

## COMPARAÇÃO DE MÉTODOS ANALÍTICOS PARA PREDIÇÃO DA ATENUAÇÃO SONORA POR BARREIRAS ACÚSTICAS

Lis S. de Moura, lis.moura@tucurui.ufpa.br<sup>1</sup>  
Elton P. de Souza, elton.souza@tucurui.ufpa.br<sup>1</sup>  
Orlando Ramos de Sá, orlando.21sa1993@gmail.com<sup>2</sup>  
Alexandre L. A. Mesquita, alexmesq@ufpa.br<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de Engenharia Mecânica. Av. Brasília, s/n - Vila Permanente - 68.455-901 – Tucuruí, PA.

<sup>2</sup>Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Processos Construtivos e Saneamento Urbano, 66.075-110 – Belém, PA.

**Resumo.** Em situações de excesso de ruído rodoviário ou ferroviário que afetam moradores próximos a essas vias, ações de mitigação desse ruído devem ser tomadas. Essas ações podem ser realizadas tanto na fonte, trajetória ou receptor. Uma ação comum de mitigação (na trajetória) é o uso de barreiras acústicas. Há na literatura várias metodologias de cálculo da atenuação sonora devido a barreiras acústicas, desde métodos numéricos a modelos analíticos com diferentes complexidades. Em relação aos métodos analíticos, existem os métodos mais complexos inclusos nos modelos utilizados pelos diferentes países, bem como métodos simplificados, que servem como uma primeira estimativa da atenuação da barreira acústica. Neste trabalho, são comparados os métodos analíticos de Kurze e Anderson (1971), Maekawa (1968) e o método de Salomons (1996).

**Palavras chave:** Barreiras acústicas. Atenuação sonora. Métodos analíticos.

**Abstract.** In situations of excessive road or railway noise that affect nearby residents, noise mitigation measures should be taken. These measures can be implemented at the source, along the transmission path or at the receiver. One common mitigation measure along the transmission path is the use of acoustic barriers. Several methodologies for calculating the sound attenuation due to acoustic barriers can be found in the literature, ranging from numerical methods to analytical models with varying complexities. Analytical methods include more complex methods used in models by different countries, as well as simplified methods that serve as a first estimate of the attenuation of the acoustic barrier. In this study, we compare the analytical methods of Kurze and Anderson (1971), Maekawa (1968), and Salomons (1996).

**Keywords:** acoustic barriers, sound attenuation, analytical methods.

### 1. INTRODUÇÃO

Uma barreira acústica pode ser definida como qualquer obstáculo sólido que seja relativamente opaco ao som, bloqueando a linha reta entre a fonte sonora e o receptor, criando assim uma região de sombra acústica atrás de si. O uso de barreiras acústicas tem se tornado cada vez mais comum como medida para a diminuição do incômodo causado por diversas fontes de ruído, principalmente o ruído relacionado com as atividades de transporte (rodoviário, ferroviário, aéreo e naval).

Até a década de 60, aparentemente não havia nenhum método prático e confiável para projetar proteções com a finalidade de redução de ruído. Isso ocorria porque o cálculo preciso da difração do som por um obstáculo sólido é complexo, como demonstravam as complicadas derivações obtidas antes desta data para o problema da difração.

Com o objetivo de solucionar essa deficiência da época, Maekawa (1968) apresentou um método para o cálculo da atenuação produzida por barreiras acústicas. O método é baseado em observações de dados experimentais de um plano semi-infinito em condições de campo livre. Como contribuição principal, o autor propôs um ábaco simples para projeto, dependente apenas de uma grandeza adimensional, o número de Fresnel, fornecendo valores aproximados de atenuação. Pela sua simplicidade e boas aproximações, este método, conhecido como Diagrama de Maekawa, tornou-se bastante difundido.

Kurze e Anderson (1971) compararam um esquema de predição com dados experimentais de atenuação sonora de barreiras fornecidos por Rathe (1969) e com resultados da teoria geométrica da difração de Keller. Eles propuseram uma expressão analítica simples para o cálculo do excesso de atenuação devido à difração em torno de uma barreira usando raios sonoros radiados por uma fonte pontual. Esta análise levou em conta a incidência oblíqua do som contra a barreira e também incluiu a região de transição entre a zona de brilho e a zona de sombra atrás da barreira. A expressão proposta é bastante difundida entre os projetistas de barreiras, também por ser expressa em termos de uma função simples e depender, assim como o Diagrama de Maekawa, apenas do número de Fresnel.

No entanto, as formulações de Maekawa (1968) e Kurze e Anderson (1971) podem ser estendidas por teorias de fonte-imagem e interferência para incorporar os efeitos de interferência entre ondas difratadas e refletidas.

## 2. FORMULAÇÕES ANALÍTICAS

Neste trabalho, procurou-se empregar formulações analíticas que satisfizessem requisitos considerados essenciais para um método de engenharia, isto é, simplicidade de cálculo e acurácia aceitável. Entre os métodos estudados, mostrou-se adequado o emprego de formulações mistas, que incorporam conceitos apresentados nas formulações de Kurze e Anderson (1971), Maekawa (1968) e Salomons (1996).

Todas estas formulações são dadas para modelos bidimensionais, ou seja, considera-se que as barreiras tenham comprimento infinito e que sua seção transversal se mantenha constante ao longo de seu comprimento. Antes de se tratar das formulações analíticas, é necessária a definição das zonas de sombra e de brilho. Para isso, deve-se considerar uma linha reta partindo da fonte sonora e tangenciando a borda superior da barreira, como mostrado na Fig. 1. O receptor que estiver localizado acima desta linha é considerado na zona de brilho ou iluminada. Por outro lado, qualquer ponto de recepção abaixo desta linha situa-se na zona de sombra acústica.

Pode-se caracterizar a localização do receptor através do ângulo  $\Delta$ , mostrado na Fig. 1.

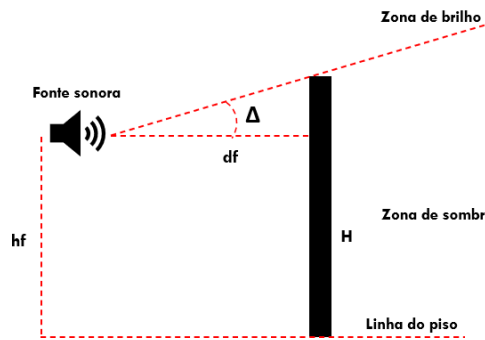


Figura 1. Definição da zona de brilho e zona de sombra (Autor)

O ângulo  $\Delta$  terá um valor de referência definido pela Eq. (1).

$$\Delta_{ref} = \arctg\left(\frac{H - h_f}{df}\right) \quad (1)$$

sendo  $H$  a altura da barreira,  $h_f$  a altura da fonte em relação ao piso e  $df$  a distância da fonte até a barreira.

Para determinar em que zona se enquadra o receptor, utiliza-se a Eq. (2).

$$\Delta_{posição} = \arctg\left(\frac{|hr - hf|}{|df + dr|}\right) \quad (2)$$

sendo  $hr$  a altura do receptor em relação ao piso e  $dr$  a distância do receptor até a barreira.

Assim, se  $\Delta_{posição} > \Delta_{ref}$ , o receptor estará na zona de brilho, caso contrário estará na zona de sombra.

### 2.1. Teoria de Kurze e Anderson

Um método amplamente utilizado por engenheiros e consultores no estudo da atenuação de ruído por barreiras acústicas é conhecido como método de Kurze e Anderson (1971). Este método é baseado em aproximações da teoria geométrica da difração de Keller (1962), além de considerar os resultados experimentais apresentados por Rathe (1969). Em sua formulação, é levada em conta a incidência oblíqua do som contra a barreira e é realizada uma análise da região de transição entre a zona de brilho e a zona de sombra atrás da barreira.

Ao contrário de muitas das complicadas soluções exatas, este método analítico emprega apenas uma variável, o conhecido número de Fresnel, dado pela Eq. (3).

$$N = \frac{2\delta}{\lambda} \quad (3)$$

sendo  $\lambda$  o comprimento de onda e  $\delta$  a diferença de percurso, que é definida com a notação da Fig. 2.

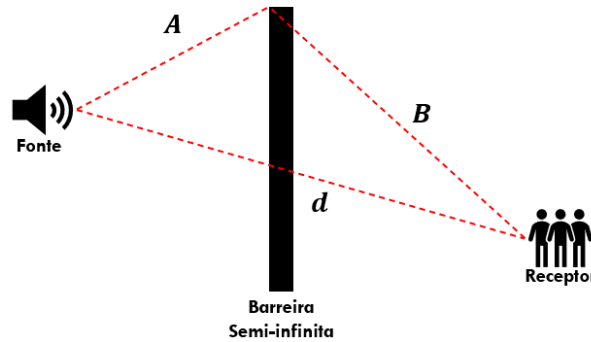


Figura 2. Parâmetros para o modelo de Kurze e Anderson barreiras semi-infinitas (Autor)

A diferença de percurso é demonstrada na Eq. (4).

$$\delta = (A + B - d) \quad (4)$$

sendo  $(A + B)$  o percurso do caminho mais curto sobre a borda, que vai da fonte até o receptor situado na zona de sombra da barreira e  $d$  é o comprimento do caminho direto entre fonte e receptor, através da barreira.

Além da atenuação causada pela barreira, há ainda outros fatores significativos, como a atenuação das ondas refletidas pelo solo. No entanto, devido à sua grande diversidade e complexidade, neste trabalho será enfatizada exclusivamente a atenuação promovida pela barreira. Conforme reportado pelos autores, a previsão da atenuação causada por uma barreira pode ser obtida conforme demonstra a Eq. (5).

$$A_b = 10 \log \left\{ 3 + C N e^{\left[ \frac{-1}{2000} \sqrt{\frac{r_{br} \cdot r_{eb} \cdot (d_{eb} + d_{br})}{2(r_{br} + r_{eb} - d_{eb} - d_{br})}} \right]} \right\} \quad (5)$$

sendo  $N$  o número de Fresnel,  $C$  uma constante de ajuste que vale 20 se o receptor estiver acima do solo e 10 se estiver junto ao solo,  $r_{eb}$  a distância do emissor ao topo da barreira,  $r_{br}$  a distância do receptor ao topo da barreira,  $d_{eb}$  a distância da barreira ao emissor e  $d_{br}$  a distância da barreira ao receptor. A Figura 3 representa o esquema geométrico.

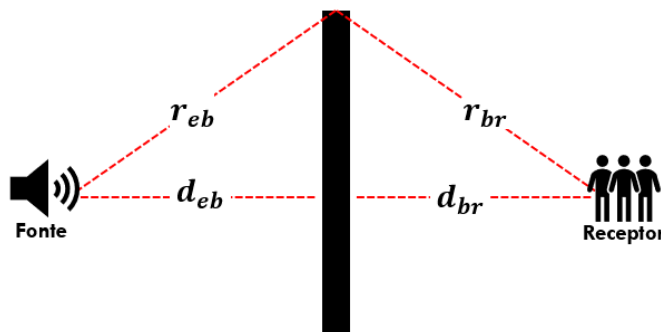


Figura 3. Distância relativas para o cálculo da atenuação por barreira no modelo de Kurze e Anderson.

## 2.2. Teoria de Maekawa

De acordo com a teoria difratória de Kirchhoff (1882), que considera uma superfície plana opaca e não reflexiva, Maekawa (1968) desenvolveu uma expressão empírica para prever o nível de pressão sonora em uma determinada

frequência em um ponto receptor dentro da sombra acústica. Essa sombra acústica é formada quando a barreira está exposta ao ar livre, e apenas a onda difratada pelo topo da barreira é capaz de alcançar o ponto receptor. A Equação (6) apresenta essa relação matemática, que é útil para o cálculo da atenuação acústica em diferentes situações.

$$A_b = 10 \log(20 \cdot N + 3) \quad (6)$$

A Equação (7) apresenta a relação para o cálculo da atenuação em uma fonte pontual desenvolvida por Maekawa, conforme relatado por Gerges (1992).

$$A_b = 20 \log \left[ \frac{\sqrt{2\pi N}}{\tan. h. \sqrt{2\pi N}} \right] + 5 \quad (7)$$

Esta equação é aplicável para valores de N iguais ou maiores que -0,2, já que para valores menores a atenuação é nula.

A Equação (6) e a Equação (7) são expressões utilizadas para calcular a atenuação sonora causada pela barreira. Ambas possuem um limite superior de 24 dB, ou seja, mesmo que os valores dos parâmetros da equação indiquem uma atenuação maior do que 24 dB, a atenuação será limitada a esse valor.

### 2.3. Teoria de Salomons

Salomons (1996) considerou a situação em que há uma barreira de comprimento infinito entre a fonte sonora e o receptor, em uma atmosfera homogênea. Ele buscou prever a atenuação sonora na região de sombra acústica, onde o receptor está localizado exatamente atrás da barreira. Para isso, utilizou a teoria da difração de Pierce (1981), que descreve como as ondas sonoras se curvam ao redor da barreira. A partir dessa teoria, Salomons desenvolveu uma expressão que permite calcular a atenuação sonora em uma ampla faixa de frequências. Essa equação é particularmente útil para o projeto de barreiras acústicas em rodovias, ferrovias e outras fontes de ruído.

A Figura 4 ilustra a geometria para o modelo de Salomons.

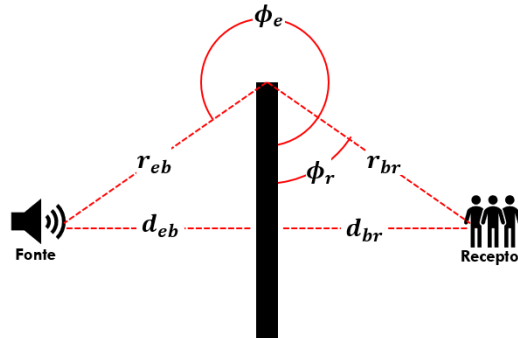


Figura 4. Definição geométrica para o modelo de Salomons (Autor)

Considerando que o receptor se encontra na sombra acústica e ignorando o efeito do solo tem-se a atenuação sonora da barreira em dB dada na Eq. (8)

$$A_b = 10 \log \left( 16\pi^2 \frac{r_{eb}}{\lambda} \cdot \frac{r_{br}}{r} \cdot \cos^2 \left( \frac{\phi_e - \phi_r}{2} \right) \right) \quad (8)$$

Sendo  $\lambda$  o comprimento de onda,  $r_{eb}$  a distância do emissor ao topo da barreira,  $r_{br}$  a distância do receptor ao topo da barreira,  $d_{eb}$  a distância da barreira ao emissor,  $d_{br}$  a distância da barreira ao receptor,  $\phi_e$  é o ângulo de incidência da onda sonora em relação à barreira e  $\phi_r$  é o ângulo de difração da onda sonora em relação à barreira, ambos em radianos.

A equação proposta por Salomons pode ser reescrita em termos do número de Fresnel. Dessa forma, simplificando as equações em relação da diferença entre a distância do caminho difratado e o direto, obtêm-se Eq. (9).

$$A_b = 10 \log(40N) \quad (9)$$

Essa equação assume que as fontes de som estão distribuídas aleatoriamente em uma área, como é o caso de ruído de tráfego rodoviário ou ferroviário.

A equação proposta por Salomons difere em 3 dB da expressão empírica proposta por Maekawa (Laranja, 2000). Isso ocorre porque a expressão empírica de Maekawa considera apenas a difração da onda sonora pelo topo da barreira,

assumindo que a barreira é alta o suficiente para bloquear a onda direta. Por outro lado, a equação proposta por Salomons leva em conta não apenas a difração pelo topo da barreira, mas também a difração pelos lados da barreira e a difração múltipla entre várias barreiras consecutivas. Além disso, a equação de Salomons considera uma barreira infinitamente longa, enquanto a expressão de Maekawa é aplicável apenas a uma barreira finita. Essas diferenças nas hipóteses adotadas nas duas expressões resultam em diferenças na predição da atenuação sonora em uma ampla faixa de frequências.

### 3. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DOS MÉTODOS ANALÍTICOS

O cálculo da atenuação produzida por barreiras acústicas é um processo que envolve diversas expressões que, apesar de serem de simples avaliação, são numerosas e repetitivas, tornando o processo trabalhoso se for feito manualmente. Além disso, essas expressões são muito sensíveis a arredondamentos matemáticos, o que pode levar a resultados incorretos caso não sejam considerados todos os algarismos significativos. Por isso, é recomendável a implementação de rotinas computacionais para essas teorias, o que pode evitar erros de arredondamento e agilizar o processo de obtenção de resultados.

Para o modelo de Kurze e Anderson, além dos parâmetros geométricos inerentes ao método, as equações utilizadas foram Eq. (3) a Eq. (5). Já na implementação das rotinas computacionais da formulação de Maekawa, foram utilizadas as Eq. (6) e Eq. (7), além daquelas envolvidas no cálculo das grandezas geométricas do modelo. Para o modelo de Salomons foi considerado as Eq. (8) e Eq. (9). Os parâmetros fixos correspondentes às dimensões da barreira, utilizados para a entrada de dados, foram retirados de um exemplo apresentado no livro de Bistafa (2018). Neste exemplo, foram observados os valores e a geometria da barreira, bem como as distâncias entre a fonte e o receptor, conforme ilustrado na Fig. 5.

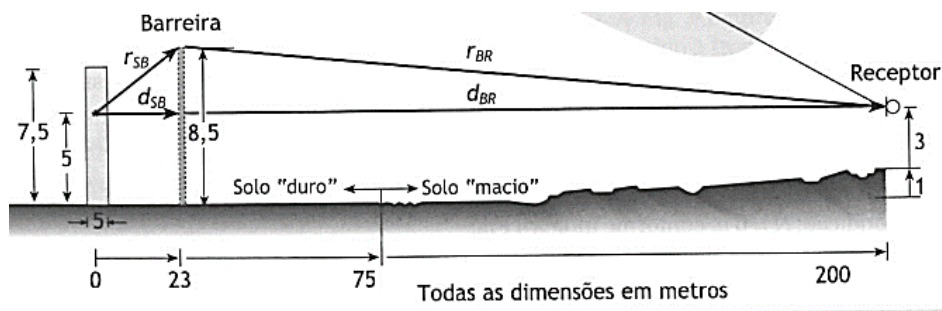


Figura 5. Medidas das dimensões da barreira (Bistafa, 2018)

### 4. RESULTADOS E COMPARAÇÕES

Como já mencionado anteriormente, para calcular a atenuação fornecida pela barreira estudada neste trabalho, foram utilizadas as formulações analíticas de Kurze e Anderson, de Maekawa e as equações de Salomons. Na Figura 6, é possível observar o gráfico resultante das curvas de atenuação sonora geradas por esses métodos.

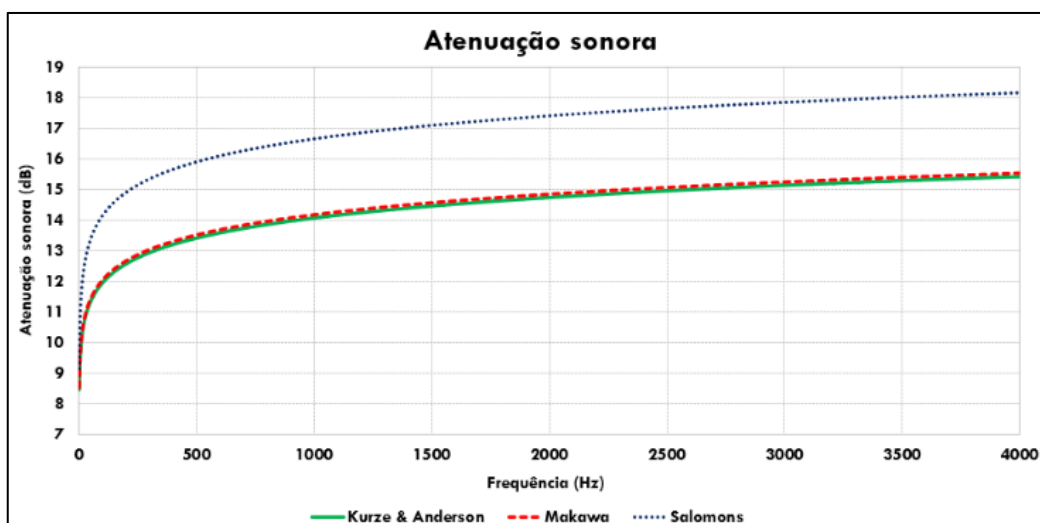


Figura 6. Gráfico de resultados das curvas de atenuações utilizando os métodos analíticos.

Todos os resultados analisados apresentaram, de uma forma geral, curvas muito semelhantes. A similaridade foi notada principalmente nos pontos de recepção localizados dentro da zona de sombra. Esse resultado era esperado, uma vez que os três métodos utilizados são capazes de prever a atenuação sonora dentro dessa região (zona de sombra). Para fins de comparação, foi tomada como referência a formulação de Kurze e Anderson, isto é, as diferenças sempre foram observadas em relação às curvas obtidas através desta formulação.

Observa-se que as curvas de atenuação geradas pelos métodos de Kurze e Anderson e Maekawa apresentam um comportamento suave e bastante semelhante. Os desvios entre as curvas geradas por esses dois métodos são bastante baixos, o que indica uma concordância satisfatória entre os resultados obtidos. De fato, a diferença média na perda por inserção entre essas duas formulações é de apenas 0,1 dB, ou seja, em grande parte dos pontos ao longo das curvas de atenuação, as curvas geradas por esses métodos são praticamente indistinguíveis. Isso reforça a confiabilidade e a validade desses dois métodos para a previsão da atenuação sonora produzida por barreiras acústicas. Por outro lado, as formulações de Kurze e Anderson e Salomons apresentam um desvio médio de cerca de 3 dB. Essa diferença já era esperada, uma vez que a equação proposta por Salomons difere em 3 dB da expressão empírica proposta por Maekawa.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foram abordados os três modelos de previsão da atenuação sonora por barreiras acústicas encontrados na literatura, bem como as equações e métodos analíticos para atenuação sonora por barreiras acústicas. Os modelos avaliados foram o de Kurze e Anderson, o modelo de Maekawa e por fim o modelo de Salomons.

Com o objetivo de aplicar esses métodos na prática, foi realizado um estudo comparativo utilizando um exemplo prático do livro de Bistafa (2018), que contém todos os dados de geometria necessários para a aplicação dos modelos. Os métodos foram implementados computacionalmente utilizando o software MATLAB, criando um algoritmo que calcula automaticamente os resultados utilizando todas as equações e métodos. No entanto, é importante destacar que os cálculos analíticos são desenvolvidos para barreiras delgadas, retas e rígidas, que são geralmente as características das barreiras usadas contra ruído de tráfego rodoviário e ferroviário. Portanto, temos uma ferramenta simples, acessível e eficaz para o projeto de barreiras acústicas. Além disso, tanto a formulação de Kurze e Anderson quanto as formulações de Maekawa e Salomons podem ser facilmente implementadas em softwares matemáticos ou em qualquer linguagem de programação.

Com relação a comparação entre os resultados das formulações de Kurze e Anderson, de Maekawa e Salomons apresentam resultados similares na maior parte da faixa de frequência analisada para os pontos de recepção dentro da zona de sombra da barreira, que é a região de interesse para o uso dessas barreiras como medida de proteção contra ruído excessivo. As formulações de Kurze e Anderson e Maekawa mostram curvas com comportamento mais suave e valores muito próximos, enquanto a curva do modelo de Salomons difere em 3 dB das curvas de Kurze e Anderson.

Por fim, embora todas as formulações avaliadas tenham apresentado resultados satisfatórios, para o caso de se recomendar algum algoritmo para propósitos de projeto, o algoritmo de Kurze e Anderson e o método de Maekawa seriam os escolhidos, por serem mais manejáveis, simples e rápidos, além de cobrirem uma área de recepção maior e produzirem resultados mais próximos da realidade. Vale ressaltar que estudos futuros devem ser realizados com a finalidade de validar a metodologia, comparando os resultados obtidos computacionalmente com resultados medidos.

#### 4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio e incentivo da Pró-Reitoria de Extensão (Proex) da Universidade Federal do Pará.

#### 5. REFERÊNCIAS

- Bistafa, S. R., 2018. *Acústica Aplicada ao Controle do Ruído*. Editora Blucher, São Paulo, 3ª edição.
- Gerges, S. N. Y. 1992. *Ruído: Fundamentos e Controle*. Editora NR, Florianópolis, 1ª edição.
- Keller, L. B., 1962. "Geometrical theory of diffraction". *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 52, p. 116 – 130.
- Kirchhoff, G., 1882. "Über die Beugung an kleinen Körpern". *Annalen der Physik und Chemie*, Vol. 253, p. 663-695.
- Kurze, U. J., ANDERSON, G.S., 1971. "Sound attenuation by barriers". *Applied Acoustics*, Vol. 4, p. 35-53.
- Laranja, R. A. C., 2000. *Métodos e modelos de predição da redução sonora por paredes e atenuação por barreiras*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brasil.
- Maekawa, Z., 1968. "Noise Reduction by Screens". *Applied Acoustics*, Vol. 1, p. 157- 173.
- Pierce, A. D., 1981. "Acoustics". *American Institute of Physics*, New York.
- Rathe, E. J., 1969. "Note on two common problems of sound attenuation", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 10, p. 472 - 479.
- Salomons, E. M., 1996. "Noise Barriers in a Refracting Atmosphere". *Applied Acoustics*, Vol. 47 (3), p. 217-238.

#### 6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.