

Avaliação da eficiência de barreiras acústicas com diferentes tipos de topos

Evaluation of the Efficiency of Acoustic Barriers with Different Types of Tops

Larissa Picchi Angeli¹
Israel Jorge Cárdenas Nuñez²
Paulo Balduino Flabes Neto³
Ricardo Humberto de Oliveira Filho⁴

¹ Engenheira de Produto (Cummins Inc.). Bacharel em Engenharia Mecânica (UFTM).
Email: lah_picchi@hotmail.com.

² Professor do Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), Uberaba, Minas Gerais Brasil. E-mail: israel.nunez@uftm.edu.br.

³ Professor do Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), Uberaba, Minas Gerais Brasil. E-mail: pauloflabes@gmail.com.

⁴ Professor do Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), Uberaba, Minas Gerais Brasil. Orcid: <http://orcid.org/0000-0002-6077-9410> E-mail: ricardo.filho@uftm.edu.br.

RESUMO: A utilização de barreiras acústicas é ainda pouco explorada no Brasil, mas bastante empregada 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 ou ferrovias. Neste trabalho, foram analisados 7 tipos diferentes de topos para barreiras, escolhidos de acordo com a viabilidade de construção. A análise foi feita utilizando o método dos elementos finitos, considerando 29 pontos receptores após a barreira, com uma altura de 1,6 metros e distanciados de 0,5 metros. Foram analisadas as frequências centrais das bandas de 1/1 oitava de 63, 125, 250, 500, 1.000 e 2.000 Hz, levando em consideração o espectro audível do ser humano. As bandas de frequência de 4.000, 8.000 e 16.000 Hz foram excluídas da análise devido ao pequeno comprimento de onda, o que exigiria um espaçamento menor entre os receptores, aumentando significativamente o custo computacional. Foram analisados os níveis de pressão sonora obtidos nos pontos receptores, avaliando o comprimento da sombra acústica gerada e a influência dos diferentes tipos de topo no campo sonoro após a sombra acústica. Dos 7 tipos de topos testados, 2 se mostraram ineficientes quando comparados ao topo tradicional e 3 se destacaram com atenuações significativas quando comparados ao tradicional.

Palavras-chave: Método dos Elementos Finitos, Poluição Sonora, Barreiras Acústicas, Sombra Acústica.

ABSTRACT: *The use of acoustic barriers is still little explored in Brazil, but it is widely used in countries of Europe, the United States and Japan, with the aim of reducing the impacts of noise pollution in urban areas close to highways or railroads. In this paper, 7 different types of barriers tops were analyzed, chosen according to the viability of construction. The analysis was done using finite element method, considering 29 receiving points after the barrier, with a height of 1.6 meters and distanced 0.5 meters. The central frequencies of 1/1 octave bands of 63, 125, 250, 500, 1000 and 2000 Hz were analyzed, taking into account the audible spectrum of human. Frequency bands of 4000, 8000 and 16000 Hz were excluded from the analysis due to the small wavelength, which would require a smaller spacing between the receivers, significantly increasing the computational cost. The sound pressure levels measured at the receiver points were analyzed by evaluating the acoustic shadow length generated and the influence of different types of top in the sound field after the acoustic shadow. Of the 7 types of tops tested, 2 were inefficient when compared to the traditional top, and 3 stood out with significant attenuations when compared to traditional ones.*

Keywords: *Finite Element Method. Sound Pollution. Acoustic Barriers. Acoustic Shadow.*

INTRODUÇÃO

O ruído é definido como um som indesejável, que em algumas vezes tem função de alerta, como nos alarmes e sirenes. Em locais onde há muito ruído, é preciso controlá-lo, a fim de evitar que as pessoas expostas tenham sua audição prejudicada (BISTAFA, 2011).

Existem diversas soluções que podem ser aplicadas para a atenuação desse ruído quando considerado incômodo, neste trabalho serão avaliadas as barreiras acústicas.

De acordo com o diretor técnico da empresa IEME Brasil, em algumas situações as barreiras devem também ter propriedades absorventes para minimizar a reflexão das ondas incidentes, por exemplo quando está muito próxima à fonte sonora (SILVA, 2018).

A eficiência da barreira é determinada por fatores como altura, comprimento, posição em relação ao emissor de ruído e ao receptor, além das características de transmissão sonora da proteção. Uma barreira em condições ideais pode chegar a proporcionar até 15 decibels de atenuação sonora. No Brasil, os materiais comumente aplicados na construção de barreiras acústicas são chapas metálicas e painéis em concreto (SILVA, 2018).

No trabalho desenvolvido por Ishizuka e Fujiwara (2004), foi avaliada a eficiência de diferentes tipos de topos em barreiras aplicadas para controle de 3 tipos de ruído de tráfego, verificando o aumento da sombra acústica gerada. As barreiras possuíam 3 m de altura e 1 m de largura. A fonte sonora foi posicionada a 8 m de distância da barreira em um solo duro. Foram realizadas simulações empregando o método dos elementos de contorno bidimensional e os melhores resultados utilizando 6 receptores em posições diferentes foram encontrados quando se utilizou materiais com boa propriedade de absorção sonora revestindo o topo das barreiras, ou quando materiais macios (e de boa propriedade de absorção sonora) foram utilizados para construir o topo das barreiras. Os topos que possuíam várias arestas foram eficientes somente nos casos sem o material de absorção sonora. No caso da utilização dos materiais de absorção, o topo que resultou em maior atenuação foi aquele em formato de T.

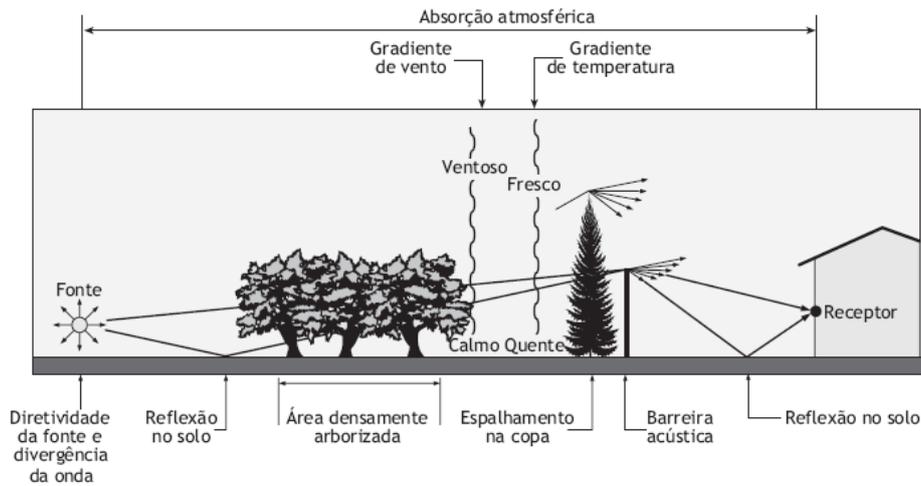
Neste trabalho será feita a comparação de diferentes tipos construtivos de topos para barreiras através de simulações pelo método dos elementos finitos, analisando sua influência na sombra acústica gerada.

REVISÃO DE LITERATURA

Há diversos tipos de mecanismo que causam atenuação sonora, como a reflexão no solo, presença de vegetação, barreiras físicas (como muros), além dos gradientes de temperatura e vento (**Figura 1**). Neste trabalho foram considerados os efeitos do solo e da barreira acústica.

O nível de pressão sonora logo após a barreira apresenta um determinado valor que é atenuado simplesmente pela ação da perda por inserção da barreira no meio de propagação. Este valor reduz com a distância dentro da região denominada sombra acústica, caracterizada por não possuir colaboração da porção do som difratada nas bordas das barreiras. O nível de ruído volta a se elevar até um valor máximo a uma determinada distância da barreira, definindo assim o fim da sombra acústica, e tendo então a atenuação regida de acordo com o comportamento de propagação sonora em campo livre.

Figura 1. Diferentes mecanismos de atenuação sonora.



Fonte: Bistafa, 2011.

Atenuação sonora de barreiras

Ishizuka e Fujiwara (2004) apresentaram o método de elementos de contorno para o cálculo da atenuação de barreiras com diferentes tipos de topo. Esse método utiliza uma seção bidimensional para reduzir o custo computacional nos cálculos. Através da **Equação 1** é possível encontrar a pressão sonora em qualquer ponto r .

$$\varepsilon(r)p(r, r_0) = G(r_0, r) - \sum_{n=1}^N p(r_n, r_0) \int_{S_n} \left(\frac{\partial G(r_s, r)}{\partial n(r_s)} + ik\beta(r_s)G(r_s, r) \right) dS(r_s) \quad (1)$$

onde:

$p(r, r_0)$: pressão sonora em r ;

S : superfície da barreira acima do chão;

$B(r_s)$: superfície normalizada da barreira no ponto r_s da superfície S ;

$p(r_n, r_0)$: pressão sonora no n -ésimo elemento da superfície S , admitido constante;

r_n : ponto médio do n -ésimo elemento;

$dS(r_s)$: tamanho do elemento de S no ponto r_n ;

$\frac{\partial}{\partial n(r_s)}$: derivada parcial de r_n direcionado para fora da propagação média;

k : número da onda;

$\varepsilon(r)$: vale 1 quando r encontra-se num meio de propagação diferente de S , ou vale 0,5 quando r está em S .

A **Equação 2** apresenta a pressão sonora em r devido à fonte em r_0 somente na presença do chão plano.

$$G(r, r_0) \frac{1}{4j} \left\{ H_0^{(2)}(k|r_0 - r|) + H_0^{(2)}(k|r'_0 - r|) \right\} \quad (2)$$

onde:

r'_0 : ponto imaginário no chão rígido;

$H_0^{(2)}$: função de Hankel do segundo tipo de ordem zero.

Como a área S foi dividida em N partes para formar os elementos, supondo r como o ponto médio de cada elemento na **Equação 1**, serão obtidas N equações com as pressões sonoras desconhecidas. Após resolver o sistema de equações e determinar a pressão sonora nos pontos médios, será possível encontrar a pressão sonora em qualquer ponto r substituindo os valores na **Equação 1**.

A perda por inserção, que representa a eficiência da barreira, é calculada pela **Equação 3** para a mesma posição da fonte e tipo de solo.

$$IL = 20 \log_{10} \left| \frac{P_g}{P_b} \right| \quad (3)$$

onde:

P_b : pressão sonora no receptor com a barreira;

P_g : pressão sonora no receptor sem a barreira.

Maekawa desenvolveu um método para prever a atenuação de barreiras simples. A perda de transmissão da barreira, PBd é dada pela **Equação 4** (ISHIZUKA; FUJIWARA, 2004).

$$PBd = 20 \log_{10} \left(\frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh(\sqrt{2\pi N})} \right) + 5 \quad (4)$$

sendo:

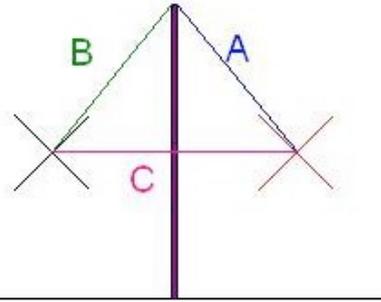
$$N = 2 \frac{(A + B - C)}{\lambda} \quad (5)$$

onde:

N é o número de Fresnel;

A , B e C são as distâncias mostradas na **Figura 2**.

Figura 2. Distâncias utilizadas para o método de Maekawa.



Fonte: Duarte, 2008.

A norma ISO-9613-2:1996 apresenta uma metodologia que pode calcular a atenuação para até duas barreiras, **Equações 6 a 9** (DUARTE, 2008).

$$AT = 10 \log_{10} \left(C_1 + \left(\frac{C_2}{\lambda} \right) C_3 z K_{met} \right) \quad (6)$$

$$z = (A + B + e) - C \quad (7)$$

$$C_3 = \frac{\left[1 + \left(5 \frac{\lambda}{e} \right)^2 \right]}{\left[\frac{1}{3} + \left(5 \frac{\lambda}{e} \right)^2 \right]} \quad (8)$$

$C_3 = 1$ para uma única barreira.

$$K_{met} = \frac{1}{\exp \left(\frac{\sqrt{(ABC)}}{\frac{z}{2000}} \right)} \text{ para } z \geq 0 \quad (9)$$

$K_{met} = 1$ para $z \leq 0$

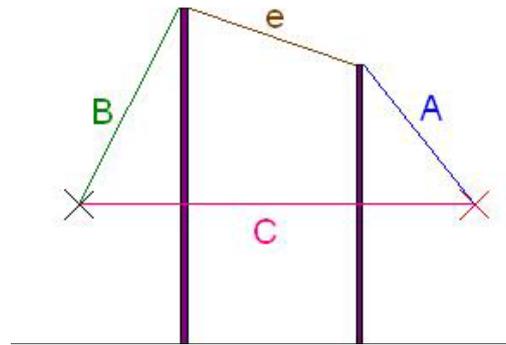
onde:

C_1 vale 3;

C_2 vale 20 quando considerados os efeitos de reflexão do solo, ou vale 40 quando as reflexões do solo são calculadas separadamente;

A, B e C são as distâncias mostradas na **Figura 3**.

Figura 3. Distâncias utilizadas para o método da norma ISO.



Fonte: Duarte, 2008.

Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) teve suas origens na análise estrutural. Com o surgimento dos primeiros computadores digitais no início da década de 1950, os métodos matriciais para a análise estrutural tiveram um grande desenvolvimento. A crescente demanda conduziu ao desenvolvimento de métodos numéricos que pudessem ser utilizados na análise de problemas mais complexos. Desde então, este método vem se consolidando como um método mais geral de soluções de equações diferenciais parciais. (RIBEIRO, 2004)

O método se destaca por dividir um domínio geometricamente complexo em uma coleção de subdomínios denominados elementos finitos. Cada um dos subdomínios, por sua vez, é visto como um domínio de si mesmo sobre os quais equações algébricas serão resolvidas e desenvolvidas de acordo com as equações que governam o problema. Após isso, as relações de todos os elementos são montadas de volta nas suas posições originais do domínio total, obtendo um sistema de equações diferenciais ordinárias. (COSTA et al., 2014)

De acordo com Cartaxo (2008), o carregamento correspondente à pressão que o fluido exerce na superfície da barreira é dado pelas **Equações 10 e 11**.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F^a\} + \{F^{pr}\} \quad (10)$$

sendo:

$$\{F^{pr}\} = \int_S \{N^T\} P \{n\} d(S) \quad (11)$$

onde:

$[M]$ = matriz de massas;

$[C]$ = matriz de amortecimento;

$[K]$ = matriz de rigidez;

$\{\ddot{u}\}$ = vetor de aceleração nodal;

$\{\dot{u}\}$ = vetor de velocidade nodal;

$\{u\}$ = vetor de deslocamento nodal;

$\{F^a\}$ = vetor de cargas aplicadas;

$\{N^i\}$ = funções de forma dos elementos finitos utilizados pra discretizar o domínio;

$\{n\}$ = normal à fronteira do fluido.

Introduzindo a função de aproximação do elemento finito para pressão, obtém-se a equação dinâmica do sistema, **Equação 12**, ao nível de elemento finito.

$$[M_e] \{\ddot{u}_e\} + [C_e] \{\dot{u}_e\} + [K_e] \{u_e\} - [R_e] \{P_e\} = \{F_e\} \quad (12)$$

Rearranjando as equações e as colocando em formato matricial, obtém-se a **Equação 13**.

$$\begin{bmatrix} M^S & 0 \\ M^{FSI} & M^f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C^u & 0 \\ 0 & C^p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K^S & K^{FSI} \\ 0 & K^f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F^S \\ F^f \end{Bmatrix} \quad (13)$$

onde:

S representa a superfície;

FSI representa a interface fluido-estrutura;

f representa o fluido.

Avaliação dos níveis de ruído

Neste trabalho, o MEF foi aplicado com o auxílio do programa ANSYS® devido à complexidade das equações e o tamanho do domínio escolhido.

No Brasil, a norma NBR 10151:2000 determina os níveis de pressão sonora aceitáveis para diferentes tipos de áreas habitadas de acordo com a atividade predominante e com o período noturno ou diurno (**Tabela 1**).

Tabela 1. Nível crítico de avaliação para ambientes externos, em dB(A).

| Tipos de áreas | Diurno | Noturno |
|--|--------|---------|
| Áreas de sítios e fazendas | 40 | 35 |
| Área estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas | 50 | 45 |
| Área mista, predominantemente residencial | 55 | 50 |
| Área mista, com vocação comercial e administrativa | 60 | 55 |
| Área mista, com vocação recreacional | 65 | 55 |
| Área predominantemente industrial | 70 | 60 |

Fonte: NBR 10151, 2000.

O período noturno não deve iniciar depois das 22:00 horas e não deve terminar antes das 07:00 horas do dia seguinte, mas para domingos e feriados pode ser adiado o término para as 09:00 horas.

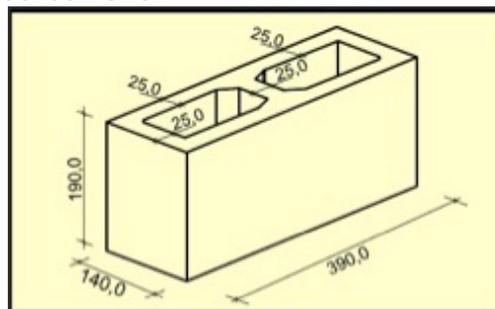
Para a avaliação em ambientes internos utiliza-se os mesmo níveis indicados na **Tabela 1**, mas com a correção de -10 dB(A) para janelas abertas e -15 dB(A) para janelas fechadas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Definição da geometria da barreira

Baseando-se em como essas barreiras são instaladas em torno das indústrias, foi adotada uma altura de 3 m e a espessura tomada de um bloco de cimento comercial de 14 cm. O material utilizado para a construção é o bloco de cimento da linha estrutural (**Figura 4**) e não foi considerado o reboco, visando preservar a porosidade do material, para auxiliar na absorção sonora.

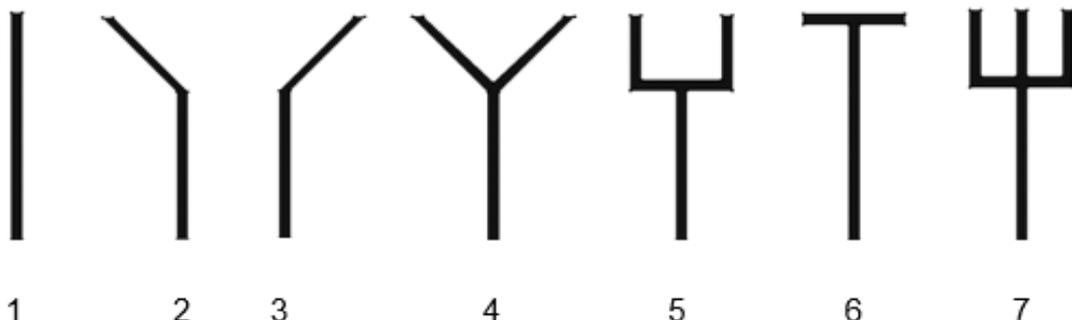
Figura 4. Dimensões do bloco de cimento utilizado para a construção da barreira.



Fonte: Adaptado de <http://colevattivendas.com/os-blocos-concretos-estruturais-e-vedacao-e-as-normas.html>. Acesso em 09 ago. 2018.

Para a avaliação foram definidos 7 tipos diferentes de topos de barreira, mostrado na **Figura 5**, baseado na viabilidade de construção.

Figura 5. Tipos de topos de barreira selecionados para análise.



Criação da geometria da barreira

Para elaborar a geometria da barreira, o campo livre em que ela está inserida e gerar a malha de elementos, foi utilizado o programa HYPERMESH[®].

Foi criado um retângulo de 30 m de comprimento por 6 m de altura para simular o campo livre onde estará instalada a barreira. Em seguida foi inserida a barreira, iniciando pelos nós com suas coordenadas, as linhas e então as duas superfícies (Ar e Barreira).

Foi definido o tamanho dos elementos com 1,5 cm, de acordo com a faixa de frequência a ser analisada. Foi criada a malha necessária para a simulação através do método de elementos finitos. Esse arquivo foi então exportado para o programa ANSYS[®].

Definição dos materiais utilizados na simulação

Foram utilizados 5 materiais distintos listados a seguir. O elemento sólido não permite que se determine o coeficiente de absorção do material, assim é necessário criar uma camada de ar utilizando o elemento FLUID 29 rente à superfície que tem necessidade da determinação do coeficiente de absorção, e definir o MU com o mesmo valor deste coeficiente. Esse procedimento foi feito em torno da barreira e sobre o solo (asfalto). Desta forma, os materiais 4 e 5, abaixo descritos, possuem a velocidade do som no meio iguais à do ar.

- Material 1: representando a barreira, material estrutural, linear, elástico e isotrópico. Com densidade de 1917,7 kg/m³, coeficiente de Poisson de 0,19 e módulo de elasticidade de 16.000 Mpa (MOHAMAD et al., 2011);
- Material 2: representando o ar livre. Com densidade de 1,21 kg/m³, velocidade do som no meio de 343 m/s e $MU=0$;
- Material 3: representando as estruturas presentes no modelo. Com densidade de 1,21 kg/m³, velocidade do som no meio de 343 m/s e $MU=1$;
- Material 4: representando o solo asfaltado. Com densidade de 1,21 kg/m³, velocidade do som no meio de 343 m/s e $MU=0,03$;
- Material 5: representando o contorno da barreira. Com densidade de 1.21 kg/m³, velocidade do som no meio de 343 m/s e $MU=0,07$.

Como foi necessário delimitar o domínio em um retângulo para reduzir o custo computacional, as laterais e o topo não poderiam refletir as ondas as sonoras para que não interferisse os resultados. Portanto, o material 3 possui o $MU = 1$, que representa o coeficiente de absorção de 100%, simulando a situação de campo livre, assim, as ondas sonoras somente serão refletidas pelos obstáculos, no caso desse modelo, a barreira e o solo.

Tipos de elemento utilizados na simulação

Foram utilizados 3 tipos de elementos:

- SHELL 63 para a parte sólida da barreira, utilizado junto com o material 1;
- FLUID 29 com estrutura ausente, para a parte do ar livre, utilizado junto com o material 2;
- FLUID 29 com estrutura presente, para representar os coeficientes de absorção, utilizado junto com os materiais 3, 4, 5.

Contantes reais utilizadas na simulação

Foram utilizados 2 tipos, uma para o sólido e uma para os fluidos:

- 1: utilizada somente com o elemento SHELL 63, com espessura de 1 mm;
- 2: utilizada para os fluidos, com pressão de referência de 20×10^{-6} Pa.

Selecionando receptores

Foram selecionados 29 pontos receptores após a barreira, com uma distância de 0,5 m a partir da barreira e entre eles, a uma altura de 1,6 m, representando a altura média de uma pessoa.

Definindo a fonte

A fonte sonora adotada foi do tipo omnidirecional, colocada a 7,5 m de distância da barreira com, a uma altura de 1 m do chão, com uma pressão de 1 Pa, que equivale a aproximadamente 94 dB.

Criando a situação de campo livre

Para aproximar a uma situação de campo livre, foi escolhido um domínio de grandes dimensões, medindo 30m x 6m. Foram selecionados todos os elementos que delimitam esse domínio e atribuídas as características do elemento tipo 3 e material 3, para não ocorrer reflexões nessas superfícies.

Foi utilizada a interface fluido/estrutura em todos os elementos do contorno, impedância de valor 1 e deslocamento nulo em todas as direções. Para o elemento fluido em torno da barreira também foram definidas essas condições de contorno.

Frequências a serem analisadas

As frequências selecionadas para análise foram centrais das bandas de 1/1 oitava de 63, 125, 250, 500, 1.000 e 2.000 Hz.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para efeito visual, serão ilustradas somente as simulações via MEF para a frequência de 2.000 Hz para cada tipo de barreira, mostradas nas **Figura 6** a **Figura 12**. Para as outras frequências, os resultados serão listados na forma numérica, obtidos através de uma interface com o programa MATLAB®. A pesquisa limitou-se a 2.000 Hz devido ao pequeno comprimento de onda em altas frequências, que dificulta a visualização dos valores nos picos.

Figura 6. Simulação da barreira 1 para 2.000 Hz.

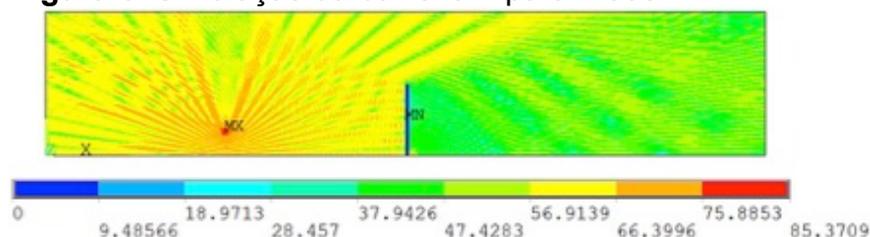


Figura 7. Simulação da barreira 2 para 2.000 Hz.

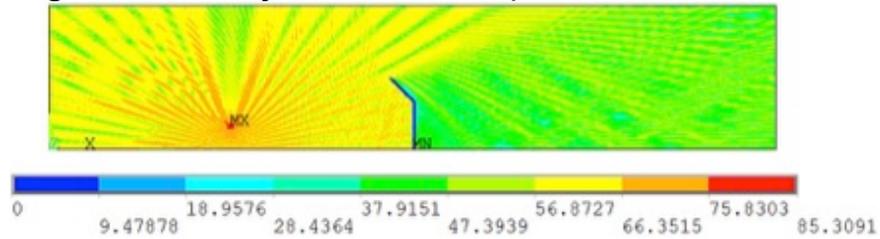


Figura 8. Simulação da barreira 3 para 2.000 Hz.

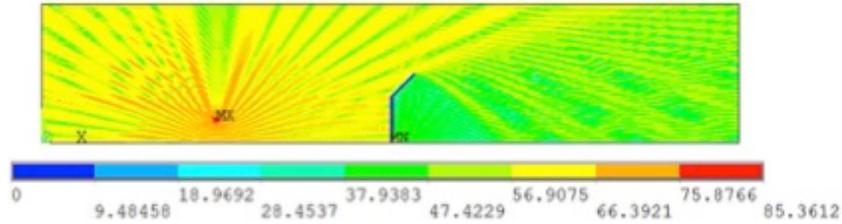


Figura 9. Simulação da barreira 4 para 2.000 Hz.

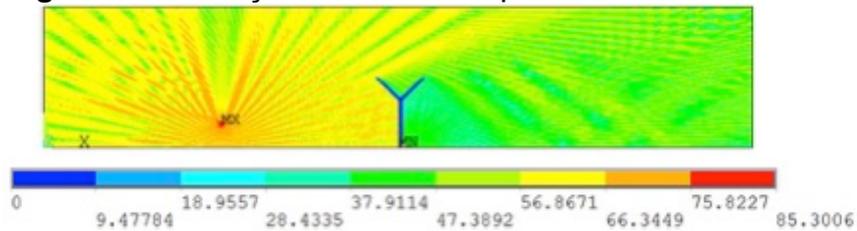


Figura 10. Simulação da barreira 5 para 2.000 Hz.

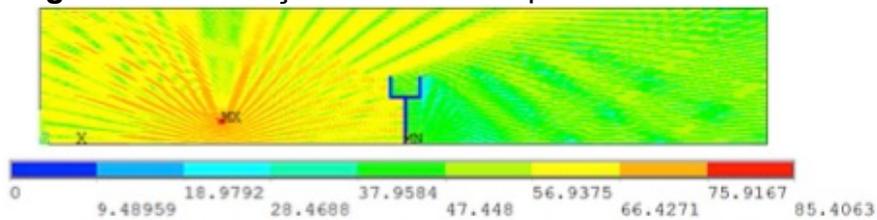


Figura 11. Simulação da barreira 6 para 2.000 Hz.

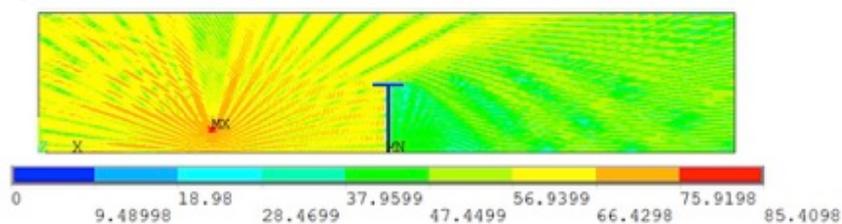
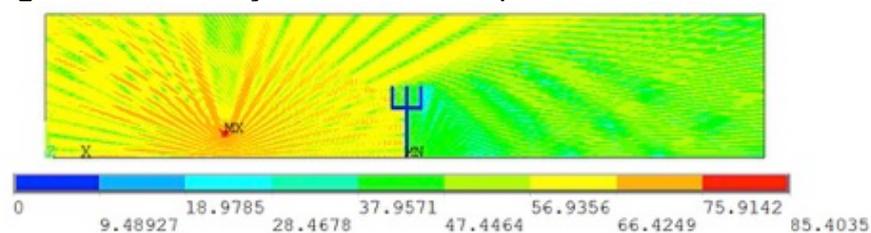


Figura 12. Simulação da barreira 7 para 2.000 Hz.



Os resultados obtidos foram analisados e coletados somente os valores de pico para cada frequência central das bandas de 1/1 oitava, **Tabela 2 a Tabela 7**. Para cada uma das frequências selecionadas para análise foi feito também um gráfico dos níveis de pressão sonora pela distância para os 7 tipos de topo de barreira, **Figura 13 a Figura 18**. Em alguns receptores não foi possível visualizar os valores picos, então os campos das tabelas foram preenchidos com X.

Tabela 2. Valores dos picos de nível de pressão sonora [dB] e suas posições para 63 Hz.

| | 1,0 m | 4,0 m | 7,0 m | 9,5 m | 12,5 m |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Barreira 1 | 63,9 | 64,6 | 67,2 | 67,9 | 67,7 |
| Barreira 2 | 63,4 | 65,1 | 67,0 | 67,4 | 67,2 |
| Barreira 3 | 62,7 | 61,4 | 66,1 | 66,8 | 67,2 |
| Barreira 4 | 61,1 | 59,7 | 63,2 | 65,5 | 65,5 |
| Barreira 5 | 62,1 | 61,3 | 64,0 | 65,8 | 65,8 |
| Barreira 6 | 61,3 | 58,0 | 62,4 | 64,6 | 64,6 |
| Barreira 7 | 61,9 | 61,2 | 63,9 | 65,8 | 65,8 |

Figura 13. Nível de pressão Sonora a partir da barreira para 63 Hz.

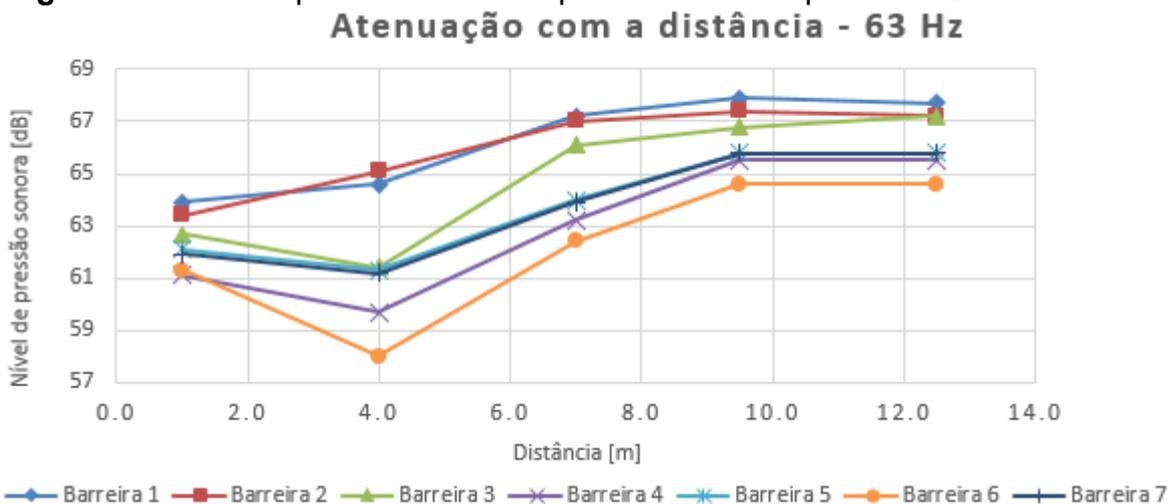


Tabela 3. Valores dos picos de nível de pressão sonora [dB] e suas posições para 125 Hz.

| | 1,5 m | 3,5 m | 5,0 m | 6,0 m | 7,5 m | 9,0 m | 10,5 m | 11,5 m | 13,0 m |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Barreira 1 | 59,9 | 58,2 | 52,8 | 48,9 | 53,5 | 55,7 | 55,6 | 55,3 | 55,7 |
| Barreira 2 | 59,9 | 56,1 | 50,2 | 50,3 | 54,8 | 56,3 | 55,6 | 56,1 | 56,8 |
| Barreira 3 | 56,0 | 60,6 | 56,9 | 49,9 | 53,9 | 57,0 | 58,0 | 57,9 | 58,1 |
| Barreira 4 | X | 53,8 | 51,4 | 51,0 | 52,2 | 52,9 | 52,5 | 53,2 | 53,1 |
| Barreira 5 | 50,6 | 53,9 | 48,7 | 49,1 | 53,3 | 54,8 | 54,3 | 52,4 | 52,8 |
| Barreira 6 | X | 51,1 | 50,5 | 51,1 | 53,1 | 53,9 | 53,7 | 50,4 | 51,4 |
| Barreira 7 | 50,0 | 52,9 | 47,5 | 48,4 | 53,0 | 54,6 | 54,0 | 51,4 | 52,0 |

Figura 14. Nível de pressão sonora a partir da barreira para 125 Hz.
Atenuação com a distância - 125 Hz

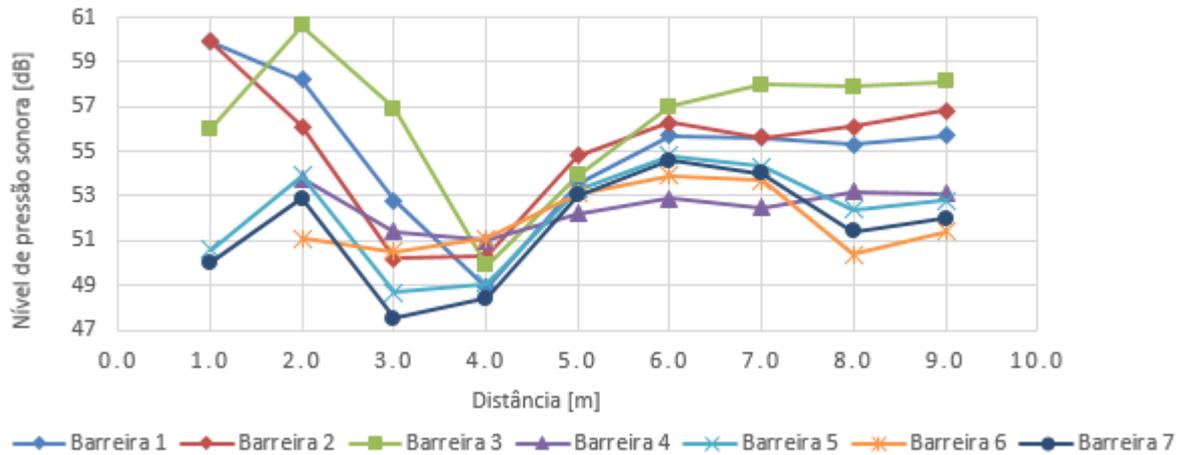


Tabela 4. Valores dos picos de nível de pressão sonora [dB] e suas posições para 250 Hz.

| | 1,0 m | 2,0 m | 3,0 m | 6,0 m | 7,5 m | 9,0 m | 10,5 m | 12,0 m | 13,0 m |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Barreira 1 | 53,4 | 56,8 | 54,6 | 50,6 | 53,1 | 57,4 | 59,8 | 59,6 | 58,5 |
| Barreira 2 | 57,7 | 58,4 | 53,5 | 49,4 | 52,8 | 57,4 | 60,0 | 59,0 | 57,0 |
| Barreira 3 | 41,5 | 48,3 | 49,8 | 55,9 | 56,5 | 58,6 | 60,1 | 59,4 | 58,0 |
| Barreira 4 | X | 47,0 | 49,5 | 55,8 | 56,5 | 59,0 | 60,2 | 59,6 | 57,8 |
| Barreira 5 | X | 53,2 | 53,6 | 53,3 | 54,6 | 58,0 | 60,0 | 59,4 | 58,6 |
| Barreira 6 | 41,0 | 52,0 | 53,1 | 52,2 | 54,3 | 58,1 | 60,1 | 59,6 | 58,2 |
| Barreira 7 | X | 49,3 | 51,2 | 54,9 | 55,4 | 58,4 | 60,0 | 59,4 | 57,6 |

Figura 15. Nível de pressão sonora a partir da barreira para 250 Hz.
Atenuação com a distância - 250 Hz

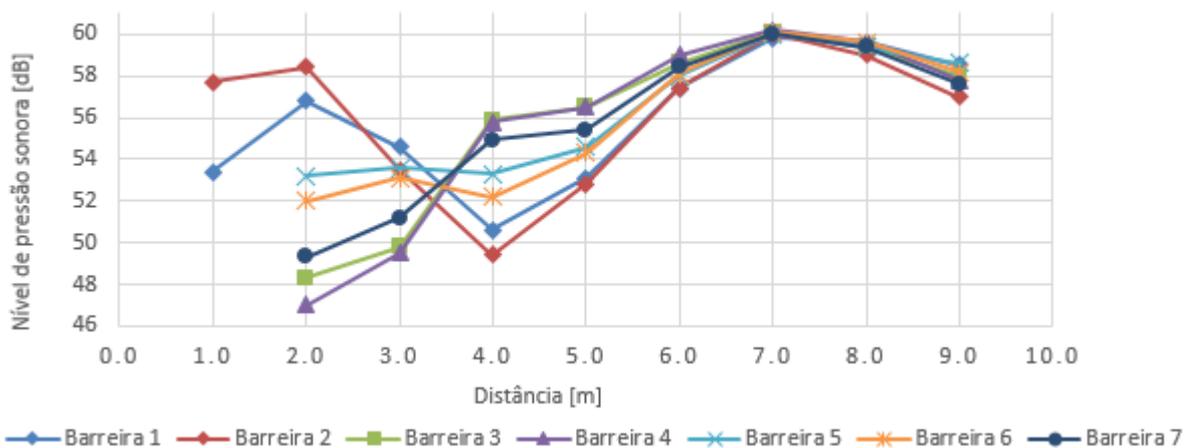


Tabela 5. Valores dos picos de nível de pressão sonora [dB] e suas posições para 500 Hz.

| | 1,0 m | 3,0 m | 5,5 m | 7,0 m | 9,0 m | 11,0 m | 12,5 m | 13,5 m |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Barreira 1 | 42,3 | 47,5 | 58,3 | 48,4 | 50,0 | 52,0 | 57,4 | 56,1 |
| Barreira 2 | 50,4 | 48,6 | 57,6 | X | 48,9 | 52,9 | 52,9 | 51,2 |
| Barreira 3 | 49,1 | 48,7 | 55,7 | 50,0 | 51,0 | 49,3 | 58,0 | 56,4 |

| | | | | | | | | |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Barreira 4 | 42,7 | 42,9 | 52,5 | 45,3 | 48,9 | 49,3 | 48,4 | 45,9 |
| Barreira 5 | X | 39,6 | 53,9 | X | 47,8 | 50,3 | 52,6 | 49,3 |
| Barreira 6 | 42,4 | 41,3 | 55,8 | X | 49,4 | 52,5 | 54,5 | 53,4 |
| Barreira 7 | 39,5 | 38,0 | 54,2 | X | 77,8 | 50,5 | 51,9 | 47,9 |

Figura 16. Nível de pressão sonora a partir da barreira para 500 Hz.
Atenuação com a distância - 500 Hz

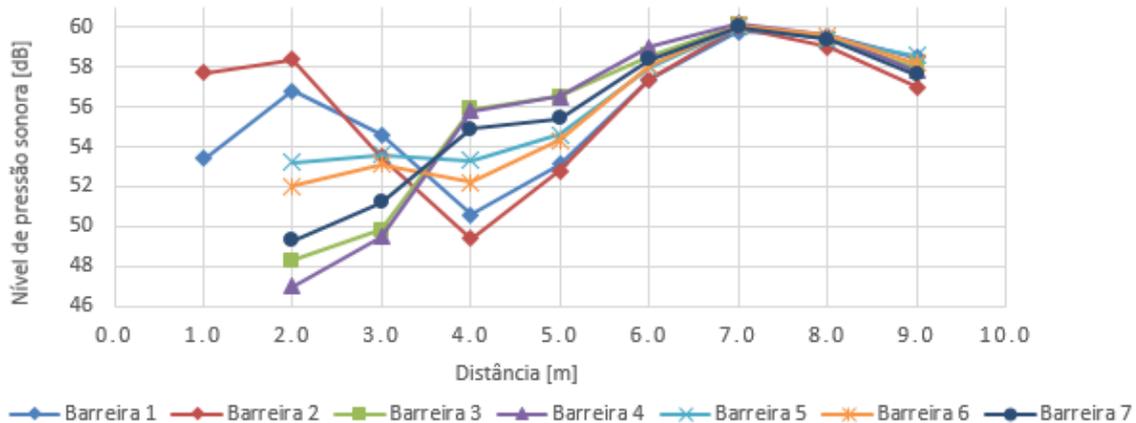


Tabela 6. Valores dos picos de nível de pressão sonora [dB] e suas posições para 1.000 Hz.

| | 1,0 m | 2,5 m | 4,0 m | 6,0 m | 8,5 m | 9,5 m | 10,5 m | 11,5 m | 12,5 m | 13,5 m |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Barreira 1 | 50,0 | X | 51,0 | 47,3 | 54,1 | 55,1 | 53,4 | 49,2 | 52,1 | 45,1 |
| Barreira 2 | 46,0 | 50,0 | 50,8 | 50,0 | 54,8 | 54,4 | 52,6 | 50,5 | 49,9 | 46,0 |
| Barreira 3 | 46,4 | 55,0 | 53,5 | 49,8 | 55,6 | 51,9 | 56,3 | 53,3 | 51,2 | X |
| Barreira 4 | 43,0 | 48,7 | 55,2 | 48,3 | 55,0 | 55,2 | 53,5 | 51,8 | 49,7 | 47,2 |
| Barreira 5 | X | 49,9 | 53,9 | 50,1 | 54,0 | 55,8 | 53,0 | 51,9 | 50,0 | 47,0 |
| Barreira 6 | X | 48,9 | 52,9 | 50,0 | 53,9 | 54,7 | 52,9 | 51,3 | 50,5 | 48,3 |
| Barreira 7 | X | 49,5 | 54,2 | 50,0 | 54,2 | 54,6 | 52,5 | 51,7 | 49,8 | 47,6 |

Figura 17. Nível de pressão sonora a partir da barreira para 1.000 Hz.
Atenuação com a distância - 1000 Hz

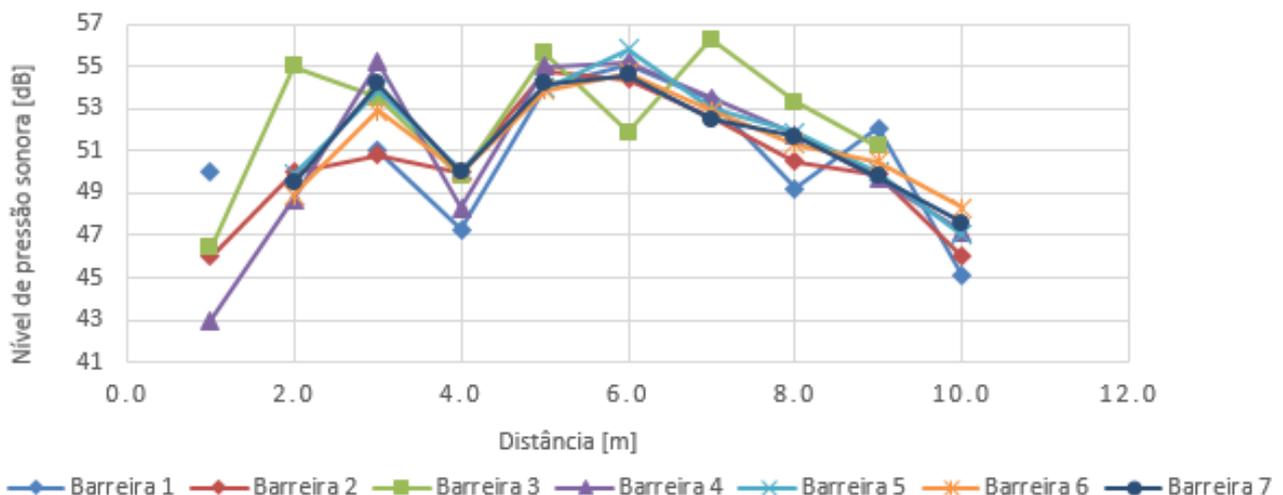
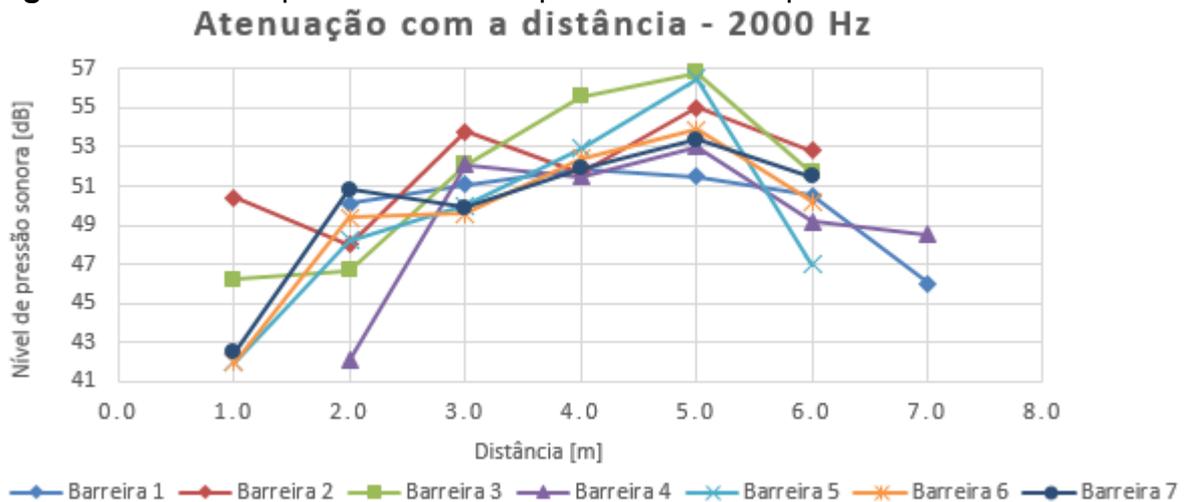


Tabela 7. Valores dos picos de nível de pressão sonora [dB] e suas posições para 2.000 Hz.

| | 1,0 m | 3,5 m | 6,5 m | 7,5 m | 10,0 m | 12,0 m | 13,5 m |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Barreira 1 | X | 50,1 | 51,1 | 51,9 | 51,5 | 50,5 | 46,0 |
| Barreira 2 | 50,4 | 48,0 | 53,8 | 51,7 | 55,0 | 52,8 | X |
| Barreira 3 | 46,2 | 46,7 | 52,1 | 55,6 | 56,8 | 51,7 | X |
| Barreira 4 | X | 42,1 | 52,1 | 51,5 | 53,0 | 49,2 | 48,5 |
| Barreira 5 | 42,0 | 48,2 | 50,0 | 52,9 | 56,5 | 47,0 | X |
| Barreira 6 | 42,0 | 49,4 | 49,6 | 52,4 | 53,9 | 50,2 | X |
| Barreira 7 | 42,5 | 50,8 | 49,9 | 51,9 | 53,4 | 51,5 | X |

Figura 18. Nível de pressão sonora a partir da barreira para 2.000 Hz.



Por meio da análise dos resultados mostrados nas Tabelas 2 a Tabela 7 e nas Figuras 13 a Figura 18, constatou-se que os resultados para as frequências de 1.000 e 2.000 Hz não são confiáveis. Isso se justifica pelo fato destas frequências possuírem comprimento de onda de 0,34 e 0,17 metros respectivamente, inferiores ao espaçamento adotado entre os receptores, de 0,5 metros. A quantidade de receptores não é suficiente para garantir que os picos de pressão sonora sejam visualizados.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foram comparados 7 tipos diferentes de topos de barreiras acústicas.

Foram usados 3 programas, desde a criação do modelo até obtenção dos resultados, visando o mínimo custo computacional possível. O modelo e a malha foram desenvolvidos no programa HYPERMESH®, para a definição das propriedades dos materiais, condições de contorno e simulação foi utilizado o programa ANSYS® e, finalmente, a determinação dos dados nos 29 pontos receptores foi feita no programa MATLAB®.

As barreiras simuladas possuem 3,0 m de altura e 14,0 cm de espessura, feitas de blocos de cimento sem reboco.

Os resultados encontrados podem ser melhorados utilizando espaçamentos diferentes de acordo com a frequência que se deseja analisar.

Todos os tipos de topo apresentaram um comportamento semelhante, com a sombra acústica eficiente e com valor máximo de atenuação a cerca de 4,0 metros de distância da barreira, mas o fim da sombra acústica se difere de acordo com frequência analisada.

As barreiras 2 e 3 não são recomendadas, pois apresentaram resultados iguais ou piores que a barreira tradicional (barreira 1).

A análise das barreiras 5 e 7 mostrou que a adição da continuação da barreira no meio do topo não tem influência significativa.

As barreiras 4, 5 e 6 apresentaram os melhores resultados, com destaque para a barreira 6, que resultou nas maiores atenuações.

Constatou-se que para cada caso prático deve-se realizar a avaliação do melhor tipo de topo a ser utilizado, uma vez que a atenuação é dependente do espectro de frequências do som que se deseja controlar.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR10151: Avaliação do nível de do ruído em áreas habitadas visando o conforto da comunidade, Rio de Janeiro, **ABNT**, 2000.

BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle de ruído**. 2. ed. Editora Edgard Blucher, 2011.

CARTAXO, A. G. *et al.* Atenuação da propagação de ondas sonoras através de uma distribuição periódica de cilindros: análise de elementos finitos experimental. **Acústica**. Universidade de Coimbra, Portugal, 2008.

COSTA, G. C. S. *et al.* Aplicação do método dos elementos finitos espectral em problemas de propagação de ondas em 2D. In: **XI Simpósio de Mecânica Computacional**. Minas Gerais, 2014.

DUARTE, J. B. Uma metodologia para prever o desempenho e eficiência acústica de barreiras múltiplas localizadas ao ar livre. In: **CONEM**. Bahia, 2008.

ISHIZUKA, T.; FUJIWARA, K. Performance of noise barriers with various edge shapes and acoustical conditions. **Applied acoustics**. v. 65, 2004. p.125-161.

ISO 9613-2. Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2: General method of calculation. **International Standard Organization**. 1. ed. Suíça, 1996.

MOHAMAD, G. *et al.* Estudo de caracterização mecânica de blocos de concreto vibro-compactados á seco. **Revista Matéria**. v. 16, n. 1, 2011. p.638-657.

RIBEIRO, F. L. B. Introdução ao método dos elementos finitos. **Notas de aula**. UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

SILVA, G. Barreiras acústicas reduzem ruídos em regiões vizinhas á vias de fluxo intenso. Disponível em: http://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/barreiras-acusticas-reduzem-ruídos-em-regioes-vizinhas-a-vias-de-fluxo-intenso_8759_0_1. Acesso em: 09 ago. 2018.

<http://colevattivendas.com/os-blocos-concretos-estruturais-e-vedacao-e-as-normas.html>. Acesso em: 09 ago. 2018.

Recebido em: 14/08/2018

Aprovado em: 17/09/2018