

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS TEÓRICOS, COMPUTACIONAIS E EXPERIMENTAIS DE APLICAÇÃO DE ENCLAUSURAMENTO E BARREIRAS PARA CONTROLE DE RUÍDO EM CAMPO LIVRE

Gerson Guerreiro Reis, gersinho.reis@gmail.com¹

Paulo Balduino Flabes Neto, pauloflabes@gmail.com¹

Ricardo Humberto de Oliveira Filho, rhofilho@gmail.com¹

Israel Jorge Cárdenas Nuñez, israel.nunez@mecanica.uftm.edu.br¹

¹Universidade Federal do Triângulo Mineiro - UFTM, Av. Dr. Randolpho Borges Júnior, 1250, Univerdecidade, CEP 38064-200

Resumo: Neste projeto é feita a avaliação dos modelos matemático e computacional da utilização de barreiras e enclausuramentos para o controle de ruído em campo livre. Para tanto utilizou-se um ambiente que simulasse duas salas de computadores em escritórios, com duas fontes sonoras instaladas no lado externo. Foi feito o mapeamento dos níveis de pressão sonora do ambiente e a identificação das fontes sonoras. Desenvolveu-se o modelo acústico tridimensional da região em estudo, determinando-se as propriedades acústicas dos materiais que o compõem, e então realizada uma simulação para avaliação do comportamento acústico, sendo o modelo validado através da comparação com as medições experimentais. O próximo passo foi utilizar os modelos matemático e computacional para escolher os tratamentos acústicos que resultassem em níveis de ruído no interior das salas que atendessem à norma NBR 10.152:1987. Foram avaliados 5 tipos diferentes de intervenções acústicas, escolhendo-se a que apresentou melhor relação custo x benefício, sendo elas um enclausuramento e uma barreira. As soluções foram então implementadas e um novo mapeamento dos níveis de ruído foi realizado e comparado com os resultados estimados pelos modelos computacional e matemático.

Palavras-chave: Propagação sonora em campo livre, Modelagem matemática, Simulação computacional

1. INTRODUÇÃO

A permanência de pessoas em níveis de ruído elevados pode causar comprometimentos orgânicos diversos, como hipertensão arterial, estresse, aumento de tensão muscular e incapacidade de concentração. A perda de audição induzida por ruído ocupacional (PAIRO) é a única patologia causada pelo ruído reconhecida pela legislação brasileira. As normas NBR-10.151:2000 e NBR-10.152:1987 fixam limites de ruído visando o conforto no interior e exterior de edificações. Para avaliação da insalubridade por ruído em locais de trabalho, a Consolidação das Leis do Trabalho, na portaria 3.214, NR-15, estabelece os limites de exposição ao ruído para trabalhadores brasileiros, visando protegê-los de danos auditivos. Existem diversas soluções que podem ser aplicadas para a atenuação desse ruído quando considerado incômodo. Santos et al. (1994) mostraram que para minimizar os efeitos da emissão de ruído pelas fontes podem ser feitas intervenções, como o enclausuramento de máquina e instalação de amortecedores de vibração. Já as barreiras acústicas são um recurso ainda pouco explorado no Brasil, mas bastante empregado em países da Europa, nos Estados Unidos e no Japão, com o objetivo de diminuir os impactos da poluição sonora em regiões urbanas próximas a rodovias, ferrovias e indústrias.

O objetivo deste projeto é a avaliação dos modelos computacional e matemático utilizados para previsão da atenuação proporcionada por enclausuramentos e barreiras através da comparação com resultados experimentais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Propagação sonora ao ar livre

A energia gerada por fontes sonoras sofre atenuação ao se propagar em ar livre. Os fatores causadores de atenuação são distância, absorção atmosférica, barreiras, vegetação, variação de temperatura e efeito do vento. Na análise do

campo acústico em comunidade é importante avaliar a influência dos vários caminhos de propagação (BISTAFA, 2012).

Atenuação do ruído com a distância com fonte pontual

Neste caso, tem-se, por exemplo, uma fonte unidimensional, em campo livre. A relação entre o nível de potência sonora (NWS), o nível de pressão sonora (NPS) e a distância entre a fonte e o ponto de medição r é dada pela Eq. (1).

$$Lp(r, \theta) = Lw + DI_{\theta} - 20 \log(r) - 10 \log \frac{\Omega}{4\pi} - A_{combinada} - 11 \quad (1)$$

onde:

- Lp é o nível de pressão sonora;
- Lw é o nível de potência sonora;
- r é a distância;
- DI é o índice de diretividade;
- Ω é o ângulo sólido.

Dessa maneira, tem-se 6 dB de atenuação para cada duplicação da distância r .

A presença de uma superfície rígida infinita (por exemplo, fonte de ruído fixa no chão) causa a reflexão de toda a energia sonora para um espaço semi-infinito. As ondas de propagação são semiesféricas e a energia sonora atravessa uma área de valor $2\pi r^2$, sendo o fator de diretividade neste caso $Q(\theta) = 2$ e $DI(\theta) = 3$.

$A_{combinada}$ é a atenuação proveniente da combinação de todos os mecanismos significativos de atenuação sonora entre a fonte e o receptor, entre eles: solo macio, barreiras, índices climáticos, vegetação, etc.

O ângulo sólido (Ω) e o fator de diretividade (Q) são determinados pela quantidade de superfícies ao redor da fonte de ruído, como vistos na Fig. 1.

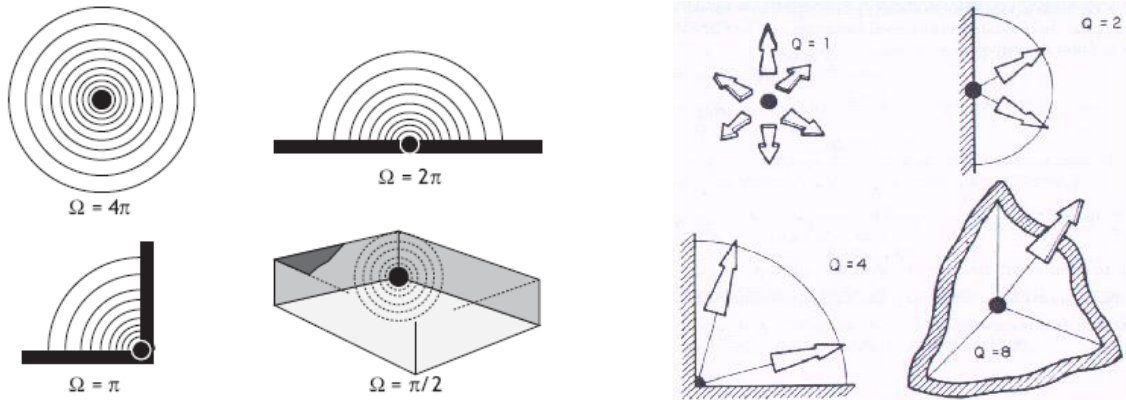


Figura 1. Ângulo sólido (Ω) e fator de diretividade (Q) para livre propagação. FONTE: (BISTAFA, 2012)

Fontes sonoras reais dificilmente irradiam som de forma igual em todas as direções, elas são, por exemplo, limitadas pelo chão. É necessário, portanto, avaliar o Índice de Diretividade, que será definido como:

$$DI(\theta) = 10 \log Q(\theta) \quad (2)$$

onde $Q(\theta)$ é Fator de Diretividade, definido como:

$$Q(\theta) = \frac{I(\theta)}{I} \quad (3)$$

onde $I(\theta)$ é a Intensidade da direção θ e a distância r da fonte, descrita por:

$$I(\theta) = \frac{p^2(\theta)}{\rho c} \quad (4)$$

sendo I igual à razão da potência da fonte pela área:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p^2}{\rho c} \quad (5)$$

Então:

$$Q\theta = \frac{P^2(\theta)}{P^2} \quad (6)$$

2.2. Tratamentos acústicos

Um enclausuramento é considerado grande quando o volume apresenta um grande número de modos ressonantes de vibração. Um grande enclausuramento normalmente satisfaz a condição dada pela Eq. (7) (BARRON, 2003).

$$\frac{fV_0^{1/3}}{c} \geq 1 \quad (7)$$

onde:

- V_0 é o volume de ar no interior do enclausuramento;
- f é a frequência do som no interior do enclausuramento;
- c a velocidade do som no interior do enclausuramento.

$$W = W_{tr} + W_{abs} \quad (8)$$

onde:

- W é a potência efetiva do enclausuramento
- W_{tr} é a potência transmitida pelo enclausuramento
- W_{abs} é a potência absorvida pelo enclausuramento

A potência irradiada a partir da superfície do enclausuramento para o espaço externo, é a energia transmitida através das paredes, conforme mostra a Eq. (9) (BARRON, 2003).

$$W_s = (\sum S_j a_{ij}/S_0) W_{inc} \quad (9)$$

sendo W_{inc} a potência sonora incidente nas paredes do enclausuramento a partir da fonte sonora. A relação de potência sonora para o recinto pode ser analisada na Eq. (10) (BARRON, 2003).

$$\frac{w}{w_s} = 1 + \frac{\sum S_j \alpha_j}{\sum S_j \alpha_{ij}} \quad (10)$$

A pressão acústica no interior do enclausuramento pode ser determinada pela Eq. (11) (BARRON, 2003).

$$W_{inc} = \frac{1}{4} D_R c S_0 = \frac{\rho^2 c S_0}{4 \rho_0 c^2} = \frac{\rho^2 S_0}{4 \rho_0 c} \quad (11)$$

A potência incidente W_{inc} pode ser determinada pela Eq. (8) combinada com a Eq. (12) (BARRON, 2003).

$$\frac{\rho^2}{\rho_0 c} = \frac{4W}{\sum S_j a_{ij} + \sum S_j a_j} \quad (12)$$

Para a transmissão de som através de uma barreira localizada ao ar livre, a Eq. (13) pode ser usada para prever o nível de pressão sonora (L_p), proveniente de uma fonte sonora pontual com um nível de potência sonora (L_w), no receptor localizado depois da barreira (MAEKAWA, 1968).

$$L_p = L_w + DI - 20 \log(A + B) - 10 \log\left(\frac{1}{\alpha_b + \alpha_t}\right) - 10,9 \quad (13)$$

Na Eq. (13), os termos A e B são as distâncias a partir da fonte de ruído para a parte superior da barreira e a partir do topo da barreira para o receptor, respectivamente, como ilustrado na Fig. 2. O termo α_b é o coeficiente de barreira, e o termo α_t é o coeficiente de transmissão de potência sonora da parede da barreira. Para uma fonte pontual, o coeficiente de barreira pode ser encontrado a partir da Eq. (14).

$$\alpha_b = \frac{t g h^2 [(2\pi N)^{1/2}]}{2\pi^2 N} \quad \text{para } N < 12,7$$

$$\alpha_b = 0,040 \quad \text{para } N \geq 12,7 \quad (14)$$

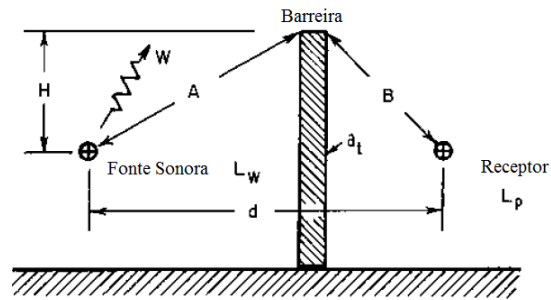


Figura 2. Barreira acústica. Fonte: Adaptado de Barron (2003).

O termo N é o número de Fresnel, sendo a razão da diferença entre o comprimento do caminho direto d e o comprimento do caminho ao sobre a barreira para metade do comprimento de onda do som (λ).

$$N = \frac{2}{\lambda}(A + B - d) = \frac{2f}{c}(A + B - d) \quad (15)$$

onde:

- f é a frequência do som;
- c a velocidade do som.

3. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do trabalho, foi utilizado o Laboratório de Vibrações, Acústica e Controle da Universidade Federal do Triângulo Mineiro – UFTM. Esse ambiente possui duas regiões distintas, sendo uma sala para o desenvolvimento de aulas práticas e outra dedicada ao desenvolvimento de projetos de simulações computacionais. Visando realizar uma avaliação de acordo com a NBR-10.152:1987, ambos os ambientes foram definidas como salas de computadores em escritório, cujos níveis máximos de ruído permitido são de 65 dB(A).

Realizou-se um experimento utilizando duas caixas de som, uma delas com um alto falante Selenium Mid Bass 6W40 e a outra com um alto falante Selenium Mid Bass 3.5W508, foi utilizado ainda um amplificador de potência e um computador com o programa para geração de ruído branco. As duas fontes sonoras ajustadas e configuradas na parte externa do laboratório como ilustrado na Fig. 3.



Figura 3. Foto da região analisada com as fontes sonoras posicionadas.

Em seguida foi feito um mapeamento dos níveis de pressão sonora do ambiente, com uma gama de espaçamento de 1 metro, seguindo as devidas recomendações da norma NBR-10.151:2000, que fixa as condições exigíveis para avaliação da aceitabilidade do ruído em comunidades independentemente da existência de reclamações. Após o mapeamento foi realizada a identificação das fontes sonoras através dos níveis de potência sonora e respectivas diretividades, sendo ambas diferentes para cada fonte sonora. A identificação do nível de potência sonora foi realizada de acordo com a norma ISO 3744:2003.

Desenvolveu-se o modelo acústico tridimensional do ambiente (Fig. 4), determinando-se as propriedades acústicas dos materiais a partir de livros e catálogos técnicos, e então se realizou uma simulação para avaliação do comportamento acústico do ambiente.

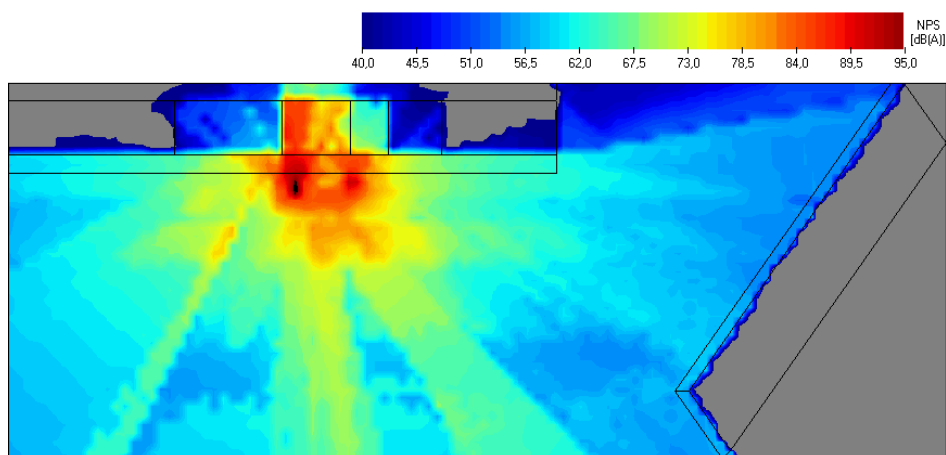


Figura 6. Curvas de isopressão sonora da simulação para as duas fontes sonoras acionadas.

Na Fig. 7 estão destacados os pontos utilizados para avaliação do modelo matemático e os valores dos níveis de pressão sonora são listados na Tab. 1 e Tab. 2.

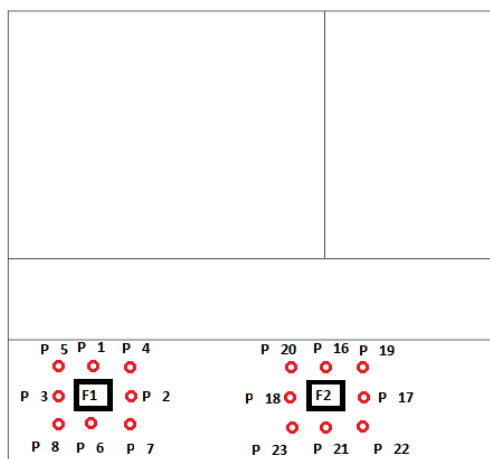


Figura 7. Pontos analisados para determinar o Nível de Pressão Sonora das fontes sonoras 1 e 2.

Tabela 1. Nível de Pressão Sonora equivalente (dB(A)) da Fonte Sonora 1 a dois metros de distância.

Ângulo Sólido (Ω) = 4π	Computacional	Matemático	Experimental
P 1	92,6	91,5	93
P 2	81,6	80,5	82,6
P 3	82,9	79,6	81,9
P 4	82,9	80,8	81,5
P 5	83,6	82,6	82,5
P 6	80,6	78,6	79,8
P 7	81,6	78,6	80,1
P 8	78,5	78,8	78,2

Tabela 2. Nível de Pressão Sonora (NPS) equivalente (dB(A)) da Fonte Sonora 2 a dois metros de distância.

Ângulo Sólido (Ω) = 4π	Computacional	Matemático	Experimental
P 16	85	81,9	84,2
P 17	82	85,0	83,5
P 18	77	75,9	77,1
P 19	84	81,0	83,9
P 20	75,6	73,2	74,0
P 21	83	82,1	82,5
P 22	79,1	80,0	80,3
P 23	78,3	77,1	79,2

A norma NBR-10.152:1987 impõe que os níveis de pressão sonora máximos para salas de computadores em escritórios deve ser de, no máximo, 65 dB(A), sendo então necessário propor um tratamento acústico para cada fonte sonora. Foram testadas as 5 combinações de intervenções listadas abaixo, cujos resultados podem ser visualizados na Tab. 3.

Tratamentos acústicos propostos e analisados:

- Tratamento 1: instalação de uma barreira de MDF com espessura de 10 mm, altura de 1,4 m e comprimento de 1,5 m em cada fonte sonora;
- Tratamento 2: instalação de um enclausuramento de MDF com espessura de 10 mm, medindo 1,0 m x 1,0 m x 1,4 m em cada fonte sonora;
- Tratamento 3: instalação de espuma com 50 mm de espessura, densidade 23 nas barreiras simuladas no Tratamento 1;
- Tratamento 4: instalação de espuma com 50 mm de espessura, densidade 23 no interior da parte frontal e superior dos enclausuramentos simulados no Tratamento 2;
- Tratamento 5: instalação do enclausuramento descrito no Tratamento 4 na fonte sonora 1 e instalação da barreira descrita no Tratamento 3 na fonte sonora 2.

A Tab. 3 mostra os níveis máximos de ruído em cada uma das salas para cada intervenção acústica simulada.

Tabela 3. Resultados dos tratamentos acústicos simulados.

Tratamento acústico	NPS na sala de aula [dB(A)]	NPS no laboratório [dB(A)]
Tratamento 1	70,5	66,5
Tratamento 2	69,2	63,9
Tratamento 3	62,9	66,0
Tratamento 4	58,0	50,1
Tratamento 5	59,3	50,1

Foi escolhido o Tratamento 5 que consiste no enclausuramento feito em MDF com espuma nas superfícies da parte frontal e superior para a Fonte 1 e a instalação de barreiras de MDF com espuma para a Fonte 2, como visto na Fig. 8.

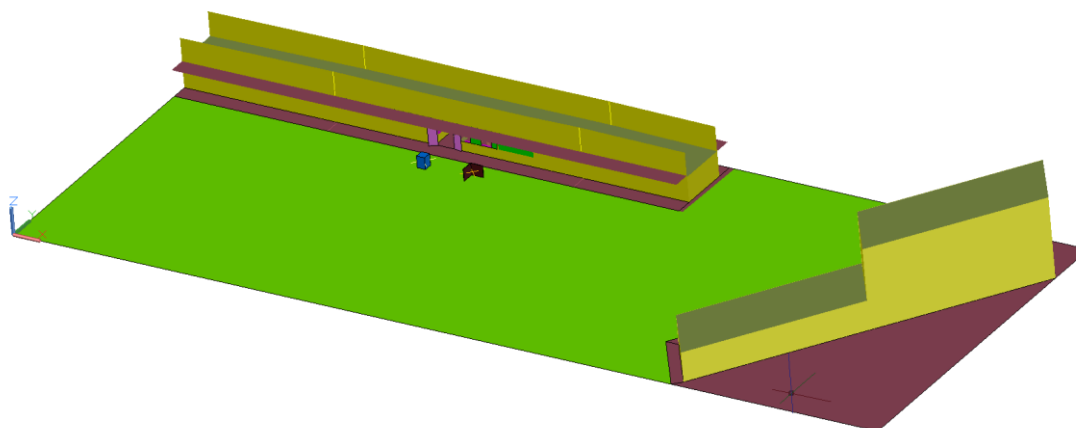


Figura 8. Modelo acústico com a instalação da barreira e do enclausuramento nas fontes sonoras.

A simulação dos níveis de pressão sonora para os tratamentos acústicos aplicados está ilustrada na Fig. 9.

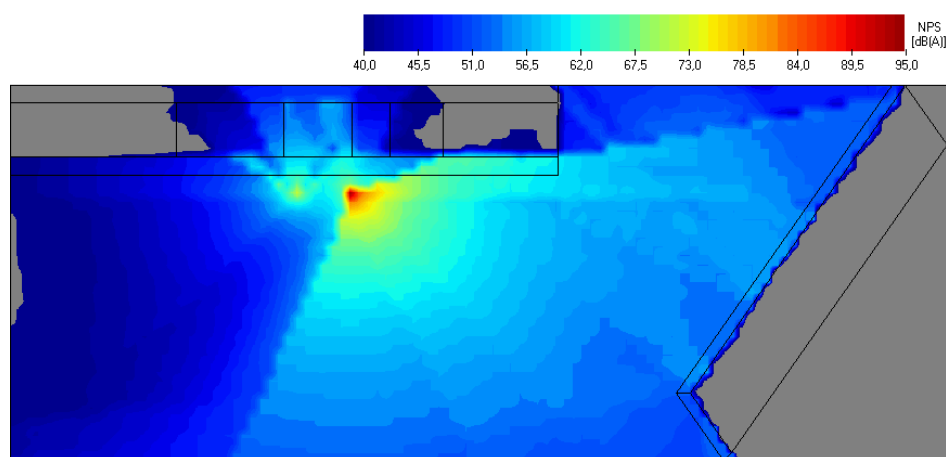


Figura 9. Curvas de isopressão sonora da simulação para o Tratamento 5.

Em seguida foi feita a avaliação do modelo matemático utilizando os pontos mostrados na Fig. 10, cujos valores obtidos estão listados na Tab. 4.

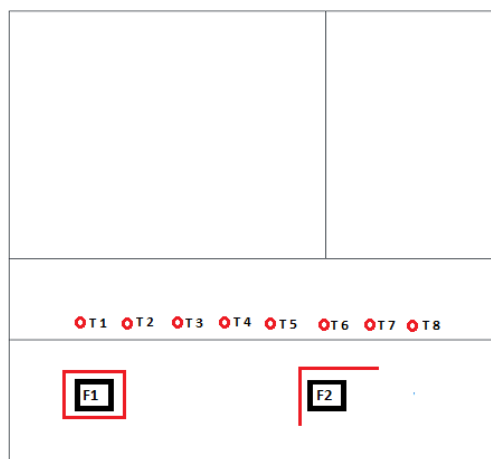


Figura 10. Pontos de análise para ambas as fontes sonoras ligadas.

Tabela 4. Valores do Nível de Pressão Sonora (dB(A)) para ambas as fontes ligadas e tratadas.

Distância [m]	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6	T 7	T 8
Computacional	62,0	61,9	56	57,8	62,1	65,2	65,7	63,8
Experimental	62,1	63,1	60,6	57,9	58,8	61,9	62,9	61,6
Matemático	62,22	58,1	55,6	58,5	57,12	59,5	62,6	65,3

Com a validação dos tratamentos acústicos propostos utilizando os modelos computacional e matemático, partiu-se para o teste experimental, sendo o enclausuramento e a barreira construídos e instalados conforme ilustrado na Fig. 11.



Figura 11. Foto dos tratamentos acústicos aplicados.

Um novo mapeamento dos níveis de pressão sonora foi realizado (Fig. 12), podendo-se comprovar a eficiência dos modelos matemático e computacional para previsão de tratamentos acústicos.

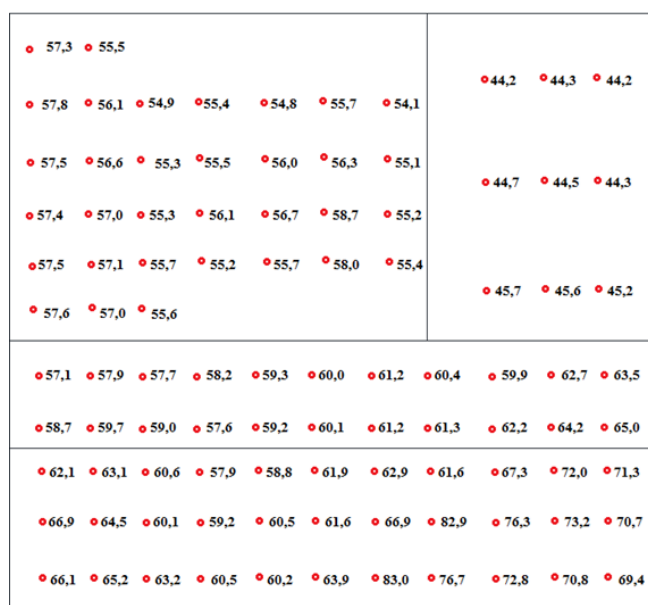


Figura 12. Mapeamento do nível de pressão sonora com tratamentos acústicos aplicados [dB(A)].

5. CONCLUSÃO

Partindo da situação inicial, comparando os resultados dos modelos matemático e computacional aos resultados do experimento, foram encontrados erros inferiores a 3 dB, validando assim os modelos computacional e o matemático e viabilizando sua utilização na avaliação de tratamentos acústicos. Utilizando o modelo computacional, estimou-se que o enclausuramento para a Fonte 1 e a instalação de uma barreira na Fonte 2 seriam suficientes para manter os níveis de ruído no interior das salas inferiores a 65 dB(A). Os modelos matemáticos foram utilizados para prever os níveis de ruído ao redor dos tratamentos acústicos, resultando em valores próximos aos simulados.

Comparando os resultados do experimento com os tratamentos acústicos implementados com os valores previstos pelos modelos computacional e matemático, foram encontrados erros inferiores a 5 dB(A), sendo possível afirmar que é segura a previsão de tratamentos acústicos através destes modelos.

6. AGRADECIMENTOS

Agradeço à FAPEMIG pela bolsa de iniciação científica.

7. REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 10.151: **Acústica – Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – Procedimento.**
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 10.152: **Níveis de ruído para conforto acústico - Procedimento.**
- BARRON, R. F. Industrial Noise Control and Acoustic. 1.ed. Marcel Dekker Inc., New York, 2003.
- BERGER, E. H., Hearing Protection The State of the Art (circa 1990), and Research Priorities for the Coming Decade. Sound and Vibration, Indianapolis USA, 1991. P. 8-14..
- ISO 1996-1:2003 – Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 1: Basic quantities and assessment procedures.

8. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

COMPARISON BETWEEN THEORETICAL MODELS, COMPUTER AND EXPERIMENTAL OF APPLICATION WITH ENCLOSURES AND BARRIERS FOR NOISE CONTROL IN FREE FIELD

Gerson Guerreiro Reis, gersinho.reis@gmail.com
Ricardo Humberto de Oliveira Filho, rhofilho@gmail.com
Paulo Balduino Flabes Neto, pauloflabes@gmail.com
Israel Jorge Cárdenas Nuñez, israel.nunez@mecanica.uftm.edu.br

¹Institution and address for first author

²Institution and address for second and third author

Abstract. *This project is done the evaluation of mathematical and computational models of the use of barriers and enclosures for noise control in free field. For this purpose we used an environment that simulates two sound sources installed on the outer side. It was done mapping the sound pressure levels of the environment and identification of sound sources. Developed three dimensional acoustic model of the region under study by determining the acoustic properties of the materials that compose it, and then conducted a simulation to evaluate the acoustic behavior, and the model validated by comparison with experimental measurements. The next step was to use mathematical and computational models to choose acoustic treatments that resulted in noise levels inside the rooms that met the standard NBR 10152:1987. We evaluated five different types of acoustic interventions, choosing the one with the best cost-benefit ratio; they are an enclosure and a barrier. The solutions were then implemented and a new mapping of noise levels was carried out and compared with the results estimated by computational and mathematical models.*

Keywords: *sound propagations in free field, mathematical modeling, computer simulation*