


Figura 6. Gráfico comparativo dos níveis de pressão sonora para o duto 2, entre os resultados experimentais, analíticos e o FEM.

Tabela 1. Propriedades dos modelos de elementos finitos utilizados

| Modelo | Tipo de Elemento | Número de nós | Número de Elementos |
|--------|------------------|---------------|---------------------|
| Duto 1 | Quadrangular | 16610 | 19390 |
| Duto 2 | Quadrangular | 10550 | 10660 |

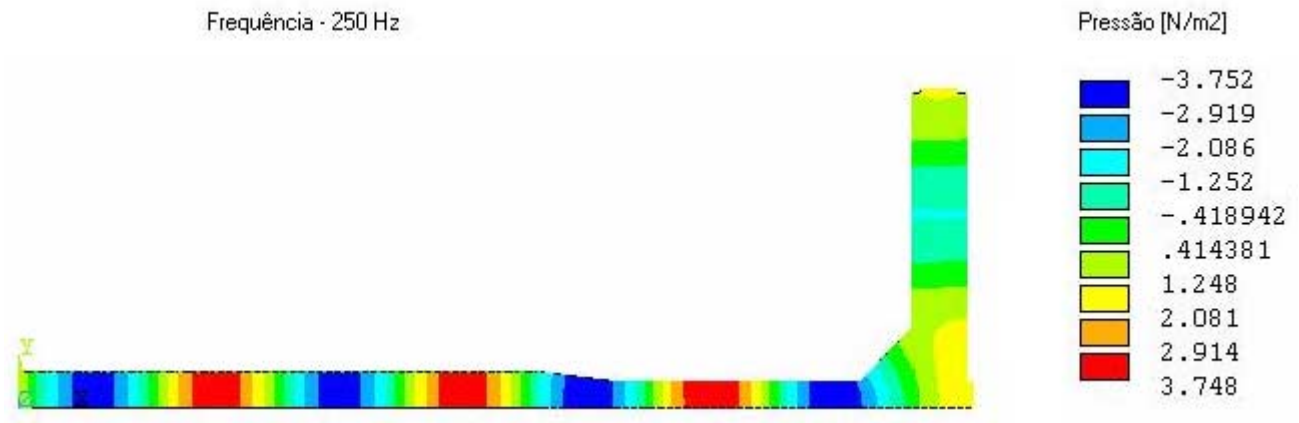


Figura 7. Campo de pressão sonora para o modelo 1, para frequência de 250 Hz

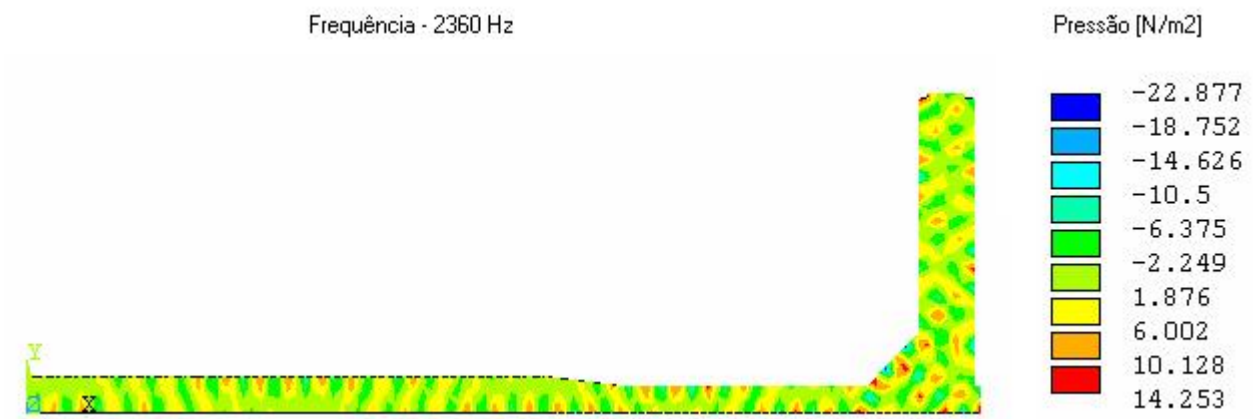


Figura 8. Campo de pressão sonora para o modelo 1, para frequência de 2360 Hz

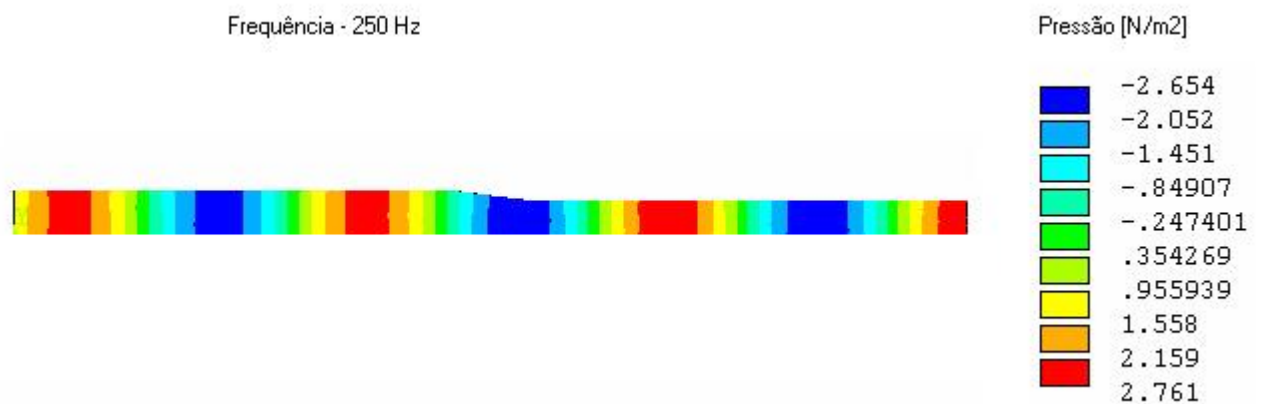


Figura 9. Campo de pressão sonora para o modelo 2, para frequência de 250 Hz

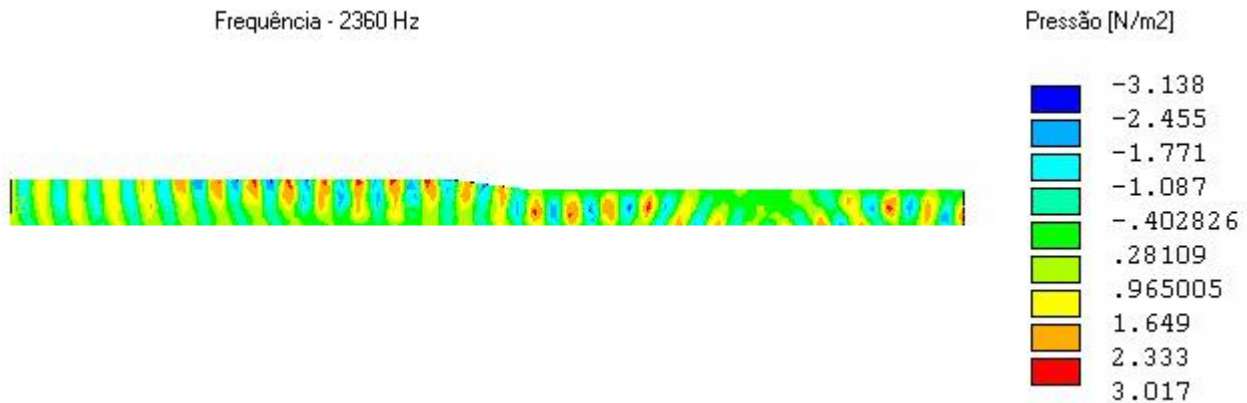


Figura 10. Campo de pressão sonora para o modelo 2, para frequência de 2360 Hz

8 CONCLUSÕES

Os resultados experimentais obtidos através do Método dos Elementos Finitos e a parte experimental apresentam uma certa concordância. Analisando os gráficos das Figuras (5) e (6), percebemos que os erros ainda são consideráveis, apesar das curvas simuladas e medidas experimentalmente possuírem a mesma tendência. Estes erros podem ser justificados analisando as características dos modelos em relação ao número de elementos e nós. Apesar do baixo número de elementos e nós, pode-se observar que o método pode ser válido se o modelo for refinado. Para o duto 1, verificou-se o surgimento de domos de máximo e mínimo que podem estar relacionados com a falta de rigidez estrutural do modelo e ao baixo coeficiente de absorção do fluido. Nas frequências de 2360 Hz, percebe-se que os domos não estão totalmente definidos, principalmente em regiões onde existe mudança da forma do duto. Percebe-se também que a frequência de 2360 Hz está muito acima da frequência de corte do duto, o que justifica o não aparecimento de ondas planas nas simulações para estas frequências e de erros elevados.

9 REFERÊNCIAS

- Abom, M. and Bodén, H., 1988, "Error Analysis of Two-microphone Measurements in Ducts with Flow", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 83, pp. 2429-2438.
- Baker, S., 1975, "An Acoustic Intensity Meter", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 27, pp. 269-273.
- Bodén, H. and Abom, M., 1986, "Influence Errors on the Two-microphone Method for Measuring Acoustic Properties in Ducts", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 79, pp. 541-549
- Chu, W. T., 1986, "Transfer Function Technique for Impedance and Absorption Measurements in an Impedance Tube Using a Single Microphone", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 80, pp. 1613-1616.
- Chung, Y. Y. and Blaser, D. A., 1980, "Transfer function Method of Measuring In-duct Acoustic Properties. I. Theory"
- Chung, J. Y. and Pope, L. , 1978, "Practical Measurement of Acoustic Intensity, *Inter Noise* (San Francisco), pp. 893-900.
- Duhamel, D., 1996, "Efficient Calculation of the Three- Dimensional Sound Pressure Field Around a Noise Barrier", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 197, pp. 547-571.

Fahy, F. J. , 1977, “Measurement of Acoustic Intensity Using the Cross- Spectral Density of Two Microphone Signals”, Journal of Sound and Vibration, Vol 62.

Fahy, F. J. , 1981, “Sound Intensity Measurement of Transmission Loss”, Proceedings of the Institute of Acoustics, pp. 5.1-5.4 (Southampton – ENGLAND).

Pereira, Marcelo Luiz, 1995, “Análise Experimental e Numérica de Silenciadores Dissipativos”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UFSC, 113 p.

SIMULATION ACOUSTICS OF NOISE IN DUCTS USING THE METHOD OF FINITE ELEMENTS

Abstract: *With the increase of the requirements concerning to low level of singing in hospital environment and workstations, it becomes necessary to study the acoustics of ducts in order to become them less noisy. In this work the study of the acoustic behavior and the performance of some patterns of ducts of central air conditioners are shown. A commercial code, which is based on the Finite Element Method, is used to perform the computaional analysis. This code evaluates the levels of singing generated for a centrifugal fan coupled in the extremity of the duct, making the analysis with bidimensional elements. The validation of the method was carried through with the experimental determination of the sound pressure levels straight a composite duct for paths and bifurcations.*

keywords: *Finite elements, ducts, measurement, sonorous intensity.*