

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**BARREIRAS ACÚSTICAS – ENSAIOS LABORATORIAIS E  
PREDIÇÃO DA ATENUAÇÃO POR MÉTODOS  
NUMÉRICOS E ANALÍTICOS**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE  
SANTA CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL

**ARLINTON JOÃO CALZA**

Florianópolis – SC

1999

CALZA, Arlinton João. **Barreiras Acústicas – ensaios laboratoriais e predição da atenuação por métodos numéricos e analíticos.** Florianópolis, 1999. 178 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Samir Nagi Yousri Gerges, Ph.D.

Defesa: 28/05/99

Predição da atenuação acústica produzida por barreiras, através de cálculos analíticos de difração, fonte-imagem e interferência. Simulações numéricas da atenuação de barreiras acústicas através do método de elementos de contorno. Validação das predições teóricas por ensaios laboratoriais de uma barreira acústica construída em câmara semi-anecóica. Apresentação das divergências entre os métodos de predição e os dados experimentais, tendências, limitações e comparação entre as vantagens de cada técnica de predição empregada.

Palavras-chave: controle de ruído; atenuação; barreiras acústicas; métodos de predição; perda por inserção; acústica; conforto ambiental.

**Barreiras Acústicas – ensaios laboratoriais e predição da atenuação  
por métodos numéricos e analíticos**

*Arlinton João Calza*

Esta dissertação foi julgada e aprovada em sua forma final, pelo Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.



---

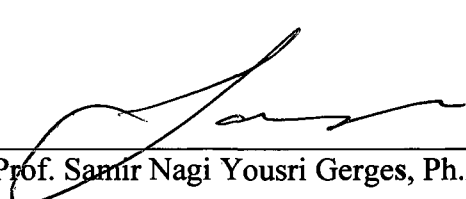
Prof. Samir Nagi Yousri Gerges, Ph.D. (Orientador)



---


Prof. Jucilei Cordini, Dr. (Coordenador do CPGEC/UFSC)

**Comissão Examinadora**



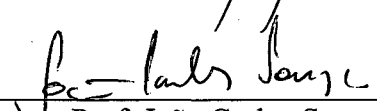
---

Prof. Samir Nagi Yousri Gerges, Ph.D. (Moderador)



---

Prof. Elvira Barros Viveiros da Silva, Dr. Eng.



---

Prof. João Carlos Souza, Dr. Eng.



---

Prof. José Luiz Bento Coelho, Ph.D.

À minha família  
À minha namorada, Suiane

## Agradecimentos

- ao Prof. Samir, pela disposição, incentivo e seriedade na orientação do trabalho;
- ao CNPq, pelo apoio financeiro, através da bolsa de estudos;
- à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pela oportunidade e esforço em proporcionar condições para a realização do trabalho;
- ao Laboratório de Ruído Industrial, pela infra-estrutura oferecida através de instalações, equipamentos, *softwares*, sem a qual não seria possível a realização deste trabalho;
- aos professores Roberto Lamberts e Fernando Oscar Ruttkay Pereira, pelo apoio nos momentos cruciais;
- aos colegas do Grupo de Vibrações e Acústica, pelo companheirismo e amizade, em especial a Felipe Vergara, Marcio Guimarães Mattos, Elisabete Bavastri e Edilar B. Antonioli, e a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho;
- aos membros da comissão examinadora, pelos comentários e sugestões;
- a Jorge Arenas e Fabio Budel Paduin, pelo envio de literatura técnica;
- à minha família e minha namorada, por saber relevar as ausências, e nem por isso deixar de dar o seu apoio, compreensão, carinho e incentivo, em todos os momentos;
- e, sobretudo, a Deus.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xvi</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>xvii</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>xviii</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xix</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xx</b>
<b>Capítulo 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	4
<b>Capítulo 2 - CÁLCULO ANALÍTICO .....</b>	<b>5</b>
2.1 ANTECEDENTES .....	5
2.2 FORMULAÇÕES ANALÍTICAS .....	12
2.2.1 <i>Teorias para barreiras semi-infinitas.....</i>	<i>14</i>
2.2.1.1 Teoria de Pierce.....	14
2.2.1.2 Algoritmo de Kurze e Anderson.....	18
2.2.1.3 Método de Maekawa .....	20
2.2.2 <i>Teorias de fonte-imagem e interferência.....</i>	<i>21</i>
2.2.3 <i>Teoria utilizada: barreira sobre superfície refletora.....</i>	<i>23</i>
2.3 IMPLEMENTAÇÃO DE ROTINAS DE CÁLCULO .....	30
2.4 RESULTADOS .....	33
2.4.1 <i>Diferenças entre as formulações empregadas.....</i>	<i>34</i>
2.4.2 <i>Resultados considerando bandas de freqüências.....</i>	<i>48</i>
2.4.3 <i>Resultados por agrupamento.....</i>	<i>51</i>
2.5 SUMÁRIO .....	60
<b>Capítulo 3 - SIMULAÇÃO NUMÉRICA PELO MÉTODO DE ELEMENTOS DE CONTORNO.....</b>	<b>61</b>
3.1 MÉTODO DE ELEMENTOS DE CONTORNO .....	61
3.1.1 <i>Introdução.....</i>	<i>61</i>
3.1.2 <i>Parâmetros de entrada.....</i>	<i>66</i>
3.1.3 <i>Saída de dados.....</i>	<i>66</i>

3.2 ANTECEDENTES .....	66
3.3 DESCRIÇÃO DOS <i>SOFTWARES</i> USADOS .....	71
3.4 TESTES PRELIMINARES DE VALIDAÇÃO .....	72
3.4.1 <i>Atenuação por difusão geométrica</i> .....	73
3.4.2 <i>Barreiras Acústicas</i> .....	76
3.5 PREDIÇÃO DA EFICIÊNCIA DE PROTEÇÃO DE BARREIRAS ACÚSTICAS .....	81
3.5.1 <i>Resultados das simulações numéricas</i> .....	87
3.6 SUMÁRIO .....	97
<b>Capítulo 4 - ENSAIOS EXPERIMENTAIS</b> .....	<b>98</b>
4.1 ANTECEDENTES .....	98
4.1.1 <i>Modelos em escala reduzida</i> .....	98
4.1.2 <i>Testes em escala real</i> .....	100
4.1.3 <i>Outros trabalhos</i> .....	103
4.2 DETERMINAÇÃO DA PERDA POR INSERÇÃO .....	104
4.2.1 <i>Introdução</i> .....	104
4.2.2 <i>Procedimento experimental</i> .....	105
4.2.3 <i>Resultados das medições</i> .....	115
4.3 SUMÁRIO .....	126
<b>Capítulo 5 - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	<b>127</b>
5.1 ANÁLISE DOS MÉTODOS TEÓRICOS DE PREDIÇÃO .....	127
5.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS .....	143
5.3 SUMÁRIO .....	159
<b>Capítulo 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>160</b>
<b>Capítulo 7 - BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>164</b>
7.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	164
7.2 OBRAS CONSULTADAS .....	168
<b>APÊNDICE 1</b> .....	<b>169</b>
<b>APÊNDICE 2</b> .....	<b>177</b>

# LISTA DE FIGURAS

## Capítulo 2

Figura 2.1 – Definição da zona de brilho e zona de sombra.....	13
Figura 2.2 – Parâmetros para a teoria de Pierce (cunhas semi-infinitas).....	15
Figura 2.3 – Geometria para calcular o Parâmetro de Redfearn.....	17
Figura 2.4 – Parâmetros para o Algoritmo de Kurze & Anderson (barreiras semi-infinitas). .....	19
Figura 2.5 – Construção da fonte-imagem.....	22
Figura 2.6 – Barreira sobre um piso refletor. Construção da fonte-imagem e barreira-imagem.....	23
Figura 2.7 – Posições da fonte e pontos de recepção da configuração utilizada. ....	33
Figura 2.8 – Características geométricas do modelo de barreira. ....	33
Figura 2.9 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 0,50 m de distância em relação à barreira e com altura de 0,01 m (posição 01). Zona de Sombra. ....	35
Figura 2.10 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 1,00 m de distância em relação à barreira e com altura de 0,01 m (posição 02). Zona de Sombra. ....	36
Figura 2.11 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 1,50 m de distância em relação à barreira e com altura de 0,01 m (posição 03). Zona de Sombra. ....	36
Figura 2.12 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 2,00 m de distância em relação à barreira e com altura de 0,01 m (posição 04). Zona de Sombra. ....	37
Figura 2.13 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 2,50 m de distância em relação à barreira e com altura de 0,01 m (posição 05). Zona de Sombra. ....	37
Figura 2.14 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 0,50 m de distância em relação à barreira e com altura de 0,25 m (posição 06). Zona de Sombra. ....	38
Figura 2.15 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 1,00 m de distância em relação à barreira e com altura de 0,25 m (posição 07). Zona de Sombra. ....	38
Figura 2.16 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 1,50 m de distância em relação à barreira e com altura de 0,25 m (posição 08). Zona de Sombra. ....	39
Figura 2.17 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 2,00 m de distância em relação à barreira e com altura de 0,25 m (posição 09). Zona de Sombra. ....	39
Figura 2.18 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 2,50 m de distância em relação à barreira e com altura de 0,25 m (posição 10). Zona de Sombra. ....	40
Figura 2.19 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 0,50 m de distância em relação à barreira e com altura de 0,50 m (posição 11). Zona de Sombra. ....	40



Figura 2.20 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 1,00 m de distância em relação à barreira e com altura de 0,50 m (posição 12). Zona de Sombra. ....	41
Figura 2.21 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 1,50 m de distância em relação à barreira e com altura de 0,50 m (posição 13). Zona de Sombra. ....	41
Figura 2.22 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 2,00 m de distância em relação à barreira e com altura de 0,50 m (posição 14). Zona de Sombra. ....	42
Figura 2.23 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 2,50 m de distância em relação à barreira e com altura de 0,50 m (posição 15). Zona de Sombra. ....	42
Figura 2.24 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 0,50 m de distância em relação à barreira e com altura de 1,00 m (posição 16). Zona de Sombra. ....	43
Figura 2.25 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 1,00 m de distância em relação à barreira e com altura de 1,00 m (posição 17). Zona de Sombra. ....	43
Figura 2.26 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 1,50 m de distância em relação à barreira e com altura de 1,00 m (posição 18). Zona de Sombra. ....	44
Figura 2.27 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 2,00 m de distância em relação à barreira e com altura de 1,00 m (posição 19). Zona de Sombra. ....	44
Figura 2.28 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 2,50 m de distância em relação à barreira e com altura de 1,00 m (posição 20). Zona de Sombra. ....	45
Figura 2.29 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 0,50 m de distância em relação à barreira e com altura de 1,50 m (posição 21). Zona de Brilho. ....	45
Figura 2.30 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 1,00 m de distância em relação à barreira e com altura de 1,50 m (posição 22). Zona de Transição. ....	46
Figura 2.31 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 1,50 m de distância em relação à barreira e com altura de 1,50 m (posição 23). Zona de Transição. ....	46
Figura 2.32 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 2,00 m de distância em relação à barreira e com altura de 1,50 m (posição 24). Zona de Transição. ....	47
Figura 2.33 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 2,50 m de distância em relação à barreira e com altura de 1,50 m (posição 25). Zona de Transição. ....	47
Figura 2.34 – Diferenças entre as curvas de perda por inserção de Pierce e de Kurze & Anderson. ....	48
Figura 2.35 – Diferenças entre as curvas de perda por inserção de Maekawa e de Kurze & Anderson. ....	48
Figura 2.36 – Cálculo analítico para frequências discretas e bandas de 1/3 de oitava (posição 05). ....	49
Figura 2.37 – Cálculo analítico para frequências discretas e bandas de 1/3 de oitava (posição 13). ....	50

Figura 2.38 – Cálculo analítico para frequências discretas e bandas de 1/24 de oitava (posição 05).....	50
Figura 2.39 – Cálculo analítico para frequências discretas e bandas de 1/24 de oitava (posição 13).....	51
Figura 2.40 – Pontos de recepção – agrupamento por altura (A até E) e por distância (F até J).....	52
Figura 2.41 – Predição para atenuação de barreira, pela formulação de Pierce, para as posições de recepção com altura de 0,01 m (Grupo A). ....	53
Figura 2.42 – Predição para atenuação de barreira, pela formulação de Pierce, para as posições de recepção com altura de 0,25 m (Grupo B). ....	54
Figura 2.43 – Predição para atenuação de barreira, pela formulação de Pierce, para as posições de recepção com altura de 0,50 m (Grupo C). ....	55
Figura 2.44 – Predição para atenuação de barreira, pela formulação de Pierce, para as posições de recepção com altura de 1,00 m (Grupo D). ....	56
Figura 2.45 – Predição para atenuação de barreira, pela formulação de Pierce, para as posições de recepção com altura de 1,50 m (Grupo E). ....	56
Figura 2.46 – Predição para atenuação de barreira, pela formulação de Kurze & Anderson, para as posições de recepção com distância de 0,50 m em relação à barreira (Grupo F).....	57
Figura 2.47 – Predição para atenuação de barreira, pela formulação de Kurze & Anderson, para as posições de recepção com distância de 1,00 m em relação à barreira (Grupo G). ....	58
Figura 2.48 – Predição para atenuação de barreira, pela formulação de Kurze & Anderson, para as posições de recepção com distância de 1,50 m em relação à barreira (Grupo H). ....	58
Figura 2.49 – Predição para atenuação de barreira, pela formulação de Kurze & Anderson, para as posições de recepção com distância de 2,00 m em relação à barreira (Grupo I).....	59
Figura 2.50 – Predição para atenuação de barreira, pela formulação de Kurze & Anderson, para as posições de recepção com distância de 2,50 m em relação à barreira (Grupo J).....	59

### Capítulo 3

Figura 3.1 - Pressão e descontinuidade de pressão.....	64
Figura 3.2 – Atenuação por difusão geométrica para uma fonte pontual a 1 kHz [decaimento de 6dB / duplicação de distância em relação à fonte sonora]. ....	75
Figura 3.3 – Atenuação por difusão geométrica para uma fonte linear a 1 kHz [decaimento de 3dB / duplicação de distância em relação à fonte sonora]. ....	75
Figura 3.4 – Geometria do exemplo numérico de LAI (1995). ....	76
Figura 3.5 – Resultados de perda por inserção calculados pelos métodos Direto e Indireto.....	77
Figura 3.6 – Geometria do exemplo numérico de GRANAT et al. (1997). ....	79
Figura 3.7 – Influência do número de pontos de sobre-determinação ( <i>ODP – overdetermination points</i> ) no exemplo de GRANAT et al. (1997). ....	79
Figura 3.8 – Excessos de atenuação calculados pelo método Variacional Indireto (Impedância Singular, Velocidade Normal e Malha Aberta) e pelo método de Colocação Direto, empregados na reprodução do exemplo de GRANAT et al. (1997).....	80

Figura 3.9 – Curvas de excesso de atenuação: SYSNOISE <i>versus</i> GRANAT et al. (1997).....	81
Figura 3.10 – Mapa de cores para o campo de pressão acústica <i>com barreira</i> a 1 kHz.	85
Figura 3.11 – Mapa de cores para o campo de pressão acústica <i>sem barreira</i> a 1 kHz.	86
Figura 3.12 – Influência do <i>passo de cálculo</i> nas simulações numéricas (posição 01)..	88
Figura 3.13 – Influência do <i>passo de cálculo</i> nas simulações numéricas (posição 05)..	88
Figura 3.14 – Influência do <i>passo de cálculo</i> nas simulações numéricas (posição 10)..	89
Figura 3.15 – Influência do <i>passo de cálculo</i> nas simulações numéricas (posição 19)..	89
Figura 3.16 – Influência do <i>passo de cálculo</i> nas simulações numéricas (posição 23)..	90
Figura 3.17 – Simulação da atenuação para posições de recepção com altura de 0,01 m (Grupo A).....	91
Figura 3.18 – Simulação da atenuação para posições de recepção com altura de 0,25 m (Grupo B).....	92
Figura 3.19 – Simulação da atenuação para posições de recepção com altura de 0,50 m (Grupo C).....	93
Figura 3.20 – Simulação da atenuação para posições de recepção com altura de 1,00 m (Grupo D).....	94
Figura 3.21 – Simulação da atenuação para posições de recepção com altura de 1,50 m (Grupo E).....	94
Figura 3.22 – Simulação da atenuação para posições de recepção com distância de 0,50 m em relação à barreira (Grupo F).....	95
Figura 3.23 – Simulação da atenuação para posições de recepção com distância de 1,00 m em relação à barreira (Grupo G).....	95
Figura 3.24 – Simulação da atenuação para posições de recepção com distância de 1,50 m em relação à barreira (Grupo H).....	96
Figura 3.25 – Simulação da atenuação para posições de recepção com distância de 2,00 m em relação à barreira (Grupo I).....	96
Figura 3.26 – Simulação da atenuação para posições de recepção com distância de 2,50 m em relação à barreira (Grupo J).....	97

## Capítulo 4

Figura 4.1 – Fonte sonora: direcionalidade horizontal [Fonte: manual Brüel & Kjær 4205].....	107
Figura 4.2 – Fonte sonora: direcionalidade vertical [Fonte: manual Brüel & Kjær 4205].....	108
Figura 4.3 – Perda de transmissão da barreira utilizada nos ensaios experimentais. Lei das Massas. ....	110
Figura 4.4 – Esquema da montagem experimental para as medições. ....	110
Figura 4.5 – Configuração experimental típica montada na câmara semi-aneecóica ....	111
Figura 4.6 – Conjunto de equipamentos de excitação do sistema e aquisição de dados .....	111
Figura 4.7 – Detalhe da vedação entre as placas componentes da barreira (massa de calafetar e fita adesiva). ....	112
Figura 4.8 – Face voltada para fonte sonora. Apoios para as placas. Detalhe da vedação entre placas e piso: massa de calafetar e fita adesiva. ....	112
Figura 4.9 – Face voltada para receptor. Apoios para as placas. Detalhe da vedação entre placas e piso: fita adesiva.....	113

Figura 4.10 – Esquema ilustrativo para determinação das curvas de perda por inserção.	116
Figura 4.11 – Influência da largura de banda nas medições (posição 08).	117
Figura 4.12 – Influência da largura de banda nas medições (posição 15).	118
Figura 4.13 – Perda por inserção determinada por ensaios experimentais para posições de recepção com altura de 0,01 m (Grupo A).	120
Figura 4.14 – Perda por inserção determinada por ensaios experimentais para posições de recepção com altura de 0,25 m (Grupo B).	121
Figura 4.15 – Perda por inserção determinada por ensaios experimentais para posições de recepção com altura de 0,50 m (Grupo C).	122
Figura 4.16 – Perda por inserção determinada por ensaios experimentais para posições de recepção com altura de 1,00 m (Grupo D).	122
Figura 4.17 – Perda por inserção determinada por ensaios experimentais para posições de recepção com altura de 1,50 m (Grupo E).	123
Figura 4.18 – Perda por inserção determinada por ensaios experimentais para posições de recepção com distância de 0,50 m em relação à barreira (Grupo F).	124
Figura 4.19 – Perda por inserção determinada por ensaios experimentais para posições de recepção com distância de 1,00 m em relação à barreira (Grupo G).	124
Figura 4.20 – Perda por inserção determinada por ensaios experimentais para posições de recepção com distância de 1,50 m em relação à barreira (Grupo H).	125
Figura 4.21 – Perda por inserção determinada por ensaios experimentais para posições de recepção com distância de 2,00 m em relação à barreira (Grupo I).	125
Figura 4.22 – Perda por inserção determinada por ensaios experimentais para posições de recepção com distância de 2,50 m em relação à barreira (Grupo J).	126

## Capítulo 5

Figura 5.1 – Resposta em frequência da barreira: BEM <i>versus</i> formulações analíticas. Receptor localizado a 0,50 m em relação à barreira e com altura de 0,01 m (posição 01). Zona de Sombra.	128
Figura 5.2 – Resposta em frequência da barreira: BEM <i>versus</i> formulações analíticas. Receptor localizado a 1,00 m em relação à barreira e com altura de 0,01 m (posição 02). Zona de Sombra.	128
Figura 5.3 – Resposta em frequência da barreira: BEM <i>versus</i> formulações analíticas. Receptor localizado a 1,50 m em relação à barreira e com altura de 0,01 m (posição 03). Zona de Sombra.	129
Figura 5.4 – Resposta em frequência da barreira: BEM <i>versus</i> formulações analíticas. Receptor localizado a 2,00 m em relação à barreira e com altura de 0,01 m (posição 04). Zona de Sombra.	129
Figura 5.5 – Resposta em frequência da barreira: BEM <i>versus</i> formulações analíticas. Receptor localizado a 2,50 m em relação à barreira e com altura de 0,01 m (posição 05). Zona de Sombra.	130
Figura 5.6 – Resposta em frequência da barreira: BEM <i>versus</i> formulações analíticas. Receptor localizado a 0,50 m em relação à barreira e com altura de 0,25 m (posição 06). Zona de Sombra.	130
Figura 5.7 – Resposta em frequência da barreira: BEM <i>versus</i> formulações analíticas. Receptor localizado a 1,00 m em relação à barreira e com altura de 0,25 m (posição 07). Zona de Sombra.	131

Figura 5.8 – Resposta em frequência da barreira: BEM <i>versus</i> formulações analíticas. Receptor localizado a 1,50 m em relação à barreira e com altura de 0,25 m (posição 08). Zona de Sombra.....	131
Figura 5.9 – Resposta em frequência da barreira: BEM <i>versus</i> formulações analíticas. Receptor localizado a 2,00 m em relação à barreira e com altura de 0,25 m (posição 09). Zona de Sombra.....	132
Figura 5.10 – Resposta em frequência da barreira: BEM <i>versus</i> formulações analíticas. Receptor localizado a 2,50 m em relação à barreira e com altura de 0,25 m (posição 10). Zona de Sombra.....	132
Figura 5.11 – Resposta em frequência da barreira: BEM <i>versus</i> formulações analíticas. Receptor localizado a 0,50 m em relação à barreira e com altura de 0,50 m (posição 11). Zona de Sombra.....	133
Figura 5.12 – Resposta em frequência da barreira: BEM <i>versus</i> formulações analíticas. Receptor localizado a 1,00 m em relação à barreira e com altura de 0,50 m (posição 12). Zona de Sombra.....	133
Figura 5.13 – Resposta em frequência da barreira: BEM <i>versus</i> formulações analíticas. Receptor localizado a 1,50 m em relação à barreira e com altura de 0,50 m (posição 13). Zona de Sombra.....	134
Figura 5.14 – Resposta em frequência da barreira: BEM <i>versus</i> formulações analíticas. Receptor localizado a 2,00 m em relação à barreira e com altura de 0,50 m (posição 14). Zona de Sombra.....	134
Figura 5.15 – Resposta em frequência da barreira: BEM <i>versus</i> formulações analíticas. Receptor localizado a 2,50 m em relação à barreira e com altura de 0,50 m (posição 15). Zona de Sombra.....	135
Figura 5.16 – Resposta em frequência da barreira: BEM <i>versus</i> formulações analíticas. Receptor localizado a 0,50 m em relação à barreira e com altura de 1,00 m (posição 16). Zona de Sombra.....	135
Figura 5.17 – Resposta em frequência da barreira: BEM <i>versus</i> formulações analíticas. Receptor localizado a 1,00 m em relação à barreira e com altura de 1,00 m (posição 17). Zona de Sombra.....	136
Figura 5.18 – Resposta em frequência da barreira: BEM <i>versus</i> formulações analíticas. Receptor localizado a 1,50 m em relação à barreira e com altura de 1,00 m (posição 18). Zona de Sombra.....	136
Figura 5.19 – Resposta em frequência da barreira: BEM <i>versus</i> formulações analíticas. Receptor localizado a 2,00 m em relação à barreira e com altura de 1,00 m (posição 19). Zona de Sombra.....	137
Figura 5.20 – Resposta em frequência da barreira: BEM <i>versus</i> formulações analíticas. Receptor localizado a 2,50 m em relação à barreira e com altura de 1,00 m (posição 20). Zona de Sombra.....	137
Figura 5.21 – Resposta em frequência da barreira: BEM <i>versus</i> formulações analíticas. Receptor localizado a 0,50 m em relação à barreira e com altura de 1,50 m (posição 21). Zona de Brilho.....	138
Figura 5.22 – Resposta em frequência da barreira: BEM <i>versus</i> formulações analíticas. Receptor localizado a 1,00 m em relação à barreira e com altura de 1,50 m (posição 22). Zona de Transição. ....	138
Figura 5.23 – Resposta em frequência da barreira: BEM <i>versus</i> formulações analíticas. Receptor localizado a 1,50 m em relação à barreira e com altura de 1,50 m (posição 23). Zona de Transição. ....	139

Figura 5.24 – Resposta em frequência da barreira: BEM <i>versus</i> formulações analíticas. Receptor localizado a 2,00 m em relação à barreira e com altura de 1,50 m (posição 24). Zona de Transição. ....	139
Figura 5.25 – Resposta em frequência da barreira: BEM <i>versus</i> formulações analíticas. Receptor localizado a 2,50 m em relação à barreira e com altura de 1,50 m (posição 25). Zona de Transição. ....	140
Figura 5.26 – Diferenças médias entre os resultados de perda por inserção obtidos pelas formulações analíticas e os obtidos pelo BEM. ....	141
Figura 5.27 – Diferenças entre a formulação analítica de Pierce em relação ao BEM para os 25 pontos de recepção anteriormente definidos. ....	141
Figura 5.28 – Diferenças entre a formulação analítica de Kurze & Anderson em relação ao BEM para os 25 pontos de recepção anteriormente definidos. ....	142
Figura 5.29 – Diferenças entre a formulação analítica de Maekawa em relação ao BEM para os 25 pontos de recepção anteriormente definidos. ....	142
Figura 5.30 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 0,50 m em relação à barreira e com altura de 0,01 m (posição 01). Zona de Sombra. ....	144
Figura 5.31 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 1,00 m em relação à barreira e com altura de 0,01 m (posição 02). Zona de Sombra. ....	144
Figura 5.32 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 1,50 m em relação à barreira e com altura de 0,01 m (posição 03). Zona de Sombra. ....	145
Figura 5.33 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 2,00 m em relação à barreira e com altura de 0,01 m (posição 04). Zona de Sombra. ....	145
Figura 5.34 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 2,50 m em relação à barreira e com altura de 0,01 m (posição 05). Zona de Sombra. ....	146
Figura 5.35 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 0,50 m em relação à barreira e com altura de 0,25 m (posição 06). Zona de Sombra. ....	146
Figura 5.36 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 1,00 m em relação à barreira e com altura de 0,25 m (posição 07). Zona de Sombra. ....	147
Figura 5.37 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 1,50 m em relação à barreira e com altura de 0,25 m (posição 08). Zona de Sombra. ....	147
Figura 5.38 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 2,00 m em relação à barreira e com altura de 0,25 m (posição 09). Zona de Sombra. ....	148
Figura 5.39 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 2,50 m em relação à barreira e com altura de 0,25 m (posição 10). Zona de Sombra. ....	148
Figura 5.40 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 0,50 m em relação à barreira e com altura de 0,50 m (posição 11). Zona de Sombra. ....	149
Figura 5.41 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 1,00 m em relação à barreira e com altura de 0,50 m (posição 12). Zona de Sombra. ....	149

Figura 5.42 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 1,50 m em relação à barreira e com altura de 0,50 m (posição 13). Zona de Sombra.....	150
Figura 5.43 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 2,00 m em relação à barreira e com altura de 0,50 m (posição 14). Zona de Sombra.....	150
Figura 5.44 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 2,50 m em relação à barreira e com altura de 0,50 m (posição 15). Zona de Sombra.....	151
Figura 5.45 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 0,50 m em relação à barreira e com altura de 1,00 m (posição 16). Zona de Sombra.....	151
Figura 5.46 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 1,00 m em relação à barreira e com altura de 1,00 m (posição 17). Zona de Sombra.....	152
Figura 5.47 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 1,50 m em relação à barreira e com altura de 1,00 m (posição 18). Zona de Sombra.....	152
Figura 5.48 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 2,00 m em relação à barreira e com altura de 1,00 m (posição 19). Zona de Sombra.....	153
Figura 5.49 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 2,50 m em relação à barreira e com altura de 1,00 m (posição 20). Zona de Sombra.....	153
Figura 5.50 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 0,50 m em relação à barreira e com altura de 1,50 m (posição 21). Zona de Brilho.....	154
Figura 5.51 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 1,00 m em relação à barreira e com altura de 1,50 m (posição 22). Zona de Transição.....	154
Figura 5.52 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 1,50 m em relação à barreira e com altura de 1,50 m (posição 23). Zona de Transição.....	155
Figura 5.53 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 2,00 m em relação à barreira e com altura de 1,50 m (posição 24). Zona de Transição.....	155
Figura 5.54 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 2,50 m em relação à barreira e com altura de 1,50 m (posição 25). Zona de Transição.....	156
Figura 5.55 – Cálculo analítico para tons puros e para bandas de ruído <i>versus</i> medição para bandas de 1/3 de oitava (posição 01).....	158
Figura 5.56 – Cálculo analítico para tons puros e para bandas de ruído <i>versus</i> medição para bandas de 1/3 de oitava (posição 06).....	158

# LISTA DE TABELAS

## Capítulo 2

Tabela 2.1 – Localização pontos de recepção utilizados. ....	32
Tabela 2.2 – Posições de recepção com mesma altura em relação ao piso. ....	52
Tabela 2.3 – Posições de recepção com mesma distância em relação à barreira. ....	52

## Capítulo 3

Tabela 3.1 – Resumo das condições geométricas e de contorno para o modelo simulado. .....	84
Tabela 3.2 – Posições de receptor com mesma altura em relação ao piso .....	90
Tabela 3.3 – Posições de receptor com mesma distância em relação à barreira.....	91

## Capítulo 4

Tabela 4.1 – Posições de microfone com mesma altura em relação ao piso. ....	119
Tabela 4.2 – Posições de microfone com mesma distância em relação à barreira. ....	120



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- BEM - Método de Elementos de Contorno (*Boundary Element Method*)
- BIE - Equação Integral de Contorno (*Boundary Integral Equation*)
- CHIEF - Formulação Combinada da Equação Integral de Helmholtz  
(*Combined Helmholtz Integral Equation Formulation*)
- FEM - Método de Elementos Finitos (*Finite Element Method*)
- MLS - Técnica de medição por Seqüências de Comprimento Máximo  
(*Maximum Length Sequences*)
- RMS - Valor médio quadrático (*Root Mean Square*)

## LISTA DE SÍMBOLOS

$c$	-	velocidade do som [m/s]
$df$	-	distância da fonte sonora em relação à barreira [m]
$dr$	-	distância do receptor em relação à barreira [m]
$H$	-	altura da barreira [m]
$hf$	-	altura da fonte sonora em relação ao piso [m]
$hr$	-	altura do receptor em relação ao piso [m]
$\lambda$	-	comprimento de onda acústica [m]
NPS	-	nível de pressão sonora [dB]
PI	-	perda por inserção [dB]
$\rho$	-	densidade [ $\text{kg/m}^3$ ]

## RESUMO

Uma barreira acústica pode ser definida como qualquer obstáculo sólido que seja relativamente opaco ao som, bloqueando a linha reta entre fonte sonora e 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 e aéreo). Assim, no projeto de barreiras eficientes, deve-se levar em conta o uso racional das ferramentas de predição, a fim de economizar-se tempo e dinheiro.

Neste trabalho são investigadas algumas formas de predição da atenuação proporcionada por barreiras acústicas, através do método de elementos de contorno (BEM) e de formulações analíticas de predição da difração produzida por barreiras semi-infinitas, adaptadas pelas teorias de fonte-imagem e interferência para incorporar nos cálculos os efeitos da interferência causados pela reflexão das ondas sonoras no piso rígido.

São comparadas simulações numéricas e cálculos analíticos de um modelo de barreira, que são posteriormente validados através de ensaios experimentais com uma barreira construída em uma câmara semi-aneecóica. Os resultados mostram que os cálculos analíticos produzem predições com grau de acurácia comparável às simulações por elementos de contorno. A comparação dos resultados obtidos pelas predições teóricas com dados experimentais, mostra que aqueles tendem a predizer maiores atenuações, com picos e vales de atenuação mais acentuados em relação aos levantados experimentalmente. Entretanto, as curvas teóricas e experimentais seguem um mesmo padrão de forma.

São apresentadas e discutidas as divergências entre os valores teóricos e experimentais. A validade, limitações e vantagens de cada método de predição são comentadas e, por fim, são dadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## *ABSTRACT*

A noise barrier can be defined as any solid obstacle that is relatively opaque to sound and blocks the line-of-sight from sound source to receiver, thus creating a sound shadow.

The use of noise barriers has become a common measure of control to decrease the annoyance caused by several noise sources, mainly the noise related to transport activities (road, rail and air transportation). Thus, in the project of efficient barriers, the rational use of prediction tools should be taken into account, in order to save time and money.

In this work methods to predict the attenuation offered by noise barriers are investigated, through the use of boundary elements method (BEM) and analytical formulas to predict the diffraction of semi-infinite barriers. These formulas are adapted by source-image and interference theories to incorporate the effects of phase change caused by the reflection of the sound waves from rigid ground.

Numerical simulations and analytical calculations of a barrier model are compared and, later on, validated by experimental tests with a barrier built in a semi-anechoic chamber. The results showed that the analytic calculations produce predictions with accuracy comparable to the simulation by BEM. The comparison of results obtained by theoretical predictions with experimental data shows that those tend to predict higher attenuations, with sharper attenuation peaks and dips in relation to that obtained experimentally. However, theoretical and experimental curves follow a similar pattern in the spectra.

The divergences between numerical, analytical and experimental results are presented and discussed. The validity, limitations and advantages of each prediction method are commented.

Finally, the conclusions of the analysis and suggestions for future works are given.

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

A preocupação com o ruído nas comunidades não teve início com o advento do avião a jato, ou mesmo com o começo da revolução industrial. Ela começou muito antes, com o surgimento das primeiras comunidades organizadas. Daquela época até os dias de hoje, as questões relacionadas ao ruído cresceram muito, tanto em número como em complexidade.

Com o contínuo desenvolvimento industrial e econômico das cidades, graves problemas têm surgido, gerados, fundamentalmente, por deficiências de planejamento.

Dentre os diversos agentes contaminantes das cidades, destaca-se o ruído de tráfego que, embora presente, na maioria dos casos, níveis de pressão sonora insuficientes para causar danos permanentes à audição humana, constitui-se em fonte de incômodo e, conseqüentemente, de *stress*, irritação e outras reações desagradáveis para a população atingida.

O uso de barreiras acústicas tem se tornado cada vez mais comum como medida de controle para a diminuição do incômodo causado por diversas fontes de ruído, principalmente o ruído relacionado com as atividades de transporte (rodoviário, ferroviário e aéreo).

“Uma barreira acústica pode ser definida como qualquer obstáculo sólido que seja relativamente opaco ao som, bloqueando a linha reta entre fonte sonora e receptor, criando assim uma região de sombra acústica atrás de si.” (DAIGLE, 1998, p. 14).

As barreiras acústicas redistribuem a energia sonora vinda diretamente da fonte em direção ao receptor por três caminhos:

- a) um caminho difratado por cima do topo da barreira (em geral, quanto maior a diferença entre o caminho direto (ou seja, antes da instalação da barreira) e o caminho difratado (depois da construção da barreira), maior é a redução de ruído);

- b) um caminho transmitido através da barreira (o quanto é transmitido depende das propriedades do material (peso e espessura), do ângulo de incidência das ondas sonoras e do espectro do ruído) e;
- c) um caminho refletido/absorvido, direcionando parte das ondas para longe do receptor e absorvendo outra parte através do material da barreira (a razão de absorção depende do material).

A altura das barreiras construídas em todo o mundo é bastante variada, em virtude das necessidades de abatimento de ruído. Entretanto, afirmam GHARABEGIAN (1995); YAMAMOTO et al. (1995); FUJIWARA e HOTHERSALL (1996), quando as barreiras começam a tornar-se muito altas, há uma rejeição generalizada, tanto por parte dos habitantes da região, como pelos usuários da rodovia, em virtude da obstrução do seu ambiente visual.

Esse é um dos motivos pelos quais existe a necessidade de se melhorar a *performance* das barreiras, para que se possa dispor de barreiras com pequenas alturas, porém com alta eficiência na redução do ruído. Todavia, no momento de se projetar estas barreiras, deve-se considerar princípios físicos bastante complicados para, finalmente, decidir qual alternativa será a melhor.

Os projetistas e consultores, entretanto, necessitam de métodos simples, que envolvam cálculos fáceis de manejar e rápidos, mas que forneçam resultados próximos aos valores reais.

Neste caminho está direcionado o presente trabalho. Foram estudadas duas formas de predição da *performance* de barreiras acústicas, sendo uma analítica e outra numérica, as quais foram validadas por medições em um modelo experimental.

## 1.1 OBJETIVOS

Neste trabalho foram estudados alguns métodos para a predição da eficiência de proteção de barreiras acústicas. Foram utilizadas para isso, soluções analíticas do problema de difração, adaptadas para o modelo de estudo, e os pacotes comerciais ANSYS 5.1 e SYSNOISE 5.3A, que implementam os métodos numéricos de elementos finitos (FEM – *Finite Element Method*) e de elementos de contorno (BEM – *Boundary Element Method*), empregados, respectivamente, na construção das malhas de elementos finitos e na predição da mudança do campo acústico introduzida pela barreira interposta no caminho direto entre fonte sonora e receptor.

O objetivo geral do trabalho é a intercomparação entre os resultados de perda por inserção obtidos através dos métodos de predição utilizados e os dados experimentais provenientes de medições laboratoriais.

Como objetivos específicos, pode-se enunciar:

- a) A comparação entre os resultados dos métodos analíticos de predição, determinando seu comportamento e a diferença média entre eles.
- b) O confronto entre os resultados teóricos, isto é, entre os resultados obtidos através dos cálculos analíticos e aqueles provenientes das simulações numéricas.
- c) O cotejo entre os resultados de atenuação calculados através dos métodos de predição (cálculo analítico e simulação numérica) e os dados experimentais medidos em condições laboratoriais, a fim de determinar a validade dos métodos preditivos.

O roteiro do trabalho, pode ser dividido basicamente nas seguintes etapas:

1. Revisar a bibliografia sobre métodos e teorias para solução do problema de difração em barreiras.
2. Selecionar formulações adequadas para o modelo físico proposto que satisfaçam os requisitos para fins de engenharia, isto é, acurácia aceitável e simplicidade de cálculo.
3. Implementar rotinas computacionais em programas matemáticos para as formulações selecionadas.
4. Investigar o uso do método dos elementos de contorno na modelagem e predição da eficiência de barreiras acústicas.
5. Realizar ensaios experimentais com uma barreira acústica construída em câmara semi-aneecóica.
6. Comparar os resultados dos ensaios experimentais, com resultados calculados pelas formulações analíticas selecionadas e pelas simulações numéricas por elementos de contorno, visando investigar a validade das mesmas na predição da eficiência de barreiras contra o ruído.
7. Discutir os resultados e elaborar propostas para continuação do trabalho.

A organização dos tópicos abordados nesta dissertação é descrita a seguir.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura sobre cálculos analíticos de predição da atenuação produzida por barreiras acústicas e uma visão cronológica da evolução deste tema, com um resumo dos principais trabalhos publicados. São selecionados e expostos três métodos analíticos de predição da atenuação em barreiras. Os resultados baseados nos cálculos por estes métodos são apresentados e discutidos.

O Capítulo 3 expõe a evolução histórica do uso do método de elementos de contorno (BEM) na predição do comportamento do campo acústico difratado por barreiras, seguindo-se com uma revisão sobre o funcionamento e a aplicação do método. É dada uma breve descrição dos *softwares* utilizados e, a seguir, são apresentados os resultados de simulações numéricas preliminares de casos conhecidos com a intenção de familiarizar-se e adquirir-se confiança na utilização dos *softwares*. Por fim, é apresentada uma descrição sobre o modelo de barreira simulado, bem como considerações explicativas sobre o modelo e os resultados da simulação.

No Capítulo 4, é apresentada uma revisão cronológica sobre trabalhos experimentais conduzidos sobre o tema e sua relação com algumas técnicas de predição. São justificadas as escolhas das características do modelo montado, bem como detalhes da sua construção e dos ensaios realizados. São apresentados e discutidos os resultados experimentais.

A comparação entre os resultados teóricos de predição e os resultados experimentais é feita no Capítulo 5. É discutida a validade dos métodos de predição e as principais tendências seguidas pelas curvas de atenuação.

No Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões e são feitas sugestões para o prosseguimento deste trabalho introdutório.

Por fim, no Capítulo 7, são listados os trabalhos e obras consultadas no desenvolvimento desta dissertação.



## Capítulo 2

### CÁLCULO ANALÍTICO

Neste capítulo, é apresentada uma revisão da literatura a respeito das principais formulações analíticas e semi-empíricas, com o objetivo de dar-se uma visão geral em relação à diversidade de métodos de cálculo existentes e, também, de se coletar subsídios para a seleção de uma formulação adequada ao caso específico do trabalho. A seguir, as formulações selecionadas são explanadas e comentadas quanto ao seu campo de aplicação. Por fim, são apresentados os valores resultantes da predição da eficiência acústica da barreira modelada, calculados através das formulações selecionadas.

#### 2.1 ANTECEDENTES

A possibilidade de prever com precisão o comportamento acústico de elementos de proteção contra o ruído através de cálculos matemáticos é um objetivo que tem sido procurado por numerosos pesquisadores há muitos anos.

Entretanto, a quantidade de fenômenos físicos que surgem com a propagação do som e sua interação com o ambiente dificulta a sua descrição precisa através de modelagens matemáticas abrangentes. O que se dispõe são diversas aproximações teóricas ou semi-empíricas, que descrevem estes fenômenos com mais ou menos detalhes, cada uma, porém, com limitações de aplicação.

Um dos mais importantes fenômenos físicos, entre os que governam o mecanismo de proteção oferecido por barreiras, é a difração.

A difração é um fenômeno que surge quando a linha reta entre fonte sonora e receptor é bloqueada por algum obstáculo, obrigando as frentes de ondas a modificarem seu caminho de propagação, contornando o obstáculo por suas bordas.

“Originalmente, a teoria da difração foi desenvolvida para os problemas da ótica e, mais tarde, emprestada para ser aplicada em todos os fenômenos de difração em acústica e outros movimentos de onda” (MAEKAWA, 1968, p. 157).

Desde fins do século passado, quando SOMMERFELD (1896) apud SEZNEC (1980) encontrou uma solução exata para a difração de uma onda plana por uma barreira fina semi-infinita<sup>1</sup>, muitos matemáticos, físicos e engenheiros têm se ocupado em compreender melhor o funcionamento do fenômeno da difração e aplicá-lo para a construção de esquemas de predição para vários tipos de barreiras acústicas.

Embora o esforço destes estudiosos tenha elucidado muitos detalhes e contribuído para melhorar a eficiência da proteção das barreiras, ainda hoje o fenômeno da difração não está totalmente compreendido.

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

Com o objetivo de solucionar esta deficiência da época, MAEKAWA (1968) apresenta 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 propõe um ábaco simples para projeto, dependente apenas de uma grandeza adimensional, o número de Fresnel, fornecendo valores aproximados de atenuação. Pela sua simplicidade e relativamente boa aproximação, este método, conhecido como *Diagrama de Maekawa*, tornou-se bastante difundido. Maekawa ainda propõe uma metodologia para ser usada no caso de barreiras finitas e com reflexões no piso, aplicando a integral de Kirchhoff-Fresnel, e uma aproximação matemática para ser usada com barreiras de espessura considerável.

KURZE e ANDERSON (1971), comparando um esquema de predição e dados experimentais de atenuação sonora de barreiras, fornecidos por Rathe, com resultados da teoria geométrica da difração de Keller, propuseram uma expressão analítica simples para o cálculo do excesso de atenuação devido à difração em torno de uma barreira, de

---

<sup>1</sup> É considerada semi-infinita, a barreira imersa em campo livre e composta por um plano que tem dimensões infinitas em três direções: inferior e as laterais esquerda e direita; esta característica faz com que as ondas sonoras incidentes sobre a sua superfície só possam contorná-la por uma borda: a superior.

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 (*tangente hiperbólica*) e, a exemplo do Diagrama de Maekawa, depender somente do número de Fresnel.

JONASSON (1972) publicou um trabalho referente à redução do ruído por barreiras sobre um piso com absorção finita. Segundo o autor, conhecida a admitância acústica do solo, que pode ser calculada através das relações empíricas enunciadas por DELANY e BAZLEY (1970), pode-se determinar, com razoável grau de acurácia, a atenuação devida ao piso (campo refletido) e a redução do ruído por uma barreira construída sobre este piso (campo difratado), incluindo apenas um termo dependente da fase. Para confirmar os resultados calculados pela sua formulação, foram conduzidas medições com uma barreira de 3 metros de altura. Os resultados experimentais mostraram boa correlação com os valores preditos.

Dois anos depois, KURZE (1974) publica um tutorial onde apresenta um apanhado das principais linhas de pesquisa em barreiras acústicas. Em seu trabalho, constatou que já naquele ano não havia escassez de artigos tratando de aspectos teóricos sobre o comportamento de barreiras, mas que ainda não se fazia uso adequado destas poderosas ferramentas para o projeto de barreiras e para a avaliação de dados de campo. Nesta pesquisa, Kurze chama a atenção para duas tendências que os trabalhos estavam tomando: “uma que procura explicar com mais detalhes a influência dos fatores atmosféricos, da forma geométrica e do comprimento de uma barreira, etc., mas que peca por esquecer o propósito de praticidade neste contexto, através de procedimentos analíticos difíceis e por vezes obscuros. A outra, que se volta para a descrição da *performance* total da barreira sob determinadas condições usuais. As simplificações inerentes a esta descrição abrangente estão em harmonia com a demanda de praticidade, mas deixam muito espaço para especulações sobre possíveis erros e sua aplicação em casos especiais.” Finalizando, sugere que as pesquisas futuras sejam direcionadas tendo como base a aproximação para engenharia de alguns detalhes importantes (interação do solo, forma e material da barreira, fenômeno de interferência, influência do vento e correlação ao longo da borda de difração).

Seguindo fielmente suas recomendações, o próprio Kurze apresenta uma metodologia para ser aplicada no caso de difração de barreiras construídas sobre um piso rígido. Esta metodologia pode ser usada em conjunto com outras formulações desenvolvidas para barreiras semi-infinitas, para considerar os efeitos de interferência entre os raios diretos e os refletidos pelo piso, no semi-espaco do receptor, uma vez que considera a fonte ao nível do piso.

PIERCE (1974) conduz um trabalho sobre a difração do som em torno de esquinas e barreiras de espessura considerável. Neste trabalho, é demonstrado que algumas das aproximações sugeridas por MAEKAWA (1968) para o cálculo de barreiras espessas, poderiam não ser aplicáveis em alguns casos. Para isto, sugere-se um método alternativo, baseado na teoria de difração por cunhas desenvolvida pelo próprio Pierce, a qual parece ser uma das mais rigorosas e exatas. Adicionalmente, Pierce apresenta um método, baseado na teoria de Keller, para calcular a difração por cunhas, o qual permite expressar os resultados em termos das funções auxiliares de Fresnel.

No início da década de 80, EMBLETON (1980) apresenta uma nova teoria de difração, a qual é baseada numa integral de linha ao longo da borda livre de uma barreira semi-infinita. Expressões, não integráveis analiticamente, são dadas para o caso onde a linha fonte/receptor apresenta-se perpendicular e também para o caso em que esta linha não encontra-se perpendicular ao plano da borda da barreira. Estas expressões são úteis para calcular, por integração numérica, o campo sonoro atrás de uma barreira devido aos efeitos combinados das ondas diretas e refletidas, em situações práticas onde fonte e receptor estão a poucos metros do piso e da barreira.

Embora sejam integráveis numericamente com a ajuda de um computador, estas expressões não foram bem aceitas por engenheiros e projetistas de barreiras acústicas, por serem um tanto complicadas.

Ao que parece, a partir de 1980, os padrões de interferência devidos à reflexão das ondas sonoras no solo passaram a ser tratados em métodos analíticos de predição da eficiência acústica de barreiras.

ISEI et al. (1980) apresentam um estudo comparativo entre a teoria enunciada por EMBLETON (1980) e outras quatro bastante conhecidas, as quais diferem entre si, principalmente, nas aproximações para o tratamento do fenômeno de difração e nos modelos para a impedância do terreno. Os resultados mostraram diferenças de até 10 dB na perda por inserção calculada por algumas destas teorias, dependendo das condições

geométricas do modelo, espectro da fonte e características acústicas do terreno. Adicionalmente, os resultados dos cálculos pelas diferentes teorias foram comparados com resultados de medições experimentais, mostrando boa correlação para algumas das teorias. Estes resultados sugerem que há um efeito significativo devido à presença do piso, que é muito maior que as propriedades absorventes que a barreira poderia ter.

Deve-se, pois, ter muito cuidado ao selecionar uma formulação analítica para a avaliação do campo acústico difratado por uma barreira.

Segundo SEZNEC (1980), uma das principais limitações das investigações por meio de formulações analíticas, é que elas continuam intrinsecamente válidas para as altas frequências, ao passo que a faixa intermediária – onde o tamanho do objeto difrator é comparável ao comprimento de onda – tem sido pouco explorada. Adicionalmente, constata-se que é um tanto difícil estimar os limites máximos de erros inerentes a estes métodos, o que certamente é interessante para fins práticos.

Assim, muitas formulações empíricas (ou semi-analíticas) usadas hoje em dia por engenheiros necessitam ser checadas por soluções mais precisas. Além disso, o problema de cálculo de padrões de difração para geometrias mais complicadas ainda tem que ser resolvido.

O problema de difração por barreiras espessas é novamente abordado por ROUSSEAU (1984). Em seu trabalho, o autor examina o comportamento dos métodos empíricos propostos para estes problema por MAEKAWA (1968), KURZE (1974), e do método de PIERCE (1974), baseado na teoria geométrica de Keller. Rousseau conduz um estudo em câmara anecóica por modelos reduzidos para testar a validade destes métodos. O método de Pierce aparece como sendo o mais preciso deles. Rousseau também apresenta um esquema desenvolvido para calcular a atenuação produzida por uma barreira situada sobre uma superfície refletora, baseado nas teorias de fonte-imagem e de interferências, o qual é comparado com dados experimentais obtidos por modelos reduzidos, mostrando boa concordância entre ambos.

Os efeitos de refração no campo difratado por uma barreira cilíndrica são estudados por COLE III (1987), aplicando os resultados da teoria geométrica de Keller e examinando as soluções exatas e assintóticas. Ambas as soluções produziram resultados com tendências similares para uma barreira cilíndrica aquecida: mostram uma pressão acústica decrescente na zona de sombra para gradientes de velocidade negativos na superfície do cilindro. Isto ocorre porque os raios acústicos que incidem sobre o cilindro

aquecido experimentam uma curvatura devida a um obstáculo efetivamente maior, o que aumenta a zona de sombra atrás da barreira. Com o cilindro resfriado, acontece o contrário. Assim, a interpretação dos resultados em termos do campo acústico atrás de uma barreira semicilíndrica aquecida sobre um plano rígido indica que a refração pode ser usada para melhorar a *performance* de barreiras acústicas.

TAKAGI (1990) faz algumas observações quanto ao uso de métodos de engenharia para o cálculo da difração acústica. Seu trabalho traz à luz detalhes sobre a utilização correta do Diagrama de Maekawa. Numa segunda etapa do seu trabalho, Takagi propõe um novo método de cálculo para barreiras espessas e revisa os métodos de KURZE (1974) e de MAEKAWA (1968), comparando-os com os dados experimentais deste último. O método de Takagi mostrou ser mais preciso do que aqueles apresentados pelos outros autores. Adicionalmente, é sugerido um novo método para cálculo de barreiras finas, considerando a presença do piso, mas sua explanação é um tanto obscura, dificultando seu entendimento.

Visando facilitar a implementação de rotinas computacionais, YAMAMOTO e TAKAGI (1992) apresentam quatro expressões numéricas simples para o projeto de barreiras acústicas, obtidas através de regressões dos pontos coordenados do Diagrama de Maekawa. O desvio máximo entre os valores dados por estas expressões e aqueles lidos diretamente do diagrama ficou abaixo de 0,5 dB, para a faixa de números de Fresnel compreendidos entre  $-0,3 < N < 1,0$ . Este trabalho simplificou sobremaneira o uso da teoria de Maekawa por engenheiros e projetistas de barreiras acústicas.

Em 1993, um modelo simples de difração, que permite predizer com acurácia a perda por inserção de barreiras finitas, é desenvolvido por LAM e ROBERTS (1993); LAM (1994). O modelo foi baseado na teoria geométrica dos mínimos caminhos difratados. Isto é feito usando-se a curva empírica de MAEKAWA (1968) para estimar a atenuação associada a cada caminho de difração. Entretanto, ao invés de somarem-se as contribuições de energia das ondas difratadas, como sugerido por Maekawa, foram assumidas condições de fase e amplitude para cada caminho de onda difratada, a fim de obter-se uma nova e simples formulação. Extensivos modelos experimentais foram usados para verificar o novo modelo. A acurácia na predição dos padrões globais de perda por inserção em banda estreita apresentaram-se comparáveis aos métodos de equações integrais que, embora produzam melhores detalhes nas predições do campo sonoro, apresentam uma avaliação numérica complexa. O modelo apresentado pelos

autores é muito mais simples e tão preciso quanto outros métodos que aplicam as soluções geométricas usuais para cada caminho difratado, e representa uma melhora significativa sobre o método de soma de energia de Maekawa para cálculo em bandas de oitava.

EMBLETON (1996) atenta para as limitações inerentes às formulações de MAEKAWA (1968) e de KURZE e ANDERSON (1971), que não levam em conta o efeito provocado pela interferência entre os raios difratados pela barreira e os refletidos no piso do terreno. Segundo ele, quando se tem um piso rígido (tal como asfalto ou concreto) e a faixa de frequências está compreendida até mais ou menos 3 kHz (abaixo da qual está concentrada quase toda a energia significativa do ruído emitido por veículos rodoviários), há uma concordância relativamente boa entre os métodos de predição mais elaborados e os acima citados. Entretanto, para pisos recobertos com superfícies absorventes (tais como grama), o efeito da interferência é significativamente diferente e os esquemas acima passam a ser inadequados.

Todavia, as formulação de MAEKAWA (1968) e de 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.

A possibilidade de qualificar as barreiras através de um índice único é a proposta de PFRETZSCHNER et al. (1996). A partir de algoritmos baseados na teoria geométrica da difração, uma expressão simples é proposta para o cálculo de um índice descritivo (expresso em dB(A)), que correlacione unicamente as características de proteção da barreira com os parâmetros geométricos da fonte em relação à barreira. O índice seria baseado no valor assintótico da perda por inserção calculado através do algoritmo de KURZE e ANDERSON (1971) ou outros. Através deste valor assintótico, um simples índice numérico poderia ser usado para caracterizar a qualidade ou a capacidade de proteção de uma barreira, assim como o procedimento adequado para a sua determinação, o que, segundo os autores, produziria numerosos benefícios, já que seria a base de uma linguagem comum de referência para administrações, engenheiros e consumidores. Além disso, se mencionam aspectos metrológicos relacionados com o espectro de ruído de tráfego ponderado pela curva A (segundo a norma ISO 717/1) e a altura ótima para posicionar o microfone de recepção. Estudos também demonstraram que este índice pode ser bem aproximado pela medição em uma simples banda de 1/3 de oitava, em particular a banda centrada em 630 Hz.

Uma continuação deste trabalho é conduzida por SIMÓN et al. (1998). Desta vez, os autores levam em conta a influência das reflexões do piso no índice único. Como no caso da barreira semi-infinita, tratada no trabalho anterior, chegou-se à conclusão que existe um valor assintótico de perda por inserção, no qual baseia-se o índice proposto. O novo índice concordou bem com testes experimentais de barreiras em escala reduzida e real.

A redução de ruído por uma barreira com borda randômica é estudada por HO et al. (1997). Eles conduziram inicialmente um estudo em escala reduzida e, a partir deste, testes em tamanho natural sob condições de laboratório. Seus resultados demonstraram uma significativa melhora na redução de ruído por barreiras com borda randômica (exceto nas baixas frequências), comparando-os com os de uma barreira de mesma altura média. Uma expressão para a predição da perda por inserção produzida por estas barreiras foi desenvolvida, porém, afirmam os autores, ainda há necessidade de futuros trabalhos para se comprovar com mais segurança os benefícios por ora descobertos e para explicar a *performance* deficiente em baixas frequências.

MURADALI e FYFE (1998) expandiram a formulação de LAM e ROBERTS (1993) para incluir geometrias bidimensionais, a consideração de barreiras paralelas e a modelagem de pisos com impedância finita. Seus resultados foram validados por modelagens bidimensionais e tridimensionais usando o método de elementos de contorno, obtendo-se valores bastante próximos entre as duas técnicas. A conclusão principal dos autores foi que com estes métodos seria possível realizar predições de uma larga escala de problemas ambientais de ruído com rapidez e acurácia.

## 2.2 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, as quais incorporam conceitos apresentados

a) para cunhas semi-infinitas, por PIERCE (1974);  
e as consagradas expressões semi-empíricas baseadas no número de Fresnel, para barreiras semi-infinitas de



b) KURZE e ANDERSON (1971) e de

c) MAEKAWA (1968),

com o método fundamentado em teorias de fonte-imagem e interferência dado por ROUSSEAU (1984), o qual foi usado para considerar a presença do piso.

Todas estas formulações são dadas para modelos bidimensionais, isto é, 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 sobre as formulações analíticas, se faz necessária a definição das zonas de sombra e de brilho.

Considere-se uma linha reta partindo da fonte sonora e tangenciando a borda superior da barreira, como mostrado na Figura 2.1. 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 ângulo  $\Delta$ , mostrado na Figura 2.1. Este ângulo terá um valor de referência definido por

$$\Delta_{\text{ref}} = \text{arctg} \left( \frac{H - hf}{df} \right) \quad (2.1)$$

sendo  $H$  - a altura da barreira,

$hf$  - a altura da fonte em relação ao piso e,

$df$  - a distância da fonte até a barreira.

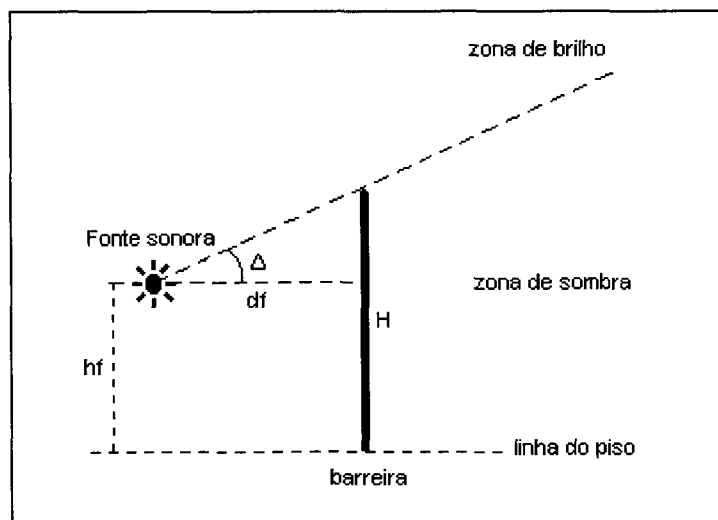


Figura 2.1 – Definição da zona de brilho e zona de sombra.

Para determinar em que zona se enquadra o receptor, utiliza-se a equação

$$\Delta_{\text{posição}} = \arctg\left(\frac{|hr - hf|}{df + dr}\right) \quad (2.2)$$

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

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

Existe uma zona de transição, cuja definição não é muito clara. Ela situa-se muito próxima à linha divisória entre a zona de brilho e a zona de sombra e geralmente é problemática no que diz respeito à predição do campo acústico difratado.

## 2.2.1 Teorias para barreiras semi-infinitas

### 2.2.1.1 Teoria de Pierce

Na década de 70, PIERCE (1974) apresenta uma teoria para difração em torno de cunhas rígidas semi-infinitas, que pode ser adaptada para o caso específico de uma barreira rígida fina, considerando o ângulo de cunha, definido na Figura 2.2,  $\beta = 2\pi$ .

O desenvolvimento analítico desta teoria é baseado no modelo idealizado de uma onda proveniente de uma fonte sonora pontual ou extensa, que incide em uma cunha rígida.

Uma versão da solução assintótica uniforme para o problema de cunhas, que é conveniente para predições numéricas, foi derivada em termos das funções auxiliares de Fresnel e interpretada dentro do espírito da teoria geométrica da difração de Keller. A derivação foi efetuada por meio de técnicas de variáveis complexas previamente empregadas por Pauli e é proveniente de uma generalização da solução integral exata desenvolvida por Sommerfeld, MacDonald e outros.

As fórmulas envolvidas nesta versão simplificada são apresentadas abaixo e a expressão final indica o *excesso de atenuação*, que é definido como a diferença entre o nível de pressão sonora em um ponto sob condições de campo livre e o nível de pressão

sonora neste mesmo ponto após a introdução de uma cunha ou plano semi-infinito. A Figura 2.2 ilustra os parâmetros geométricos envolvidos.

Sabe-se que no cálculo da redução por barreiras do ruído produzido por pequenas fontes, é conveniente comparar a amplitude do campo de pressão difratado com aquele esperado para uma distância equivalente  $L$ , medida a partir da fonte quando a barreira não está presente. A distância  $L$  é considerada como sendo a menor distância da fonte até o receptor através da borda da barreira, isto é, o mais curto caminho difratado.

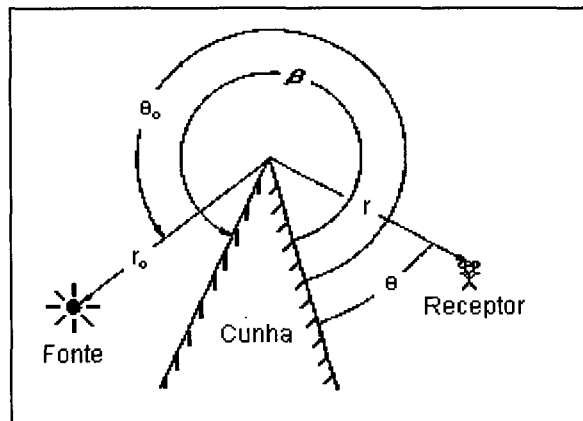


Figura 2.2 – Parâmetros para a teoria de Pierce (cunhas semi-infinitas).

O quadrado da razão entre estas quantidades, segundo PIERCE (1974), é dado por

$$\left| \frac{P_{\text{difratada}}}{P_{\text{direta}}} \right|^2 = \frac{1}{2} \left\{ [f(X_+) + f(X_-)]^2 + [g(X_+) + g(X_-)]^2 \right\} \quad (2.3)$$

tendo-se como notação geral de  $X_+$  e  $X_-$ ,

$$X_+ = \left( \frac{2 \cdot r \cdot r_0}{\lambda \cdot L} \right)^{\frac{1}{2}} \left| \frac{\cos\left(\frac{\pi^2}{\beta}\right) - \cos\left[\left(\frac{\pi}{\beta}\right)(\theta + \theta_0)\right]}{\left(\frac{\pi}{\beta}\right) \text{sen}\left(\frac{\pi^2}{\beta}\right)} \right| \quad (2.4)$$

$$X_- = \left( \frac{2 \cdot r \cdot r_0}{\lambda \cdot L} \right)^{\frac{1}{2}} \left| \frac{\cos\left(\frac{\pi^2}{\beta}\right) - \cos\left[\left(\frac{\pi}{\beta}\right)(\theta - \theta_0)\right]}{\left(\frac{\pi}{\beta}\right) \text{sen}\left(\frac{\pi^2}{\beta}\right)} \right| \quad (2.5)$$

sendo,

$$L = r + r_0 \quad (2.6)$$

$\beta$  é o ângulo da cunha (para o caso de uma barreira reta,  $\beta = 2\pi$ );

$(r_0, \theta_0)$  e  $(r, \theta)$  são as coordenadas cilíndricas para duas dimensões, da fonte e do receptor, respectivamente, como indicadas na Figura 2.2.

$\lambda$  é o comprimento de onda acústica.

As funções  $f(x)$  e  $g(x)$  são as funções auxiliares de Fresnel, definidas e tabuladas em diversos artigos e livros. Neste trabalho, foram utilizadas as definições dadas por GAUTSCHI (1965).

Para o caso de uma barreira rígida fina, ou seja,  $\beta = 2\pi$ , as equações (2.4) e (2.5) podem ser simplificadas para

$$X_+ = \left( \frac{2 \cdot r \cdot r_0}{\lambda \cdot L} \right)^{\frac{1}{2}} \left| -2 \cos \left( \frac{\theta + \theta_0}{2} \right) \right| \quad (2.7)$$

$$X_- = \left( \frac{2 \cdot r \cdot r_0}{\lambda \cdot L} \right)^{\frac{1}{2}} \left| -2 \cos \left( \frac{\theta - \theta_0}{2} \right) \right| \quad (2.8)$$

Os parâmetros de difração sobre uma cunha rígida, na direção  $\theta = \pi/2$ , com incidência normal do som e para  $d' \approx r + r_0$  são dados pela notação especial

$$X_+ = 2 \left[ \left( \frac{h}{\lambda} \right) \operatorname{tg} \left( \frac{\varphi}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.9)$$

$$X_- = 2 \left[ \left( \frac{h}{\lambda} \right) \operatorname{tg} \left( \frac{\varphi}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.10)$$

$$e \quad \frac{h}{\lambda} = \frac{r \cdot r_0}{\lambda \cdot d'} \cdot \operatorname{sen} \varphi \quad (\text{Parâmetro de Redfearn}) \quad (2.11)$$

Os termos  $h$  e  $\varphi$  das equações (2.9), (2.10) e (2.11), são definidos na Figura 2.3.

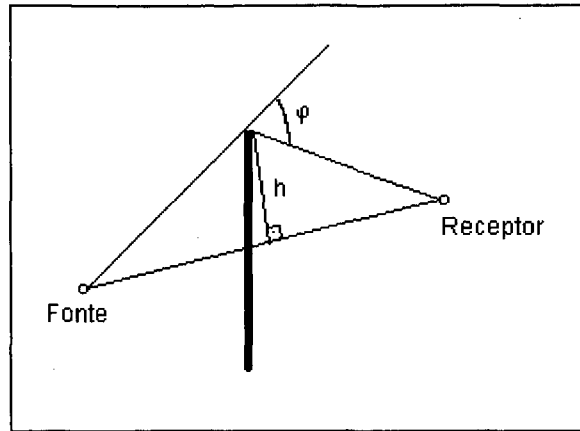


Figura 2.3 – Geometria para calcular o Parâmetro de Redfearn.

Alternativamente, pode-se calcular diretamente as funções auxiliares de Fresnel. Neste trabalho, calculou-se o valor exato de cada função, com o auxílio do computador, avaliando-se as seguintes expressões:

$$f(X) = \left[ \left( \frac{1}{2} \right) - S(X) \right] \cos \left( \left[ \frac{1}{2} \right] \pi X^2 \right) - \left[ \left( \frac{1}{2} \right) - C(X) \right] \sin \left( \left[ \frac{1}{2} \right] \pi X^2 \right) \quad (2.12)$$

$$g(X) = \left[ \left( \frac{1}{2} \right) - C(X) \right] \cos \left( \left[ \frac{1}{2} \right] \pi X^2 \right) + \left[ \left( \frac{1}{2} \right) - S(X) \right] \sin \left( \left[ \frac{1}{2} \right] \pi X^2 \right) \quad (2.13)$$

sendo as Integrais de Fresnel dadas por

$$C(X) = \int_0^X \cos \left( \left[ \frac{1}{2} \right] \pi t^2 \right) dt \quad (2.14)$$

$$S(X) = \int_0^X \sin \left( \left[ \frac{1}{2} \right] \pi t^2 \right) dt \quad (2.15)$$

Finalmente, pode-se calcular o excesso de atenuação, através da expressão

$$A_p = -10 \log \frac{1}{2} \{ [f(X_+) + f(X_-)]^2 + [g(X_+) + g(X_-)]^2 \} \quad (2.16)$$

ou

$$A_p = 3 - 10 \log \{ [f(X_+) + f(X_-)]^2 + [g(X_+) + g(X_-)]^2 \} \quad (2.17)$$

Certos cuidados, entretanto, devem ser tomados na aplicação das fórmulas matemáticas dadas aqui. Deve-se ter em mente que esta análise é baseada na idealização de uma barreira rígida semi-infinita. As barreiras existentes, todavia, podem ser absorventes e permitir a passagem de uma fração de energia. Também existe a necessidade de se estender a teoria acima para considerar a presença de um piso refletor ou absorvente.

Devem ser observadas algumas limitações para a geometria do modelo a ser calculado. Por exemplo, no que diz respeito à localização de fonte e receptor, aquela deve estar situada a uma distância  $r_0 \gg \lambda$  e este deve ter  $r \gg \lambda$ . Além disso, esta formulação é válida apenas para receptores localizados bem dentro da região de sombra da barreira.

Estes fatos não anulam a utilidade da presente teoria, mas tornam necessário o bom senso na interpretação de qualquer predição quantitativa.

### 2.2.1.2 Algoritmo de Kurze e Anderson

O campo sonoro difratado na região de sombra de uma placa rígida, fina e semi-infinita pode ser calculado pelo uso das equações integrais de Fresnel, como foi visto no método apresentado por Pierce. Entretanto, foram também introduzidas na literatura técnica algumas aproximações, baseadas em resultados teóricos e experimentais, as quais mostraram-se mais práticas.

Um método bastante difundido entre projetistas e consultores é o devido a KURZE e ANDERSON (1971). Este método é baseado em aproximações da teoria geométrica da difração de Keller e em resultados experimentais apresentados por Rathe. Em seu desenvolvimento foi levada em conta a incidência oblíqua do som contra a barreira e incluída a 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-empírico emprega apenas uma variável: o conhecido número de Fresnel, dado por,

$$N = \frac{2\delta}{\lambda} \quad (2.18)$$

sendo  $\delta$  a diferença de percurso, que é definida com a notação da Figura 2.4 como,

$$\delta = (A + B - d) \quad (2.19)$$

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

O resultado das aproximações introduzidas por KURZE e ANDERSON (1971) é dado pela seguinte expressão para o excesso de atenuação,

$$A_{K-A} = 5 + 20 \log \left( \frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh \sqrt{2\pi N}} \right) \quad (2.20)$$

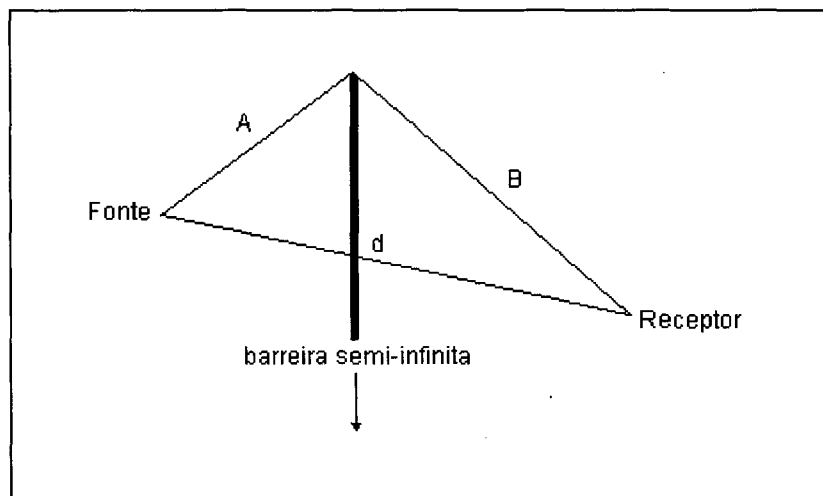


Figura 2.4 – Parâmetros para o Algoritmo de Kurze & Anderson (barreiras semi-infinitas).

A atenuação calculada pela equação (2.20) é consistente com os dados de Rathe para valores de  $N < 12,5$ , com um desvio máximo de apenas 1 dB. Se for assumido que  $A_{K-A} = 0$  para  $N < -0,2$ , a equação (2.20) pode ser igualmente empregada para o cálculo da perda por inserção de ondas sonoras tangentes ou passando logo acima do topo da barreira. Comparando os resultados dos cálculos com os dados experimentais de Maekawa, KURZE e ANDERSON (1971) observaram uma boa aproximação, com diferenças máximas da ordem de 1 dB. Contudo, para um valor de  $N > 15$ , a curva produzida pela equação (2.20) segue aumentando, o que, na prática, é quase impossível

de ser conseguido (é mencionado um limite prático de 24 dB (KURZE e BERANEK, 1971)).

Também devem ser feitas algumas observações quanto ao uso do algoritmo de Kurze e Anderson. Em muitos casos, segundo KURZE e ANDERSON (1971), o excesso de atenuação calculado com a equação (2.20) produz uma estimativa conservativa, porém, são esperados valores mais altos de atenuação para barreiras espessas ou prédios, onde a dupla difração nas duas bordas torna-se significativa. Cabe salientar que, assim como a teoria apresentada por Pierce, o algoritmo de Kurze e Anderson necessita ser adaptado para a introdução dos efeitos de reflexão do som pelo piso.

Para este propósito, utilizam-se as teorias de fonte-imagem e interferência, as quais são apresentadas na Seção 2.2.2.

### 2.2.1.3 Método de Maekawa

Talvez o mais conhecido método para projeto de barreiras acústicas, a formulação semi-empírica devida a MAEKAWA (1968), é baseado na observação de resultados experimentais de uma barreira construída e testada sob condições de campo livre.

Embora seja uma aproximação para barreiras semi-infinitas, seu emprego para o projeto de barreiras reais é amplamente difundido, sendo ignoradas, porém, as interferências ocorridas pela reflexão das ondas sonoras pelo piso.

MAEKAWA (1968) apresentou sua formulação através de um ábaco, na forma de uma simples linha reta ajustada para dar a atenuação em termos do número de Fresnel. Este ábaco é conhecido mundialmente como Diagrama de Maekawa.

Com o objetivo de facilitar a implementação de rotinas computacionais empregando-se o Diagrama de Maekawa, YAMAMOTO e TAKAGI (1992) derivaram quatro expressões numéricas baseadas neste diagrama de projeto. As expressões resultantes são relativamente simples e a acurácia da aproximação, segundo os autores, foi bastante satisfatória, apresentando desvios não maiores do que 0,3 dB em relação à reta original dada por Maekawa.

As diferenças entre as quatro expressões são evidenciadas pela complexidade e pelo número de equações necessárias para cada uma cobrir a faixa de números de



Fresnel expressas no Diagrama de Maekawa. Assim, por exemplo, uma das expressões descreve todo o diagrama empregando uma única e relativamente complicada expressão, enquanto que as outras são construídas considerando-se três faixas de número de Fresnel dentro do diagrama, o que resulta em expressões mais simples.

Na escolha da expressão a ser empregada no presente trabalho, foram levadas em conta a simplicidade das suas equações componentes e a acurácia das expressões em relação aos dados originais do Diagrama de Maekawa.

Com base nestes parâmetros, a expressão selecionada para este trabalho é dada por,

$$A_M = \begin{cases} 10 \cdot \log(N) + 13 & \text{para } N > 1 \\ 5 + 8 \cdot N |N|^{-0,55 - 0,143|N|} & \text{para } -0,3 < N < 1 \\ 0 & \text{para } N < -0,3 \end{cases} \quad (2.21)$$

na qual  $N$  é o número de Fresnel, definido na equação (2.18).

Observa-se, na equação (2.21), que tanto a região de sombra ( $N > 0$ ), quanto a região iluminada ( $N < 0$ ), são consideradas na análise.

Conforme já comentado, os valores de atenuação calculados por esta expressão são para condições de campo livre, sendo necessário, portanto, combiná-la com teorias de fonte imagem e interferência, para serem considerados no resultado final, os efeitos de interferência introduzidos pelo piso rígido. Esta adaptação é explanada na seção seguinte.

## 2.2.2 Teorias de fonte-imagem e interferência

Conforme frisado na seção anterior, as aproximações dadas por PIERCE (1974), por KURZE e ANDERSON (1971) e por MAEKAWA (1968)<sup>2</sup> não incluem a interferência causada pelo piso sobre o qual é construída a barreira.

Segundo ROUSSEAU (1984), com uma fonte sonora situada próxima a uma superfície refletora (com coeficiente de reflexão idealmente igual à unidade), a

<sup>2</sup> Embora a expressão numérica tenha sido dada por YAMAMOTO e TAKAGI (1992), a teoria é derivada de MAEKAWA (1968) e, por este motivo, doravante a mesma será referida por este nome.

superfície do piso pode ser substituída por uma equivalente fonte-imagem  $S'$ , simétrica a  $S$  em relação à superfície. A configuração é, então, equivalente a duas fontes idênticas  $S$  e  $S'$ , localizadas como mostrado na Figura 2.5. Esta técnica pode ser justificada pelo fato de que a velocidade normal é cancelada em uma superfície rígida.

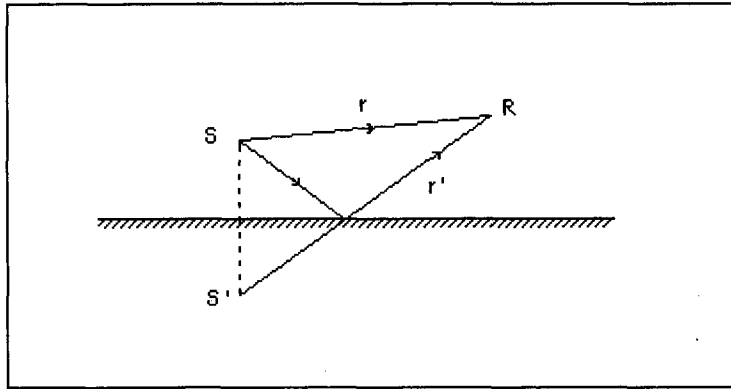


Figura 2.5 – Construção da fonte-imagem.

A expressão analítica para o nível de pressão sonora em um ponto ROUSSEAU (1984), pode ser calculada pela observação que, devido ao processo de interferência, o valor da pressão sonora RMS pode ser expresso por

$$p_{RMS}^2 = p_{1RMS}^2 + p_{2RMS}^2 + 2p_{1RMS}p_{2RMS}I(r, r') \quad (2.22)$$

na qual,

$p_{1RMS}$  e  $p_{2RMS}$  são os valores de pressão sonora RMS no ponto R, produzidos respectivamente por S e  $S'$ .

$I(r, r')$  é uma função de interferência dependente do sinal da fonte,

$r$  é a distância em linha reta entre fonte sonora e receptor; e  $r'$  é a distância em linha reta entre a imagem da fonte sonora e o receptor. Estes valores são definidos na Figura 2.5.

$$I(r, r') = \cos[k(r - r')] \quad , \quad \text{para um sinal senoidal} \quad (2.23)$$

$$I(r, r') = \frac{\text{sen}[k_2(r - r')] - \text{sen}[k_1(r - r')]}{k_2(r - r') - k_1(r - r')} \quad , \quad \text{para banda de ruído branco,} \quad (2.24)$$

com,

$$\begin{aligned} k &= 2\pi/\lambda \\ k_1 &= 2\pi/\lambda_1 \\ k_2 &= 2\pi/\lambda_2 \end{aligned} \tag{2.25}$$

$\lambda_1$  e  $\lambda_2$  são os comprimentos de onda correspondentes às frequências extremas da banda de ruído branco.

### 2.2.3 Teoria utilizada: barreira sobre superfície refletora

Usando-se as teorias de fonte-imagem e interferência, comentadas na Seção 2.2.2, pode-se construir um método de cálculo da atenuação sonora para tal situação, afirma ROUSSEAU (1984).

A superfície é substituída por uma imagem da fonte e uma imagem fictícia da barreira, simétricas e idênticas à fonte e à barreira, como mostrado na Figura 2.6.

As ondas sonoras que circundam a barreira, seguem quatro diferentes caminhos:

- contornando a barreira pelo lado superior, vindas da fonte S;
- contornando a barreira pelo lado superior, vindas da fonte S';
- contornando a barreira fictícia pelo lado inferior, vindas da fonte S;
- contornando a barreira fictícia pelo lado inferior, vinda da fonte S'.

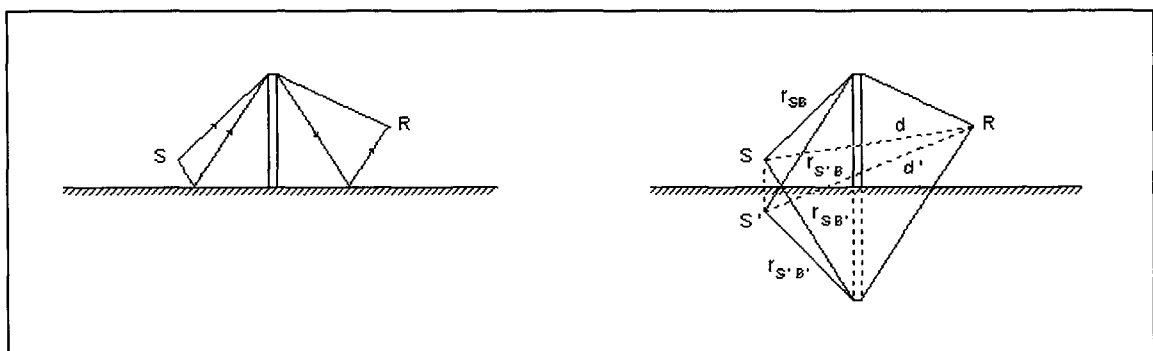


Figura 2.6 – Barreira sobre um piso refletor. Construção da fonte-imagem e barreira-imagem.

Combinando-se as pressões sonoras correspondentes a estes quatro diferentes percursos das ondas sonoras, pode-se avaliar a atenuação produzida pela barreira. Este cálculo requer duas etapas.

Primeiro, é necessário conhecer-se o nível de pressão sonora com a barreira ausente.

a) *Determinação do nível de pressão sonora com a barreira ausente:*

Partindo-se de que  $p_{0RMS}$  é a pressão sonora RMS no ponto receptor em situação de campo livre (sem piso e sem barreira), tem-se,

$$L_0 = 20 \log(p_{0RMS}) \quad (2.26)$$

logo, pelo caminho inverso,

$$p_{0RMS} = 10^{\frac{L_0}{20}} = p_{1RMS} \quad (2.27)$$

A pressão sonora  $p_{1RMS}$  tem o mesmo valor da pressão  $p_{0RMS}$ , pois é devida à onda sonora vinda diretamente da fonte, que não sofre reflexão alguma.

Já pressão sonora  $p_{2RMS}$ , devida à onda refletida no piso rígido, é dada por,

$$p_{2RMS} = 10^{\frac{L_0}{20}} \left( \frac{d}{d'} \right) \quad (2.28)$$

sendo  $d$  e  $d'$  dados nas equações (2.11) e (2.19), respectivamente.

Substituindo-se as pressões acima na equação (2.22) chega-se a,

$$p_{RMS}^2 = \left( 10^{\frac{L_0}{20}} \right)^2 + \left[ 10^{\frac{L_0}{20}} \left( \frac{d}{d'} \right) \right]^2 + 2 \cdot \left[ 10^{\frac{L_0}{20}} \cdot 10^{\frac{L_0}{20}} \left( \frac{d}{d'} \right) \right] I(d, d') \quad (2.29)$$

$$p_{RMS}^2 = 10^{\frac{L_0}{10}} + 10^{\frac{L_0}{10}} \left( \frac{d}{d'} \right)^2 + 2 \cdot \left[ 10^{\frac{L_0+L_0}{20}} \left( \frac{d}{d'} \right) \right] I(d, d') \quad (2.30)$$

$$p_{RMS}^2 = 10^{\frac{L_0}{10}} + 10^{\frac{L_0}{10}} \left( \frac{d}{d'} \right)^2 + 2 \cdot \left[ 10^{\frac{2L_0}{20}} \left( \frac{d}{d'} \right) \right] I(d, d') \quad (2.31)$$

$$p_{\text{RMS}}^2 = 10^{\frac{L_0}{10}} + 10^{\frac{L_0}{10}} \left( \frac{d}{d'} \right)^2 + 2 \cdot 10^{\frac{L_0}{10}} \left( \frac{d}{d'} \right) I(d, d') \quad (2.32)$$

$$p_{\text{RMS}}^2 = 10^{\frac{L_0}{10}} \left[ 1 + \left( \frac{d}{d'} \right)^2 + 2 \cdot \left( \frac{d}{d'} \right) I(d, d') \right] \quad (2.33)$$

O nível de pressão sonora no ponto R, com a barreira ausente é, então,

$$10 \cdot \log \{ p_{\text{RMS}}^2 \} = 10 \cdot \log \left\{ 10^{\frac{L_0}{10}} \left[ 1 + \left( \frac{d}{d'} \right)^2 + 2 \cdot \left( \frac{d}{d'} \right) I(d, d') \right] \right\} \quad (2.34)$$

$$L_{\text{sem}} = 10 \cdot \log \left( 10^{\frac{L_0}{10}} \right) + 10 \cdot \log \left[ 1 + \left( \frac{d}{d'} \right)^2 + 2 \cdot \left( \frac{d}{d'} \right) I(d, d') \right] \quad (2.35)$$

e a expressão final será,

$$L_{\text{sem}} = L_0 + 10 \log \left[ 1 + \left( \frac{d}{d'} \right)^2 + 2 \cdot \left( \frac{d}{d'} \right) \cdot I(d, d') \right] \quad (2.36)$$

Numa segunda etapa, obtém-se o nível de pressão sonora com a barreira presente.

*b) Determinação do nível de pressão sonora com a barreira presente:*

O nível de pressão sonora com a barreira pode ser calculado através da consideração de quatro processos de difração, um para cada caminho em torno da barreira. A atenuação e o valor RMS da correspondente pressão sonora são, então, avaliados para cada configuração,

- fonte S + barreira: atenuação  $A_{sB}$

$$p_{\text{IRMS}} = 10^{(L_0 - A_{sB})/20} \quad (2.37)$$

- imagem da fonte S' + barreira: atenuação  $A_{s'B}$

$$p_{2RMS} = 10^{(L_0 - A_{s'B})/20} (d/d')$$
 (2.38)

- fonte S + barreira fictícia: atenuação  $A_{s'B}$

$$p_{3RMS} = 10^{(L_0 - A_{s'B'})/20}$$
 (2.39)

- imagem da fonte S' = barreira fictícia: atenuação  $A_{s'B'}$

$$p_{4RMS} = 10^{(L_0 - A_{s'B'})/20} (d/d')$$
 (2.40)

Combinando-se estas quatro pressões de acordo com a teoria de interferência, chega-se a uma expressão para o nível de pressão sonora com a barreira presente, dada por,

$$\begin{aligned} p_{comRMS}^2 = & p_{1RMS}^2 + p_{2RMS}^2 + p_{3RMS}^2 + p_{4RMS}^2 + 2[p_{1RMS} + p_{3RMS} \cdot I(r_{sB}, r_{sB'}) + \\ & + p_{1RMS} + p_{2RMS} \cdot I(r_{sB}, r_{sB}) + p_{1RMS} + p_{4RMS} \cdot I(r_{sB}, r_{sB'}) + \\ & + p_{2RMS} + p_{3RMS} \cdot I(r_{sB}, r_{sB'}) + p_{3RMS} + p_{4RMS} \cdot I(r_{sB}, r_{sB'}) + \\ & + p_{2RMS} + p_{4RMS} \cdot I(r_{sB}, r_{sB'})] \end{aligned}$$
 (2.41)

Substituindo-se os valores das pressões dados pelas equações (2.37) a (2.40), chega-se a,

$$\begin{aligned} p_{comRMS}^2 = & \left( 10^{\frac{L_0 - A_{sB}}{20}} \right)^2 + \left( 10^{\frac{L_0 - A_{s'B}}{20}} \cdot \left( \frac{d}{d'} \right) \right)^2 + \left( 10^{\frac{L_0 - A_{sB'}}{20}} \right)^2 + \\ & + \left( 10^{\frac{L_0 - A_{s'B'}}{20}} \cdot \left( \frac{d}{d'} \right) \right)^2 + 2 \cdot \left[ 10^{\frac{L_0 - A_{sB}}{20}} \cdot 10^{\frac{L_0 - A_{sB'}}{20}} \cdot I(r_{sB}, r_{sB'}) + \right. \\ & + 10^{\frac{L_0 - A_{sB}}{20}} \cdot 10^{\frac{L_0 - A_{s'B}}{20}} \cdot \left( \frac{d}{d'} \right) \cdot I(r_{sB}, r_{sB}) + \\ & + 10^{\frac{L_0 - A_{sB}}{20}} \cdot 10^{\frac{L_0 - A_{s'B'}}{20}} \cdot \left( \frac{d}{d'} \right) \cdot I(r_{sB}, r_{sB'}) + \\ & \left. + 10^{\frac{L_0 - A_{s'B}}{20}} \cdot \left( \frac{d}{d'} \right) \cdot 10^{\frac{L_0 - A_{sB'}}{20}} \cdot I(r_{sB}, r_{sB'}) + \right] \end{aligned}$$
 (2.42)

$$\begin{aligned}
 &+ 10^{\frac{L_0 - A_{sB'}}{20}} \cdot 10^{\frac{L_0 - A_{sB'}}{20}} \left( \frac{d}{d'} \right) I(r_{sB}, r_{sB'}) + \\
 &+ 10^{\frac{L_0 - A_{sB'}}{20}} \left( \frac{d}{d'} \right) \cdot 10^{\frac{L_0 - A_{sB'}}{20}} \left( \frac{d}{d'} \right) I(r_{sB}, r_{sB'}) \Big]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p_{\text{comRMS}}^2 = & 10^{\frac{L_0 - A_{sB}}{10}} \cdot 10^{\frac{L_0 - A_{sB'}}{10}} \left( \frac{d}{d'} \right)^2 + 10^{\frac{L_0 - A_{sB'}}{10}} + 10^{\frac{L_0 - A_{sB'}}{10}} \left( \frac{d}{d'} \right)^2 + \\
 & + 2 \left[ 10^{\frac{2L_0 - A_{sB} - A_{sB'}}{20}} I(r_{sB}, r_{sB'}) + 10^{\frac{2L_0 - A_{sB} - A_{sB'}}{20}} \left( \frac{d}{d'} \right) I(r_{sB}, r_{sB'}) + \right. \\
 & + 10^{\frac{2L_0 - A_{sB} - A_{sB'}}{20}} \left( \frac{d}{d'} \right) I(r_{sB}, r_{sB'}) + 10^{\frac{2L_0 - A_{sB} - A_{sB'}}{20}} \left( \frac{d}{d'} \right) I(r_{sB}, r_{sB'}) + \quad (2.43) \\
 & \left. + 10^{\frac{2L_0 - A_{sB} - A_{sB'}}{20}} \left( \frac{d}{d'} \right) I(r_{sB}, r_{sB'}) + 10^{\frac{2L_0 - A_{sB} - A_{sB'}}{20}} \left( \frac{d}{d'} \right)^2 I(r_{sB}, r_{sB'}) \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p_{\text{comRMS}}^2 = & 10^{\frac{L_0}{10}} \left\{ 10^{\frac{-A_{sB}}{10}} + 10^{\frac{-A_{sB}}{10}} \left( \frac{d}{d'} \right)^2 + 10^{\frac{-A_{sB'}}{10}} + 10^{\frac{-A_{sB'}}{10}} \left( \frac{d}{d'} \right)^2 + \right. \\
 & + 2 \left[ 10^{\frac{(-A_{sB} - A_{sB'})}{20}} I(r_{sB}, r_{sB'}) + 10^{\frac{(-A_{sB} - A_{sB'})}{20}} \left( \frac{d}{d'} \right) I(r_{sB}, r_{sB'}) + \quad (2.44) \\
 & + 10^{\frac{(-A_{sB} - A_{sB'})}{20}} \left( \frac{d}{d'} \right) I(r_{sB}, r_{sB'}) + 10^{\frac{(-A_{sB'} - A_{sB'})}{20}} \left( \frac{d}{d'} \right) I(r_{sB}, r_{sB'}) + \right. \\
 & \left. + 10^{\frac{(-A_{sB'} - A_{sB'})}{20}} \left( \frac{d}{d'} \right) I(r_{sB}, r_{sB'}) + 10^{\frac{(-A_{sB'} - A_{sB'})}{20}} \left( \frac{d}{d'} \right)^2 I(r_{sB}, r_{sB'}) \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{\text{comRMS}}^2 = & 10^{\frac{L_0}{10}} \left\{ 10^{\frac{-A_{sB}}{10}} + 10^{\frac{-A_{sB'}}{10}} + \left(\frac{d}{d'}\right)^2 \left[ 10^{\frac{-A_{s'B}}{10}} + 10^{\frac{-A_{s'B'}}{10}} \right] + \right. \\
 & + 2 \cdot 10^{\frac{(-A_{sB}-A_{sB'})}{20}} \cdot I(r_{sB}, r_{sB'}) + 2 \cdot \left(\frac{d}{d'}\right) \left[ 10^{\frac{(-A_{sB}-A_{s'B'})}{20}} \cdot I(r_{sB}, r_{s'B}) + \right. \\
 & + 10^{\frac{(-A_{sB}-A_{s'B'})}{20}} \cdot I(r_{sB}, r_{s'B'}) + 10^{\frac{(-A_{s'B}-A_{sB'})}{20}} \cdot I(r_{s'B}, r_{sB}) + \\
 & \left. \left. + 10^{\frac{(-A_{s'B}-A_{s'B'})}{20}} \cdot I(r_{s'B}, r_{s'B'}) \right] + 2 \cdot \left(\frac{d}{d'}\right)^2 10^{\frac{(-A_{s'B}-A_{s'B'})}{20}} \cdot I(r_{s'B}, r_{s'B'}) \right\} \quad (2.45)
 \end{aligned}$$

O nível de pressão sonora com a barreira, então, será,

$$\begin{aligned}
 10 \cdot \log(p_{\text{comRMS}}^2) = & 10 \cdot \log \left\{ 10^{\frac{L_0}{10}} \left[ 10^{\frac{-A_{sB}}{10}} + 10^{\frac{-A_{sB'}}{10}} + \left(\frac{d}{d'}\right)^2 \left[ 10^{\frac{-A_{s'B}}{10}} + 10^{\frac{-A_{s'B'}}{10}} \right] + \right. \right. \\
 & + 2 \cdot 10^{\frac{(-A_{sB}-A_{sB'})}{20}} \cdot I(r_{sB}, r_{sB'}) + 2 \cdot \left(\frac{d}{d'}\right) \left[ 10^{\frac{(-A_{sB}-A_{s'B'})}{20}} \cdot I(r_{sB}, r_{s'B}) + \right. \\
 & + 10^{\frac{(-A_{sB}-A_{s'B'})}{20}} \cdot I(r_{sB}, r_{s'B'}) + 10^{\frac{(-A_{s'B}-A_{sB'})}{20}} \cdot I(r_{s'B}, r_{sB}) + \\
 & \left. \left. + 10^{\frac{(-A_{s'B}-A_{s'B'})}{20}} \cdot I(r_{s'B}, r_{s'B'}) \right] + 2 \cdot \left(\frac{d}{d'}\right)^2 10^{\frac{(-A_{s'B}-A_{s'B'})}{20}} \cdot I(r_{s'B}, r_{s'B'}) \right\} \quad (2.46)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 L_{\text{com}} = & L_0 + 10 \cdot \log \left\{ 10^{\frac{-A_{sB}}{10}} + 10^{\frac{-A_{sB'}}{10}} + \left(\frac{d}{d'}\right)^2 \left[ 10^{\frac{-A_{s'B}}{10}} + 10^{\frac{-A_{s'B'}}{10}} \right] + \right. \\
 & + 2 \cdot 10^{\frac{(-A_{sB}-A_{sB'})}{20}} \cdot I(r_{sB}, r_{sB'}) + 2 \cdot \left(\frac{d}{d'}\right) \left[ 10^{\frac{(-A_{sB}-A_{s'B'})}{20}} \cdot I(r_{sB}, r_{s'B}) + \right. \\
 & + 10^{\frac{(-A_{sB}-A_{s'B'})}{20}} \cdot I(r_{sB}, r_{s'B'}) + 10^{\frac{(-A_{s'B}-A_{sB'})}{20}} \cdot I(r_{s'B}, r_{sB}) + \\
 & \left. \left. + 10^{\frac{(-A_{s'B}-A_{s'B'})}{20}} \cdot I(r_{s'B}, r_{s'B'}) \right] + 2 \cdot \left(\frac{d}{d'}\right)^2 10^{\frac{(-A_{s'B}-A_{s'B'})}{20}} \cdot I(r_{s'B}, r_{s'B'}) \right\} \quad (2.47)
 \end{aligned}$$



Assim, a perda por inserção, definida como a diferença entre o nível de pressão sonora sem a barreira ( $L_{sem}$ ) e o nível de pressão sonora com a barreira presente ( $L_{com}$ ), será dada por,

$$PI = L_{sem} - L_{com} \quad [dB] \quad (2.48)$$

$$PI = \text{equação (2.36)} - \text{equação (2.47)} \quad (2.49)$$

Neste caso, os níveis  $L_0$  se anulam, restando o segundo termo de cada equação, isto é, as partes que envolvem o logaritmo. Desta forma, tem-se,

$$PI = 10 \cdot \log \{ \text{termo entre colchetes eq. (2.36)} \} - 10 \cdot \log \{ \text{termo entre chaves eq. (2.47)} \}$$

ou

$$PI = 10 \cdot \log \left( \frac{\text{termo entre colchetes da eq. (2.36)}}{\text{termo entre chaves da eq. (2.47)}} \right) \quad (2.50)$$

Explicitamente, esta relação para a perda por inserção é expressa por,

$$PI = 10 \cdot \log \frac{1 + \left(\frac{d}{d'}\right)^2 + 2\left(\frac{d}{d'}\right) \cdot I(d, d')}{D} \quad (2.51)$$

para a qual o denominador é dado por,

$$\begin{aligned} D = & 10^{-A_{sB}/10} + 10^{-A_{sB'}/10} + \left(\frac{d}{d'}\right)^2 \left[ 10^{-A_{sB}/10} + 10^{-A_{sB'}/10} \right] \\ & + 2 \cdot 10^{[-A_{sB} - A_{sB'}]/20} \cdot I(r_{sB}, r_{sB'}) \\ & + 2 \cdot \left(\frac{d}{d'}\right) \left[ 10^{[-A_{sB} - A_{sB'}]/20} \cdot I(r_{sB}, r_{sB'}) \right] \\ & + 10^{[-A_{sB} - A_{sB'}]/20} \cdot I(r_{sB}, r_{sB'}) \\ & + 10^{[-A_{sB'} - A_{sB}]/20} \cdot I(r_{sB'}, r_{sB}) \\ & + 10^{[-A_{sB'} - A_{sB}]/20} \cdot I(r_{sB'}, r_{sB}) \end{aligned} \quad (2.52)$$

$$+ 2 \left( \frac{d}{d'} \right)^2 \cdot 10^{[-A_{s'B} - A_{s'B'}] / 20} \cdot I(\mathbf{r}_{s'B}, \mathbf{r}_{s'B'})$$

na qual,  $A_{sB}$ ,  $A_{s'B}$ ,  $A_{sB'}$  e  $A_{s'B'}$  são os excessos de atenuação calculados pela teoria de Pierce, pelo método de Kurze & Anderson ou pela formulação de Maekawa, para cada uma das configurações definidas nas equações (2.37), (2.38), (2.39) e (2.40), respectivamente.

Esta expressão inclui seis funções de interferência e pode ser facilmente calculada quando forem conhecidas as posições da fonte e barreira.

### 2.3 IMPLEMENTAÇÃO DE ROTINAS DE CÁLCULO

As expressões envolvidas no cálculo da atenuação produzida por barreiras acústicas, embora sejam simples de avaliar, são numerosas e repetitivas sendo, portanto, trabalhosas se forem calculadas *manualmente*.

Além disso, são muito sensíveis a *arredondamentos* matemáticos, produzindo resultados diversos dos corretos quando não considerados todos os algarismos significativos. Desta forma, é recomendável a implementação de rotinas computacionais para as teorias, evitando-se erros de *arredondamento* e agilizando-se o processo de obtenção de resultados.

Foram, então, implementadas rotinas computacionais para as formulações analíticas mistas de Pierce/Rousseaux, Kurze & Anderson/Rousseaux e Maekawa/Rousseaux utilizando-se o *software* Mathcad 7 Professional (MathSoft, Inc.).

Para o método de Pierce/Rousseaux as expressões implementadas foram as equações (2.4) a (2.16), (2.23), (2.51) e (2.52), além de relações para automatizar o cálculo dos aspectos geométricos envolvidos.

O algoritmo de Kurze & Anderson/Rousseaux teve automatizadas, além dos parâmetros geométricos inerentes ao método, as equações (2.18) a (2.20), (2.51) e (2.52).

Já na implementação das rotinas computacionais da formulação de Maekawa/Rousseaux, foram utilizadas as equações (2.18), (2.19), (2.21), (2.51) e (2.52), além daquelas envolvidas no cálculo das grandezas geométricas do modelo.

As características geométricas do modelo calculado foram planejadas tendo em vista as limitações impostas pelos ensaios experimentais para validação, os quais seriam realizados dentro da câmara semi-aneecóica. Assim, em virtude das dimensões câmara utilizada e, além disso, visando limitar-se o número de variáveis de cálculo, foram mantidos fixos alguns parâmetros geométricos.

Embora o objetivo do trabalho seja avaliar os métodos de predição da atenuação da barreira na zona de sombra acústica foram definidos, também, alguns pontos na zona de brilho, com a finalidade de estudar-se o comportamento destes métodos para pontos na zona de transição e na zona de brilho.

Os parâmetros fixos, correspondentes ao semi-espço de emissão e dimensões da barreira<sup>3</sup>, utilizados para a entrada de dados foram,

Altura da barreira	$H = 1,00 \text{ m}$
Distância da fonte à barreira	$df = 1,00 \text{ m}$
Altura da fonte sonora	$hf = 0,23 \text{ m}$

Os dados de entrada variáveis, correspondentes ao semi-espço de recepção, foram,

distância do receptor à barreira	$dr = 0,50 - 1,00 - 1,50 - 2,00 - 2,50 \text{ m};$
altura do receptor	$hr = 0,01 - 0,25 - 0,50 - 1,00 - 1,50 \text{ m}.$

Na Tabela 2.1 é dada a localização dos 25 pontos de recepção, resultantes da combinação entre as diversas distâncias e alturas do receptor, descritas anteriormente, e na Figura 2.7 é dado um esquema gráfico para estas posições além da posição da fonte sonora.

A Figura 2.8 mostra esquematicamente o modelo geométrico utilizado para o cálculo analítico da atenuação, definindo os semi-espços de emissão e de recepção.

As frequências utilizadas nos cálculos analíticos foram as frequências centrais de bandas de largura constante de 8 Hz, dadas no Apêndice 2.3. A opção pelo uso deste “passo de cálculo” é justificada pelo melhor detalhamento do espectro que produz, quando comparado com “passos de cálculo” mais espaçados (frequências centrais de 1/24 de oitava ou de 1/3 de oitava).

---

<sup>3</sup> É dada somente a altura da barreira, uma vez que sua espessura não é levada em conta nos cálculos analíticos da atenuação. O comprimento da barreira é considerado infinito, uma vez que as formulações analíticas consideram modelos bidimensionais, conforme mencionado na Seção 2.2.1.

Tabela 2.1 – Localização pontos de recepção utilizados.

	Ponto de recepção	Distância da barreira (m)	Altura em relação ao piso (m)
<b>Zona de Sombra</b>	01	0,50	0,01
	02	1,00	0,01
	03	1,50	0,01
	04	2,00	0,01
	05	2,50	0,01
	06	0,50	0,25
	07	1,00	0,25
	08	1,50	0,25
	09	2,00	0,25
	10	2,50	0,25
	11	0,50	0,50
	12	1,00	0,50
	13	1,50	0,50
	14	2,00	0,50
	15	2,50	0,50
	16	0,50	1,00
	17	1,00	1,00
	18	1,50	1,00
	19	2,00	1,00
	20	2,50	1,00
<b>Zona de Brilho</b>	21	0,50	1,50
<b>Zona de Transição</b>	22	1,00	1,50
	23	1,50	1,50
	24	2,00	1,50
	25	2,50	1,50

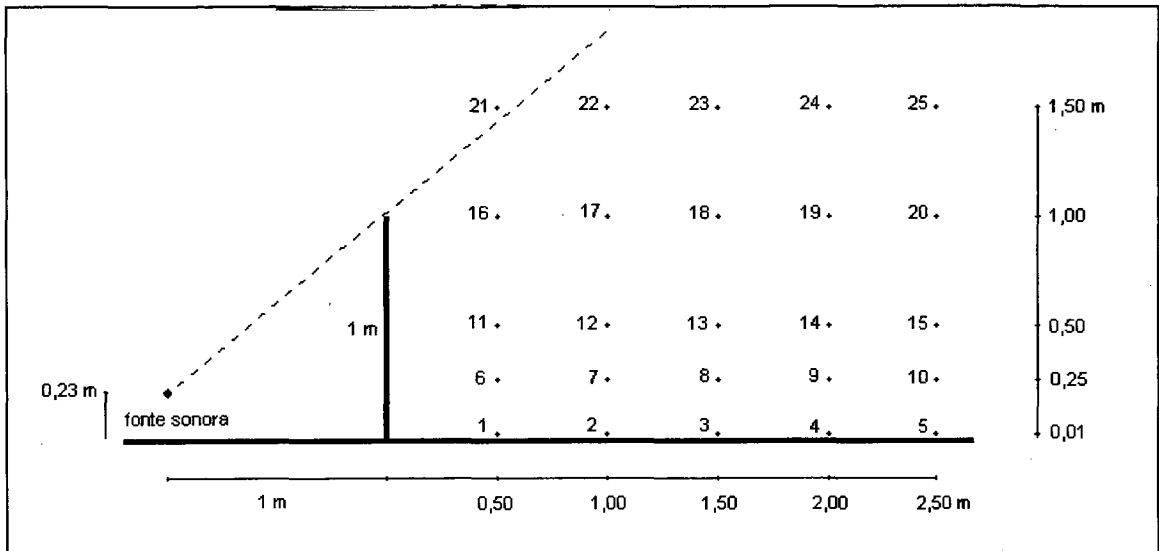


Figura 2.7 – Posições da fonte e pontos de recepção da configuração utilizada.

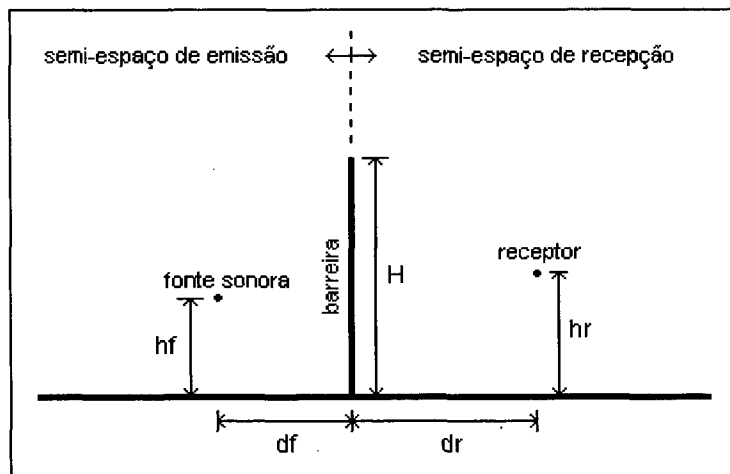


Figura 2.8 – Características geométricas do modelo de barreira.

## 2.4 RESULTADOS

A apresentação dos resultados dos cálculos analíticos será feita em duas etapas. Na primeira, serão analisadas as diferenças entre os resultados calculados pelas três formulações utilizadas e, a seguir, as curvas serão agrupadas segundo certos critérios e o comportamento de cada grupo de curvas será, então, analisado.

### 2.4.1 Diferenças entre as formulações empregadas

Como exposto nas Seções 2.2 e 2.3, a atenuação<sup>4</sup> fornecida pela barreira estudada neste trabalho foi calculada pelas formulações analíticas mistas de Pierce / Rousseaux, (doravante referida simplesmente como formulação de Pierce), de Kurze & Anderson / Rousseaux (doravante chamada formulação de Kurze & Anderson), e de Maekawa / Rousseaux (idem, para Maekawa).

Os resultados das predições apresentaram, de uma forma geral, curvas muito parecidas. A similaridade foi notada principalmente nos pontos de recepção localizados bem dentro da zona de sombra (Figura 2.9 à Figura 2.28). Este resultado era esperado, uma vez que os três métodos usados são hábeis para predições dentro desta região.

Para fins de comparação, foi tomada como referência a formulação de Kurze & Anderson, isto é, as diferenças sempre foram observadas em relação às curvas obtidas através desta formulação.

Pode-se observar, nas Figuras 2.9 a 2.33, que as curvas de perda por inserção de Kurze & Anderson e de Maekawa, apresentam comportamento mais suave, com menor amplitude dos picos e/ou vales de atenuação. Além disso, as diferenças entre os resultados das formulações variam dependendo da localização do receptor, isto é, se estão na zona de sombra, de transição ou de brilho Assim, para as curvas das Figuras 2.9 a 2.28, correspondentes às posições 01 até 20, situadas na zona de sombra acústica da barreira, a diferença média na perda por inserção entre as formulações de Kurze & Anderson e Maekawa é de apenas 0,1 dB, isto é, as curvas são praticamente indistinguíveis na maioria dos pontos das curvas. Em alguns pontos de pico e mergulho das curvas, porém, há discordâncias máximas em torno de 3,3 dB.

Já as formulações de Kurze & Anderson e Pierce apresentam desvio médio entre as curvas um pouco maior nesta mesma zona, em torno de 1,3 dB. É também nos picos e vales que ocorrem as diferenças máximas, chegando a 8,3 dB.

Os pontos de recepção 22 a 25, localizados próximos à fronteira entre a zona de sombra e a zona de brilho, cujos resultados são apresentados pelas Figuras 2.30 a 2.33, entretanto, mostraram desvios maiores entre as curvas obtidas pelas distintas formulações empregadas. Todavia, a formulação de Maekawa novamente mostrou melhor concordância com os resultados obtidos pela formulação de Kurze & Anderson

---

<sup>4</sup> Doravante a palavra *atenuação* será usada como sinônimo de *perda por inserção*.

do que aqueles calculados pela teoria de Pierce. A diferença média entre Maekawa e Kurze & Anderson, nesta zona de transição, ficou em torno de 0,7 dB, chegando ao máximo de 3,4 dB. Já as discrepâncias entre Kurze & Anderson e Pierce ficaram em torno de 8,9 dB, em média, com diferenças máximas da ordem de 23,3 dB em pontos de picos. Nesta região, a predição de valores de atenuação sempre foi considerada bastante problemática, sendo, por isso, até excluída de muitas formulações, a fim de evitar-se cálculos mais complicados. Os desvios maiores observados para a teoria de Pierce são decorrentes da sua inabilidade para predições em pontos situados na região próxima à fronteira com a zona de brilho, também conhecida como zona de transição. Os algoritmos de Kurze & Anderson e de Maekawa, por outro lado, foram desenvolvidos através de observações de dados experimentais, incluindo dados medidos na zona de transição e, por isso, há uma tendência de que seus resultados sejam mais confiáveis.

O único ponto de recepção situado na zona de brilho está representado pela posição 21. Conforme esperado, pode-se notar na Figura 2.29 divergência total nos valores de perda por inserção calculados pela formulação de Pierce em relação aos obtidos pelas outras duas formulações.

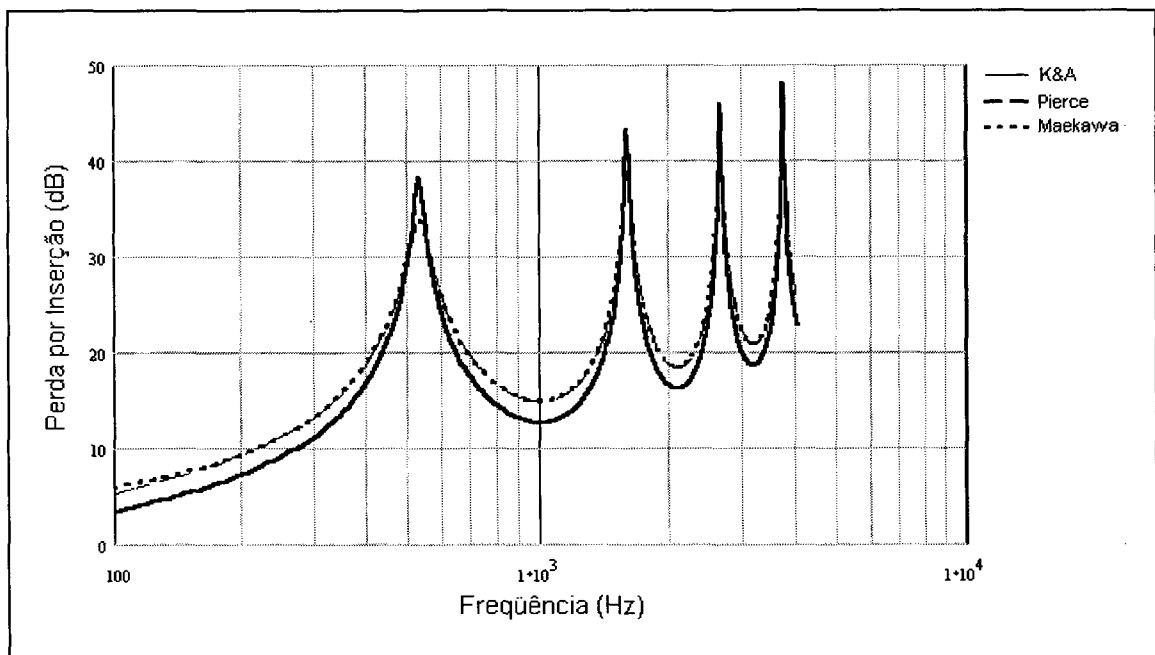


Figura 2.9 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 0,50 m de distância em relação à barreira e com altura de 0,01 m (posição 01). Zona de Sombra.

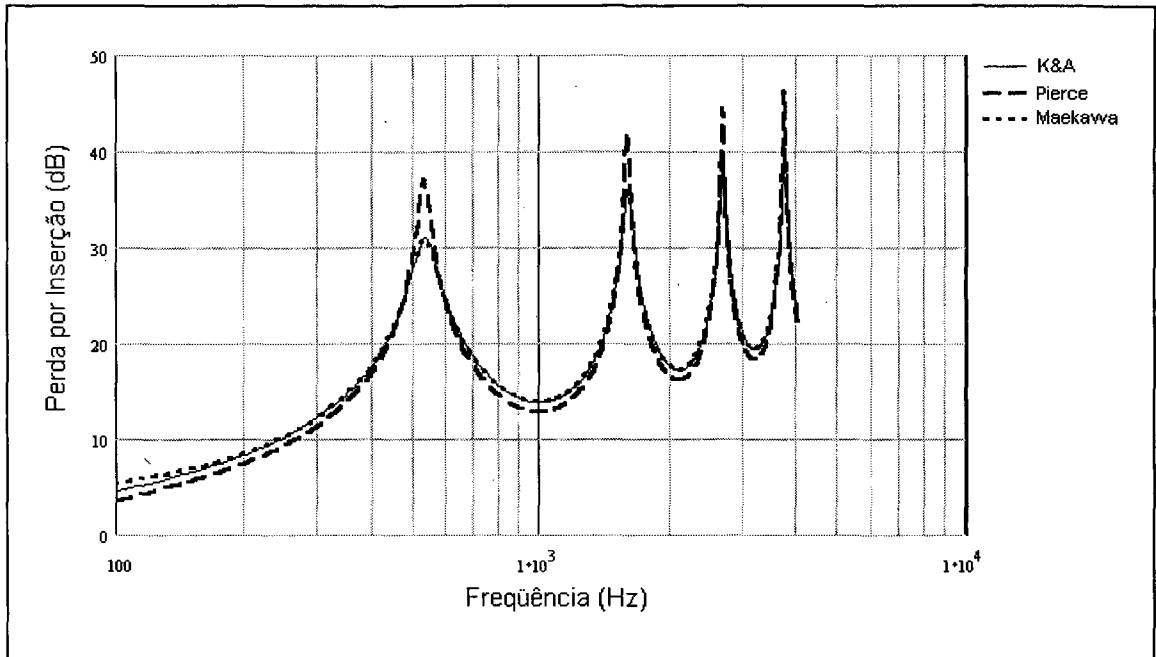


Figura 2.10 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 1,00 m de distância em relação à barreira e com altura de 0,01 m (posição 02). Zona de Sombra.

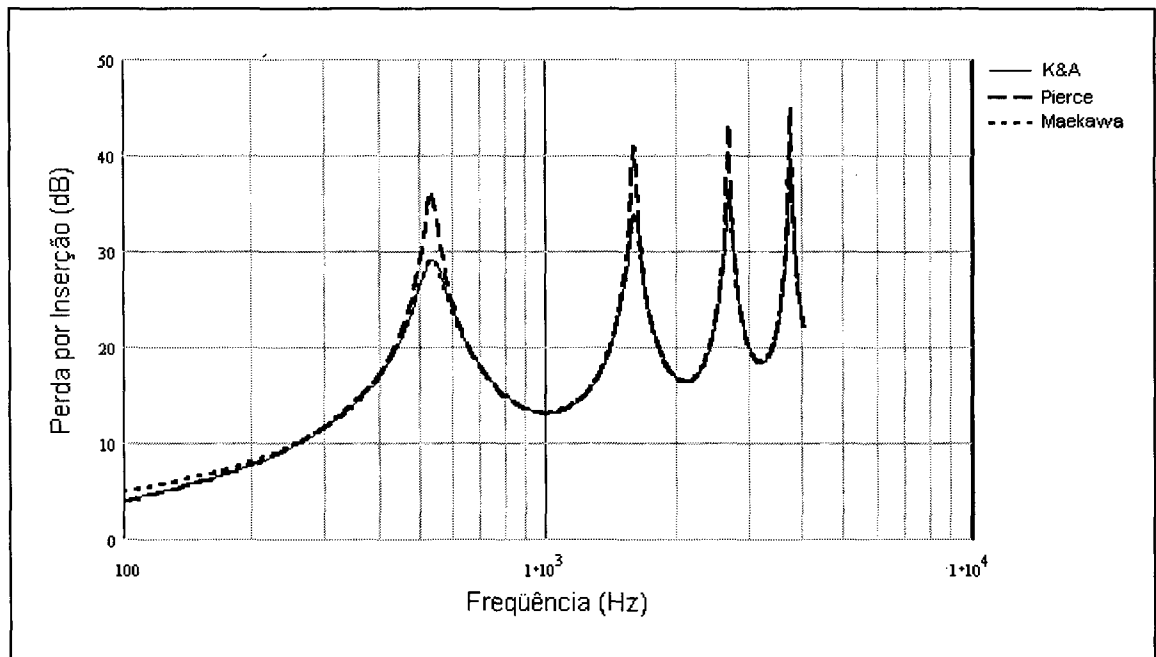


Figura 2.11 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 1,50 m de distância em relação à barreira e com altura de 0,01 m (posição 03). Zona de Sombra.



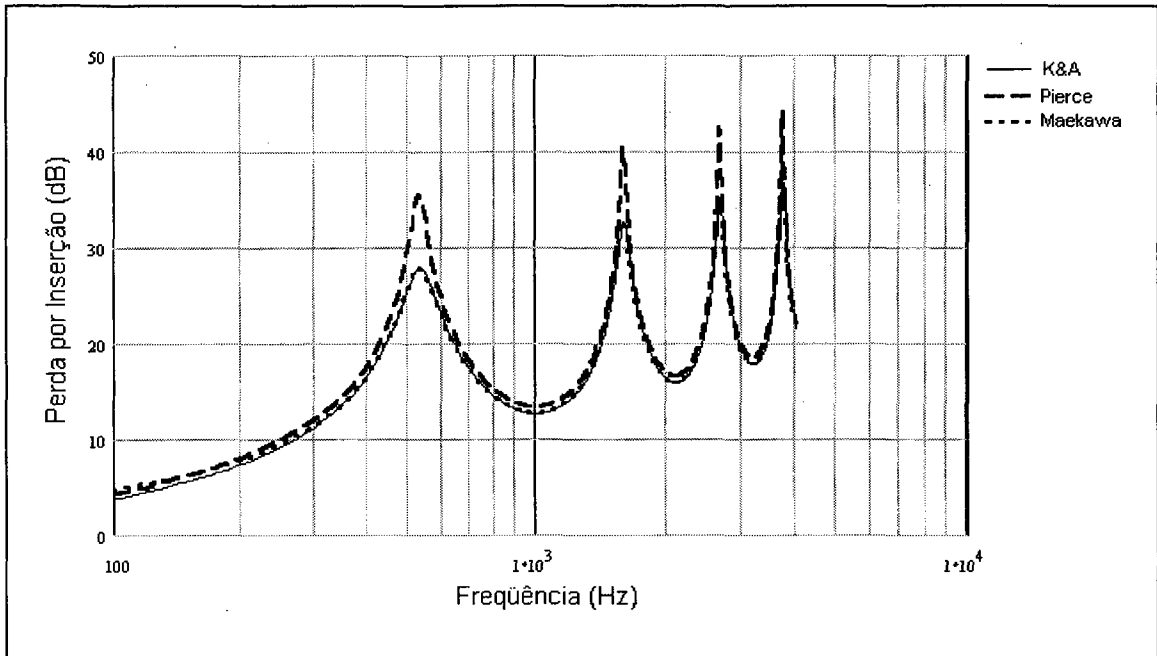


Figura 2.12 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 2,00 m de distância em relação à barreira e com altura de 0,01 m (posição 04). Zona de Sombra.

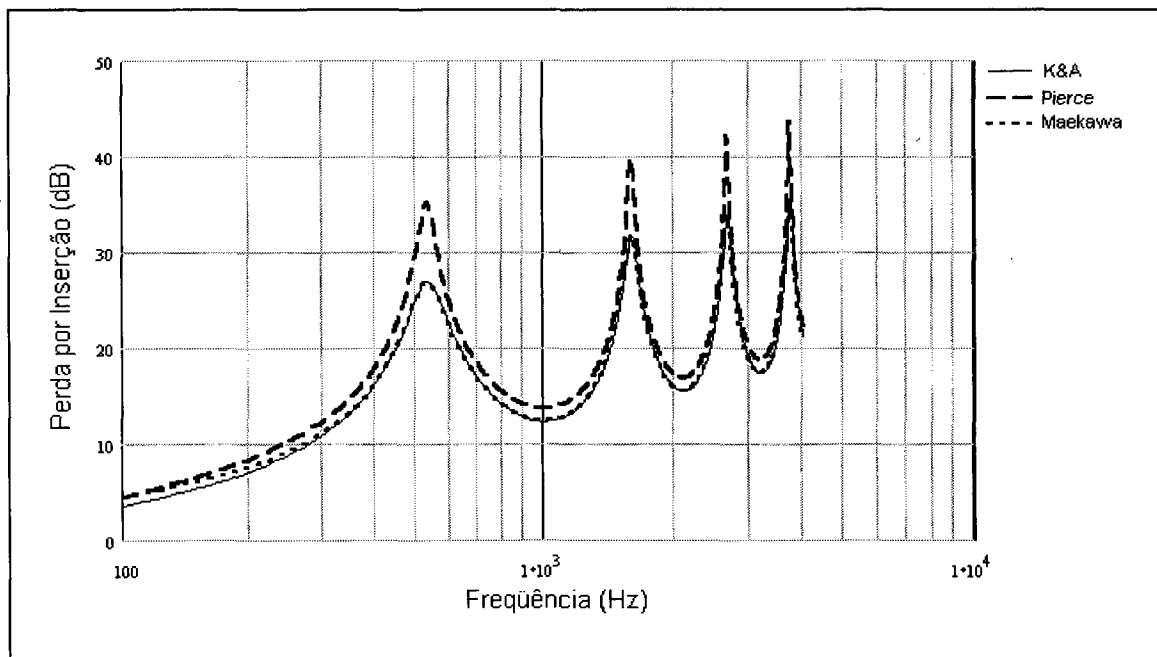


Figura 2.13 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 2,50 m de distância em relação à barreira e com altura de 0,01 m (posição 05). Zona de Sombra.

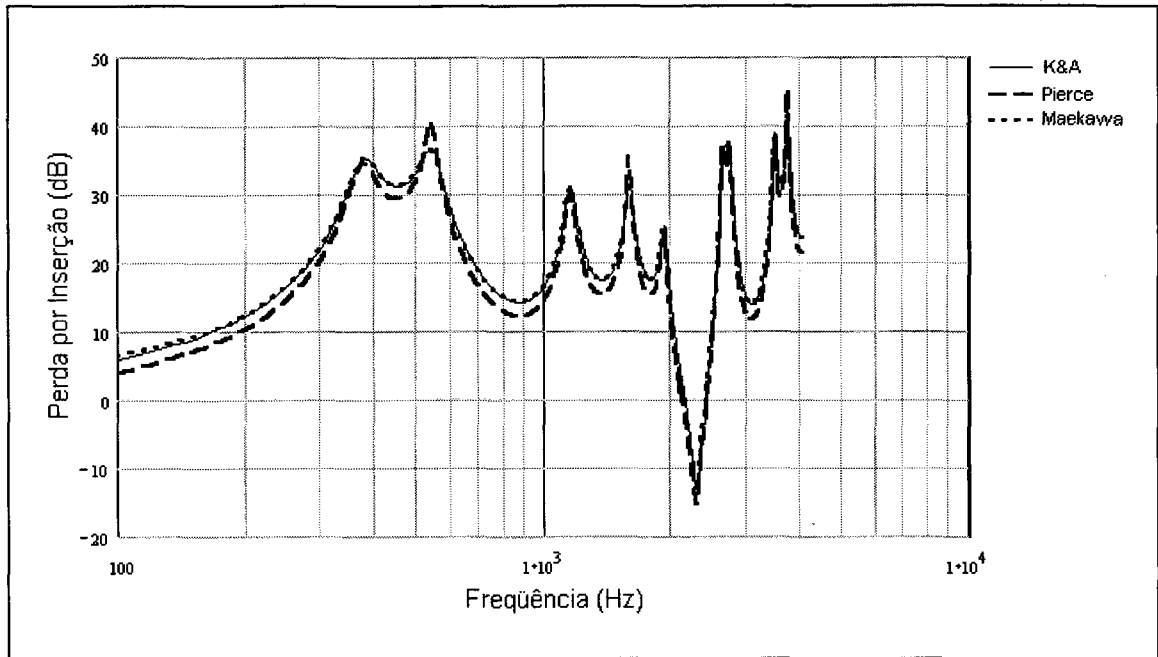


Figura 2.14 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 0,50 m de distância em relação à barreira e com altura de 0,25 m (posição 06). Zona de Sombra.

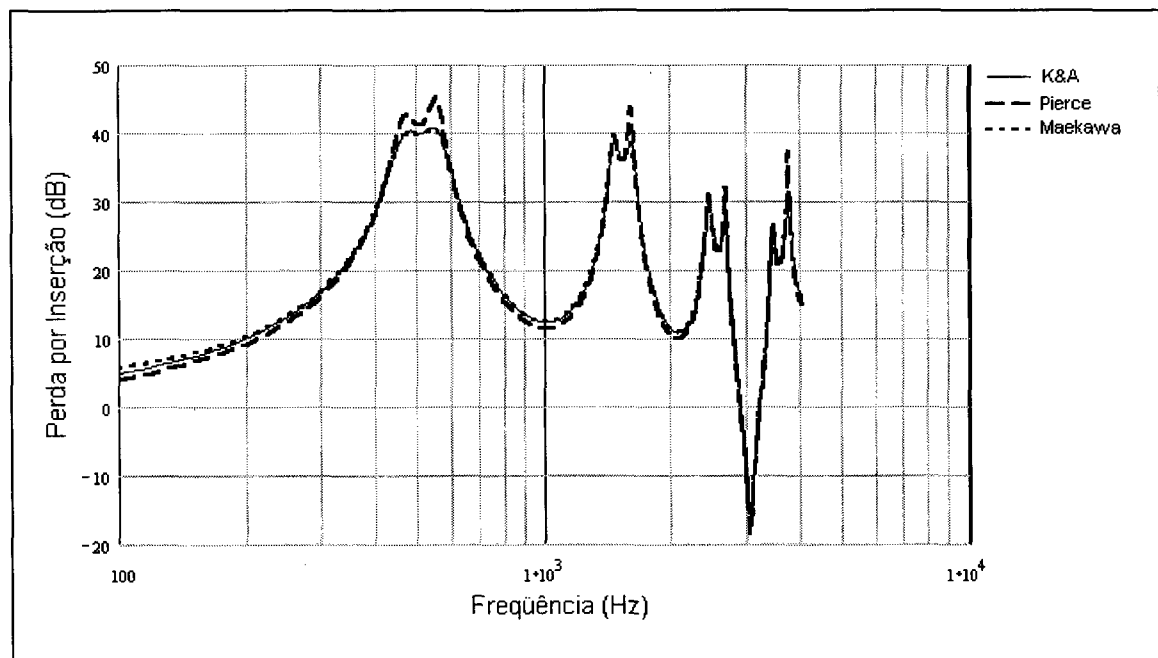


Figura 2.15 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 1,00 m de distância em relação à barreira e com altura de 0,25 m (posição 07). Zona de Sombra.

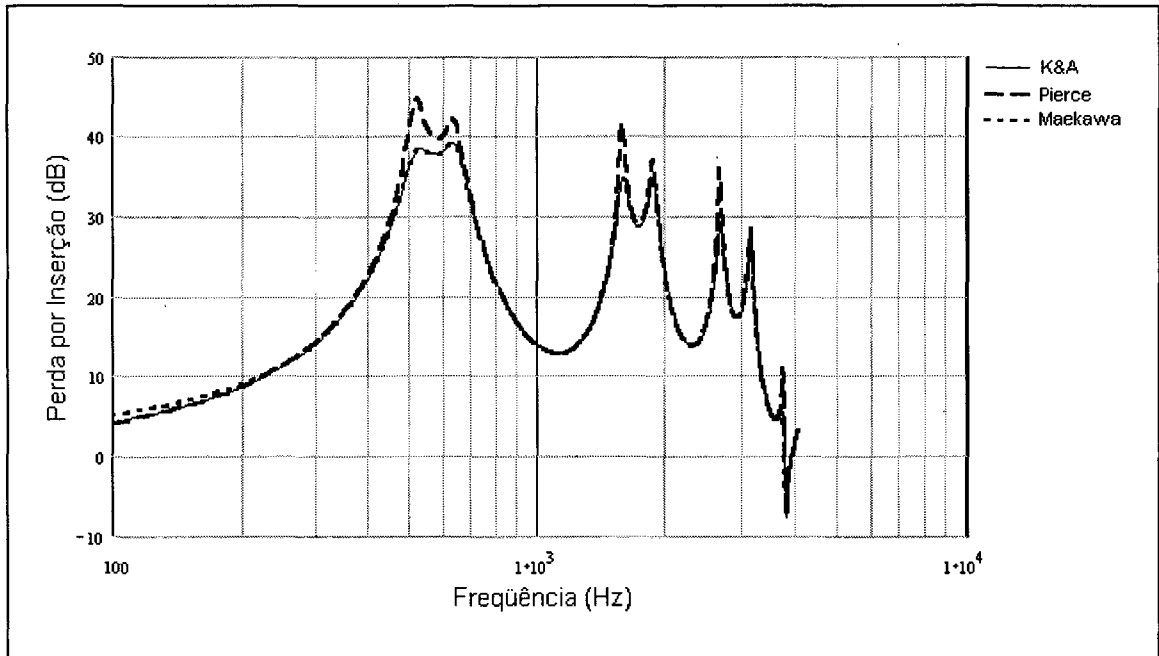


Figura 2.16 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 1,50 m de distância em relação à barreira e com altura de 0,25 m (posição 08). Zona de Sombra.

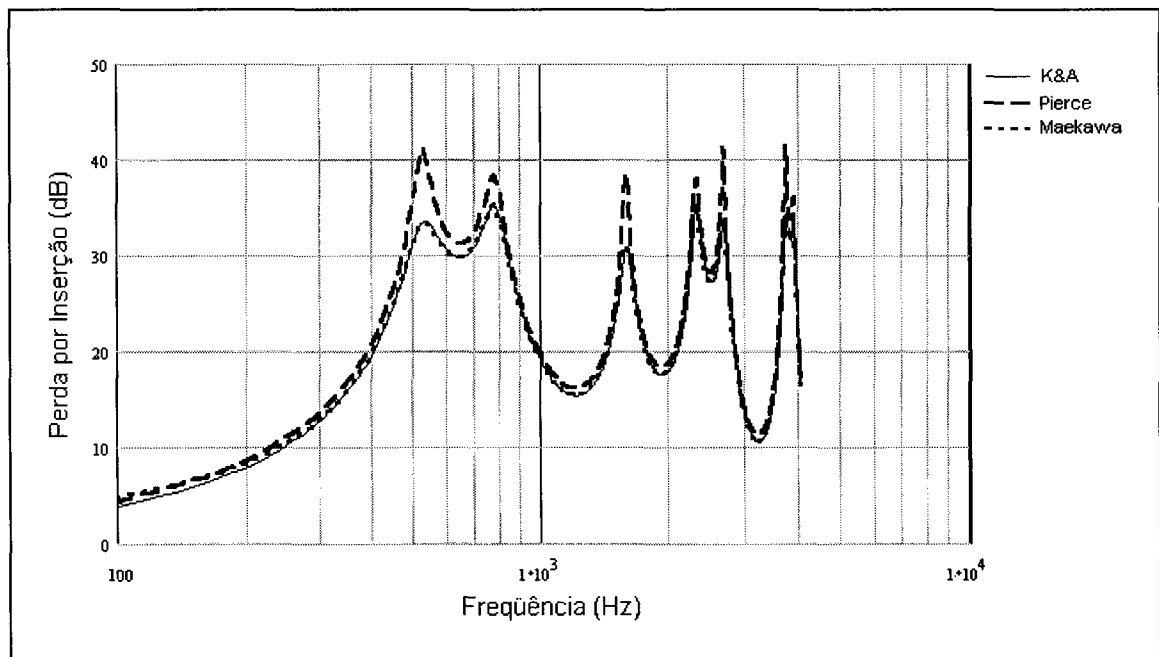


Figura 2.17 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 2,00 m de distância em relação à barreira e com altura de 0,25 m (posição 09). Zona de Sombra.

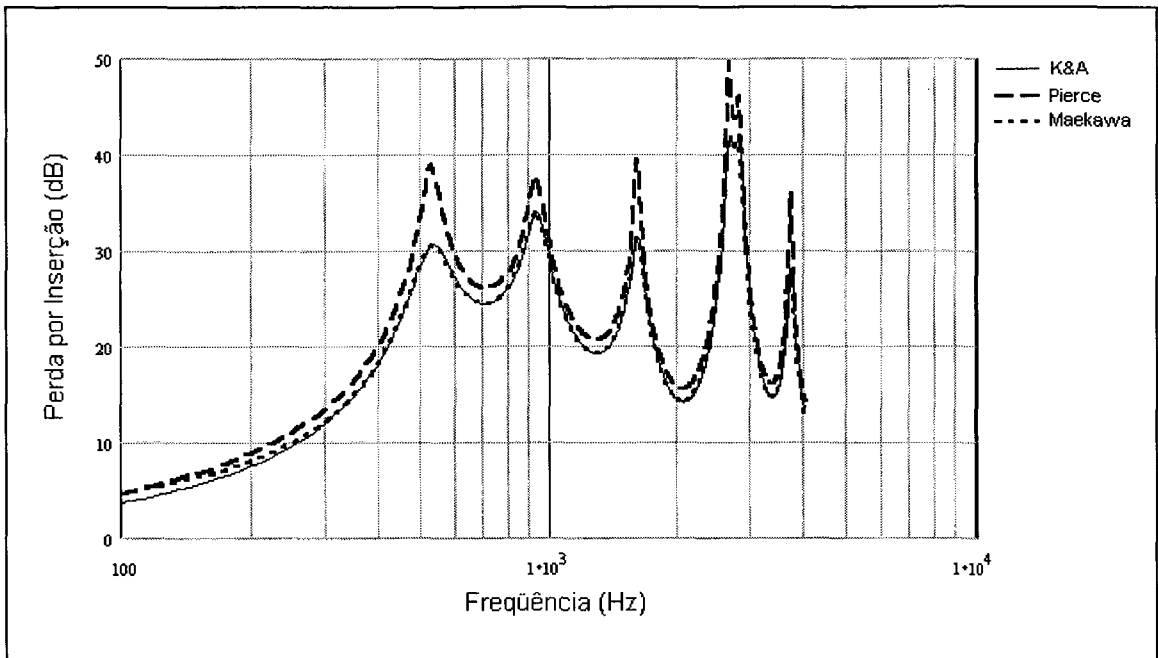


Figura 2.18 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 2,50 m de distância em relação à barreira e com altura de 0,25 m (posição 10). Zona de Sombra.

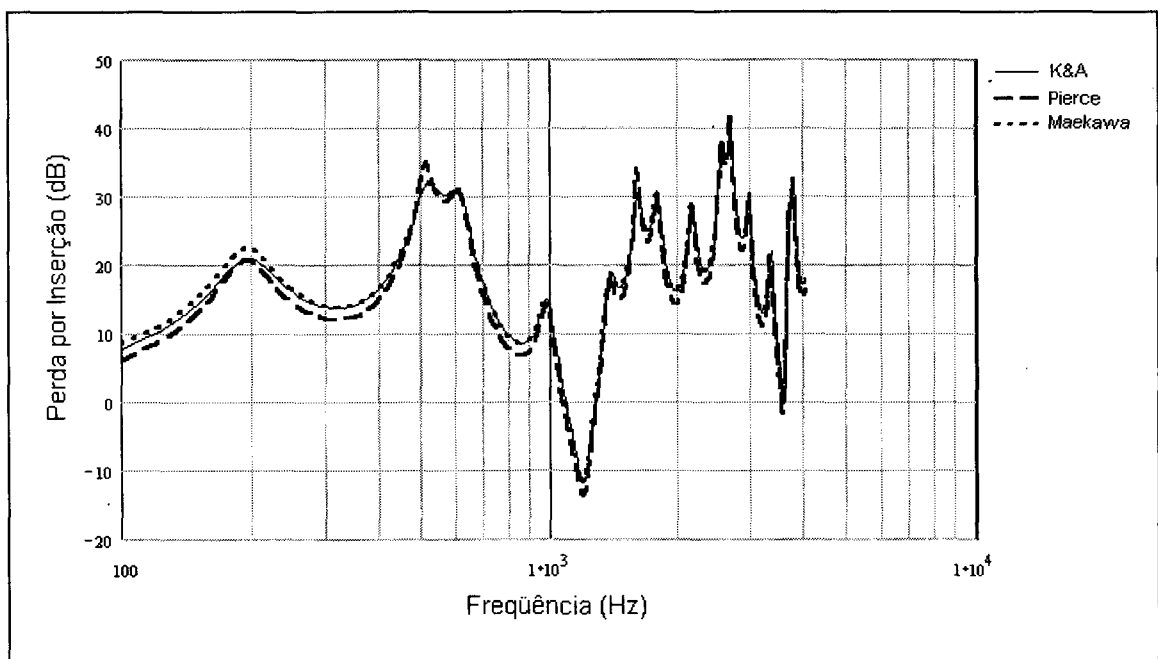


Figura 2.19 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 0,50 m de distância em relação à barreira e com altura de 0,50 m (posição 11). Zona de Sombra.

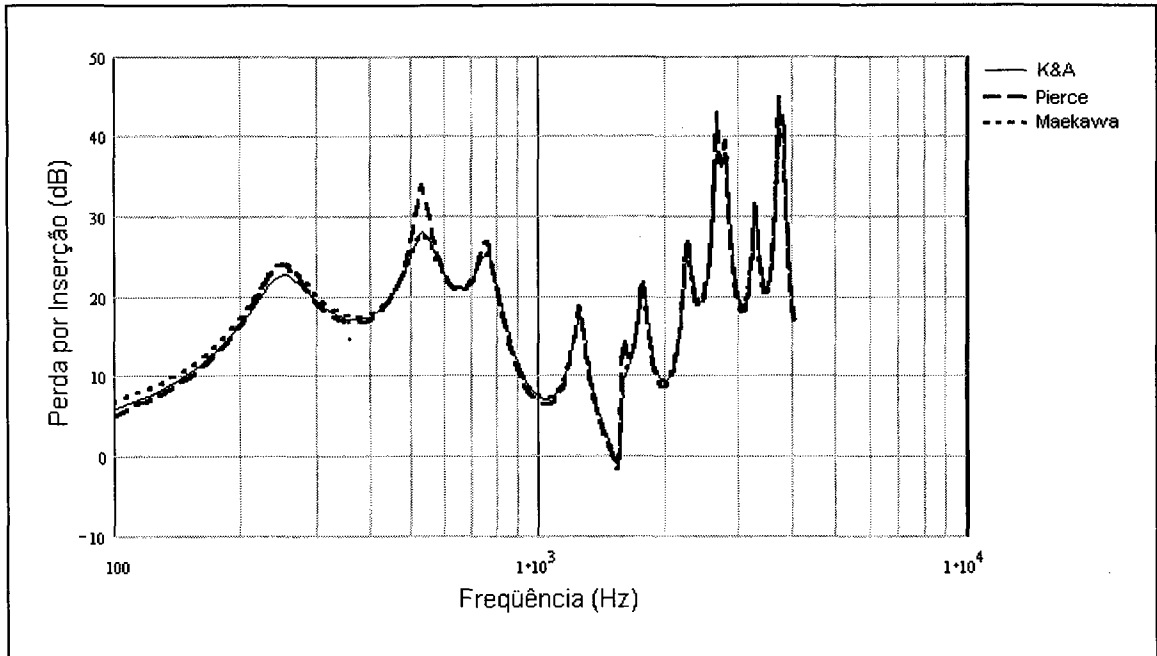


Figura 2.20 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 1,00 m de distância em relação à barreira e com altura de 0,50 m (posição 12). Zona de Sombra.

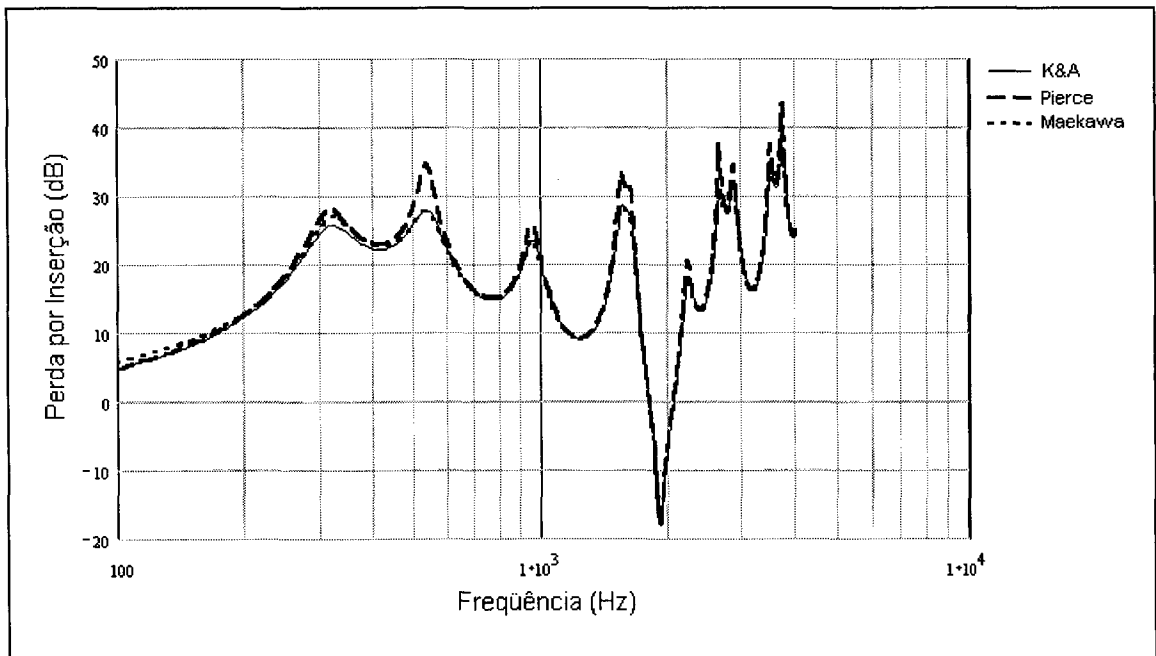


Figura 2.21 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 1,50 m de distância em relação à barreira e com altura de 0,50 m (posição 13). Zona de Sombra.

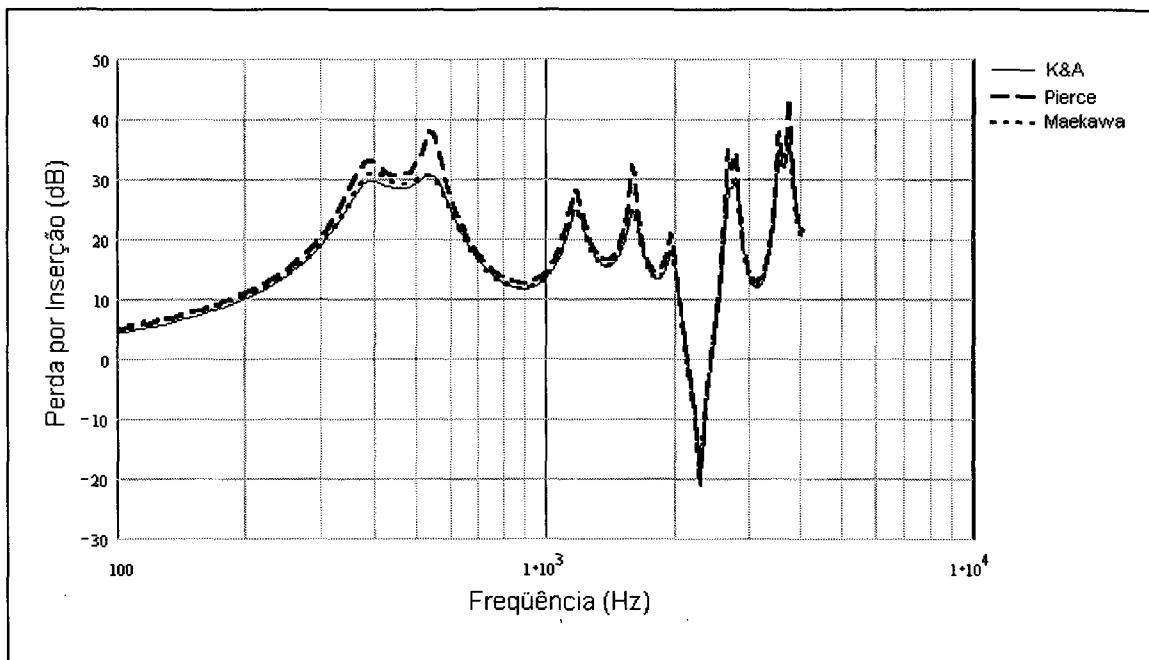


Figura 2.22 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 2,00 m de distância em relação à barreira e com altura de 0,50 m (posição 14). Zona de Sombra.

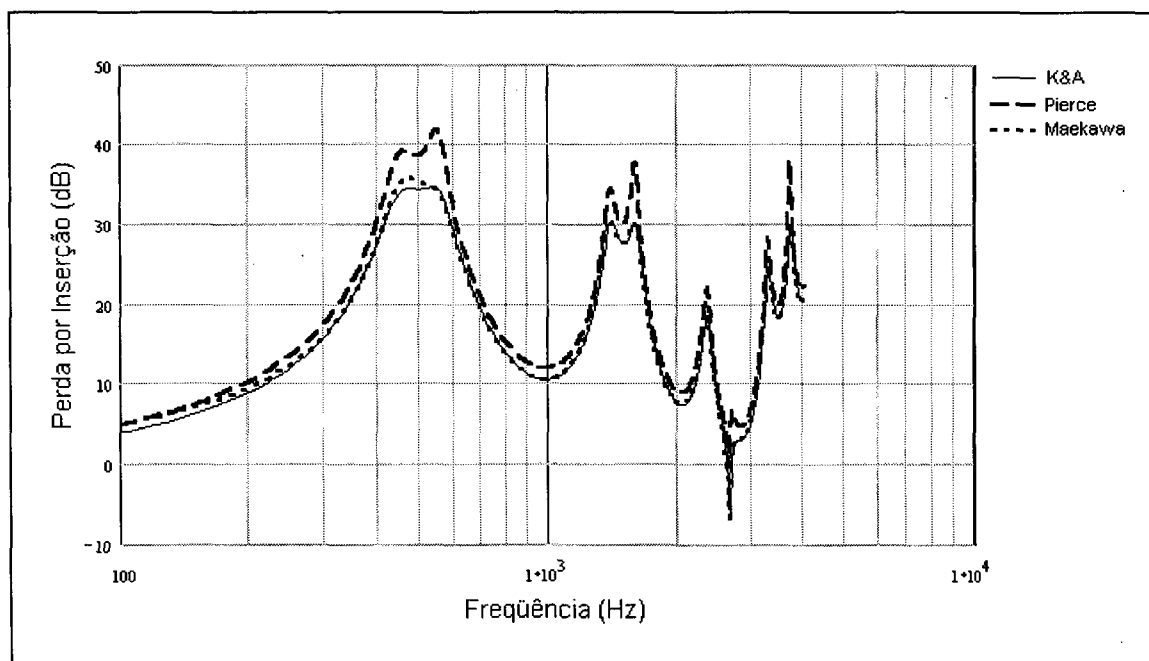


Figura 2.23 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 2,50 m de distância em relação à barreira e com altura de 0,50 m (posição 15). Zona de Sombra.

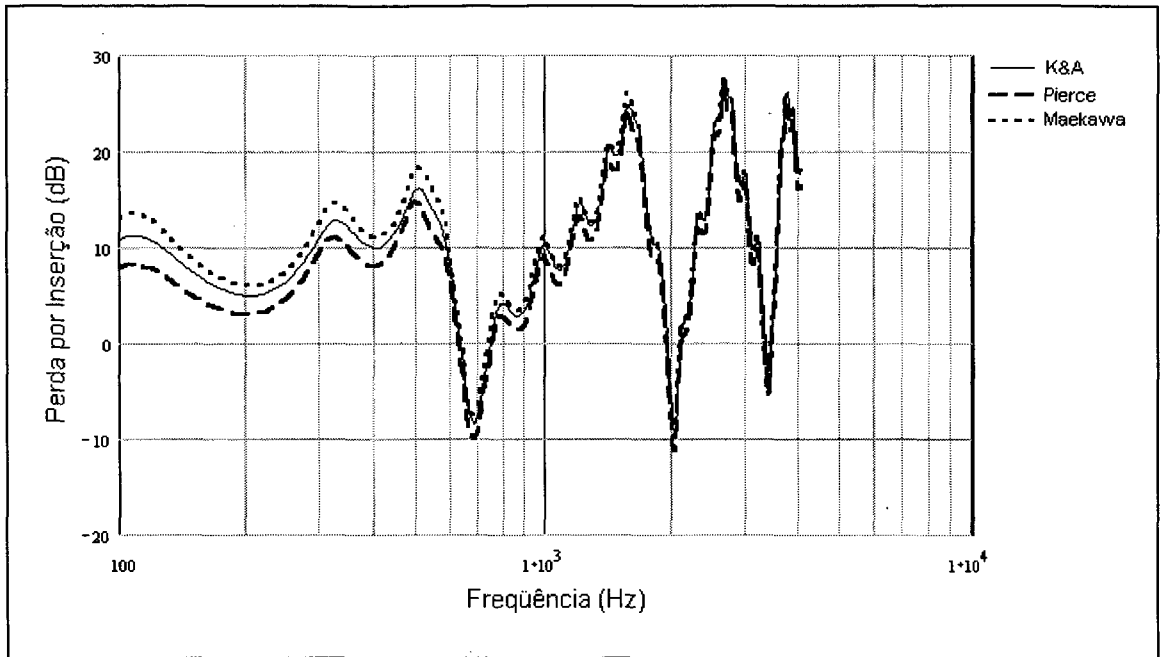


Figura 2.24 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 0,50 m de distância em relação à barreira e com altura de 1,00 m (posição 16). Zona de Sombra.

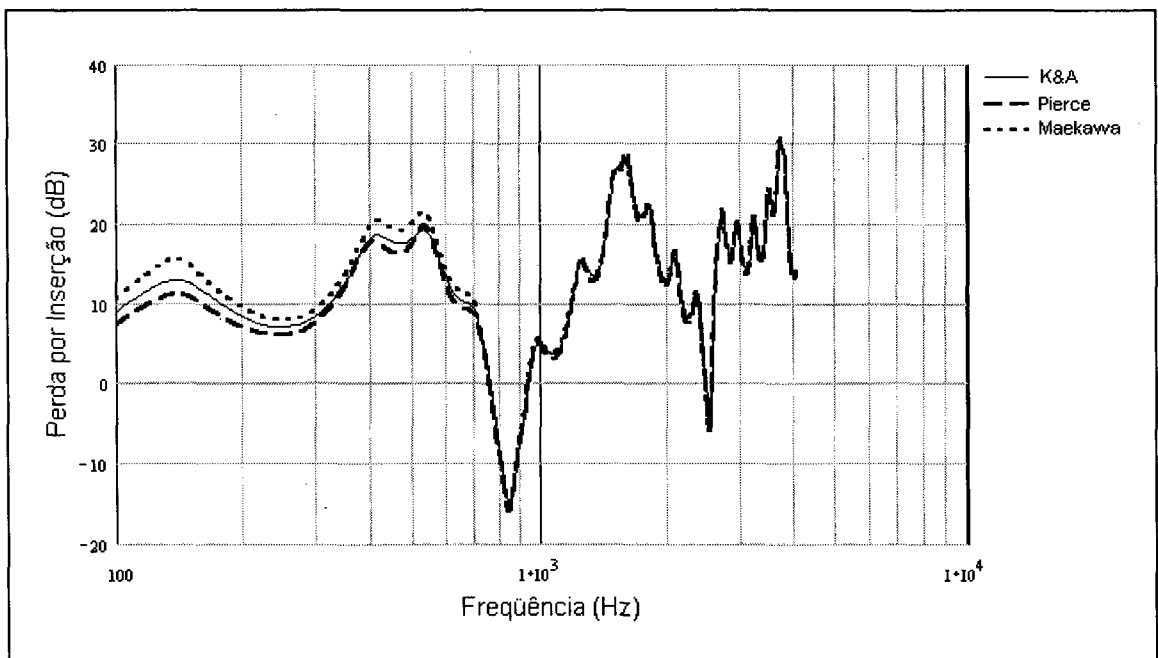


Figura 2.25 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 1,00 m de distância em relação à barreira e com altura de 1,00 m (posição 17). Zona de Sombra.

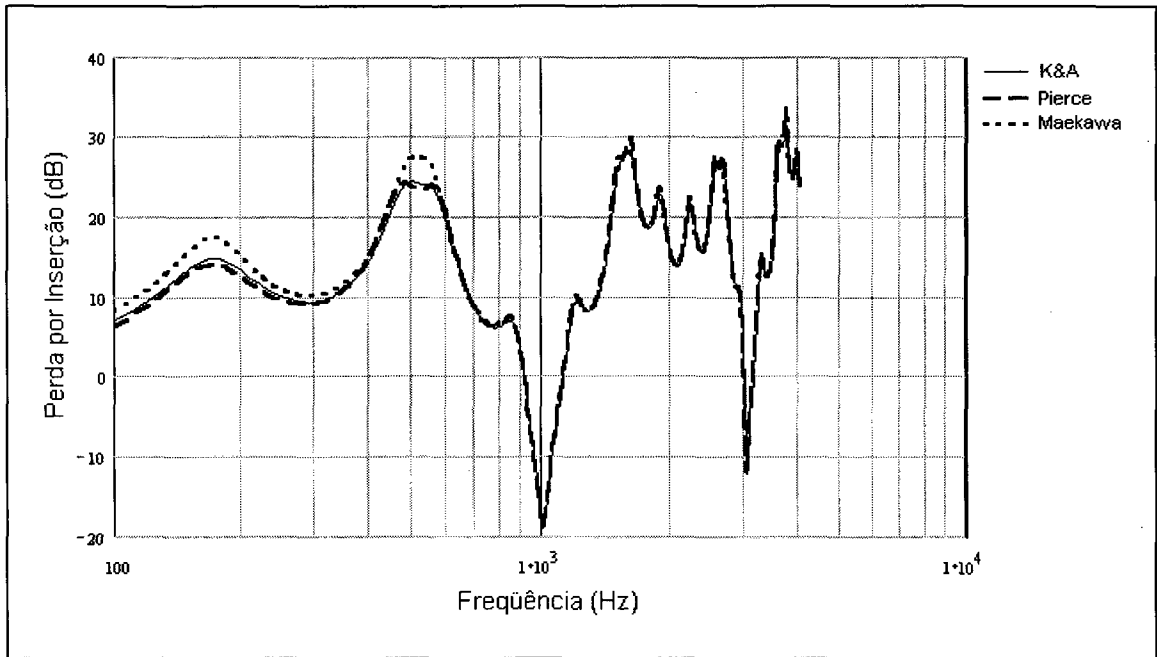


Figura 2.26 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 1,50 m de distância em relação à barreira e com altura de 1,00 m (posição 18). Zona de Sombra.

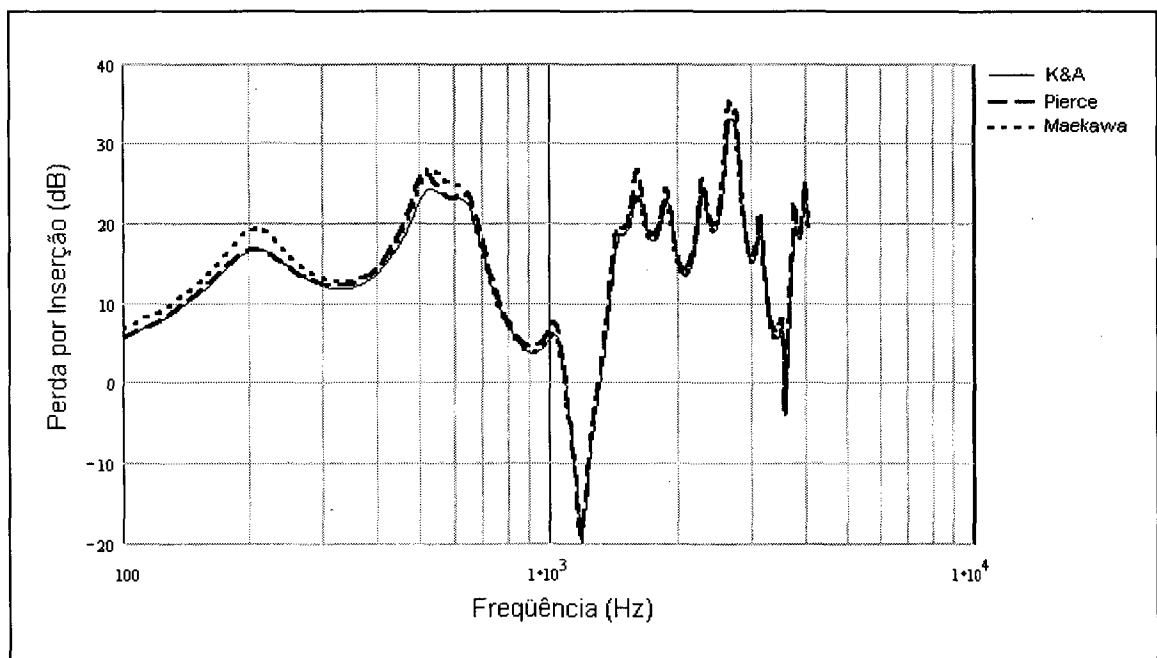


Figura 2.27 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 2,00 m de distância em relação à barreira e com altura de 1,00 m (posição 19). Zona de Sombra.



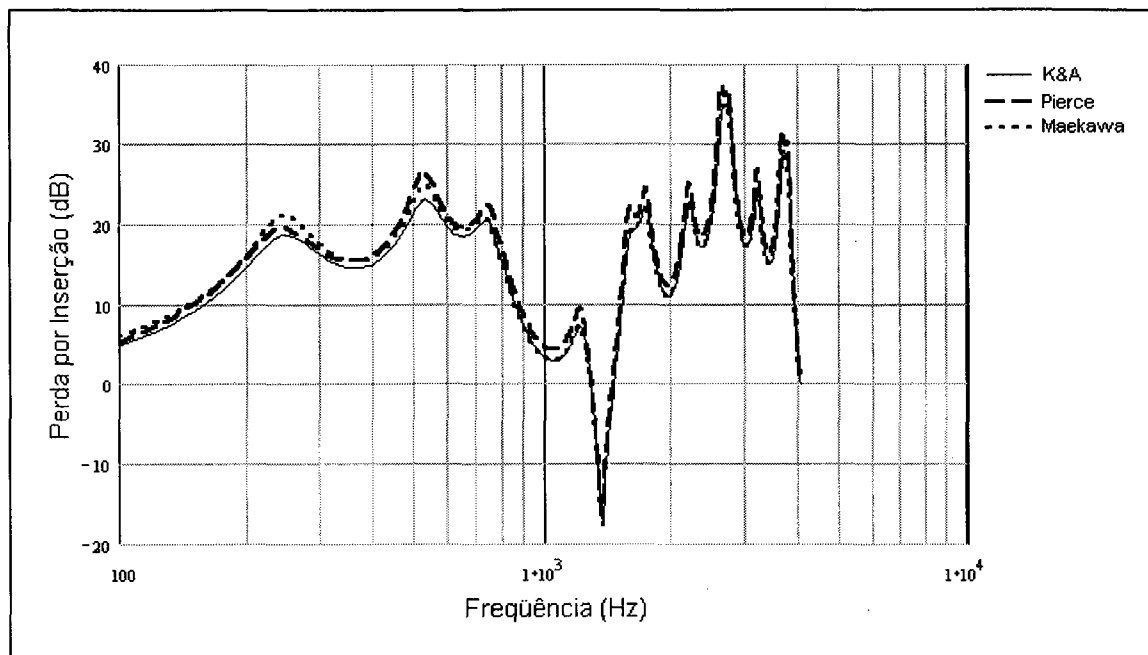


Figura 2.28 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 2,50 m de distância em relação à barreira e com altura de 1,00 m (posição 20). Zona de Sombra.

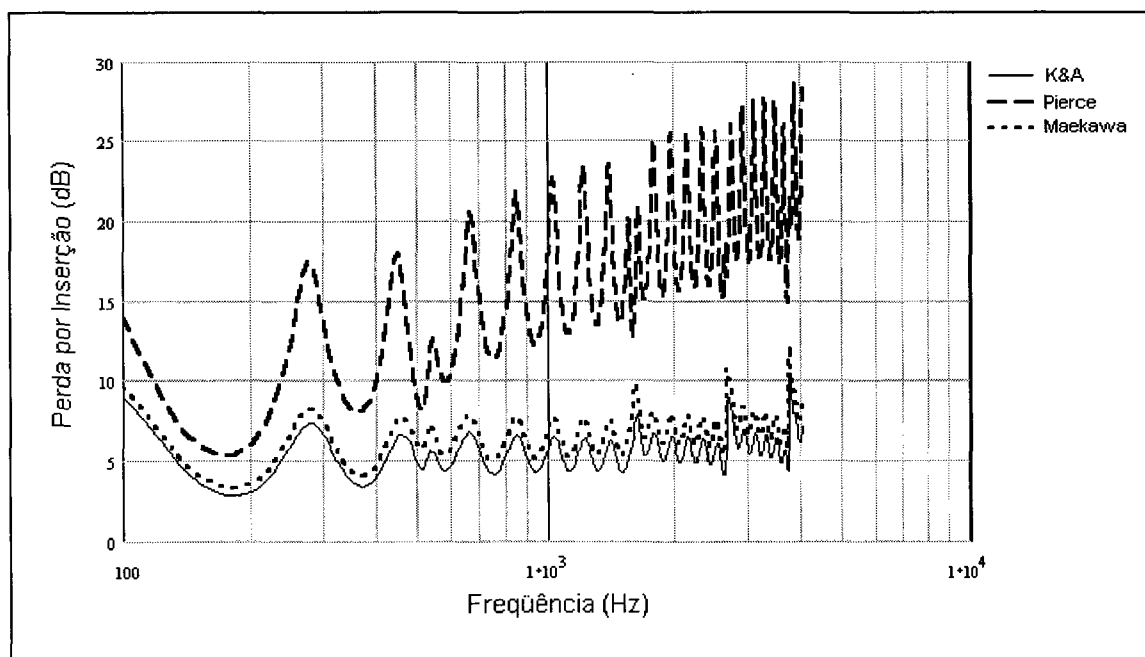


Figura 2.29 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 0,50 m de distância em relação à barreira e com altura de 1,50 m (posição 21). Zona de Brilho.

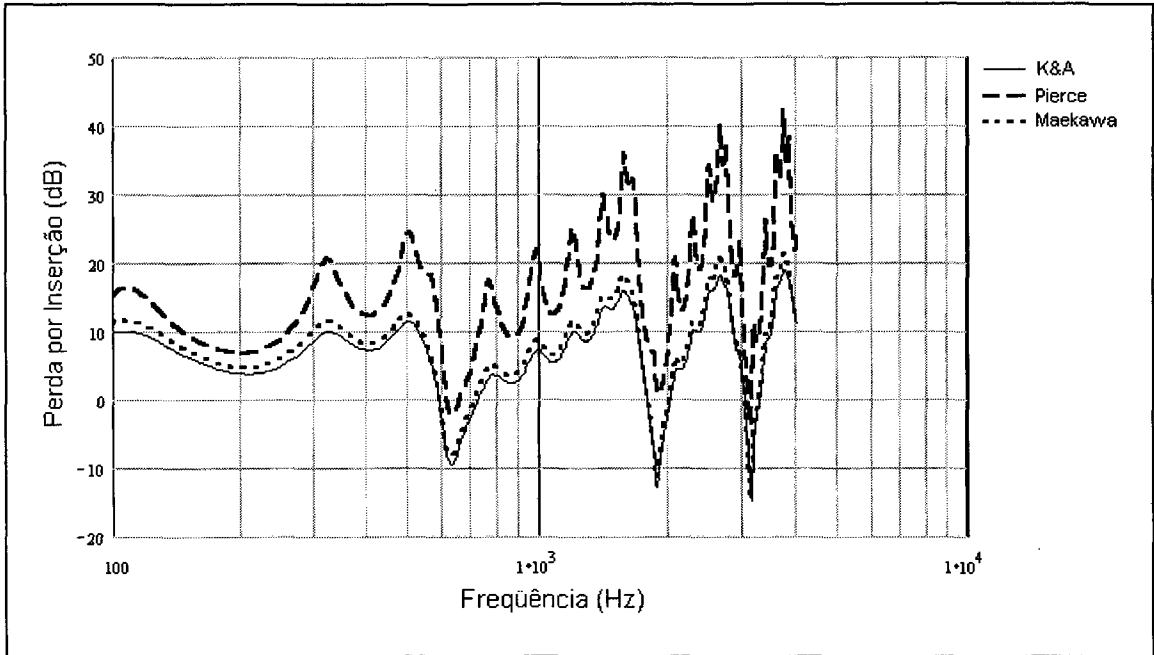


Figura 2.30 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 1,00 m de distância em relação à barreira e com altura de 1,50 m (posição 22). Zona de Transição.

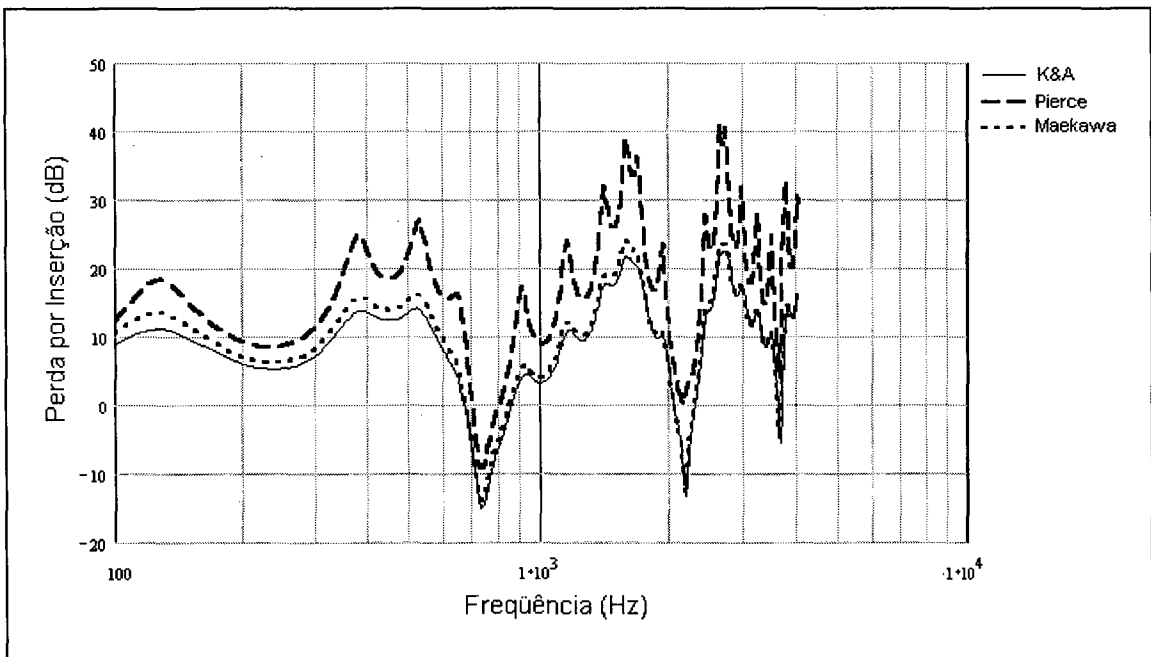


Figura 2.31 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 1,50 m de distância em relação à barreira e com altura de 1,50 m (posição 23). Zona de Transição.

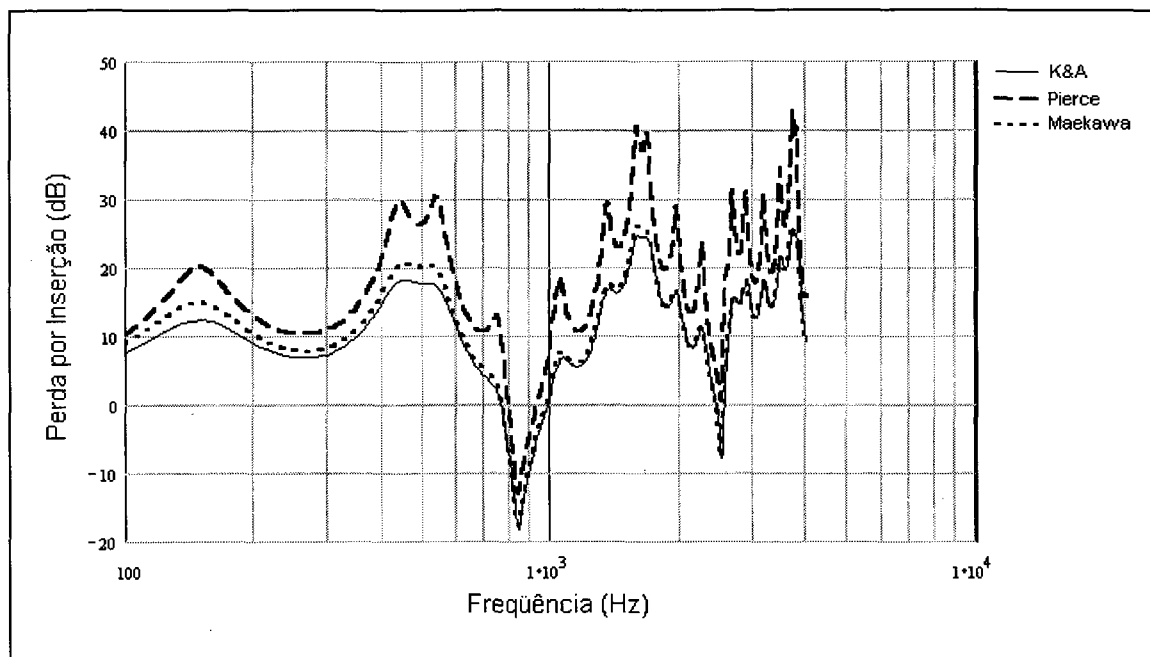


Figura 2.32 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 2,00 m de distância em relação à barreira e com altura de 1,50 m (posição 24). Zona de Transição.

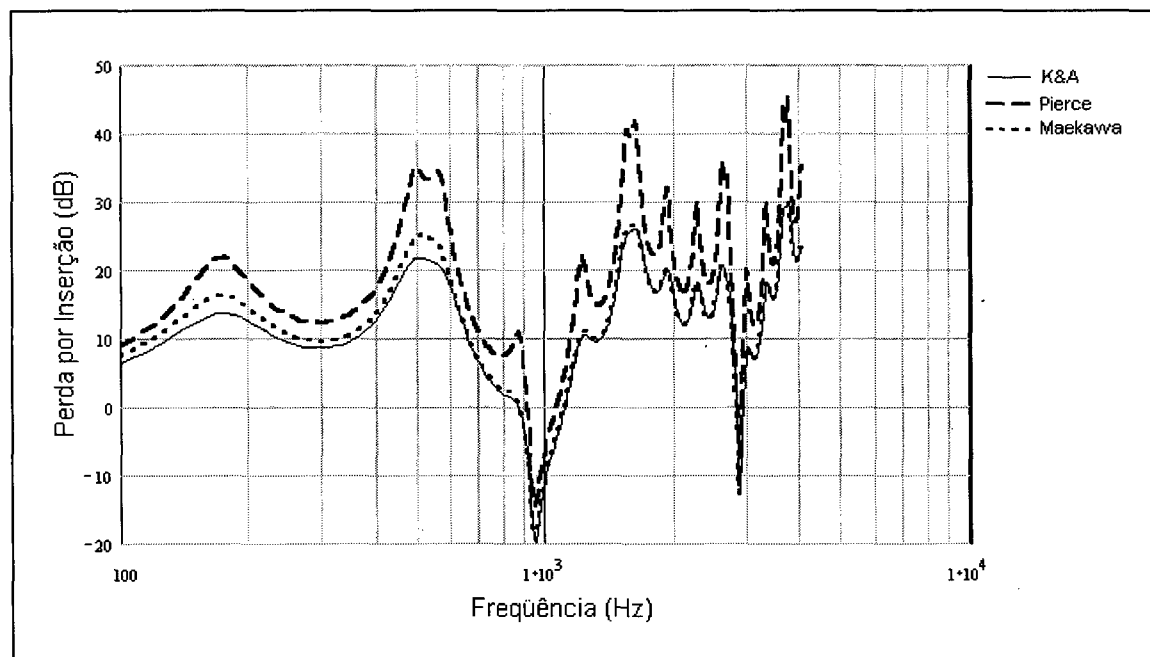


Figura 2.33 – Comparação entre as formulações analíticas empregadas para receptor localizado a 2,50 m de distância em relação à barreira e com altura de 1,50 m (posição 25). Zona de Transição.

A Figura 2.34 e a Figura 2.35 resumem as diferenças entre as curvas apresentadas pelas três formulações analíticas, lembrando-se que as diferenças são dadas em relação à formulação de Kurze & Anderson. Ambas as figuras foram plotadas na mesma escala para facilitar a visualização da ordem de grandeza das diferenças.

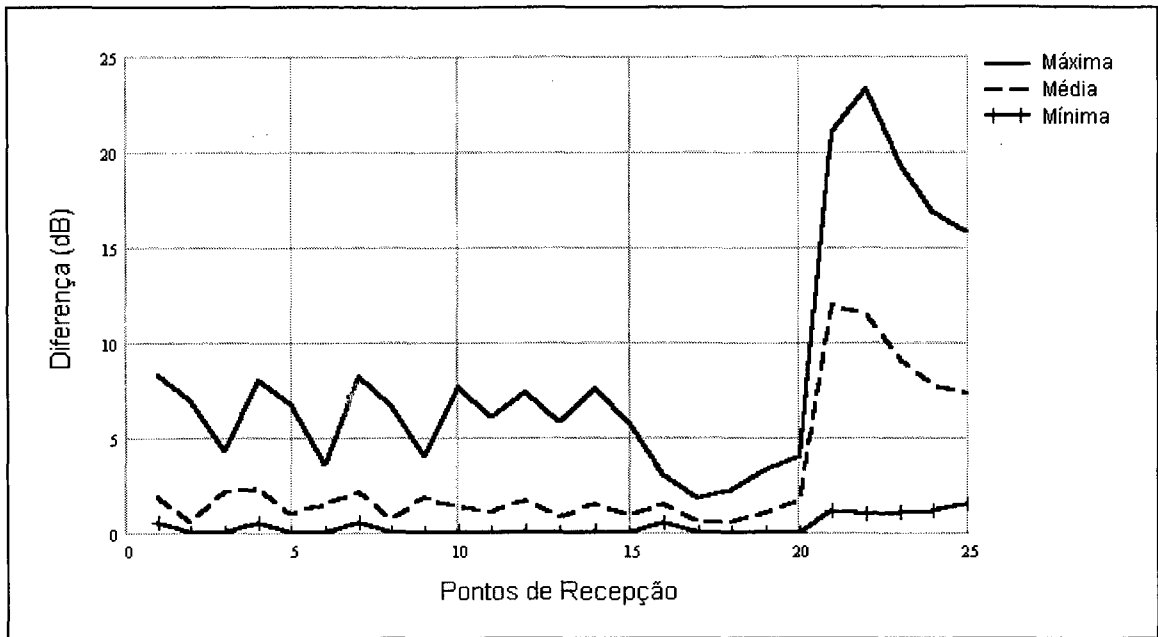


Figura 2.34 – Diferenças entre as curvas de perda por inserção de Pierce e de Kurze & Anderson.

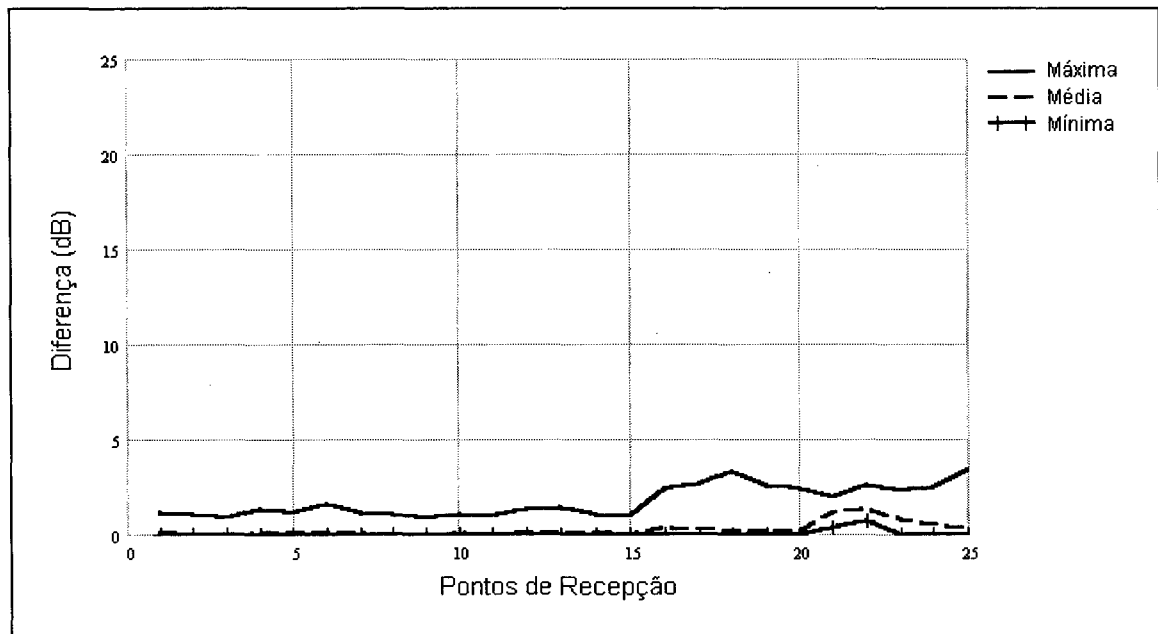


Figura 2.35 – Diferenças entre as curvas de perda por inserção de Maekawa e de Kurze & Anderson.

### 2.4.2 Resultados considerando bandas de frequências

Os cálculos apresentados até agora foram realizados para frequências discretas, utilizando-se a função de interferência expressa na equação (2.23), própria para um sinal senoidal.

Entretanto, como as medições foram feitas para três diferentes larguras de banda de freqüências, procurou-se adaptar os cálculos analíticos para considerar a largura de banda, utilizando-se a função de interferência para banda de ruído dada pela equação (2.24).

As curvas da Figura 2.36 até a Figura 2.39 foram calculadas através da formulação de Kurze & Anderson, mas os resultados apresentados foram similares aos obtidos para a formulação de Pierce e de Maekawa.

Na Figura 2.36 e na Figura 2.37 é mostrado que para a banda de 1/3 de oitava os resultados correspondentes a freqüências discretas são sensivelmente diferentes daqueles calculados para bandas de freqüências, sobretudo para as freqüências mais altas, onde a largura de banda é maior, conforme será discutido no Capítulo 4, apresentando picos e vales de atenuação mais suaves. Para a banda de 1/24 de oitava, porém, os cálculos utilizando as equações (2.23) e (2.24) fornecem resultados praticamente idênticos, como mostrado na Figura 2.38 e na Figura 2.39.

Desta forma, pode-se concluir que a equação (2.24) somente produz resultados diferenciados quando a banda de freqüências considerada é significativamente larga, como as altas freqüências com largura de banda de 1/3 de oitava.

A comparação dos resultados das medições e resultados calculados utilizando-se a equação (2.23) e a equação (2.24) como função de interferência será feita no Capítulo 5.

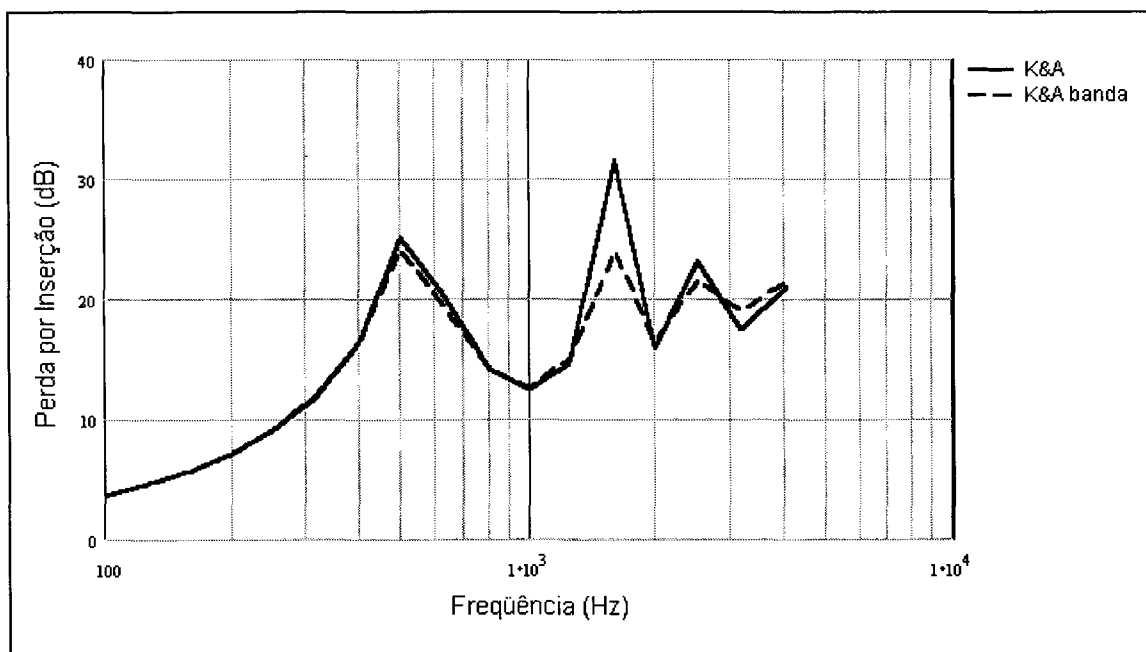


Figura 2.36 – Cálculo analítico para freqüências discretas e bandas de 1/3 de oitava (posição 05).

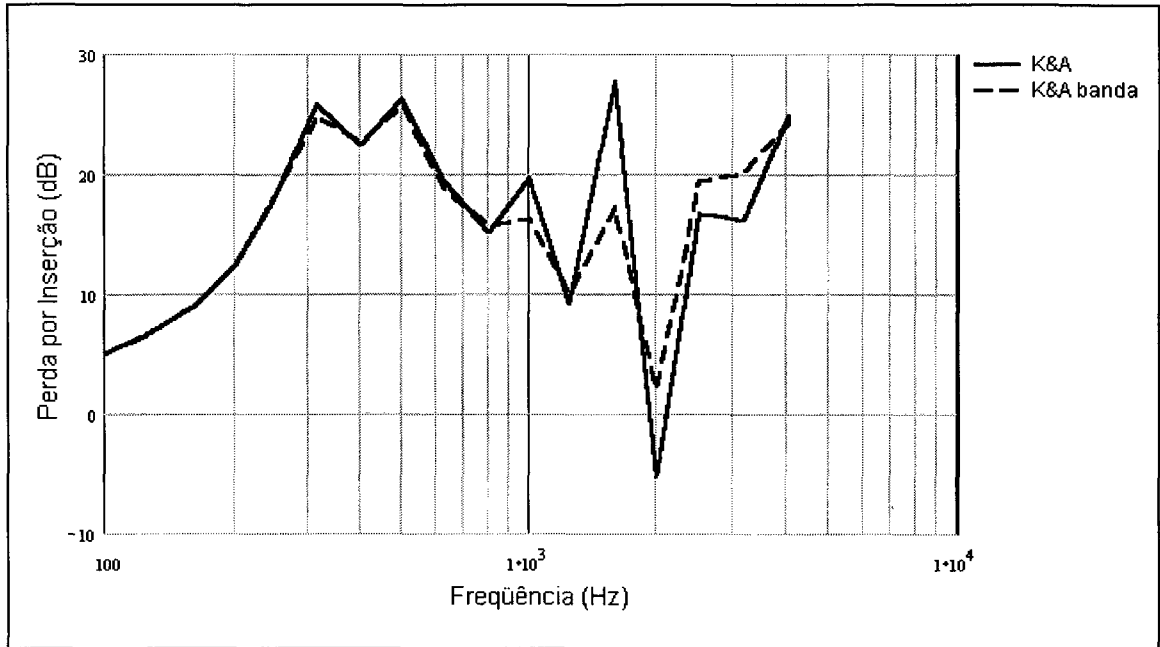


Figura 2.37 – Cálculo analítico para frequências discretas e bandas de 1/3 de oitava (posição 13).

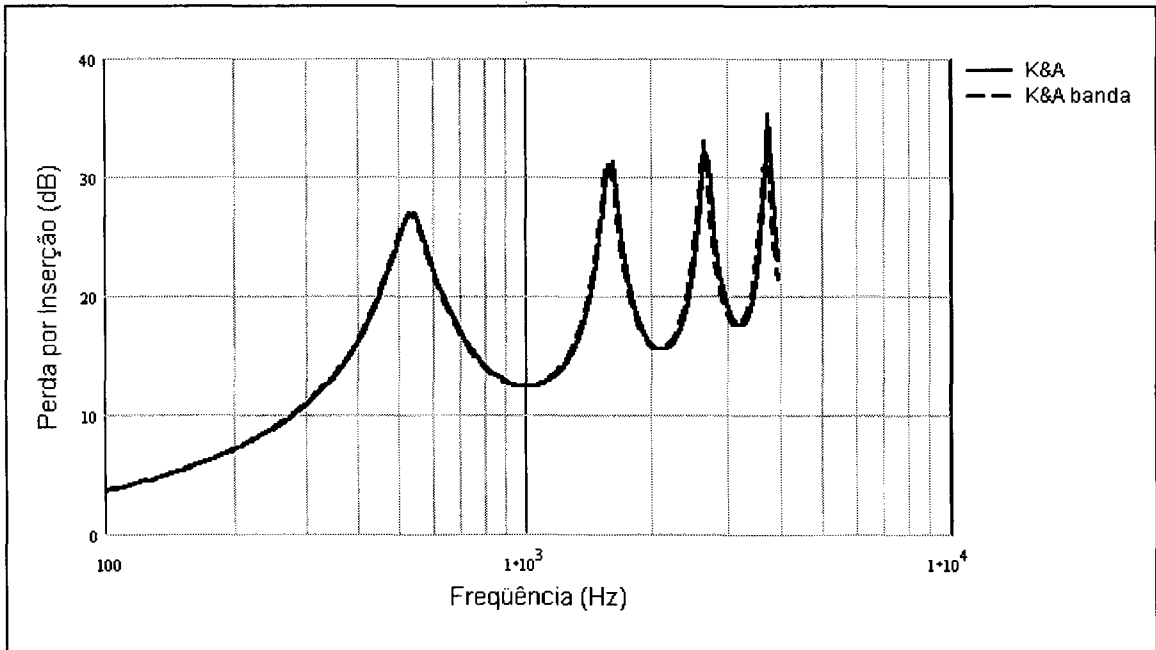


Figura 2.38 – Cálculo analítico para frequências discretas e bandas de 1/24 de oitava (posição 05).

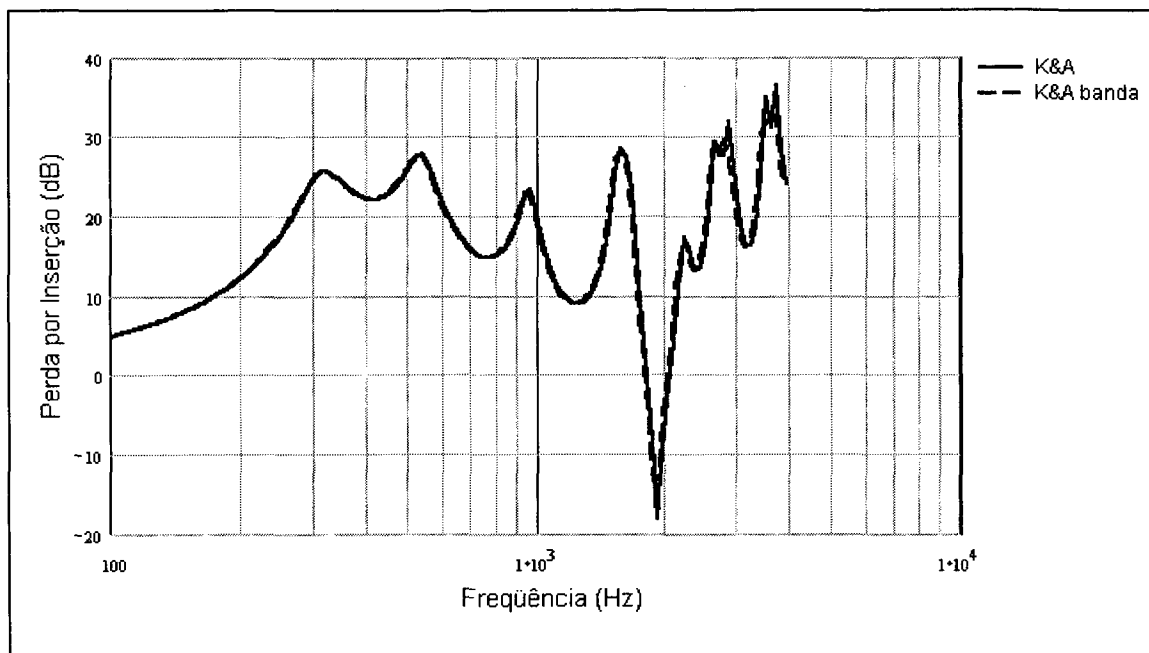


Figura 2.39 – Cálculo analítico para frequências discretas e bandas de 1/24 de oitava (posição 13).

### 2.4.3 Resultados por agrupamento

Como visto na Seção 2.4.1, os resultados de perda por inserção calculadas pelo método de Pierce, pelo algoritmo de Kurze & Anderson ou pela formulação de Maekawa são bastante semelhantes. Desta forma, decidiu-se analisá-los de forma conjunta, evitando-se a repetição de comentários e a inclusão de figuras praticamente idênticas. Entretanto, à medida que as figuras forem aparecendo, será feita referência sobre a sua origem. Estas medidas de forma alguma comprometem a análise dos resultados.

Procurou-se reunir as curvas de perda por inserção em grupos, levando-se em conta características comuns a todas as curvas do grupo. Assim, os parâmetros escolhidos foram:

- a) a altura do ponto de recepção em relação ao piso;
- b) a distância do ponto de recepção em relação à barreira.

Desta forma, considerando-se os critérios acima, as posições de recepção foram divididas em 10 grupos, resumidos na Tabela 2.2 e Tabela 2.3 e esquematizados na Figura 2.40.

Tabela 2.2 – Posições de recepção com mesma altura em relação ao piso.

Grupo	Pontos de recepção	Altura do ponto
A	01 a 05	0,01 m
B	06 a 10	0,25 m
C	11 a 15	0,50 m
D	16 a 20	1,00 m
E	21 a 25	1,50 m

Tabela 2.3 – Posições de recepção com mesma distância em relação à barreira.

Grupo	Pontos de recepção	Distância do ponto
F	01, 06, 11, 16 e 21	0,50 m
G	02, 07, 12, 17 e 22	1,00 m
H	03, 08, 13, 18 e 23	1,50 m
I	04, 09, 14, 19 e 24	2,00 m
J	05, 10, 15, 20 e 25	2,50 m

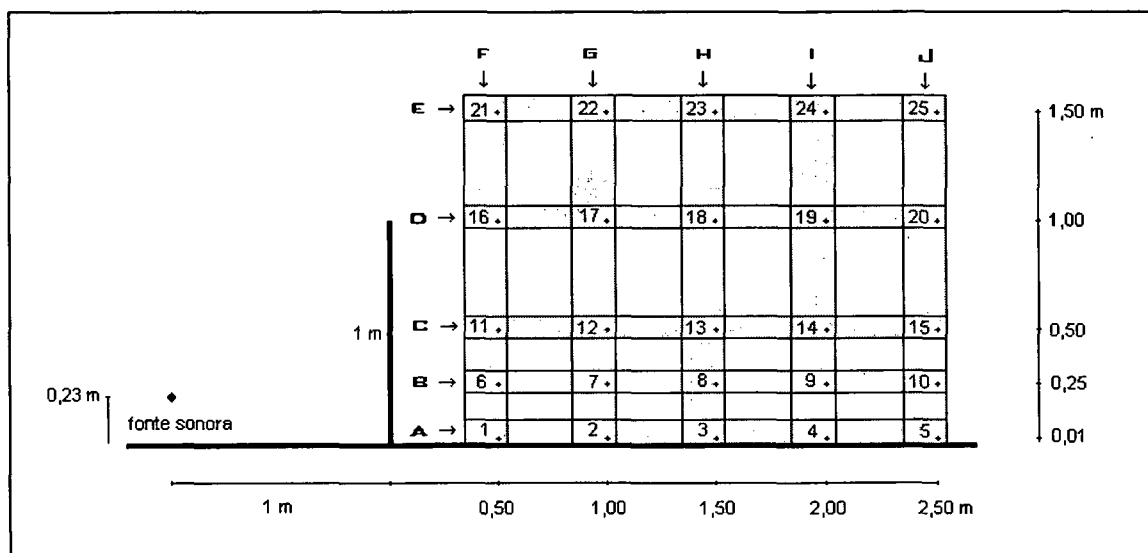


Figura 2.40 – Pontos de recepção – agrupamento por altura (A até E) e por distância (F até J).

Para os grupos A até E, cujos resultados são apresentados nas Figuras 2.41 a 2.45, os cálculos empregam a formulação de Pierce e para os grupos F até J, nas Figuras 2.46 a 2.50, as curvas exibem os cálculos do algoritmo de Kurze & Anderson. Os



resultados para a formulação de Maekawa não foram incluídos nesta análise, mas, conforme frisado anteriormente, suas características são praticamente idênticas às apresentadas por Kurze & Anderson.

Os resultados correspondentes às posições do grupo A, apresentados na Figura 2.41, têm altura igual a 1 cm, a qual, na prática, pode ser considerada nula. Nota-se que o comportamento das curvas dentro do grupo foi bastante parecido, com picos e vales de atenuação acontecendo nas mesmas frequências. Esta ótima concordância, como será visto posteriormente, está extremamente ligada à altura dos pontos de recepção.

Nesta configuração, com os receptores no piso (ou praticamente no piso), o aparecimento de picos e vales de atenuação é decorrente apenas dos fenômenos de interferência ocorridos no semi-espaco de emissão (ou da fonte).

As interferências ocorrem pela superposição das ondas viajando diretamente da fonte com aquelas que sofrem reflexão no piso. Então, há interferências construtivas, correspondentes aos picos, e interferências destrutivas, correspondentes aos vales de atenuação.

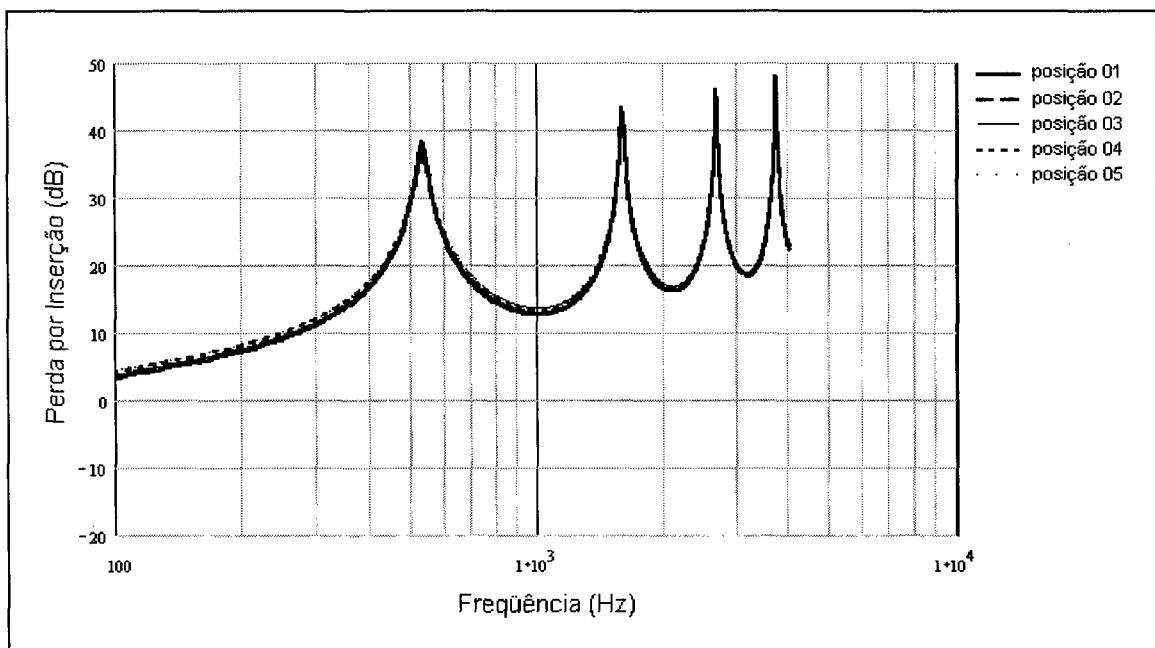


Figura 2.41 – Predição para atenuação de barreira, pela formulação de Pierce, para as posições de recepção com altura de 0,01 m (Grupo A).

Assim, uma vez que os parâmetros geométricos no semi-espaco da fonte são fixos, explica-se o comportamento bastante similar para estas curvas.

Observa-se, ainda para este grupo, a tendência de maiores valores de atenuação para pontos situados mais próximos à barreira. Essa propensão foi relatada na literatura técnica, porém, será visto a seguir que sua identificação nos outros grupos não foi satisfatória. Cabe assinalar ainda, que os resultados das formulações de Kurze & Anderson e de Maekawa mostram com mais clareza esta tendência para este grupo.

No grupo B, apresentado na Figura 2.42, a altura do receptor é  $h_r = 25$  cm. Aqui, o efeito de interferência devido à reflexão das ondas sonoras no piso rígido se faz notar com mais clareza. Desta vez, o efeito também ocorre no semi-espço de recepção, devido ao receptor encontrar-se afastado do piso. Estas combinações de ondas e superposição de efeitos provocam o aparecimento de maior número de picos e vales de atenuação. A coincidência na ocorrência dos picos e vales, observada nas curvas do grupo A, não ocorre mais. Entretanto, de uma forma geral, o espectro para cada posição de recepção é semelhante, ocorrendo apenas defasagens no aparecimento dos picos e vales e diferenças mais marcantes na amplitude destes. As defasagens são caracterizadas pelo atraso na ocorrência de picos e vales de atenuação para as posições de receptor mais afastadas da barreira.

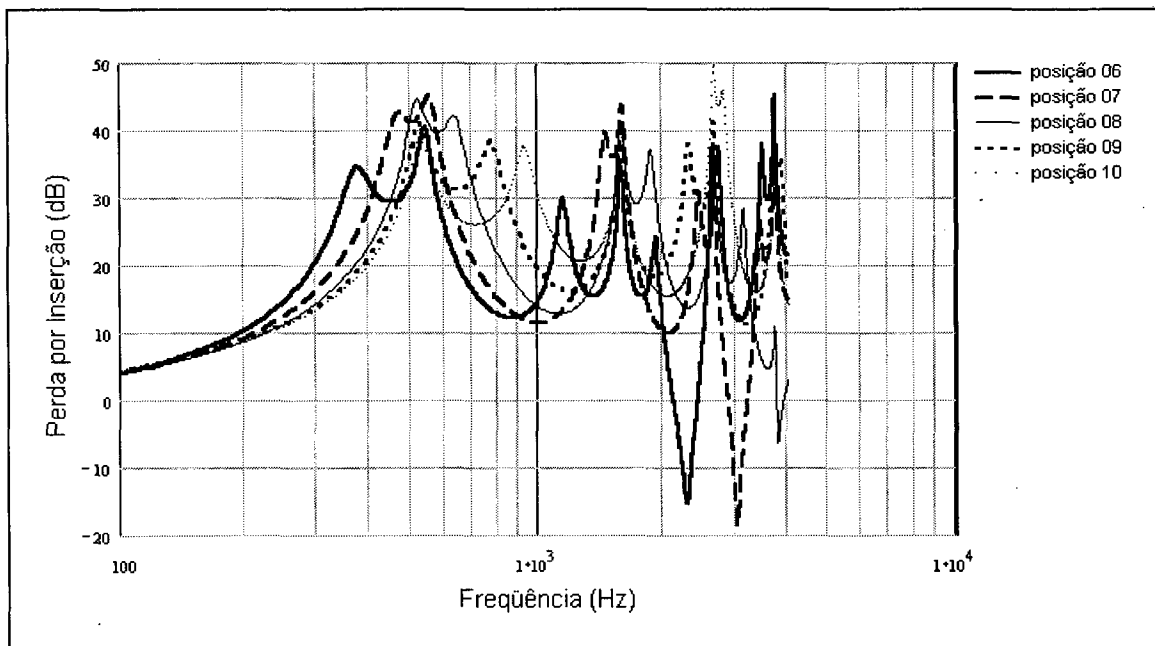


Figura 2.42 – Predição para atenuação de barreira, pela formulação de Pierce, para as posições de recepção com altura de 0,25 m (Grupo B).

Estas observações levam à constatação de que, no semi-espço de recepção, a altura do receptor, juntamente com sua posição horizontal, são fatores determinantes no

aparecimento de picos e vales de atenuação, bem como de sua amplitude e localização no eixo das frequências. Com o receptor afastado do piso, a identificação de tendências para toda a faixa de frequências, tal como observadas para as curvas do grupo A, torna-se impraticável, em virtude das defasagens entre os picos e vales de atenuação, que fazem as curvas se cruzarem várias vezes. No entanto, na faixa de frequências compreendidas entre 100 Hz e 350 Hz, pode-se verificar a mesma tendência do grupo A, com melhores resultados de atenuação para receptores mais próximos à barreira.

Para as posições do grupo C ( $h_r = 50$  cm), cujos resultados são apresentados na Figura 2.43 e do grupo D ( $h_r = 1$  m), ilustrados na Figura 2.44, valem as observações feitas para o grupo B. Novamente o efeito das interferências comanda o aparecimento de picos e vales de atenuação e seu deslocamento na frequência, bem como diferenças na amplitude e largura são influenciados pelas posições horizontal e vertical do receptor.

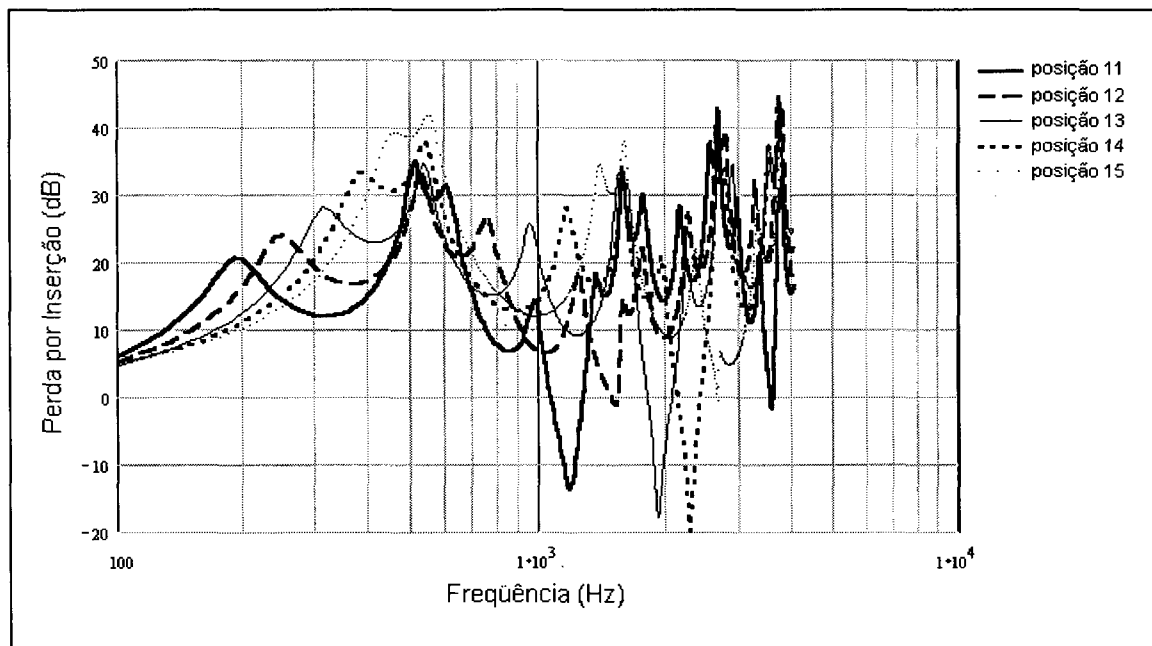


Figura 2.43 – Predição para atenuação de barreira, pela formulação de Pierce, para as posições de recepção com altura de 0,50 m (Grupo C).

O grupo E, cujo desempenho está representado na Figura 2.45, agrega as posições de recepção com altura superior à da barreira, porém, somente a posição 21 encontra-se na zona de brilho. Pode-se observar, como esperado, o comportamento diferenciado da curva correspondente a esta posição em relação às demais do grupo. Quando da comparação entre os resultados teóricos e experimentais, será discutido este

resultado. As curvas das posições 22, 23, 24 e 25, ressalvadas as diferenças em formato e amplitude, têm o comportamento anteriormente descrito para as demais posições (grupos B, C e D) com altura de recepção significativa, ou seja, aparecimento de picos e vales de atenuação deslocados na frequência, dependendo basicamente das posições horizontal e vertical de recepção, com *atraso* para as posições mais afastadas da barreira.

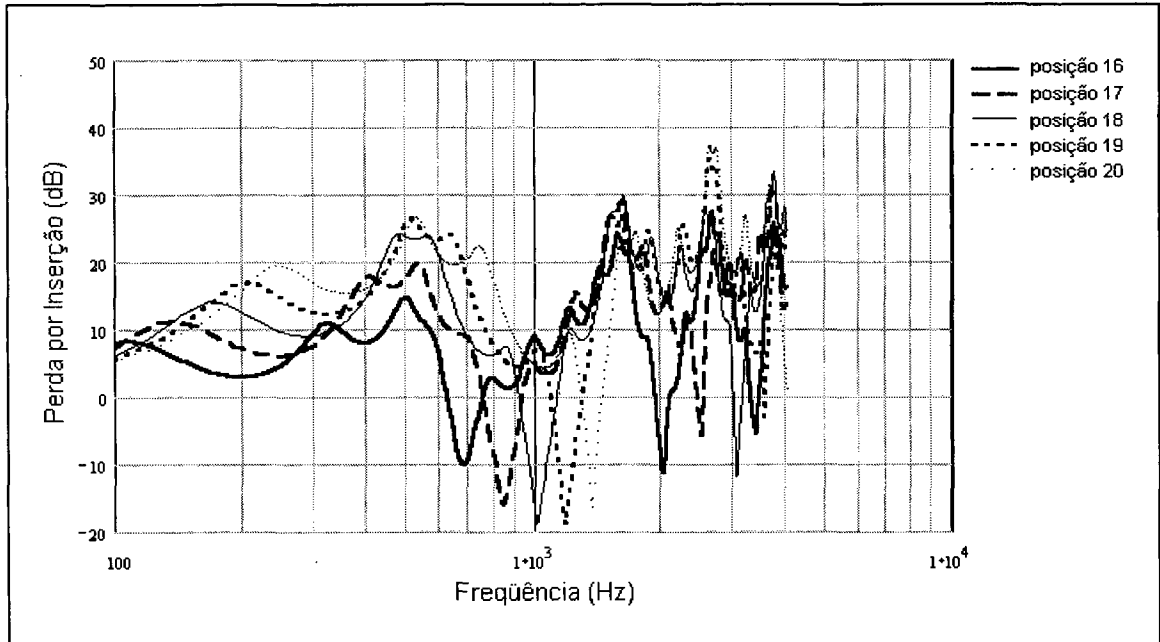


Figura 2.44 – Predição para atenuação de barreira, pela formulação de Pierce, para as posições de recepção com altura de 1,00 m (Grupo D).

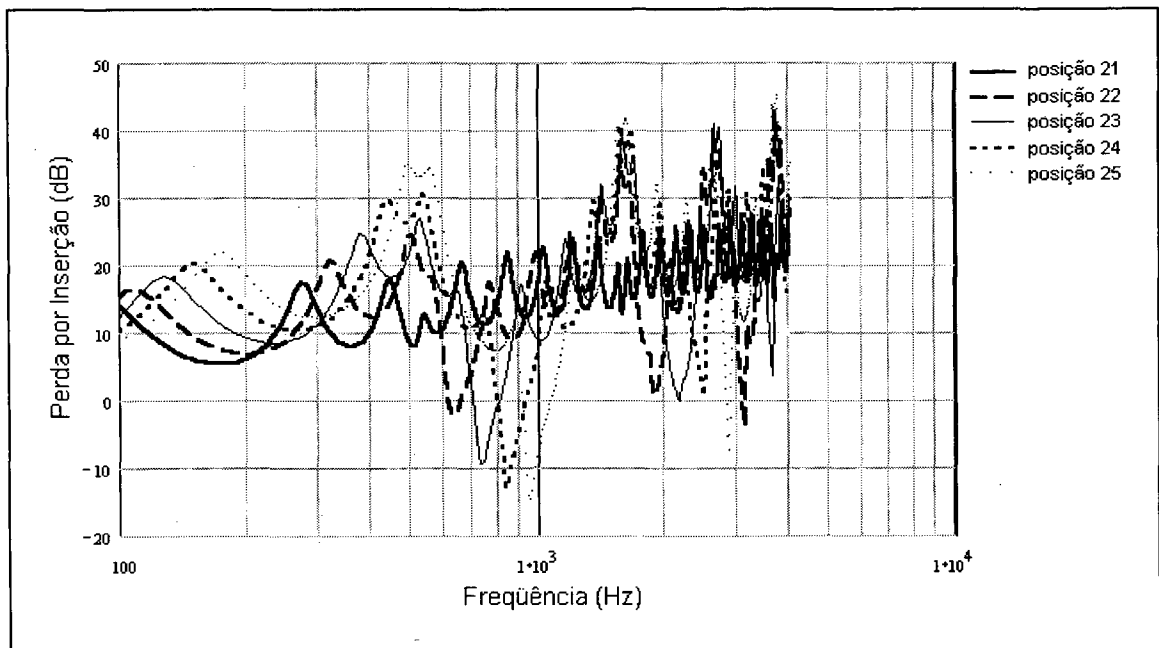


Figura 2.45 – Predição para atenuação de barreira, pela formulação de Pierce, para as posições de recepção com altura de 1,50 m (Grupo E).

A análise dos grupos F até J, cujos resultados são mostrados nas Figuras 2.46 a 2.50, sugere que a altura do receptor mostra-se mais importante na determinação do espectro das curvas do que sua distância horizontal em relação à barreira. Posições de receptor com a mesma altura e diferentes distâncias em relação à barreira apresentam curvas com comportamento mais semelhante (ao menos para as posições examinadas neste trabalho).

Entretanto, observa-se na seqüência das Figuras 2.46 a 2.50, que as curvas tendem a diminuir sua dispersão à medida que o receptor afasta-se da barreira, sugerindo a existência de um valor assintótico de atenuação para o receptor situado a grandes distâncias da barreira, conforme afirmado por PFRETZSCHNER (1996).

Finalizando a análise dos resultados obtidos pelas formulações analíticas, pode-se concluir que o incremento de altura do receptor em relação ao piso torna mais evidente o efeito de interferências causados pela reflexão das ondas sonoras no piso, dificultando a identificação de tendências.

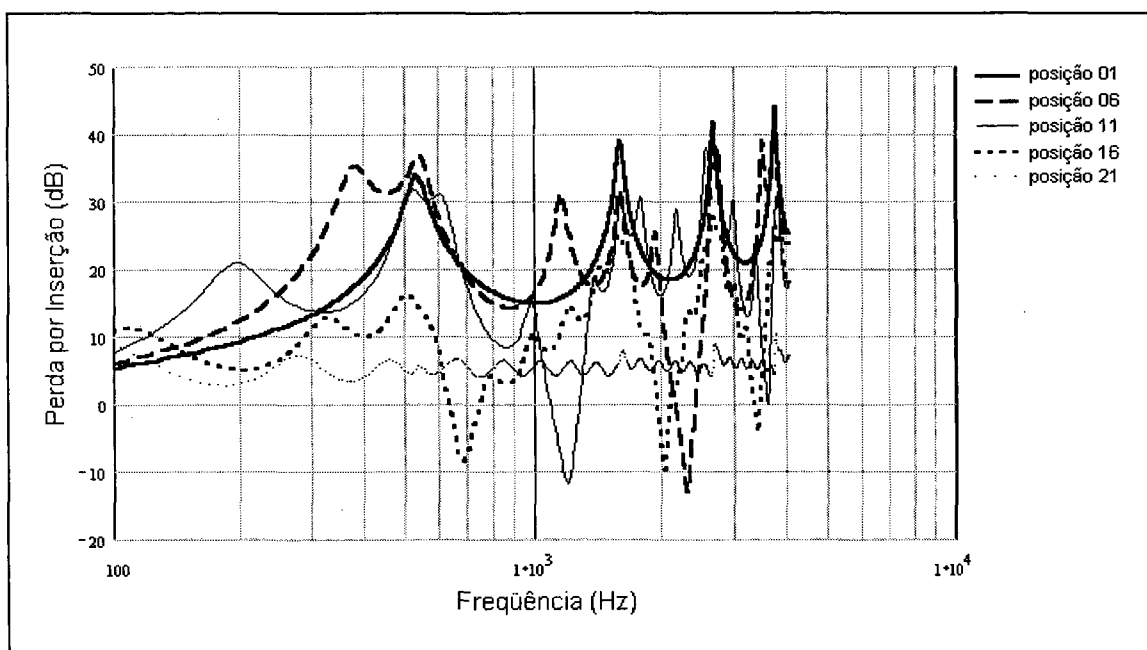


Figura 2.46 – Predição para atenuação de barreira, pela formulação de Kurze & Anderson, para as posições de recepção com distância de 0,50 m em relação à barreira (Grupo F).

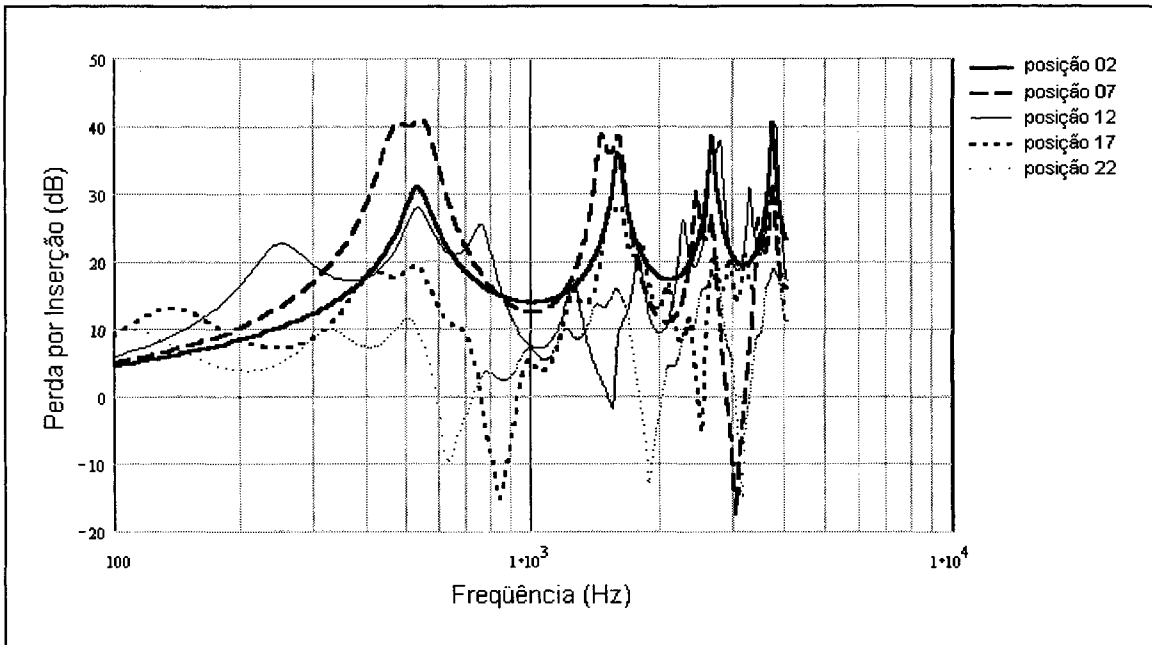


Figura 2.47 – Predição para atenuação de barreira, pela formulação de Kurze & Anderson, para as posições de recepção com distância de 1,00 m em relação à barreira (Grupo G).

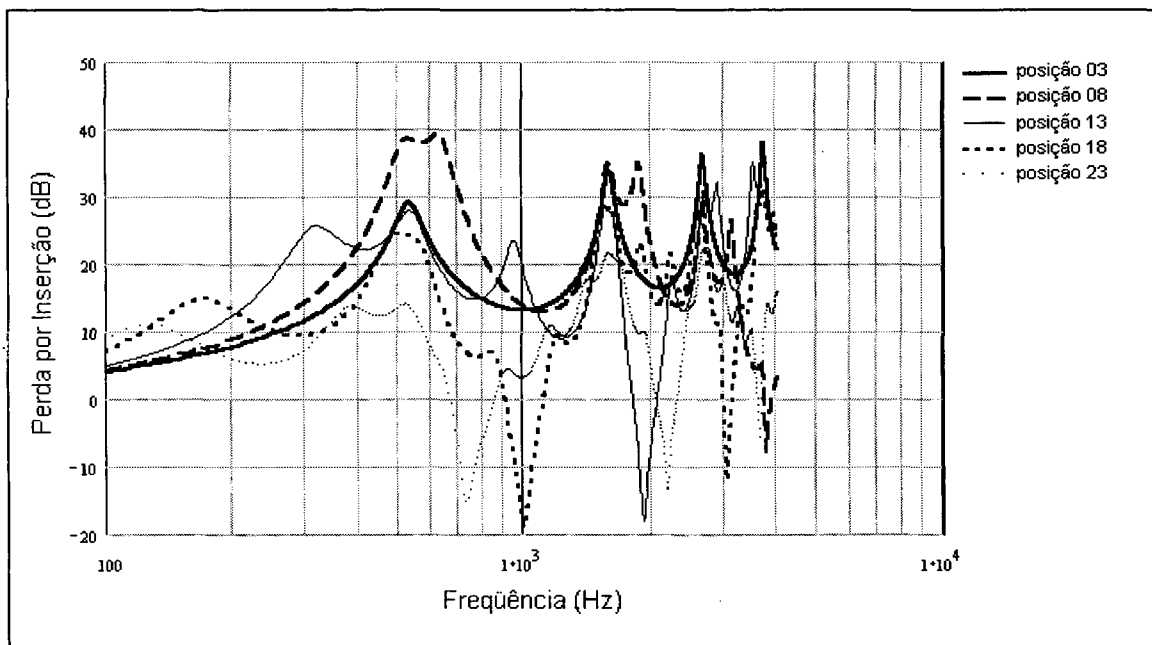


Figura 2.48 – Predição para atenuação de barreira, pela formulação de Kurze & Anderson, para as posições de recepção com distância de 1,50 m em relação à barreira (Grupo H).

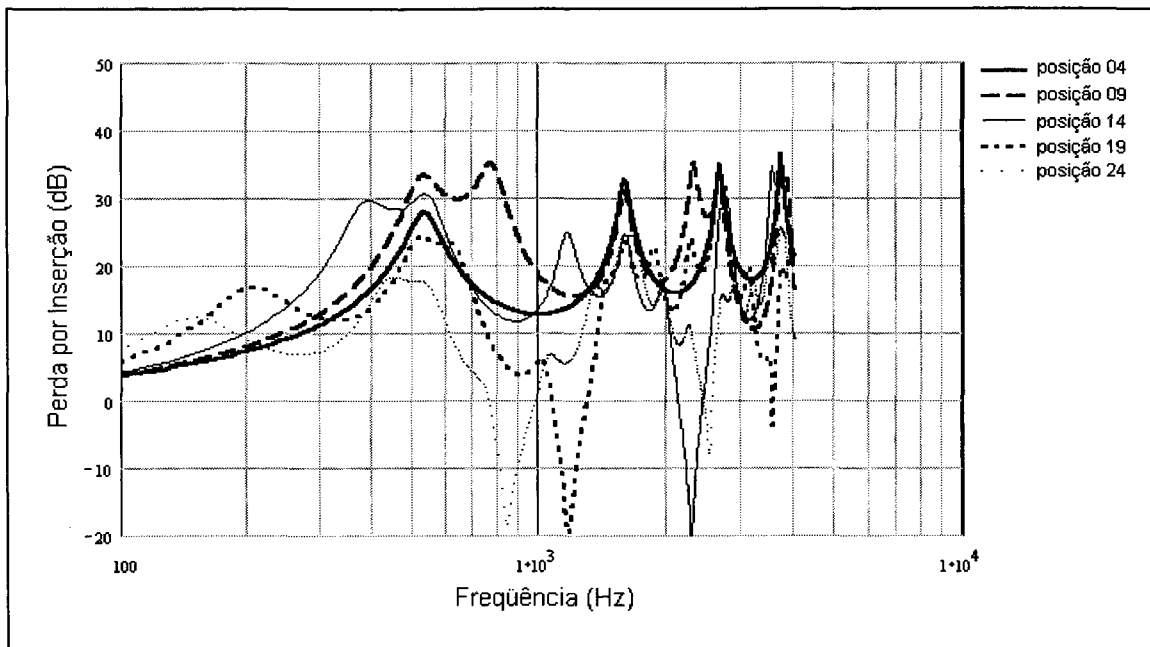


Figura 2.49 – Predição para atenuação de barreira, pela formulação de Kurze & Anderson, para as posições de recepção com distância de 2,00 m em relação à barreira (Grupo I).

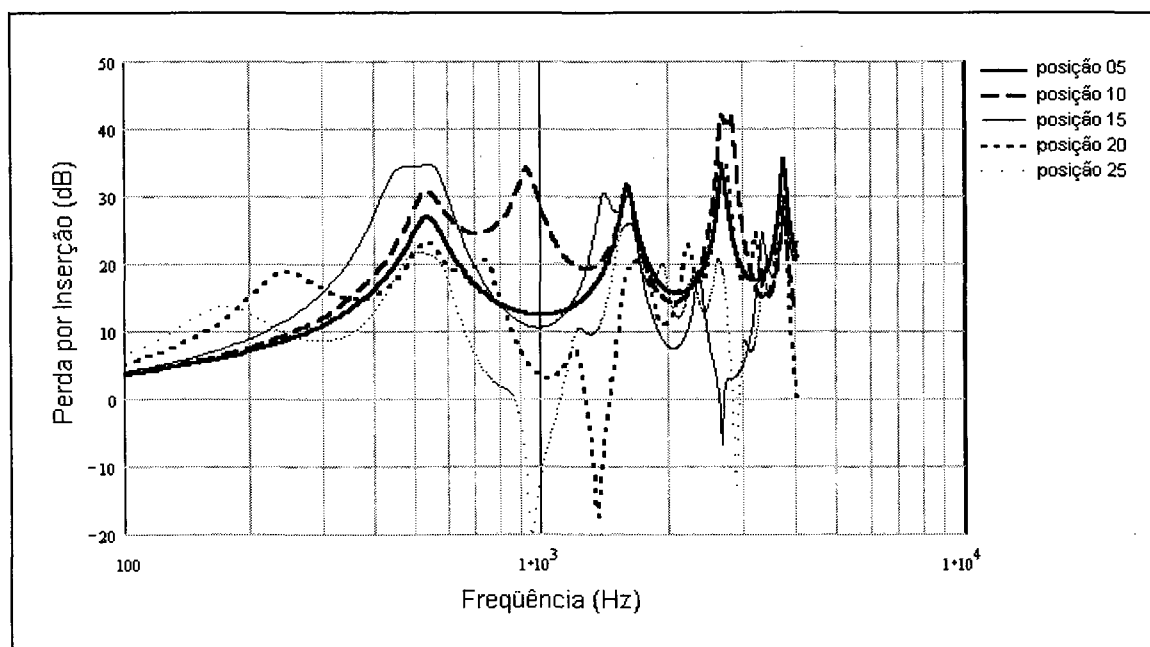


Figura 2.50 – Predição para atenuação de barreira, pela formulação de Kurze & Anderson, para as posições de recepção com distância de 2,50 m em relação à barreira (Grupo J).

## 2.5 SUMÁRIO

Neste capítulo foi feita uma revisão bibliográfica sobre as principais soluções analíticas dadas para o problema de barreiras acústicas. Dentre elas, foram selecionadas e explanadas as formulações de PIERCE (1974), KURZE & ANDERSON (1971) e MAEKAWA (1968), as quais, adaptadas pelo método de fonte-imagem e interferência dado por ROUSSEAU (1984), puderam incorporar efeitos de interferência devidos à presença de piso rígido, dando origem aos métodos mistos denominados de Pierce/Rousseau, Kurze & Anderson/Rousseau e Maekawa/Rousseau (que por medida de simplificação são referidos somente pelo primeiro nome).

A análise dos resultados entre as três formulações mostra que todas produzem resultados de atenuação muito próximos, em particular as de Kurze & Anderson e Maekawa. As diferenças entre os resultados das formulações, porém, variam dependendo da localização do receptor, isto é, se estão na zona de sombra, de transição ou de brilho, apresentando desvios crescentes à medida que se dirige da zona de sombra para a zona de brilho.

Na observação das curvas por agrupamentos, levando-se em conta posições de recepção com mesma altura ou mesma distância em relação à barreira, constatou-se que posições de recepção com mesma altura apresentam curvas com formatos similares entre si, sugerindo que a altura do receptor é determinante da forma das curvas de atenuação mais do que sua distância em relação à barreira.



## Capítulo 3

# SIMULAÇÃO NUMÉRICA PELO MÉTODO DE ELEMENTOS DE CONTORNO

Uma revisão sobre os métodos numéricos empregados na etapa de simulação do presente trabalho é exposta. São discutidas as principais características do método de elementos de contorno, as técnicas de solução e o problema da não unicidade de solução do método. É dada uma breve descrição dos *softwares* utilizados. Simulações preliminares são implementadas, a fim de se testar a validade do método para o problema em questão. Finalmente, apresenta-se a montagem do problema completo de simulação numérica bidimensional de uma barreira acústica e os resultados de perda por inserção obtidos.

### 3.1 MÉTODO DE ELEMENTOS DE CONTORNO

#### 3.1.1 Introdução

O Método de Elementos de Contorno, mais conhecido por BEM (do inglês, *Boundary Element Method*), é uma técnica numérica que pode ser usada para simular diversos problemas reais. No ramo da acústica, estes problemas podem ser, por exemplo, o cálculo do som radiado por um corpo vibrando, como é o caso de um bloco de motor, ou para a predição do campo sonoro dentro de uma cavidade, tal como o interior de um veículo. Além destes exemplos, pode-se utilizar o método para determinar o comportamento das ondas sonoras espalhadas por um objeto, tal como a predição do campo acústico difratado por uma barreira, ou para a predição da *performance* de silenciadores.

Os problemas podem ser *exteriores* ou *interiores*, dependendo do domínio envolvido. Um *problema exterior*, em acústica, é assim chamado quando o domínio

acústico é infinito ou semi-infinito (quando existe uma superfície de reflexão, tal como um piso). O cálculo do campo difratado por uma barreira acústica, é um bom exemplo de problema exterior. Ao contrário, quando o domínio acústico é limitado, o problema é dito interior, como por exemplo, no caso da predição do campo acústico dentro de um veículo. Nada impede, porém, a possibilidade do problema ter os dois domínios simultaneamente.

A geometria de um problema é representada por uma malha de elementos, que consiste em uma série de pontos chamados de *nós* na superfície do corpo modelado, os quais são conectados uns aos outros para formar os *elementos*.

A construção da malha de elementos é a primeira etapa para se resolver um problema com o BEM. O tamanho de cada elemento deve ser suficientemente pequeno para obter-se uma solução aceitável, mas não deve ser pequeno em demasia, a fim de se evitar um tempo de computação excessivo.

Em geral, afirma SEYBERT (1995), a malha de elementos deve satisfazer algumas exigências. Deve-se modelar a geometria do corpo com acurácia. Isto significa que todas as superfícies principais, bem como as bordas e esquinas, devem ser precisamente representadas. Entretanto, não é necessário modelar regiões do corpo que se possa afirmar não serem acusticamente importantes, tais como irregularidades superficiais que sejam pequenas comparadas com o comprimento de onda acústica. Adicionalmente, a malha deve ser suficientemente fina para representar a distribuição de pressão sonora na superfície do corpo. Isto pode ser feito pela seleção do tamanho do elemento, garantindo-se que ele não seja maior que uma certa fração do comprimento de onda acústica da maior frequência de interesse. Não há consenso entre os autores quanto ao número de elementos por comprimento de onda acústica (considerando-se o comprimento de onda da mais alta frequência de interesse).

Por exemplo, WATTS et al. (1994), trabalhando com modelagem bidimensional por elementos de contorno, dividiram a superfície da barreira e do piso em elementos de tamanho máximo igual a  $\lambda/2$  (onde  $\lambda$  é o comprimento de onda). Entretanto, em 1996, novamente trabalhando com modelagem bidimensional, WATTS e MORGAN (1996) ; WATTS (1996), utilizaram cinco elementos por comprimento de onda. O mesmo critério destes foi adotado HOTHERSALL et al. (1991) em suas simulações numéricas. MURADALLI e FYFE (1998), por outro lado, recomendam o uso de 6 elementos por comprimento de onda para se obter convergência de resultados.

SEYBERT (1995), por sua vez, afirma que o tamanho dos elementos é determinado pela geometria da estrutura modelada e pelo comprimento de onda acústica ou estrutural, o que for menor. Segundo ele, para elementos lineares, ao menos quatro elementos por comprimento de onda são necessários, enquanto que para elementos quadráticos, dois elementos por comprimento de onda são suficientes.

Na implementação do método de elementos de contorno deve-se optar pela formulação e pela técnica adequada, dependendo da natureza do problema a ser resolvido. Assim, deve-se escolher entre os métodos Direto ou Indireto e, também, entre as técnicas de Colocação ou Variacional.

As palavras *Direto/Indireto*, referem-se à escolha da incógnita na superfície do modelo. O método Direto usa pressão e velocidade normal como variáveis de superfície, enquanto que o método Indireto usa descontinuidade de pressão (*jump of pressure*) e descontinuidade de velocidade normal (*jump of velocity*), através da superfície, supostamente delgada. Estas duas formulações conduzem a diferentes equações integrais para o campo de pressão, as quais são resolvidas usando diferentes técnicas.

As palavras *Colocação/Variacional*, referem-se às técnicas de solução. Na técnica de Colocação, a solução aproximada é forçada a satisfazer à equação integral de contorno em um número finito de pontos na superfície, conhecidos por *collocation points*, enquanto que na técnica Variacional a solução aproximada é obtida pela minimização de um funcional associado com a equação integral de contorno original.

Na versão do *software* utilizado neste trabalho, a técnica de Colocação é usada com a aproximação Direta e a técnica Variacional é usada com a aproximação Indireta.

O propósito do método de Colocação Direto, para radiação e espalhamento acústicos, é a determinação das variáveis acústicas no domínio interior ou exterior de um objeto (mas não em ambos).

O método é baseado em uma formulação integral de contorno (BIE – *Boundary Integral Equation*) da equação de Helmholtz, que pode ser usada em uma forma direta para resolver o problema. As incógnitas para resolver o problema exterior (ou interior), conforme mencionado, são a pressão e a velocidade normal na superfície do contorno, as quais podem ser usadas para calcular diretamente as variáveis do campo acústico em qualquer ponto fora (ou dentro) da superfície de contorno.

Em um problema bem definido, uma das incógnitas é dada na superfície de contorno (condição de contorno). Existem três diferentes condições de contorno que podem ser aplicadas na superfície:

- pressão na superfície (condição de contorno de Dirichlet);
- velocidade normal na superfície (condição de contorno de Neumann);
- admitância normal na superfície (condição de contorno mista ou de Robin: é dada a relação entre a pressão e a velocidade normal na superfície).

Com o método de Colocação Direto é construído um sistema de equações que permitirá o cálculo das outras incógnitas na superfície. Equações especiais podem ser formuladas para solucionar problemas exteriores envolvendo semi-espaco (*halfspace*). O método também pode ser acoplado a um modelo estrutural de elementos finitos para levar em conta os efeitos de interação entre vibrações estruturais e do fluido.

O método Indireto de elementos de contorno é capaz de solucionar, simultaneamente, um problema de radiação e espalhamento acústico interno e externo. Enquanto no método de Colocação Direto as variáveis acústicas de superfície (pressão e velocidade normal da partícula) eram fixadas para um lado da superfície (interno ou externo), a representação indireta usa potenciais de camadas, que são as diferenças entre os valores de pressão externos e internos e suas derivadas normais, respectivamente, conforme apresentados na Figura 3.1, de acordo com,

$$\mu = p^+ - p^- \quad (3.1)$$

$$\sigma = \frac{\partial p^+}{\partial n} - \frac{\partial p^-}{\partial n} \quad (3.2)$$

sendo que  $\mu$  é a diferença entre a pressão externa e interna na superfície e é chamado de salto de pressão ou potencial de dupla camada, e  $\sigma$  é a diferença entre as derivadas normais de pressão exterior e interior na superfície e é chamada salto da derivada normal de pressão ou potencial de simples camada.

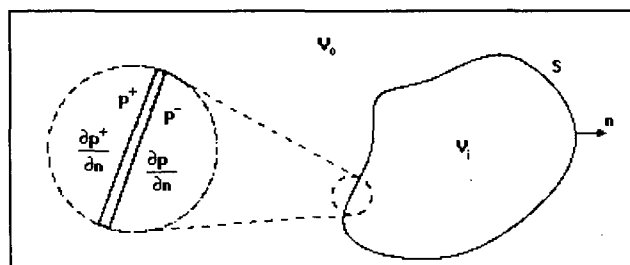


Figura 3.1 - Pressão e descontinuidade de pressão.

No método Indireto, as variáveis acústicas em qualquer ponto no volume ( $V = V_o \cup V_i$ ) são computadas como funções desses dois potenciais de camada. As condições de contorno que podem ser aplicadas são as mesmas que para o método de Colocação

Direto e podem ser formuladas em termos de potenciais de camada. Na resolução do problema, o primeiro passo será o cálculo desses potenciais de camada desconhecidos. Por causa de singularidades nas integrais, o método de Colocação não é usual (ou é difícil de aplicar) para o método Indireto. Portanto, a formulação Variacional é elaborada, a qual é capaz de solucionar o problema, dando origem, então, ao chamado método Variacional Indireto.

Sabe-se que para problemas externos o BEM apresenta falha em certas frequências, conhecidas como *frequências irregulares*.

Segundo SEYBERT e RENGARAJAN (1987); COYETTE (1995), este problema, puramente matemático, resulta da relação fechada entre as representações do contorno integral exterior e interior. Esta relação induz o aparecimento de uma falha na solução do problema exterior em algumas frequências discretas, relacionada com o problema de autovalor interior (ou frequência de ressonância). O espectro associado é basicamente dependente da forma integral selecionada para calcular o modelo de elementos de contorno. Esta falha leva à não unicidade de solução para problemas tratados com o Método Direto mas, no caso do Método Indireto, como afirmam BURTON e MILLER (1971) apud SEYBERT (1995), “(...) os efeitos são ainda mais catastróficos (...) por causa da não existência de solução para o problema.”

Vários procedimentos têm sido propostos na literatura para contornar este problema, a saber:

- Método de Colocação Direta: o procedimento mais tradicional, proposto primeiramente por SCHENK (1968) apud SEYBERT e RENGARAJAN (1987), consiste em sobredeterminar o problema, pela adição de algumas equações ligadas à determinação de pressão nula em alguns pontos internos (método **CHIEF** – *Combined Helmholtz Integral Equation Formulation*). O problema sobredeterminado pode ser resolvido pelo uso dos multiplicadores de Lagrange. O método é simples, mas não há informações sobre o número de pontos selecionados e a *melhor* localização destes pontos. Esta é a principal desvantagem do método. Existem, entretanto, algumas regras, como aumentar o número de pontos com a frequência, evitar localizar os pontos em superfícies nodais interiores, etc., mas o controle da eficiência do método só pode ser feito *a posteriori*. Em alguns casos, porém, o procedimento pode ser ineficiente (se pontos estiverem localizados em superfícies nodais interiores).

- Método Variacional Indireto: o uso da forma derivativa leva às mesmas dificuldades, exceto que o espectro de *freqüências irregulares* agora é diferente. Novamente um procedimento de sobredeterminação poderia ser usado mas, segundo COYETTE (1995), o tratamento tradicionalmente empregado implica a especificação de uma condição de contorno de impedância singular em alguma superfície interna. O objetivo é ainda o mesmo: modificar a forma do problema interior tal que a solução relacionada é um campo de pressão nulo nas freqüências consideradas.

### 3.1.2 Parâmetros de entrada

Além da malha de elementos, é necessário que se forneça algumas informações a respeito do problema em cada ponto de nó da malha. Estas informações são as chamadas *condições de contorno*.

No caso de uma análise acústica, as condições de contorno podem ser: pressão, velocidade normal ou admitância (ou impedância). Tanto a amplitude como a fase da velocidade devem ser conhecidas. Se uma parte da superfície for coberta por um material absorvente, deve-se explicitar a impedância acústica do material em cada um dos nós pertencentes a esta superfície.

### 3.1.3 Saída de dados

O BEM calcula a distribuição de pressão sonora na superfície de um corpo a partir da geometria do corpo e das condições de contorno dadas pelo usuário. Uma vez que a pressão sonora é conhecida na superfície, a intensidade sonora, a potência sonora, e a eficiência de radiação sonora podem ser encontradas. Posteriormente, a pressão sonora, a velocidade da partícula e a intensidade sonora podem ser calculadas nos chamados *field points* (ou pontos de campo), isto é, pontos no domínio acústico que não estão na superfície do corpo. Estes pontos de campo podem até estar localizados em um plano de reflexão, como por exemplo, um piso.

## 3.2 ANTECEDENTES

No início da década de 80, SEZNEC (1980) apresentou o BEM em um estudo de difração em torno de barreiras acústicas. Esta nova ferramenta permitiu a avaliação

precisa do campo de pressão acústica difratada por barreiras de diferentes formas geométricas sobre um piso plano.

Ao contrário das formulações analíticas, as condições de absorção do solo e da barreira podem ser facilmente incluídas. A principal limitação da técnica é que a influência dos parâmetros externos, tais como vento, gradientes de temperatura e outros fatores ambientais ainda não podiam ser incluídas (atualmente existem pesquisas visando a inclusão destes fatores na análise). Tais parâmetros, entretanto, não são levados em conta em outros métodos e, além disso, se for desejável comparar diferentes formas, ou diferentes qualidades de coberturas absorventes, a hipótese de uma atmosfera estacionária e homogênea não é restritiva, desde que se tenha usado esta regra para a situação de referência. Numa segunda etapa do trabalho, Sez nec compara os resultados das simulações numéricas por elementos de contorno com cálculos analíticos, obtendo boa correlação.

Embora os resultados tenham sido animadores, o autor frisa em seu trabalho que não intenciona que esta metodologia seja usada para competir com cálculos analíticos aproximados, os quais são mais usuais em problemas de campo. Ao invés disso, o BEM seria usado como uma ferramenta de pesquisas, a princípio com a capacidade de efetuar comparações para casos teóricos, e para auxiliar no desenvolvimento de novas aproximações analíticas, no entendimento de discrepâncias entre diferentes fórmulas ou na definição de diagramas para aplicações práticas.

KAWAI e TERA I (1990) retomam o estudo do uso do BEM como ferramenta para calcular o campo difratado por barreiras rígidas ou absorventes. O trabalho é bastante teórico, mas alguns exemplos numéricos são apresentados para demonstrar a efetividade do método.

No ano seguinte, HOTHERSALL et al. (1991) publicam um trabalho extenso e interessante, no qual descrevem um modelo numérico que permite que o campo sonoro da região próxima a barreiras acústicas seja calculado usando o BEM. A não unicidade de solução do método que, como comentado anteriormente, pode produzir resultados incertos, é discutida. Assim como SEZNEC (1980), estes autores observam que uma das principais vantagens apresentadas pelo método é a possibilidade de ser aplicado a barreiras com seção transversal de forma arbitrária e com diferentes materiais superficiais. O modelo apresentado no trabalho de Hothersall era bidimensional, mas resultados mostram que os mesmos apresentam boa correlação com os obtidos para um

problema tridimensional de propagação, considerando uma fonte sonora pontual e uma barreira de comprimento infinito.

O modelo estudado foi usado para comparar a eficiência de uma ampla gama de construções de barreiras acústicas simples de diferentes alturas, forma da seção transversal e recobrimento da superfície. Os efeitos da cobertura do terreno também foram considerados. As comparações foram feitas pelo exame do espectro da perda por inserção das barreiras em frequências discretas e, também, através da perda por inserção em banda larga para uma fonte com espectro característico de ruído de tráfego ponderado pela curva A. Estimativas de eficiência relativa foram apresentadas em termos de perda por inserção, na zona de sombra das barreiras.

WATTS et al. (1994) indicam o BEM como um eficiente método para a investigação inicial do potencial de *designs* inovadores para barreiras. Os mesmos autores, conduzindo testes experimentais em escala natural, comprovaram eficiência superior, em termos de proteção acústica, de barreiras com perfis em forma T e com múltiplas bordas de difração. A superioridade destas formas alternativas já havia sido predita através de modelagem por BEM. Sendo assim, constituíram-se em um teste útil de validação da técnica de elementos de contorno para predições teóricas.

No meio da década de 90, uma série de trabalhos publicados em uma conferência (LAI, 1995 ; HERSTER, 1995; FYFE, 1995), mostram que a aplicação do BEM no cálculo, análise e otimização de barreiras acústicas havia tomado grande impulso.

LAI (1995), utilizando um pacote de *software* comercial, investiga o potencial do método na predição da *performance* de desenhos mais complexos de barreiras. Os resultados das simulações numéricas em duas dimensões são comparados com cálculos analíticos e apresentam boa correlação. Lai observou os efeitos da espessura, altura e absorção no desempenho das barreiras e avaliou um redutor de ruído comercial para barreiras acústicas, que consiste em um cilindro com material absorvente, fixado no topo da barreira. Finalmente, o autor conclui que o parâmetro mais significativo para a eficiência de barreiras é a sua altura e que o cilindro testado apresenta boa eficácia na melhora das qualidades de proteção de uma barreira. Ademais, o uso do BEM para calcular a *performance* de barreiras acústicas demonstrou boa capacidade.

HERSTER (1995), usando o mesmo pacote comercial, apresenta o estudo de dois modelos de barreira, com cilindro absorvente no topo e com o lado voltado para a fonte sonora recoberto por material absorvente, sendo a primeira uma configuração de



barreira simples e a outra, de barreiras paralelas. Suas conclusões a respeito da eficiência do cilindro como sistema de redução de ruído concordam com as comentadas por LAI (1995).

FYFE (1995), por sua vez, fez uma comparação entre a modelagem bidimensional e tridimensional, utilizando a mesma técnica de elementos de contorno, e comparou esta última com o modelo proposto por LAM e ROBERTS (1993) para barreiras de dimensões finitas. Os modelos de elementos de contorno revelaram significantes relações entre as características de desenho e a perda por inserção das barreiras acústicas. Um resultado importante, segundo o autor, foi o entendimento de que a *performance* de uma barreira é altamente dependente da frequência. Assim, o espectro da fonte sonora influencia a avaliação da barreira. Além disso, também concluiu que, quando a fonte sonora situa-se próxima à barreira, ou quando barreiras paralelas são usadas, um cobertura absorvente na face da barreira voltada para a fonte é bastante benéfica. A análise tridimensional de barreiras finitas com tamanho moderado através do BEM mostrou-se computacionalmente bastante intensiva, exigindo grande capacidade de computação e memória. Em contrapartida, foi demonstrado que o novo método proposto por LAM e ROBERTS (1993) aplicado à mesma barreira oferece acurácia comparável, porém com o envolvimento de um pequeno número de cálculos.

ALFREDSON e DU (1995) testaram a *performance* de barreiras com perfis não usuais através de simulação pelo BEM. Os resultados apurados mostram um ganho de até 5 dB(A) na eficiência de proteção quando estes perfis são comparados a uma barreira convencional, isto é, com perfil reto.

FUJIWARA e HOTHERSALL (1996) utilizaram o método dos elementos de contorno para modelar uma barreira em formato T, com a superfície superior composta por um plano com várias depressões. Este tipo de superfície com depressões pode ser projetado para absorver o ruído em faixas de frequências escolhidas, através da variação das dimensões das depressões, que provoca mudança de fase e interferência destrutiva da onda incidente. Para a modelagem em BEM, o plano absorvente é considerado uma superfície reta, sendo, portanto, necessário que se encontre uma expressão adequada para descrever a impedância equivalente do plano absorvente (plano com depressões). Os resultados do estudo apontaram para grandes valores de perda por inserção nas faixas de frequências escolhidas.

WATTS e MORGAN (1996) conduziram um estudo teórico-experimental visando o desenvolvimento de um perfil de interferência para ser empregado na melhora

das características de proteção de barreiras acústicas. O BEM foi utilizado na etapa de planejamento e os resultados experimentais, mais uma vez, validaram o método numérico como ferramenta de desenvolvimento para novas formas e configurações de barreiras.

Seguindo na mesma linha de pesquisa, WATTS (1996) investiga a degradação da eficiência de barreiras paralelas, causada pelas sucessivas reflexões das ondas entre as duas barreiras, e a possibilidade de melhora através do uso de barreiras com as superfícies cobertas por material absorvente e de barreiras inclinadas. Os resultados experimentais mostraram boa correlação com as modelagens numéricas, sendo que estas apresentaram níveis de pressão um pouco acima dos medidos. Segundo o autor, esta diferença entre valores medidos e preditos pode ser explicada pela hipótese feita na simulação por BEM, em que a área de localização dos receptores foi considerada como sendo rígida, ao invés de absorvente. Esta simplificação foi assumida para reduzir consideravelmente o tempo de processamento. Um fonte adicional de erro foi que as superfícies da barreira foram assumidas como sendo perfeitamente refletoras e paralelas. Na prática, esta situação idealizada não é alcançada, uma vez que alguns desvios são inevitáveis. Trabalhos anteriores mostram que ambos os fatores tendem a aumentar os níveis sonoros preditos, assinala o autor.

HOTHERSALL e HOROSHENKOV (1997) conduzem um trabalho comparativo com barreiras. O trabalho é abordado por modelagem bidimensional em BEM, método fonte-imagem e medições experimentais. O modelo em BEM é restrito a duas dimensões para este tipo de problema, por causa da extensão da superfície a ser discretizada e pelo grande número de cálculos, em razão da faixa de frequências de interesse. O segundo método envolve a definição de imagens das fontes sonoras nas superfícies do piso e a adição da contribuição de cada imagem na pressão sonora final medida no ponto receptor. Uma das desvantagens do método é que os efeitos da reflexão e difração em superfícies complexas não são definidos com acurácia, pois uma imagem completa somente existe para reflexão de um plano infinito homogêneo. Assim, foram usadas aproximações para calcular os efeitos de difração. Os resultados das comparações foram um tanto dispersivos, sendo atribuídos aos aspectos singulares de cada método, o que tornou as condições de contorno não homogêneas em cada abordagem.

GRANAT et al. (1997) apresentaram em seu trabalho a solução de alguns problemas numéricos envolvendo barreiras acústicas, através da formulação Variacional

Indireta de elementos de contorno. Seus resultados mostraram boa correlação com soluções obtidas por outros autores utilizando o método clássico de Colocação Direta e com resultados experimentais encontrados na literatura.

A comparação entre resultados de métodos analíticos de cálculo e de simulações numéricas por BEM é retratada por MURADALLI e FYFE (1998). As diferenças entre resultados obtidos por métodos analíticos modificados e simulações bidimensionais são pequenas, com a vantagem da rapidez de cálculo dos métodos baseados na teoria da difração. Numa segunda etapa, resultados de simulações de um modelo bidimensional de barreira infinita (utilizando fonte linear coerente) e dois tridimensionais de barreira infinita e finita (ambos com fonte pontual), são avaliados. Segundo eles, são muito pequenas as diferenças entre os resultados de resposta em frequência destes modelos. Assim, além da comprovada indiferença entre as diferentes abordagens (2D ou 3D), também é chamada a atenção para a independência quanto ao tipo de fonte usada, seja ela linear ou pontual, para os resultados finais de resposta em frequência.

### 3.3 DESCRIÇÃO DOS SOFTWARES USADOS

Muitos programas comercialmente disponíveis de pré e pós-processamento desenvolvidos para o Método de Elementos Finitos (FEM), podem ser usados também para a construção de malhas para o Método de Elementos de Contorno (BEM) (pré-processamento). As propriedades físicas dos elementos usados devem ser imateriais, uma vez que os elementos de contorno não têm espessura ou propriedades. Estes mesmos programas podem ser usados para visualizar os resultados do BEM usando suas capacidades normais de contorno (pós-processamento).

O ANSYS é um *software* para análise por elementos finitos de uso geral, permitindo a análise de problemas em diversos campos da engenharia como, por exemplo, problemas nas áreas estrutural, térmica, elétrica, eletromagnética e fluidos. Na área de análise estrutural, é possível realizar-se análise estática, modal, de resposta harmônica e outras.

O *software* é dividido em pré-processador, processador (*solver*) e pós-processador. O pré-processador possui amplos recursos para a construção do modelo da estrutura a ser analisada, permitindo a modelagem de geometrias complexas e geração automática da malha de elementos. Depois da construção do modelo, pode-se entrar na fase de solução, onde deve-se escolher o tipo de análise a ser realizada, além da

aplicação das condições de contorno. Após a obtenção da solução, o *software* permite a visualização e pós-processamento dos resultados, com geração de curvas, mapas de resposta (cores ou contornos) e animação gráfica.

O SYSNOISE (*System for Numerical Noise Analysis*), da LMS-NIT (Bélgica), é um pacote de *software* comercial de análise vibro-acústica, baseado no método de elementos finitos e no método de elementos de contorno, podendo ser utilizado principalmente para problemas de predição de campos sonoros em volumes fechados, campo sonoro radiado e problemas envolvendo interação entre fluido e estrutura. Desta forma, o SYSNOISE implementa rotinas de FEM acústico e estrutural e o BEM é implementado em duas formulações matemáticas diferentes, os chamados método Direto e Indireto, possibilitando grande flexibilidade para resolução de diversos problemas.

Na sua versão atual, o SYSNOISE não possui gerador de malha, tendo a geometria da estrutura e meio acústico (este último no caso de FEM) que ser obrigatoriamente gerados externamente (no presente caso, foi usado o ANSYS), possuindo para isso, interface com pré-processadores de diversos programas de elementos finitos. Após a importação da malha de elementos, devem ser definidas as características dos materiais e aplicadas as diferentes condições de contorno acústicas (pressão, velocidade ou impedância) e/ou mecânicas (força ou deslocamento) necessárias à análise. É definido, então, o procedimento de análise e obtida a solução, inicialmente na malha de elementos e, em seguida, em qualquer ponto do domínio através da definição de pontos de campo (pontos do domínio acústico selecionados para os quais os resultados serão calculados). Os resultados podem ser exportados e visualizados em um pós-processador externo ou no pós-processador do próprio SYSNOISE, na forma de curvas de resposta em frequência para determinado ponto de campo, ou em mapas de cores de uma malha de pontos de campo para uma frequência particular.

### 3.4 TESTES PRELIMINARES DE VALIDAÇÃO

Antes de serem iniciadas as simulações referentes a este trabalho, foram feitas simulações preliminares de problemas com solução conhecida e de problemas apresentados em outros trabalhos, com as seguintes finalidades:

- a) adquirir proficiência na operação dos *softwares*;

- b) adquirir confiança nos resultados;
- c) escolher, dentre os métodos de solução, conforme exposto na Seção 3.1.1, o mais adequado ao problema;
- d) definir os parâmetros adequados à simulação.

Assim, primeiramente foram simulados dois problemas de atenuação por difusão geométrica, utilizando-se fonte pontual e fonte linear. Em seguida, procurou-se repetir as simulações apresentadas nos trabalhos de LAI (1995) e de GRANAT et al. (1997).

### 3.4.1 Atenuação por difusão geométrica

É sabido de longa data que a grandes distâncias de uma fonte sonora, em atmosfera homogênea, não dissipativa e sem a presença de planos refletores, a pressão sonora varia inversamente com a distância da fonte. A atenuação devida à difusão geométrica,  $A_D$ , é aproximada por

$$A_D = C \cdot \log\left(\frac{r}{r_0}\right) \quad [\text{dB}] \quad (3.3)$$

sendo

$r$ , a distância entre o ponto de recepção e o centro da fonte [m];

$r_0$ , uma distância de referência de 1 metro.

$C$ , uma constante que toma valores de  $C = 20$  para uma fonte pontual e  $C = 10$  para uma fonte linear.

Essa razão teórica de decaimento corresponde a um decréscimo de 6 dB/duplicação de distância para uma fonte pontual e de 3 dB/duplicação de distância no caso de uma fonte linear.

Assim, como simulação preliminar empregando o SYSNOISE, foram realizadas predições numéricas bidimensionais do modelo físico de uma fonte radiando energia sonora em campo livre, a fim de se confirmar o valor teórico de decaimento do nível de pressão sonora com a distância predito pela equação (3.3).

Conforme apresentado na Seção 3.1, a simulação de um modelo através do método de elementos de contorno requer, antes de tudo, uma malha de elementos. O fenômeno da difusão geométrica em campo livre, entretanto, pressupõe uma fonte

emitindo na ausência de qualquer obstáculo que possa interferir no campo sonoro radiado. Para contornar o problema de uma maneira aceitável, construiu-se previamente no ANSYS uma malha com apenas 1 elemento, colocada a uma distância muito grande da fonte sonora (200 m), se comparada com as dimensões da malha e com os comprimentos de onda acústica envolvidos. Desta forma, garantiu-se condições de propagação em campo livre, sendo desprezível a influência da malha sobre o campo sonoro. O tamanho do elemento utilizado foi de 0,01m, o que proporciona resultados confiáveis até a frequência de 5666 Hz, levando-se em consideração a recomendação do manual do usuário do *software*, que prescreve o uso de 6 elementos por comprimento de onda. Este tamanho de elemento proporciona uma margem de confiança adicional nos resultados, tendo em vista os valores recomendados por outros autores para que se obtenham valores aceitáveis, conforme apresentado na Seção 3.1.1.

Nesta simulação preliminar foram calculados os níveis de pressão sonora para as frequências centrais de 1/3 de oitava compreendidas no intervalo entre 63 Hz e 4 kHz.

O método selecionado foi o Variacional Indireto, em razão das particularidades do problema requeridas para a montagem da simulação.

As condições de contorno aplicadas ao elemento que compunha a malha foram a atribuição da impedância acústica do ar à sua superfície e descontinuidade de pressão em suas extremidades livres.

Como visto anteriormente, o fenômeno da difusão geométrica está intimamente ligado com a natureza da fonte sonora. Por esta razão, dois tipos de fonte foram utilizados nas simulações: fonte com espalhamento esférico, correspondente a uma fonte pontual em três dimensões, e fonte com espalhamento cilíndrico, equivalente a uma fonte linear coerente para o caso tridimensional. A amplitude de pressão das fontes utilizadas foi fixada em  $1 \text{ N/m}^2$  para todas as simulações.

A Figura 3.2 mostra o resultado da primeira simulação, onde observa-se uma queda de 6 dB por duplicação de distância, concordando integralmente com o valor teórico de decaimento para fonte pontual.

A Figura 3.3 apresenta os resultados de atenuação por difusão geométrica para uma fonte linear coerente. Novamente os valores da simulação numérica obtiveram ótima concordância com os valores teóricos. Como era esperado, o decaimento foi de 3 dB por duplicação de distância.

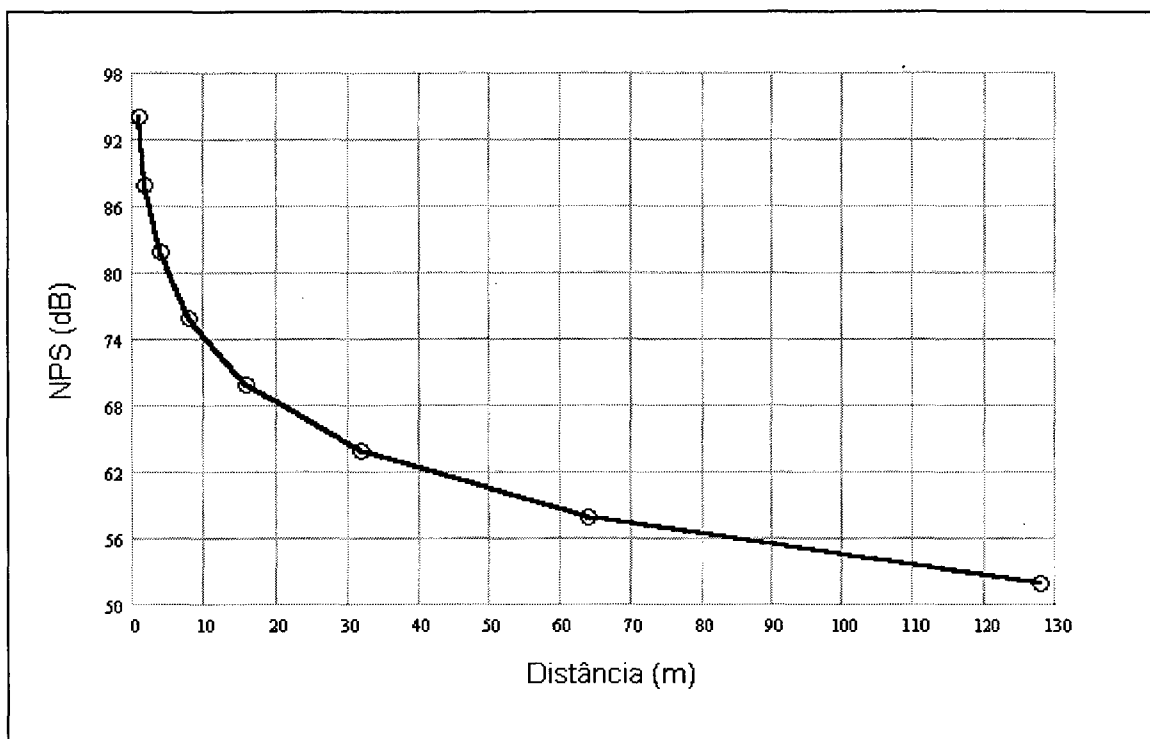


Figura 3.2 – Atenuação por difusão geométrica para uma fonte pontual a 1 kHz [decaimento de 6dB / duplicação de distância em relação à fonte sonora].

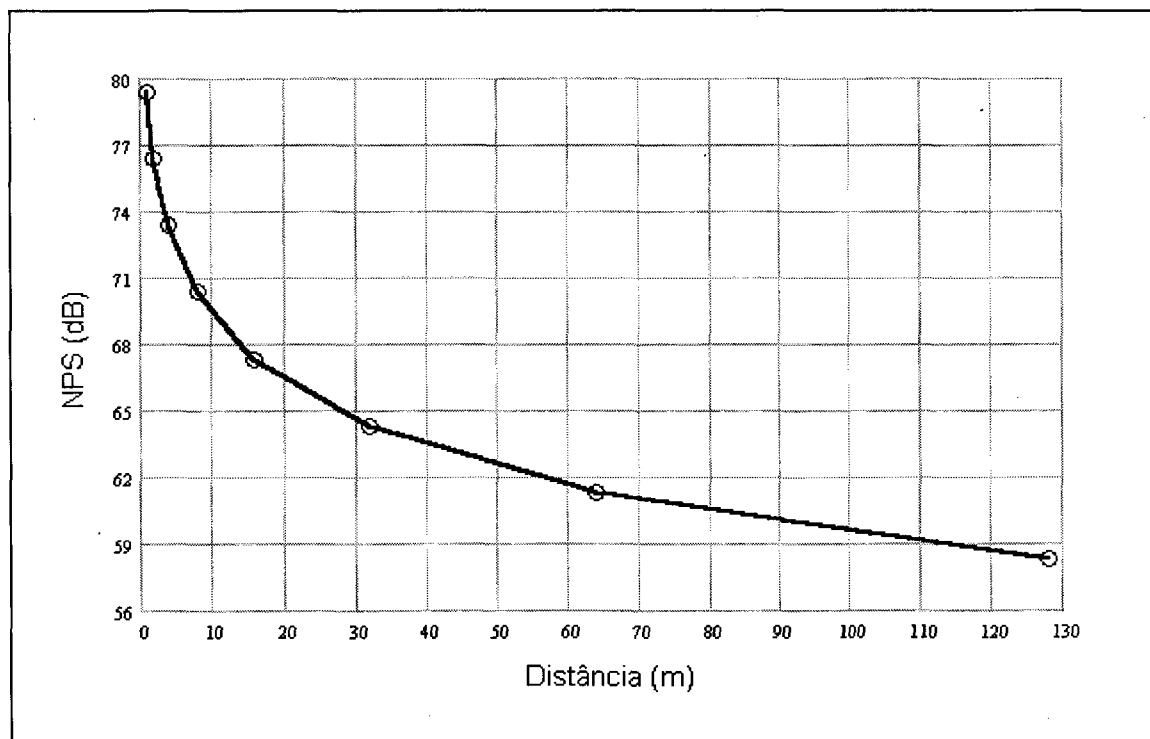


Figura 3.3 – Atenuação por difusão geométrica para uma fonte linear a 1 kHz [decaimento de 3dB / duplicação de distância em relação à fonte sonora].

### 3.4.2 Barreiras Acústicas

Nesta seção, são apresentadas duas simulações que reproduzem modelos de barreiras estudadas por outros autores que também utilizaram o método de elementos de contorno em seus trabalhos.

A primeira é um modelo de elementos de contorno bidimensional de barreira acústica investigado por LAI (1995), apresentando um estudo da atenuação de uma barreira de superfícies refletoras construída sobre um piso rígido.

Neste caso, o modelo foi reproduzido no SYSNOISE, seguindo-se as mesmas características descritas no trabalho de Lai, e encontra-se ilustrado na Figura 3.4. A malha de elementos, construída no ANSYS, foi composta de elementos tipo viga (BEAM3), o qual apresenta três graus de liberdade: duas translações e uma rotação. O piso não foi discretizado em elementos; o comando *halfspace* do SYSNOISE foi utilizado para atribuir velocidade normal nula na superfície do mesmo. Empregou-se uma fonte linear com amplitude de pressão igual à unidade. Os valores de perda por inserção foram calculados para as frequências centrais de 1/3 de oitava entre 63 Hz e 4 kHz. A condição de contorno atribuída para as superfícies da barreira foi de admitância nula.

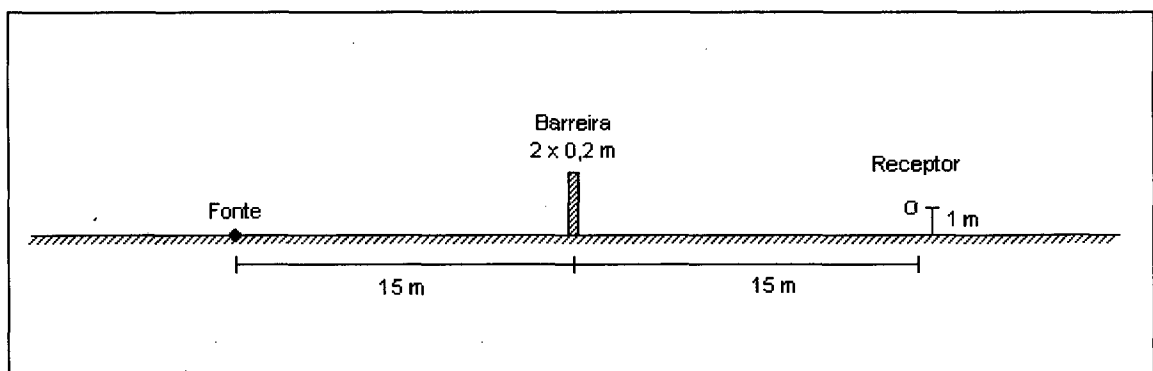


Figura 3.4 – Geometria do exemplo numérico de LAI (1995).

Com o objetivo de se verificar o comportamento dos métodos de solução para um problema com barreiras, o modelo foi simulado tanto pelo método Direto quanto pelo Indireto.

Para o método de Colocação Direto, construiu-se a malha de elementos representando a barreira com a forma geométrica fechada de um retângulo com 2 m de altura e 0,20 m de largura. Segundo LAI (1995), em suas simulações foram necessários



40 pontos de sobre-determinação em pontos internos à malha para contornar o problema de não unicidade de solução para o problema exterior. Entretanto, no modelo calculado pelo SYSNOISE, optou-se por testar a influência do número de pontos de sobre-determinação neste modelo. As simulações foram feitas com 40 pontos de sobre-determinação, como sugerido por Lai, e sem nenhum ponto de sobre-determinação. Os resultados foram indistinguíveis um do outro. Assim, constata-se que, para este modelo e para as frequências escolhidas, não se fazem necessários maiores cuidados com o problema de não unicidade de solução.

No método Variacional Indireto, entretanto, a malha foi construída de forma peculiar. Ao invés de se representar a barreira através de um retângulo, optou-se por empregar uma malha em forma de polígono aberto na parte inferior. Isto foi feito para evitar-se o problema matemático de não unicidade de solução, que é devido às frequências de ressonância internas, pois com a malha aberta as ressonâncias deixariam de existir. As outras condições de contorno foram idênticas às descritas para o método Direto.

Os resultados apresentados na Figura 3.5 mostram extrema concordância entre os dois métodos utilizados para a barreira ilustrada na Figura 3.4. A comparação destes resultados com os do artigo também evidenciou ótima correlação.

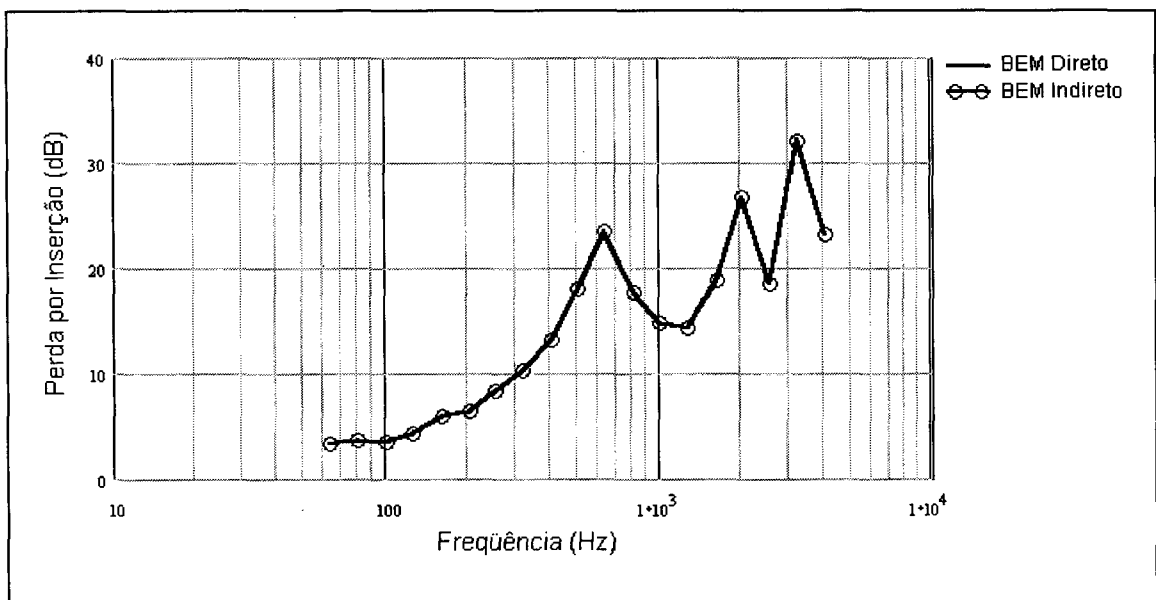


Figura 3.5 – Resultados de perda por inserção calculados pelos métodos Direto e Indireto.

Outro trabalho sobre aplicação do método de elementos de contorno na predição da eficiência de barreiras acústicas foi conduzido por GRANAT et al. (1997). Eles

simularam, também bidimensionalmente, uma barreira espessa, de dimensões 0,5 x 0,5 m. A Figura 3.6 mostra a geometria utilizada neste exemplo numérico.

Esta simulação também foi reproduzida aqui e, novamente, utilizaram-se as duas formulações (Direta e Indireta) para reproduzir o problema no SYSNOISE, porém com algumas diferenças em relação ao teste anterior.

Na formulação de Colocação Direta, o número de pontos de sobredeterminação utilizado em sua solução não fora mencionado pelo autor. Como comentado na Seção 3.1, não existe regra para determinar quantos pontos de sobredeterminação devem ser usados, sendo que a eficiência deste processo de sobredeterminação só pode ser conhecida após a solução do problema. Assim, a simulação foi feita com 9 pontos e, na seqüência, 20, 30, 80, 85 e, por fim, 100 pontos de sobredeterminação. Observou-se, novamente, que a variação do número de pontos de sobredeterminação praticamente não modificou os resultados para este exemplo e nas freqüências selecionadas, como pode ser observado na Figura 3.7.

Na formulação Variacional Indireta, o problema foi resolvido através de três diferentes formas:

1. *Impedância singular interna*: alguns elementos com impedância singular (igual a 100.000 rayls) foram criados no interior da malha para evitar-se o problema de não unicidade de solução. A condição de contorno para as superfícies exteriores foi admitância igual a zero (paredes rígidas).
2. *Condição de velocidade normal*: nenhum procedimento para evitar a não unicidade de solução foi adotada; assumiu-se condição de contorno de velocidade normal igual a zero nas superfícies externas da malha, ao invés de condições de admitância.
3. *Malha aberta*: para evitar o problema de não unicidade de solução do problema exterior, a malha representativa da barreira foi construída com a superfície inferior (em contato com o piso) aberta, evitando-se, assim, as ressonâncias interiores. A condição de contorno das superfícies foi novamente admitância zero.

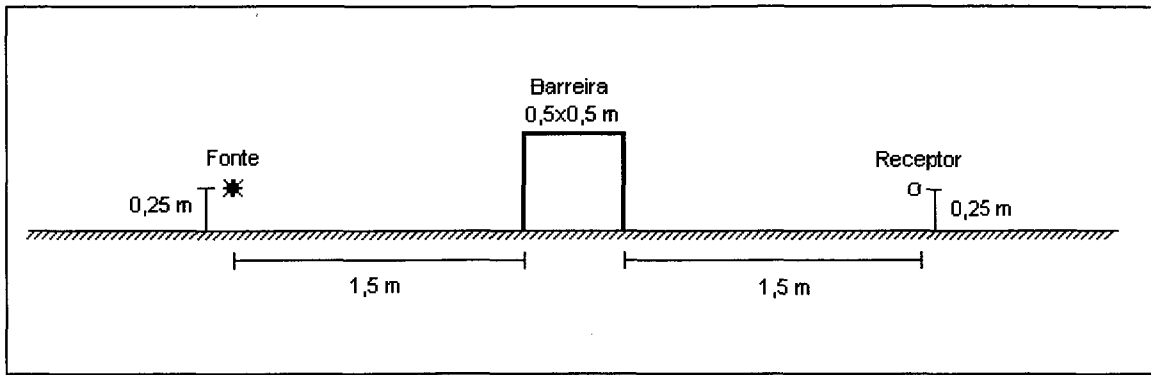


Figura 3.6 – Geometria do exemplo numérico de GRANAT et al. (1997).

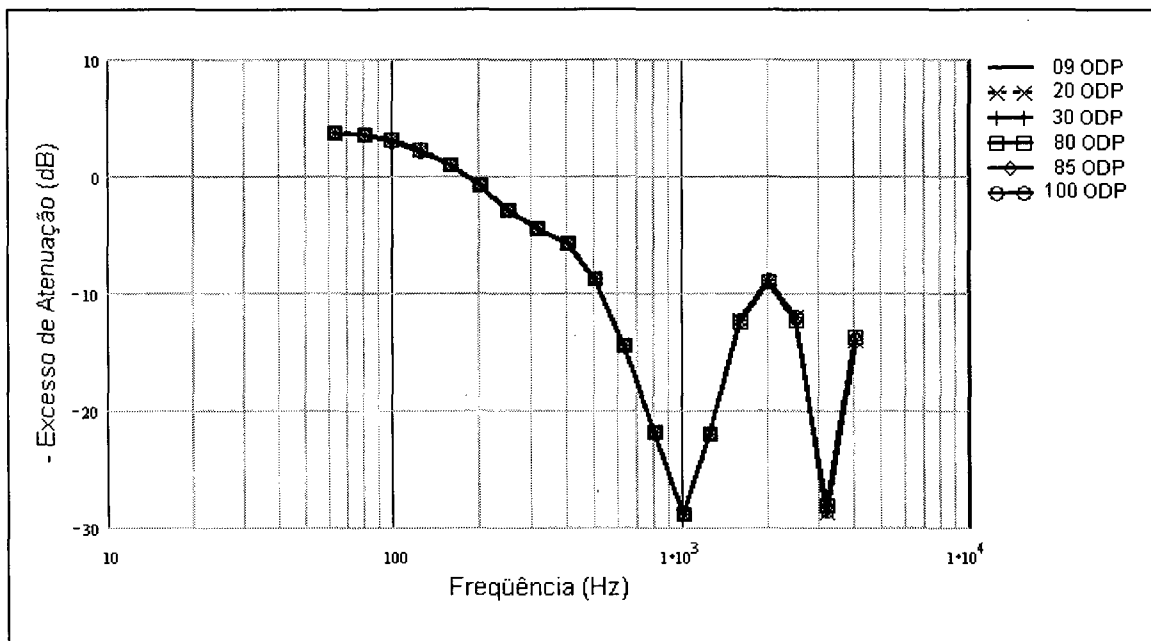


Figura 3.7 – Influência do número de pontos de sobredeterminação (ODP – overdetermination points) no exemplo de GRANAT et al. (1997).

Um gráfico comparativo é mostrado na Figura 3.8. Observa-se que há diferenças significativas entre as três formas utilizadas para a resolução do problema pelo método Variacional Indireto. No mesmo gráfico é feita uma comparação destes resultados com os obtidos pelo método de Colocação Direto. Há uma nítida discordância entre os resultados das duas primeiras formas do método Variacional Indireto com os do método de Colocação Direto. Entretanto, os resultados obtidos com a malha aberta pelo método Variacional Indireto são indistinguíveis daqueles calculados pelo método de Colocação Direto.

Os resultados apurados para a configuração mostrada na Figura 3.6 através do método de Colocação Direto são apresentados na Figura 3.9, sob a forma de excesso de

atenuação, definido como a diferença entre o nível de pressão sonora em campo livre e o nível de pressão sonora com a presença da barreira e piso. O sinal negativo foi usado para manter a notação original utilizada por GRANAT et al. (1997).

Houve boa concordância entre os resultados calculados pelo SYSNOISE e os resultados de GRANAT et al. (1997). A diferença média de aproximadamente 1,5 dB entre as curvas ficou dentro da faixa de incerteza para a coleta visual dos dados na curva publicada no artigo de referência.

Estas simulações preliminares forneceram uma boa base sobre o funcionamento do *software* SYSNOISE. Foram testadas as formulações de Colocação Direta e Variacional Indireta, com suas variações. As simulações de condição de campo livre, mostraram ótima concordância com a teoria. Os resultados das simulações com barreiras mostraram boa concordância com os resultados apresentados por outros autores e possibilitaram que as formulações disponíveis fossem testadas com maior grau de segurança.

A partir da experiência obtida nestas simulações, foram definidos vários dos parâmetros utilizados neste trabalho.

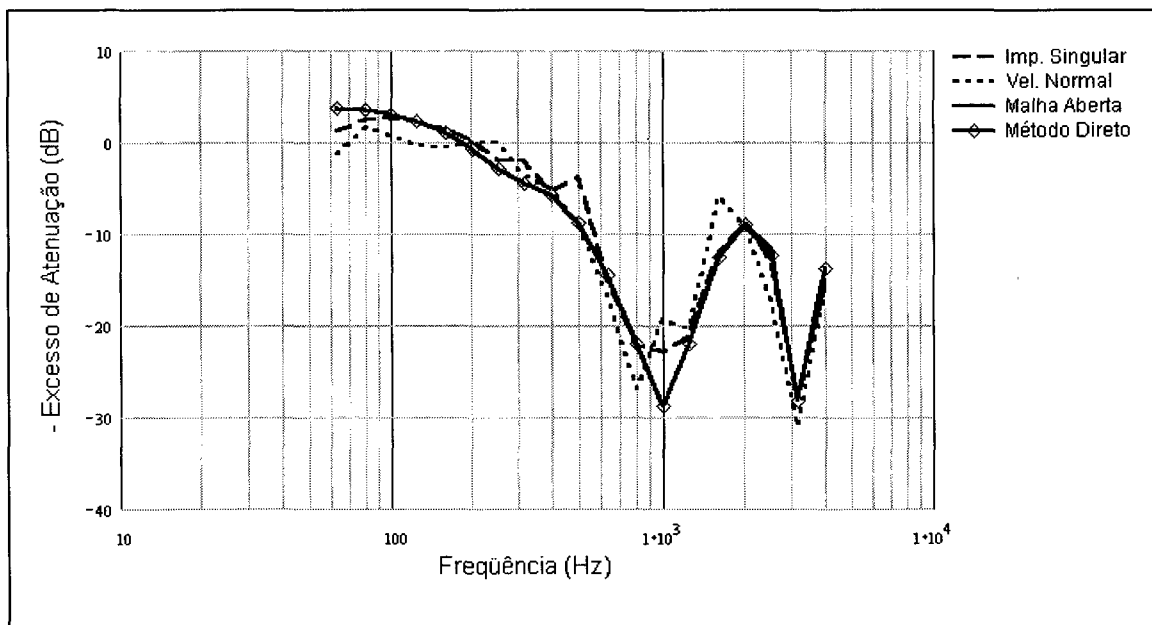


Figura 3.8 – Excessos de atenuação calculados pelo método Variacional Indireto (Impedância Singular, Velocidade Normal e Malha Aberta) e pelo método de Colocação Direta, empregados na reprodução do exemplo de GRANAT et al. (1997).

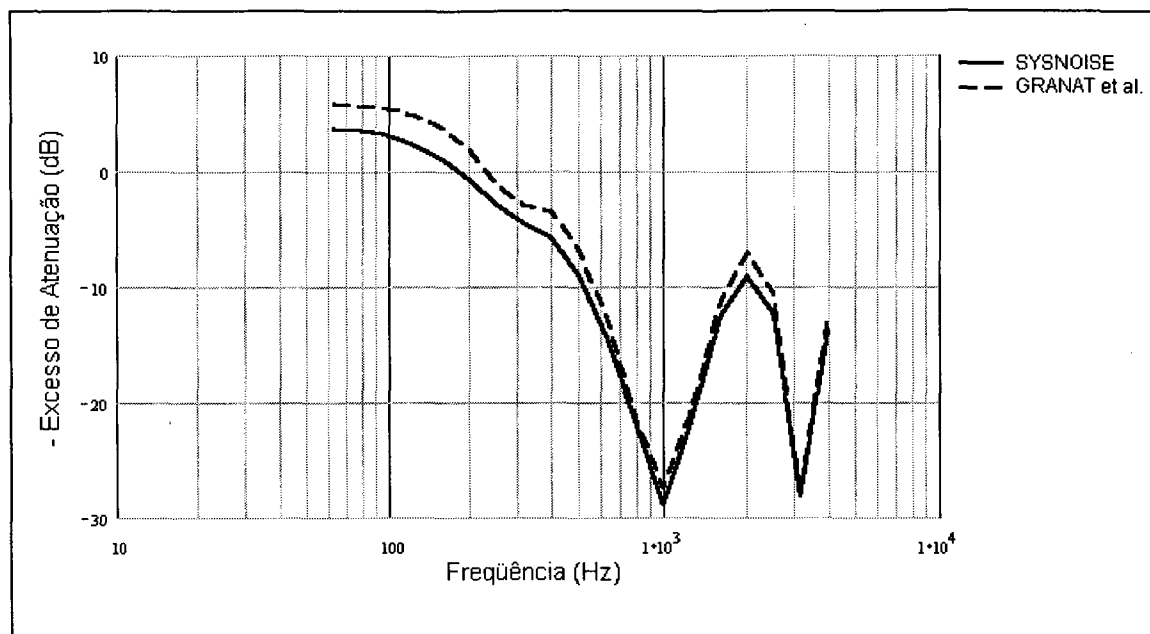


Figura 3.9 – Curvas de excesso de atenuação: SYSNOISE versus GRANAT et al. (1997).

### 3.5 PREDIÇÃO DA EFICIÊNCIA DE PROTEÇÃO DE BARREIRAS ACÚSTICAS

A simulação consistiu em determinar numericamente os níveis de pressão sonora em alguns pontos do campo acústico para duas situações: a primeira, para a situação de campo semi-livre, isto é, nenhum obstáculo entre fonte e receptor, porém considerando a presença de um piso rígido; a segunda, com a introdução da barreira construída sobre piso rígido.

Inicialmente, procedeu-se à idealização do modelo da estrutura, seguindo-se os mesmos parâmetros considerados no cálculo analíticos e, tendo em vista a barreira que seria testada experimentalmente, visando-se reproduzir suas características físicas. A primeira definição diz respeito à opção entre um modelo bidimensional ou tridimensional, levando-se em conta algumas observações colhidas da revisão bibliográfica e, também, fatores limitantes intrínsecos à capacidade computacional disponível.

FYFE (1995), que conduziu um estudo preliminar de simulação tridimensional de barreiras finitas através do BEM, observou que simulações tridimensionais requerem uma estação de trabalho (*workstation*) com grande quantidade de memória *core* para desenvolver os cálculos eficientemente.

DUHAMEL (1996), por sua vez, afirma que a modelagem de barreiras em 2D produz resultados muito úteis para prever o comportamento de barreiras em 3D. Uma

importante observação assinalada pelo autor é que estas comparações são válidas para situações onde fonte e receptor estão situados no mesmo plano perpendicular à barreira, como é o caso do presente trabalho.

HOTHERSALL e HOROSHENKOV (1997), apoiando o ponto de vista de FYFE (1995), limitaram seus estudos numéricos sobre barreiras a modelos bidimensionais, devido à grande extensão de superfícies a serem discretizadas (grande número de elementos e incógnitas) e à grande capacidade computacional requerida para os cálculos em 3 D.

Para uma barreira com altura de 2 m e comprimento de 10 m, a discretização da superfície retangular pelo BEM, considerando elementos de tamanho igual a  $\lambda/5$ , necessita aproximadamente de  $500/\lambda^2$  incógnitas. Para a frequência de 1000 Hz, onde  $\lambda = 0,34$  m, seria necessário resolver um sistema linear com 4000 incógnitas, o que é possível, mas necessita de cálculos pesados. Em um modelo bidimensional, entretanto, a solução para a seção transversal da mesma barreira requer , para a mesma frequência, apenas  $10/\lambda$  incógnitas ou, aproximadamente, 30 incógnitas.

Além disso, os autores obtiveram boas correlações entre os resultados da simulação numérica bidimensional e resultados experimentais usando fonte pontual, o que confirmou a boa aproximação proporcionada por modelagem bidimensional.

Com base nas experiências obtidas pelos pesquisadores que comprovaram ser boa a aproximação dos resultados simulados bidimensionalmente e aqueles obtidos experimentalmente e, também, após uma tentativa infrutífera de modelagem tridimensional, devida à insuficiência de recursos computacionais para o modelo, optou-se por utilizar um modelo bidimensional para o problema.

A próxima decisão foi quanto ao tipo de fonte a ser empregada na modelagem bidimensional: pontual (espalhamento esférico) ou linear (espalhamento cilíndrico).

WATTS et al. (1994) ; WATTS (1996) ; WATTS e MORGAN (1996) realizaram estudos comparativos entre BEM e medições, utilizando para a modelagem numérica um modelo bidimensional e fonte com espalhamento cilíndrico, e para as medições uma fonte pontual.

Segundo eles, as diferentes considerações não afetam as comparações de perda por inserção, embora, obviamente, as predições da variação de nível de pressão sonora com a distância sejam afetadas.

Reforçando a justificativa para o emprego de uma fonte com espalhamento cilíndrico, WATTS e MORGAN (1996) concluíram que numa situação real de tráfego de veículos o ruído atrás da barreira é recebido de muitas fontes movendo-se pela estrada e, portanto, a fonte pode ser considerada como uma fonte linear incoerente com razoável aproximação. Entretanto, modelos em escala reduzida e testes em escala natural indicam que a eficiência de proteção de barreiras para uma fonte sonora pontual testada à incidência normal (isto é, quando o caminho de propagação entre fonte e receptor é perpendicular à barreira) e para fontes lineares são similares.

MURADALLI e FYFE (1998) compararam os resultados de simulações de um modelo bidimensional de barreira infinita (utilizando fonte linear coerente) e dois tridimensionais de barreira infinita e finita (ambos usando fonte pontual). Segundo eles, as diferenças entre os resultados de resposta em frequência destes modelos são muito pequenas. Assim, observa-se que os resultados não são sensíveis tanto para diferentes abordagens (2D ou 3D), como para distintos tipos de fonte (linear ou pontual).

Da mesma opinião compartilham DEFRANCE et al. (1998). Eles conduziram medições pela técnica de MLS (*Maximum Length Sequences*) e simulações numéricas utilizando o BEM. Segundo os autores, simulações numéricas realizadas com fontes lineares coerentes (2D) e pontuais (3D), produzem resultados muito similares aos experimentais.

Definida a dimensionalidade da análise e o tipo de fonte sonora empregada, segue-se com a etapa de construção da malha de elementos, representando a geometria do problema. Neste momento, porém, já deve-se ter em mente o método de solução. Esta necessidade provém do fato que alguns detalhes inerentes a cada método têm de ser incluídos na própria malha de elementos, como a adição de elementos interiores à malha (no caso desta ter a forma de um polígono) ou sua construção através de uma poligonal aberta.

As etapas descritas a seguir são para a construção e análise da situação em que a barreira e piso estão presentes no modelo. Para o caso em que a barreira é retirada, o procedimento é aquele apresentado na Seção 3.4.2, que será revisado oportunamente.

Para este trabalho, escolheu-se realizar as análises através dos dois métodos de solução disponíveis, em virtude das ótimas concordâncias alcançadas nas simulações preliminares e visando-se minimizar a possibilidade de erros decorrentes das características que cada método apresenta. Desta forma, houve a necessidade de

construção de uma malha de elementos fechada para ser usada com o método Direto de solução e uma malha aberta na sua parte inferior para o método Indireto.

A malha de elementos foi gerada no ANSYS como um modelo bidimensional no plano  $xy$ , utilizando-se elementos finitos tipo viga (BEAM3), que apresenta 3 graus de liberdade em cada nó, especificamente, translações nas direções  $x$  e  $y$  e rotação em torno do eixo nodal  $z$ , perpendicular ao plano  $xy$ . A geometria foi montada seguindo as mesmas dimensões utilizadas para o cálculo analítico, com algumas informações adicionais, necessárias às simulações. A geometria e as características gerais do modelo são resumidas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Resumo das condições geométricas e de contorno para o modelo simulado.

<b>Barreira</b>	
Altura	$H = 1,00$ m
Espessura	$w = 0,02$ m
Superfície	Rígida (admitância nula)
<b>Semi-espaco de emissão</b>	
Distância da fonte em relação à barreira	$df = 1,00$ m
Altura da fonte em relação ao piso	$hf = 0,23$ m
Piso	Rígido (admitância nula)
<b>Semi-espaco de recepção</b>	
Distância do receptor em relação à barreira	$dr = 0,50 - 1,00 - 1,50 - 2,00 - 2,50$ m
Altura do receptor em relação ao piso	$hr = 0,01 - 0,25 - 0,50 - 1,00 - 1,50$ m
Piso	Rígido (admitância nula)

A escolha do tamanho dos elementos foi feita com base na pesquisa bibliográfica (onde recomendam-se tamanhos variando desde  $\lambda/2$  até  $\lambda/6$ ) e, também, na recomendação do manual do usuário do SYSNOISE, que sugere, no mínimo, 6 elementos por comprimento de onda da maior frequência de interesse. Decidiu-se aumentar a margem de segurança, utilizando-se 8,575 elementos por comprimento de onda. Desta forma, para a maior frequência de interesse, correspondente a 4 kHz, utilizou-se elementos de 0,01 m. Pela recomendação do manual do SYSNOISE, para este tamanho de elementos pode-se lograr resultados confiáveis até a frequência de 5666 Hz.



A etapa de atribuição de condições de contorno e demais características do modelo foram realizadas no SYSNOISE, após a importação da malha construída no ANSYS. Atribuiu-se condição de admitância igual a zero para todos os nós da malha da barreira, o que equivale a uma superfície idealmente rígida.

O piso rígido, sobre o qual foi construída a barreira, foi representado pelo comando *halfspace* do SYSNOISE. Este comando permite que a análise seja feita para um semi-espaco. Existem duas possibilidades de atribuição do comando: a) *halfspace absorbent*, ou superfície absorvente, onde a condição imputada à superfície é pressão igual a zero; e b) *halfspace rigid*, ou superfície rígida, que corresponde a velocidade normal igual a zero. Para os propósitos do trabalho, utilizou-se a condição b).

A fonte utilizada, conforme já justificado, apresenta espalhamento cilíndrico com amplitude de pressão de  $1 \text{ N/m}^2$ .

Os pontos de recepção foram definidos através da criação dos pontos de campo. Criou-se uma malha adicional de pontos de campo, formando um plano no qual pode-se visualizar o campo acústico através de um mapa de cores, como mostrado na Figura 3.10, para a situação com a barreira presente e na Figura 3.11, para a situação sem barreira.

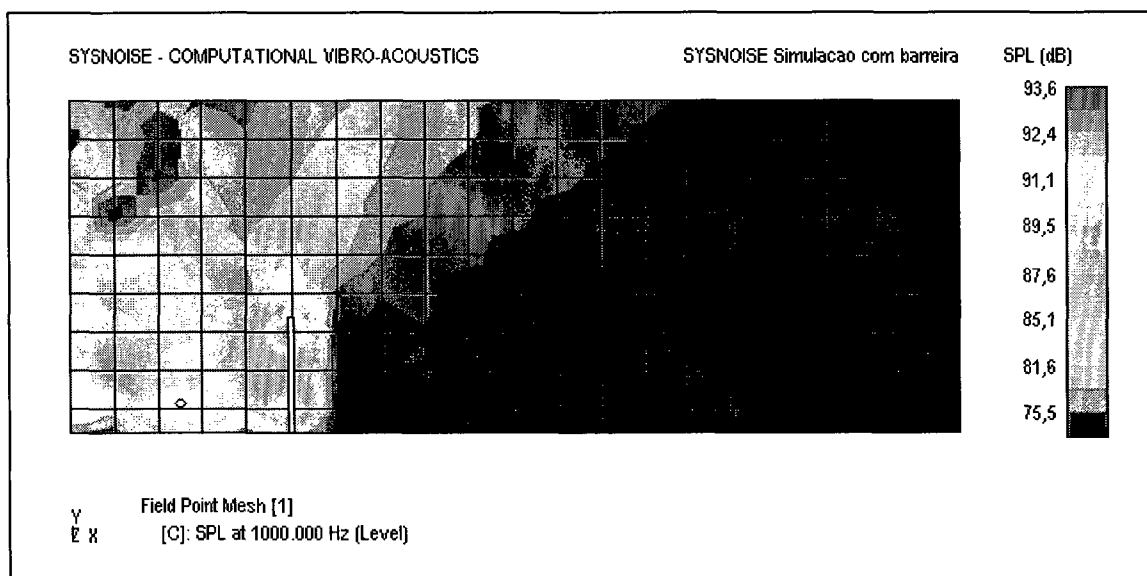


Figura 3.10 – Mapa de cores para o campo de pressão acústica *com barreira* a 1 kHz.

Como frisado anteriormente, os procedimentos descritos estão ligados à simulação da situação *com barreira*. Para a situação de *campo semi-livre*, as diferenças

introduzidas são sutis. Com respeito à malha de elementos, usou-se uma malha constituída por um elemento apenas, localizada a 200 m da posição correspondente à posição em que se situava a barreira. As condições de contorno foram admitância de  $2,409 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$  (admitância do ar, considerando  $\rho = 1,21 \text{ kg/m}^3$  e  $c = 343 \text{ m/s}$ ) para o elemento e descontinuidade de pressão para os nós do elemento. Empregou-se o método Indireto para obter a solução para esta situação.

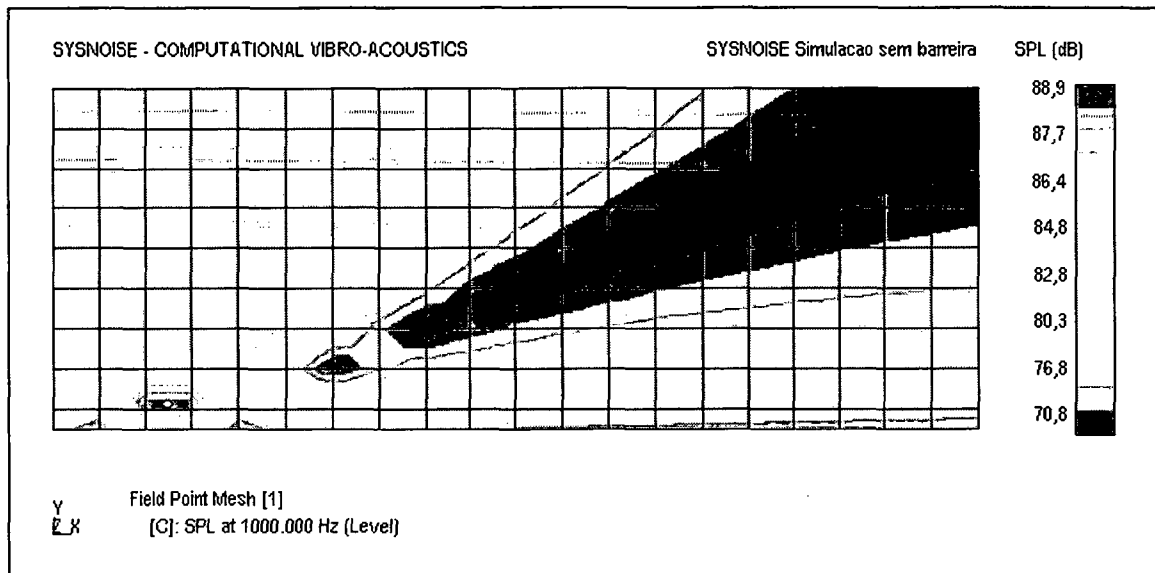


Figura 3.11 – Mapa de cores para o campo de pressão acústica *sem barreira* a 1 kHz.

A análise do modelo foi feita, primeiramente, para as frequências centrais de bandas de 1/3 de oitava, na faixa de 100 Hz a 4 kHz, que correspondem à faixa de frequências com componentes significativas em ruído de tráfego (EMBLETON, 1996).

Posteriormente, o número de frequências discretas dentro desta faixa foi aumentado, através do refinamento do cálculo para as frequências centrais de 1/24 de oitava e para um passo constante de 8 Hz (na faixa de 104 Hz – 4 kHz). Este refinamento se deu em virtude de observações feitas na parte experimental, as quais são oportunamente comentadas no Capítulo 5.

No Apêndice 1.1 e no Apêndice 1.2 encontram-se as listagens dos comandos utilizados pelo SYSNOISE para a simulação da situação com barreira e sem barreira, respectivamente.

### 3.5.1 Resultados das simulações numéricas

A simulação por elementos de contorno, como comentado na Seção 3.5, foi feita para frequências centrais de 1/3 de oitava, 1/24 de oitava e para passo constante de 8 Hz. Como os resultados para os dois métodos empregados foi coincidente, apenas os resultados obtidos para o método de Colocação Direto são apresentados.

Embora seja desnecessária uma análise da influência da largura de banda nos resultados das simulações, uma vez que os cálculos são feitos para frequências discretas e não para bandas de frequências, uma averiguação similar é conduzida para demonstrar a necessidade de boa resolução em frequência (“passo de cálculo”) numa análise detalhada do comportamento do campo acústico. Como esperado, observa-se nas Figuras 3.12 a 3.16, que para as frequências de cálculo coincidentes, isto é, para aquelas frequências que são comuns tanto para as frequências centrais de 1/3 de oitava, 1/24 de oitava ou passo constante de 8 Hz, o valor de perda por inserção é o mesmo, pois não importa em que contexto esteja inserida, cada uma destas frequências comuns continuará sendo uma frequência discreta.

Cabe chamar a atenção para o fato de que as curvas para frequências centrais de 1/24 de oitava e passo constante de 8 Hz são praticamente coincidentes. Isto poderia ser usado para diminuir os tempos computacionais gastos, já que para o primeiro grupo é necessário o cálculo para aproximadamente 150 frequências discretas, enquanto que para o segundo necessita-se em torno de 500 frequências discretas para cobrir toda a faixa de interesse. Entretanto, é necessário tomar cuidado com este tipo de simplificação: neste caso particular, as curvas seguiram um padrão mais ou menos definido e, coincidentemente, quase todas as frequências correspondentes a picos ou vales de atenuação foram as mesmas tanto para 1/24 de oitava quanto para o passo de 8 Hz, mas podem existir diferenças significantes na atenuação em frequências não coincidentes. Esta observação pode ser visualizada na Figura 3.15 (anti-pico em 3600 Hz) e na Figura 3.16 (anti-pico em 2150 Hz e 3700 Hz). Nestes dois exemplos, o valor dos vales de atenuação para o passo constante de 8 Hz foi notavelmente maior do que para passo de cálculo em frequências centrais de 1/24 de oitava.

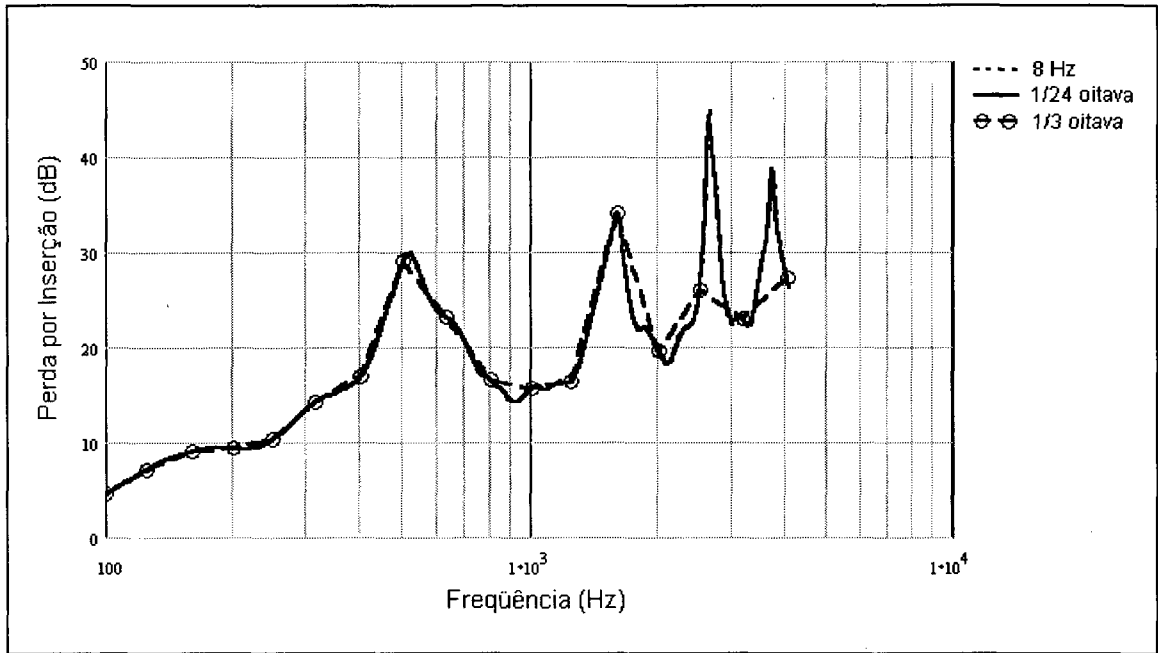


Figura 3.12 – Influência do *passo de cálculo* nas simulações numéricas (posição 01).

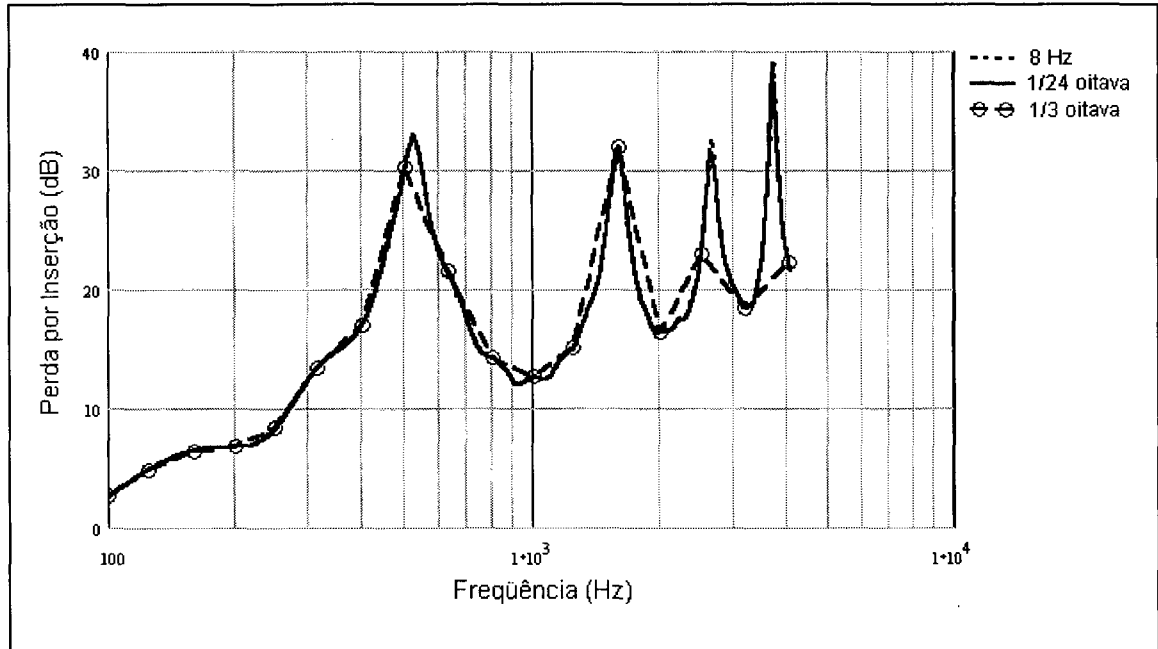


Figura 3.13 – Influência do *passo de cálculo* nas simulações numéricas (posição 05).

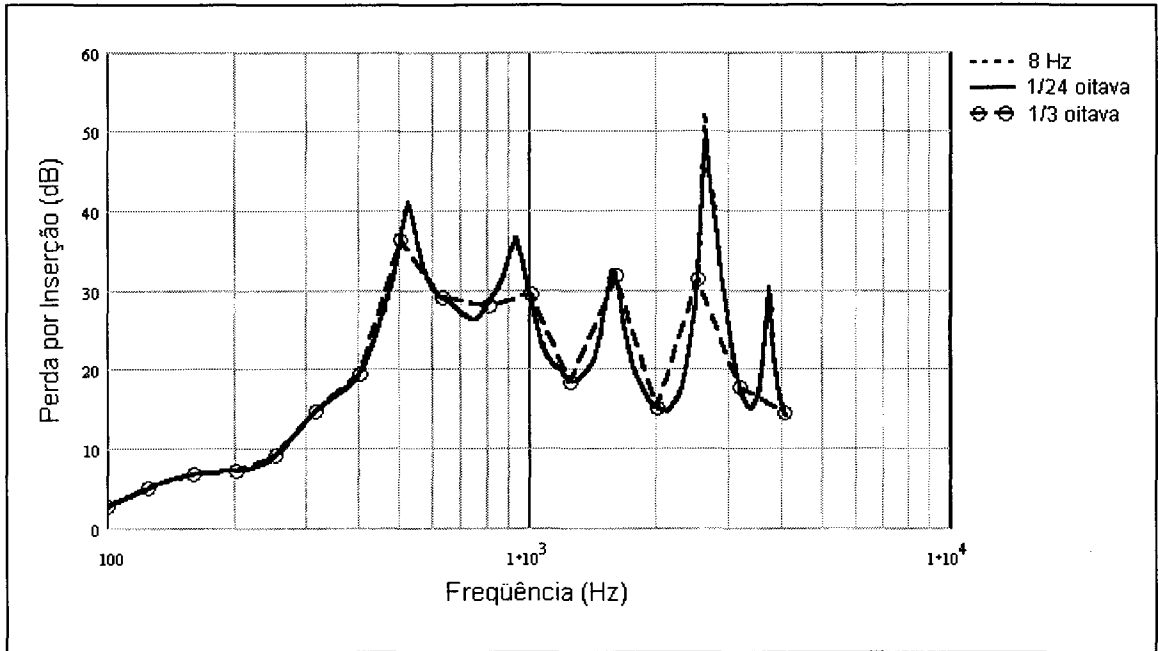


Figura 3.14 – Influência do *passo de cálculo* nas simulações numéricas (posição 10).

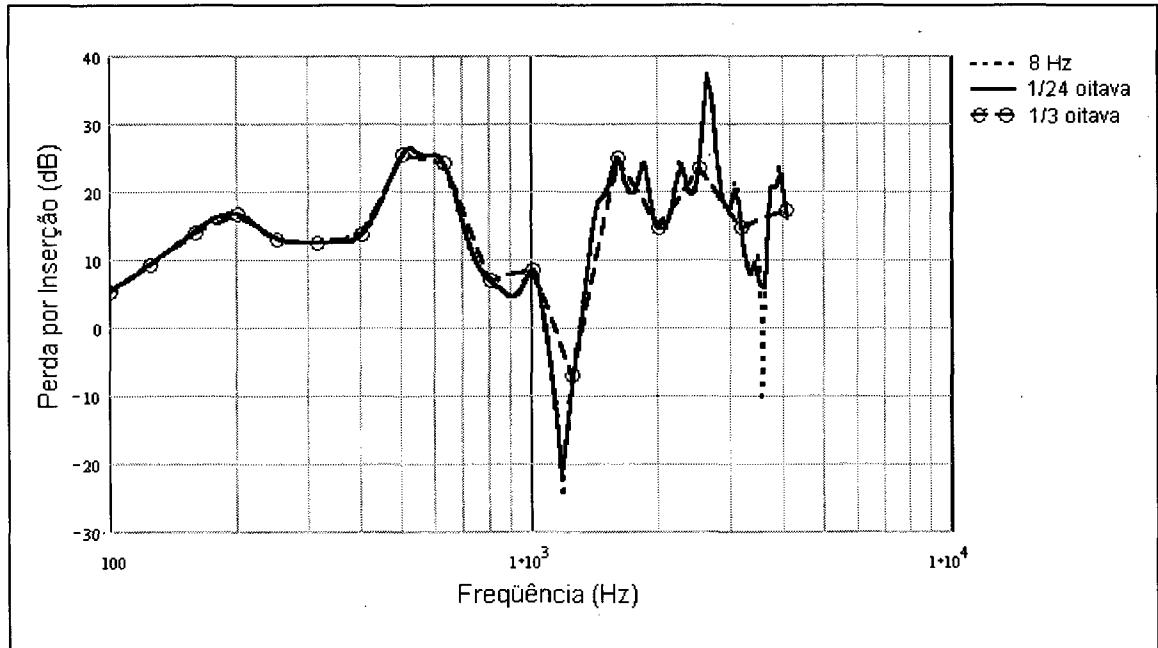


Figura 3.15 – Influência do *passo de cálculo* nas simulações numéricas (posição 19).

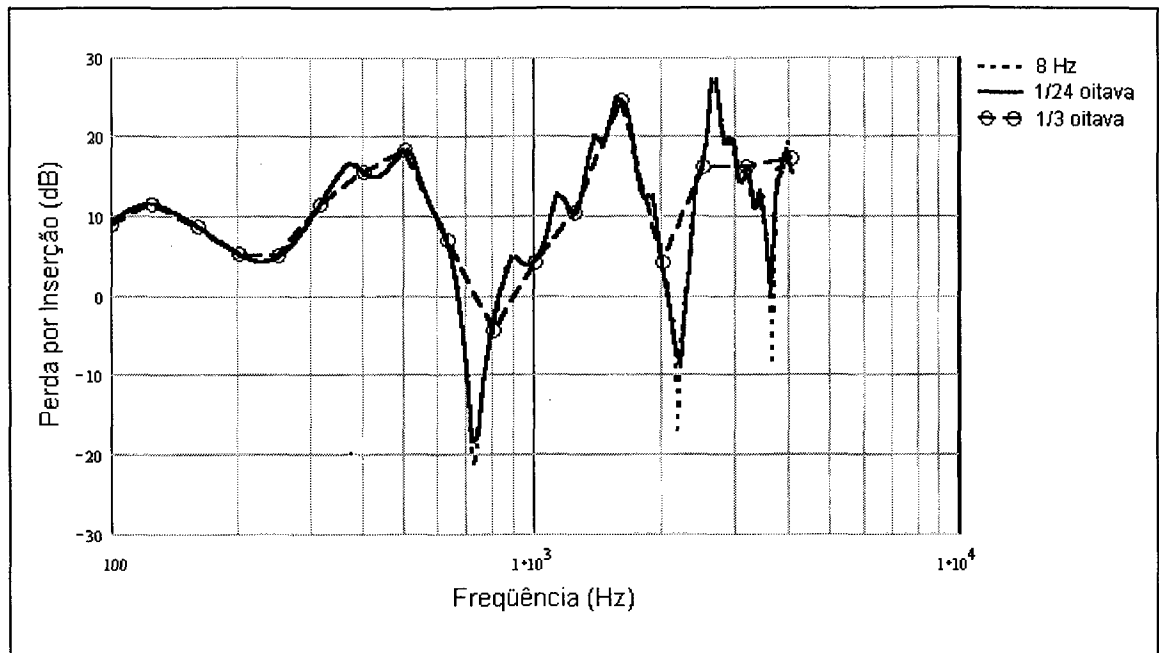


Figura 3.16 – Influência do *passo de cálculo* nas simulações numéricas (posição 23).

Da mesma forma que apresentado no Capítulo 2, as 25 posições de recepção foram divididas em grupos, levando-se em conta características comuns a cada grupo. Assim, considerando-se as posições de recepção com mesma altura em relação ao piso, tem-se os grupos da Tabela 3.2 (reprodução da Tabela 2.2); por outro lado, levando-se em consideração as posições com igual distância em relação à barreira, tem-se os grupos da Tabela 3.3 (reprodução da Tabela 2.3).

Tabela 3.2 – Posições de receptor com mesma altura em relação ao piso

Grupo	Pontos de recepção	Altura do ponto
A	01 a 05	0,01 m
B	06 a 10	0,25 m
C	11 a 15	0,50 m
D	16 a 20	1,00 m
E	21 a 25	1,50 m

As curvas de perda por inserção do grupo A, ilustradas na Figura 3.17, apresentam comportamento bastante semelhante entre si, tanto na forma, quanto na ocorrência de picos e vales de atenuação nas mesmas freqüências, restando apenas diferenças na amplitude de atenuação. O valor da atenuação produzida pela barreira para estas posições foi, geralmente, maior para posições de recepção mais próximas à

barreira, resultado esperado com base em descrições colhidas na revisão bibliográfica. A explicação para a similaridade na forma das curvas provém da observação prática de que, para a altura de recepção do grupo (hr = 1 cm), as mesmas comportam-se como se os receptores estivessem diretamente sobre o piso, estando sujeitos, portanto, apenas às interferências ocorridas no semi-espaço da fonte. Outro aspecto que não pode, de maneira alguma, ser desprezado, é o fato de que a simulação é um método teórico e, por isso, não está sujeito a interferências de equipamentos (ruído elétrico ou equipamentos avariados), fatores ambientais, erros de operação e repetibilidade.

Tabela 3.3 – Posições de receptor com mesma distância em relação à barreira

Grupo	Pontos de recepção	Distância do ponto
F	01, 06, 11, 16 e 21	0,50 m
G	02, 07, 12, 17 e 22	1,00 m
H	03, 08, 13, 18 e 23	1,50 m
I	04, 09, 14, 19 e 24	2,00 m
J	05, 10, 15, 20 e 25	2,50 m

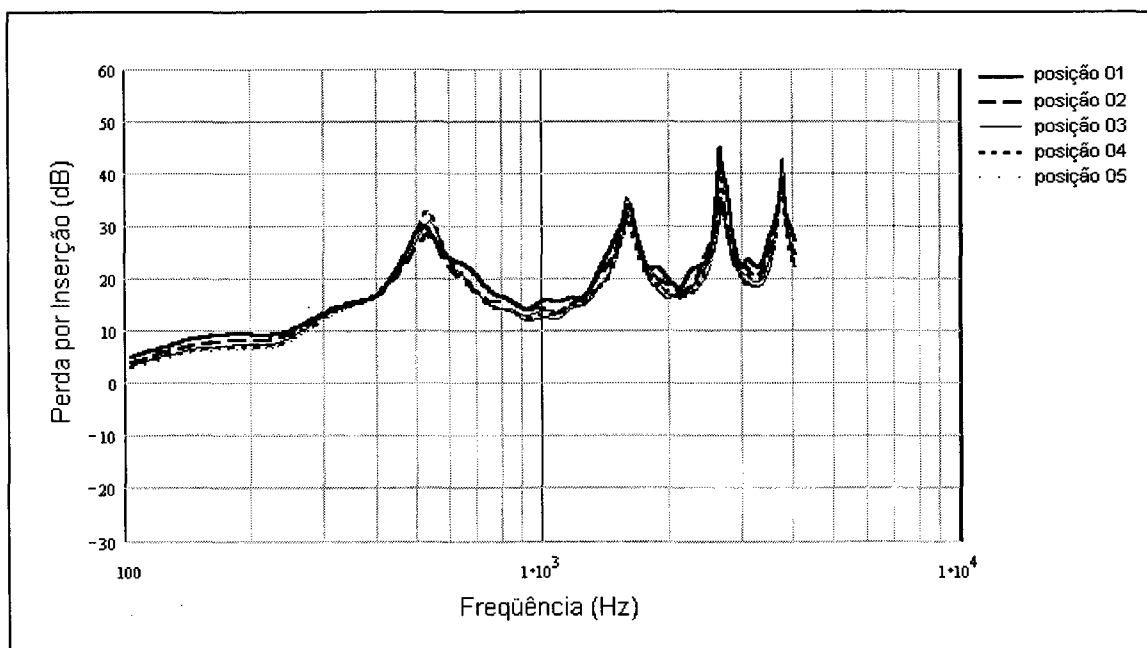


Figura 3.17 – Simulação da atenuação para posições de recepção com altura de 0,01 m (Grupo A).

Para as posições do grupo B, a altura de recepção é de 25 cm. Nota-se, da análise dos resultados mostrados na Figura 3.18, que agora existe uma defasagem no eixo das

freqüências para a ocorrência de picos e vales de atenuação. Esta diferença é, claramente, devida ao efeito de interferência causado pela superposição de ondas difratadas diretas e ondas refletidas no piso do semi-espço de recepção. A diferença de fase que ocorre entre estas ondas (diretas e refletidas) na posição do receptor, ocorre pelas diferenças de percurso entre uma e outra, as quais são responsáveis por interferências construtivas ou destrutivas entre as ondas, o que determina a forma, posição e amplitude de picos e vales de atenuação, sendo extremamente dependentes da posição do receptor.

A variação das amplitudes de atenuação não segue uma tendência única para toda a faixa de freqüências de interesse, apresentando atenuações maiores ora para os pontos mais próximos à barreira, ora para pontos mais afastados. Desta forma, torna-se praticamente impossível determinar um padrão de comportamento para a atenuação, mesmo tratando-se de um método teórico.

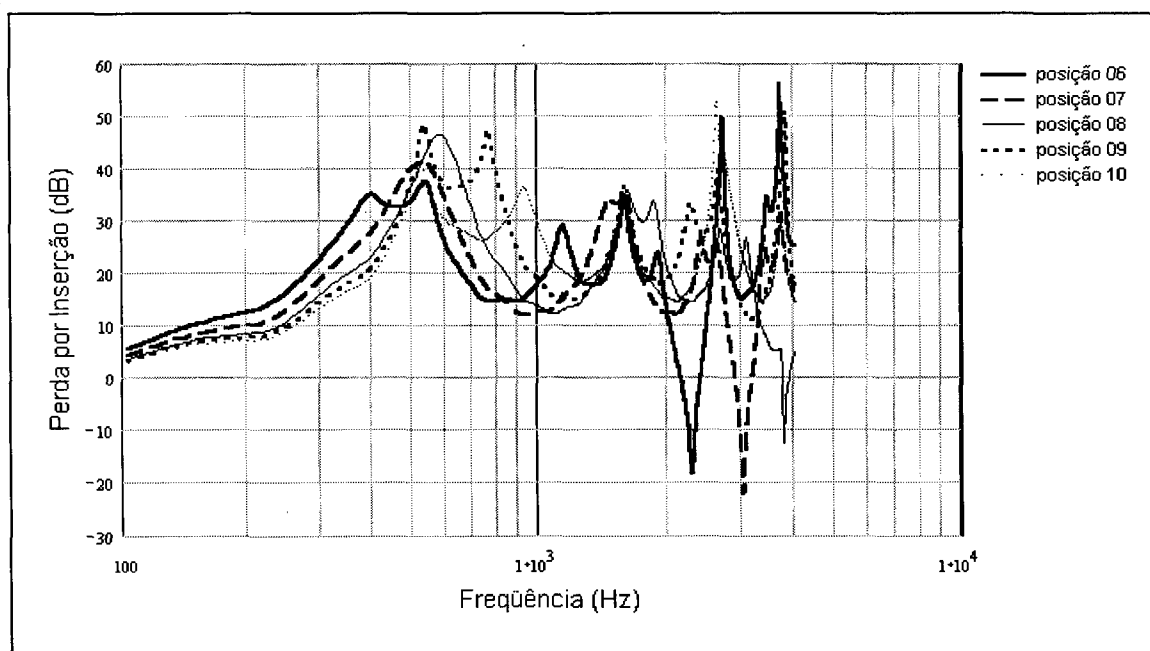


Figura 3.18 – Simulação da atenuação para posições de recepção com altura de 0,25 m (Grupo B).

Para os pontos de recepção situados à altura de 50 cm em relação ao piso (grupo C), cujos resultados são apresentados na Figura 3.19, valem os mesmos comentários feitos para as posições do grupo B. Há defasagens no aparecimento de picos e vales de atenuação, causados por diferenças de fase no ponto de recepção ocorridas pelo atraso das ondas refletidas em relação às que não sofrem reflexão e que, portanto, percorrem diferentes caminhos. São observadas, também, diferenças na amplitude destes picos e



vales que não seguem um padrão definido para o afastamento das posições de medição, isto é, em algumas faixas de frequências as curvas correspondentes a posições mais próximas à barreira mostram melhor eficiência de atenuação e em outras ocorre o contrário.

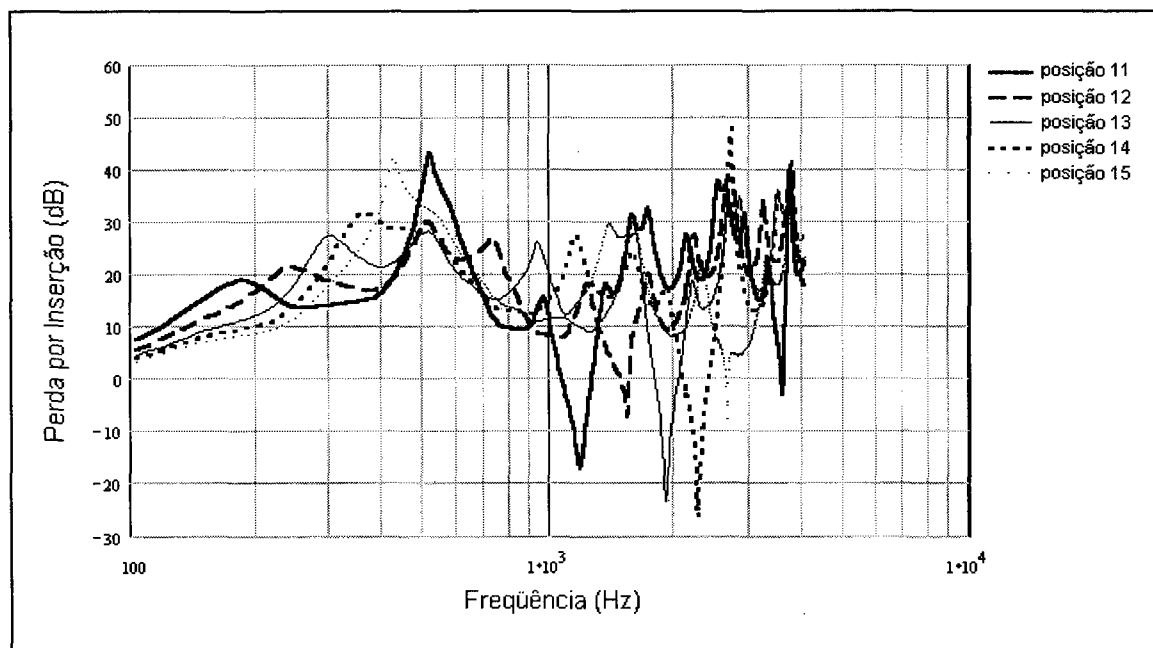


Figura 3.19 – Simulação da atenuação para posições de recepção com altura de 0,50 m (Grupo C).

Um fato interessante ocorre com o comportamento das curvas do grupo D, dadas na Figura 3.20, cujas posições de recepção localizam-se na linha que tangencia a borda superior da barreira ( $h_r = 1$  m): os picos de atenuação são praticamente coincidentes em frequência; no entanto, os vales mostram uma defasagem em frequência, aparecendo primeiro os vales para as posições de receptor mais próximas à barreira, seguidos dos outros. Quanto à amplitude de atenuação, não há uma tendência definida considerando-se os pontos de recepção.

As curvas da Figura 3.21, que representam as posições de recepção com altura igual a 1,5 m (grupo E), apresentam o comportamento característico do grupo D, isto é, defasagem na frequência, com os picos de atenuação apresentando maior concordância do que os vales na frequência de ocorrência. A exceção é feita para a posição 21, que situa-se fora da zona de sombra acústica da barreira. Nota-se, como esperado, uma atenuação média expressivamente menor que as obtidas para as outras posições do grupo, o mesmo ocorrendo para os picos e vales de atenuação, já que nesta posição não há proteção direta pela parede da barreira.

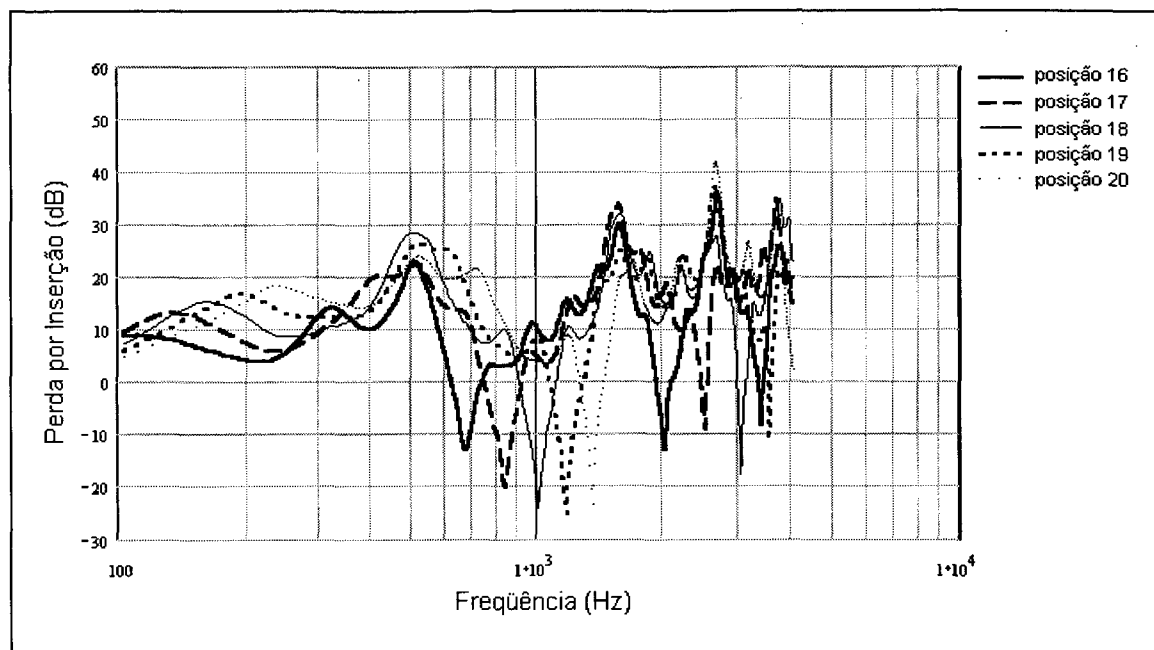


Figura 3.20 – Simulação da atenuação para posições de recepção com altura de 1,00 m (Grupo D).

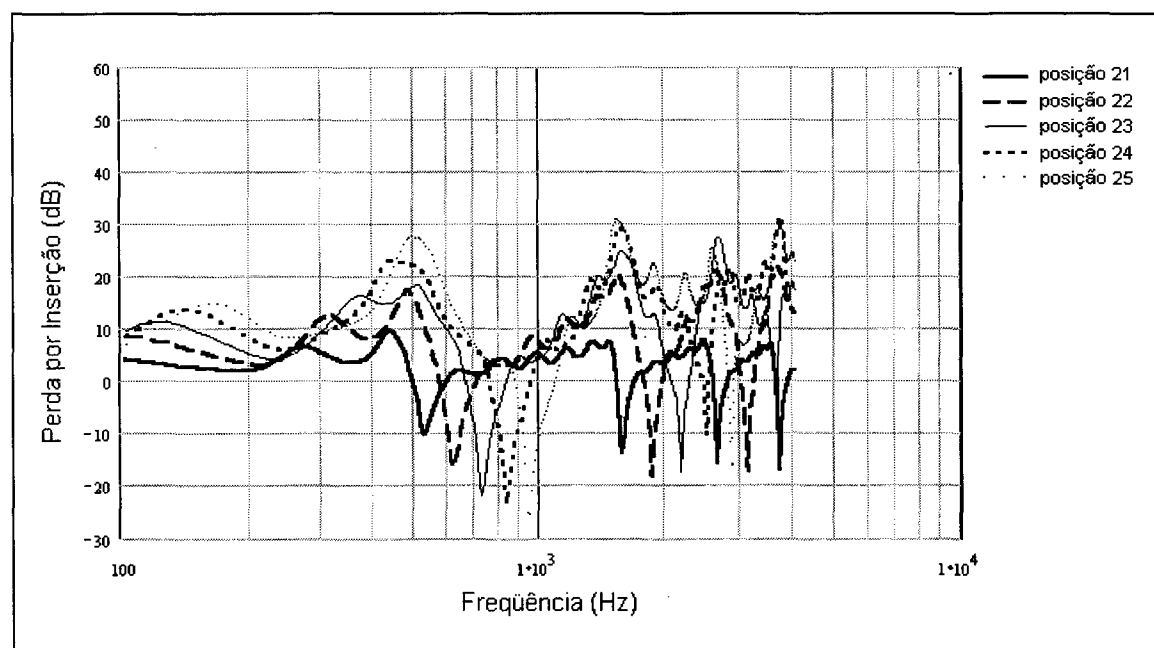


Figura 3.21 – Simulação da atenuação para posições de recepção com altura de 1,50 m (Grupo E).

Para os grupos F até J, cuja característica comum é a mesma distância em relação à barreira, constata-se que não há uma nítida semelhança entre as curvas dentro do grupo, conforme mostram as Figuras 3.22 a 3.26. O que pode ser notado é que, à medida que o receptor se afasta da barreira, as curvas do grupo tendem a apresentar valores mais próximos entre si, conforme já havia sido comentado na Seção 2.4.3 para os resultados dos cálculos analíticos.

Desta forma, pode-se concluir que a altura do receptor é mais importante na determinação do espectro das curvas do que sua distância em relação à barreira e que os resultados de perda por inserção tendem a um valor assintótico a grandes distâncias da barreira.

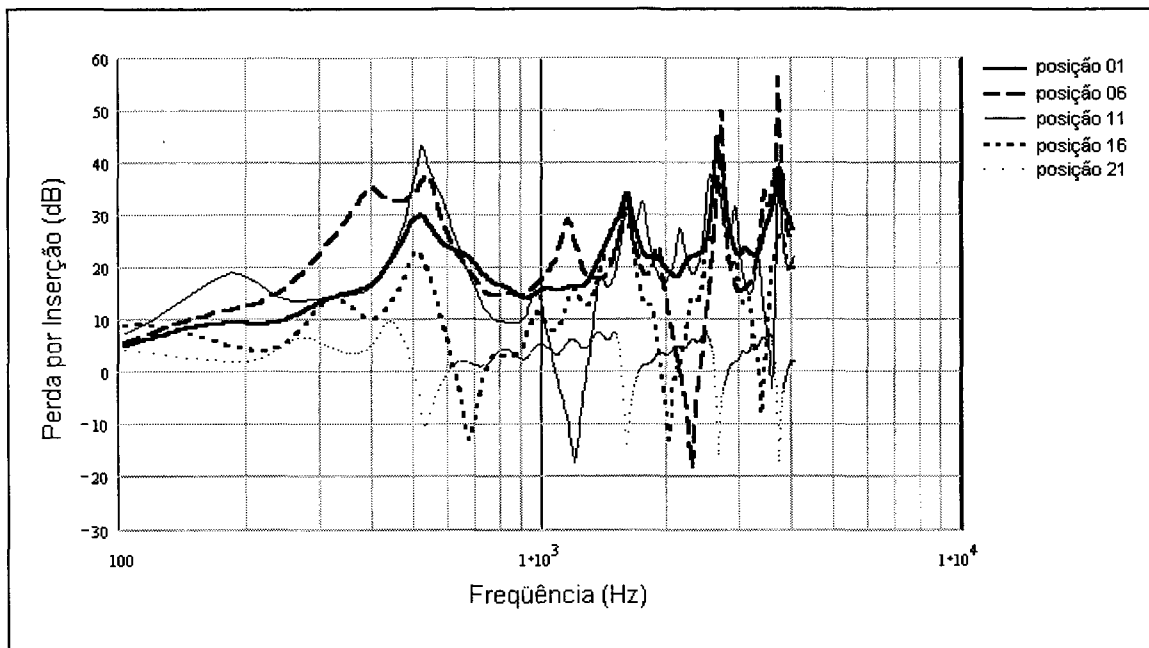


Figura 3.22 – Simulação da atenuação para posições de recepção com distância de 0,50 m em relação à barreira (Grupo F).

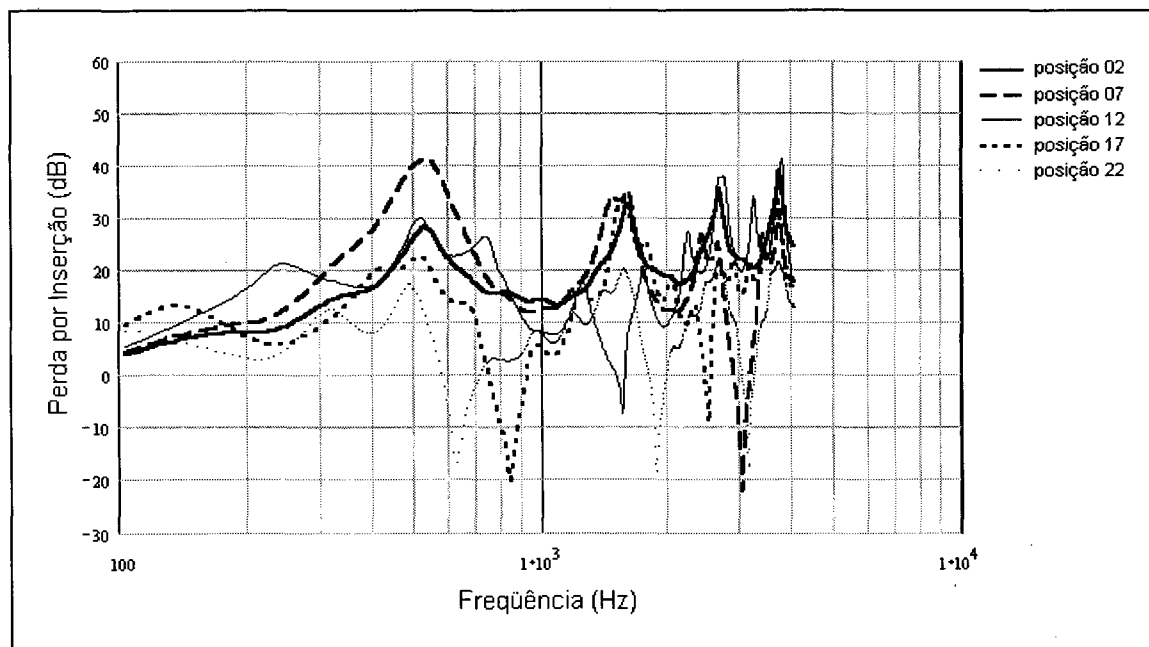


Figura 3.23 – Simulação da atenuação para posições de recepção com distância de 1,00 m em relação à barreira (Grupo G).

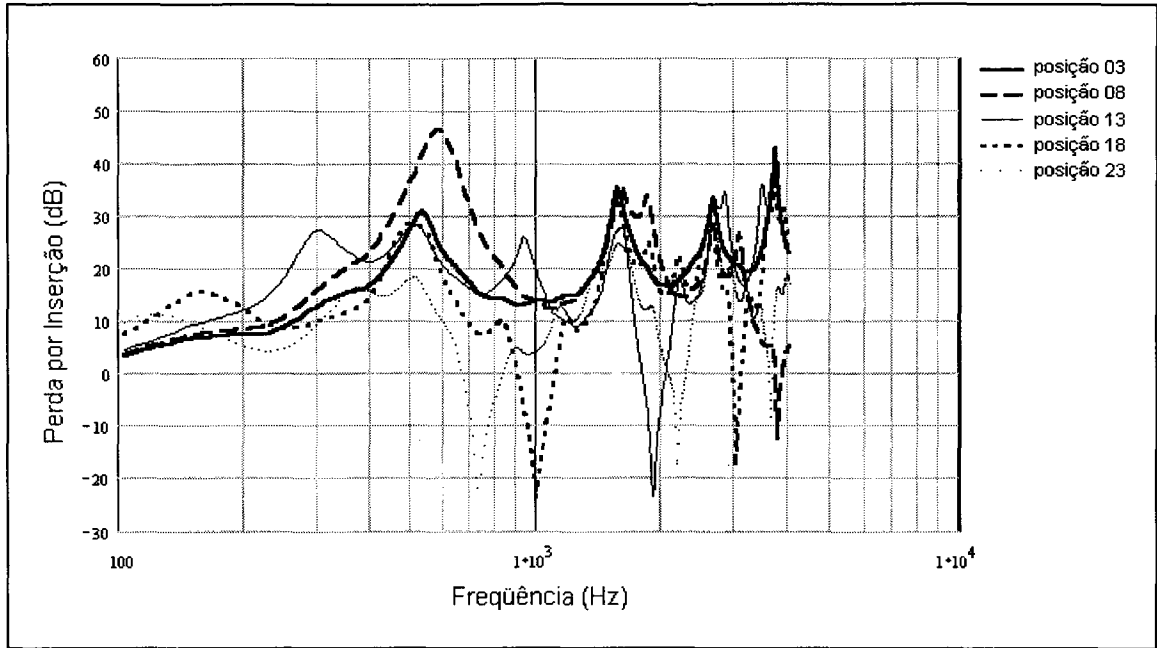


Figura 3.24 – Simulação da atenuação para posições de recepção com distância de 1,50 m em relação à barreira (Grupo H).

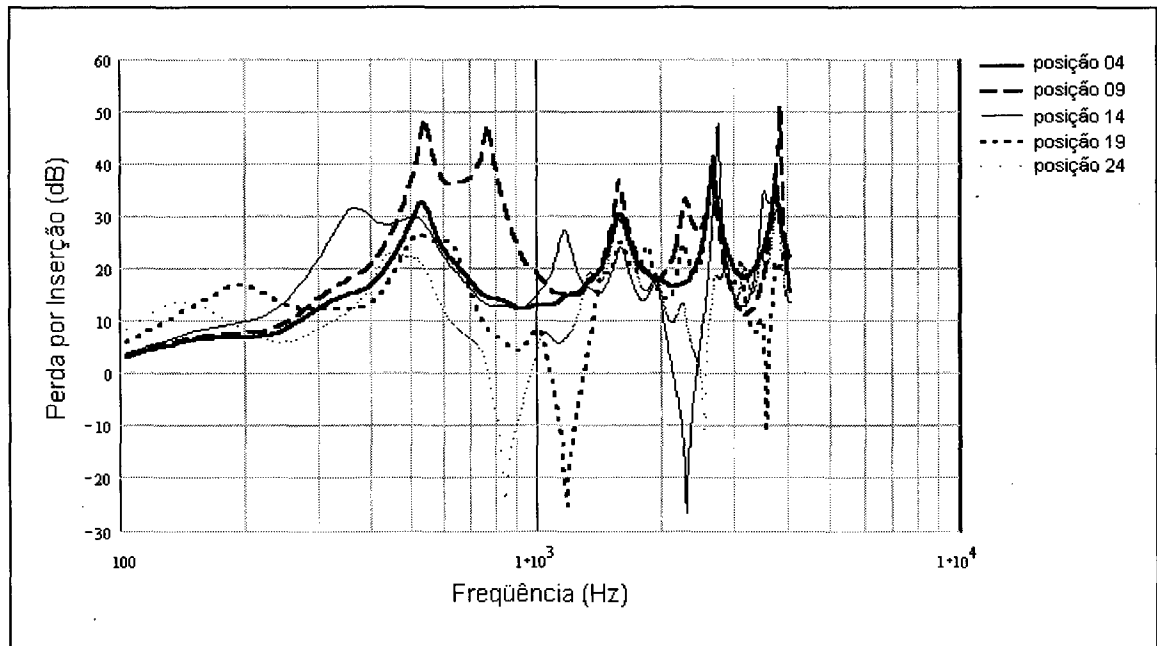


Figura 3.25 – Simulação da atenuação para posições de recepção com distância de 2,00 m em relação à barreira (Grupo I).

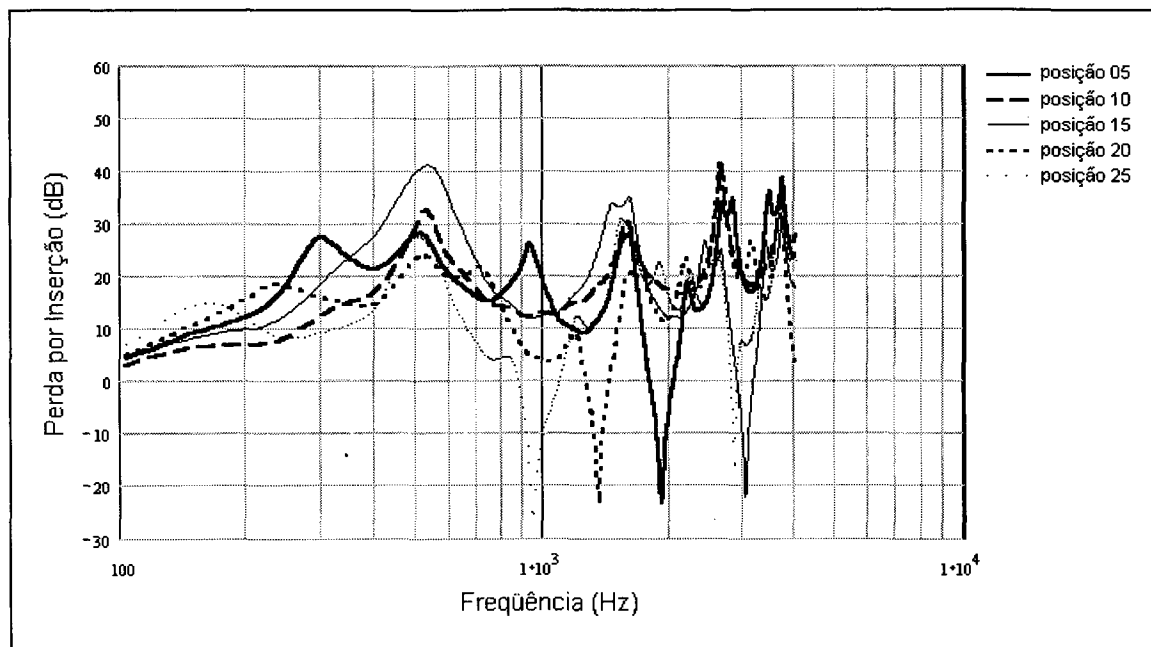


Figura 3.26 – Simulação da atenuação para posições de recepção com distância de 2,50 m em relação à barreira (Grupo J).

No Capítulo 5, os resultados de perda por inserção obtidos através da simulação por elementos de contorno, expostos nesta seção, são confrontados com os resultados dos cálculos analíticos e dos ensaios experimentais, sendo discutida sua validade como método de predição da atenuação acústica de barreiras.

### 3.6 SUMÁRIO

Neste capítulo foi feita uma revisão sobre o funcionamento do método de elementos de contorno e os cuidados que se deve ter com a entrada e saída de dados a fim de evitar-se resultados inadequados.

Foi apresentada a simulação numérica realizada, sendo descritos os detalhes da sua execução, compreendendo os métodos de solução, hipóteses assumidas, condições de contorno adotadas e a discussão dos problemas encontrados.

A análise dos resultados mostrou que o BEM produz resultados com características análogas aos obtidos pelos métodos analíticos estudados no Capítulo 2, isto é, levando-se em conta posições de recepção com mesma altura ou mesma distância em relação à barreira, constatou-se que posições de recepção com mesma altura apresentam curvas com formatos similares entre si, sugerindo que a altura do receptor é determinante da forma das curvas de atenuação mais do que sua distância em relação à barreira.

## Capítulo 4

### ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Para que a utilização de métodos analíticos e técnicas numéricas na modelagem de problemas físicos seja realizada com êxito, é necessário que as formulações em que se baseiam os esquemas analíticos, ou os *softwares* que implementam os métodos numéricos, sejam operados com confiança suficiente. Desta forma, torna-se necessária a verificação dos resultados destes, que pode ser feita pela comparação dos mesmos com resultados de ensaios experimentais do problema físico modelado.

Neste capítulo é apresentado um resumo dos trabalhos experimentais conduzidos por outros autores e, num segundo momento, os procedimentos e resultados da parte experimental deste estudo, com a finalidade de se verificar a validade das soluções analíticas e das simulações realizadas anteriormente, nos Capítulos 2 e 3, respectivamente.

#### 4.1 ANTECEDENTES

Os estudos experimentais sempre constituíram-se em mecanismos de extrema importância. Seus méritos estão tanto no desenvolvimento de teorias de predição, como na validação ou ajuste empírico destas. Além disso, deve-se chamar atenção para o fato de que podem ser realizados em escala reduzida e/ou sob condições controladas, diminuindo efetivamente os custos destes.

##### 4.1.1 Modelos em escala reduzida

Na década de 80, a modelagem em escala reduzida com a finalidade de investigar a *performance* de barreiras acústicas atingiu grande expansão.

O número de trabalhos nesta linha de pesquisa é bastante extenso e, como resultado destes estudos experimentais, muitos avanços foram alcançados na definição de materiais e novas geometrias de barreiras para aplicação em situações reais.

A seguir é dado um resumo dos principais trabalhos e suas contribuições para a melhora da eficiência de proteção de barreiras.

MENGE (1980) conduziu uma investigação, em escala 1:40, sobre a possibilidade de uso de barreiras refletoras inclinadas em substituição a barreiras paralelas com superfície absorvente, já que estas requerem manutenção contínua, tornando sua relação custo/benefício desvantajosa. A fonte sonora utilizada foi uma faísca produzida por uma descarga elétrica. A captação das informações do sinal no tempo e na frequência foi feita utilizando-se um microfone capacitivo de 6 mm de diâmetro, ligado a um analisador em tempo-real. A natureza impulsiva da fonte permitiu a análise dos diversos caminhos tomados pelo som, causados pela sua reflexão e difração nas superfícies do modelo. Seu trabalho indica que para um ângulo de inclinação de 10°, a perda por inserção é equivalente à das barreiras com superfície absorvente. Assim, para a geometria testada, o uso de barreiras inclinadas para o controle de ruído constitui-se em uma alternativa interessante.

Após efetuarem um estudo em escala 1:16 de uma série de configurações até então não usuais, MAY e OSMAN (1980) propuseram novas formas geométricas para barreiras simples e paralelas. A técnica de medição utilizada foi a impulsiva, de modo a evitar reflexões indesejáveis. Os resultados do estudo demonstraram que novos perfis para barreiras (T, Y e seta), o uso de redutores de ruído acoplados à barreira (cilindro), o emprego de *thnadners*<sup>5</sup> e/ou o recobrimento de suas superfícies com material absorvente poderia melhorar a *performance* das mesmas em até 6,5 dB(A) em relação a uma barreira convencional<sup>6</sup> de mesma altura. O recobrimento das superfícies refletoras das barreiras paralelas com material absorvente mostrou-se interessante para atenuar as múltiplas reflexões entre elas.

HUTCHINS et al. (1984), trabalhando com modelos reduzidos de barreiras em escala 1:80, atentam para a necessidade de condições anecóicas para realizar as medições de nível de pressão sonora requeridas para a determinação da perda por inserção de barreiras. Isto é devido à natureza contínua da fonte sonora utilizada, a qual

---

<sup>5</sup> WIRT (1978) define *thnadner* como “uma forma de painel acústico, uma pluralidade que lança uma sombra acústica desproporcional.”

<sup>6</sup> Entende-se por barreira convencional, uma barreira com perfil reto e com superfícies refletoras.

foi composta por um conjunto de três apitos ultra-sônicos empregados para cobrir o espectro de frequências de interesse. A instrumentação utilizada na aquisição de dados foi um microfone de 1/8" conjugado a pré-amplificador para providenciar o envio dos sinais a um analisador de frequências calibrado. A conclusão desenhada por HUTCHINS et al. (1984) quanto aos resultados coincide com a de ISEI et al. (1980), que trabalharam com métodos analíticos de predição. Ambos afirmam que a perda por inserção de barreiras acústicas é extremamente dependente das características do piso existente em cada lado da barreira.

FUJIWARA e FURUTA (1991) patentearam uma barreira com um cilindro absorvente acoplado ao topo que foi desenvolvido pela aplicação da teoria de Keller. Os ensaios em escala reduzida foram conduzidos em uma câmara anecóica e o sinal utilizado foi um pulso na frequência de 10 kHz e duração de 1 ms. As demais condições do ensaio, tais como o tipo de equipamento utilizado na aquisição do sinal, não são muito claras. Nos modelos em escala reduzida, os aumentos de atenuação foram da ordem de 7 a 8 dB(A).

#### **4.1.2 Testes em escala real**

Em outra etapa de seu trabalho experimental, FUJIWARA e FURUTA (1991) conduzem medições para barreiras em escala real. Os ensaios em escala real foram feitos medindo-se os níveis de pressão sonora próximos a uma barreira instalada. Os níveis de pressão sonora foram medidos na posição central da região da barreira onde foi instalado o cilindro (150 m de extensão), em um plano perpendicular à barreira para a situação da barreira sem o cilindro e com o cilindro instalado. As componentes predominantes do ruído medido encontravam-se na faixa de frequências de 1 kHz até 1,6 kHz. As medições foram feitas à noite a fim de reduzir o efeito da variação do ruído de fundo. Os níveis de ruído de referência foram medidos um metro acima do topo da barreira, tanto para a barreira sem o cilindro, como para a barreira com o cilindro. Os resultados foram comparados com os medidos para uma barreira já existente, encontrando-se um aumento de atenuação da ordem de 2 a 3 dB(A) para o caso em que o cilindro absorvente estava instalado. Este efeito corresponde a um excesso de atenuação obtido por uma barreira delgada 2 metros mais alta, com a vantagem adicional de não obstruir a visão ou a ventilação causados pelo incremento de altura da barreira.



Seguindo a linha de pesquisas em sistemas de redução de ruído para barreiras através de peças de topo, SHONO et al. (1994) testaram algumas configurações em escala reduzida e, posteriormente, alguns protótipos em escala natural. Os autores observam que barreiras com sistemas de redução de ruído mostram maiores níveis de atenuação do que barreiras tradicionais e que o aumento da atenuação é particularmente proeminente em posições de recepção próximas ao piso atrás das barreiras, onde a diferença de percurso das ondas é grande, ou em altas frequências ou, ainda, em ambos os casos. Os testes foram conduzidos *in situ*, através da medição do  $L_{eq\ 10\ min}$  no período das 19 h às 7 h, por 7 noites. Detalhes quanto à descrição da instrumentação foram ignorados.

WATTS et al. (1994) descrevem testes em escala natural de barreiras com perfis especiais, identificados por outros trabalhos de modelagem numérica e em escala reduzida como passíveis de proporcionar melhor eficiência de proteção do que os perfis tradicionais. Os testes foram feitos em ambiente aberto, utilizando um alto-falante móvel, localizado sobre uma superfície de asfalto e um conjunto de microfones localizados até 80 m atrás da barreira. A fonte sonora consistiu de um sistema de dois alto-falantes cônicos radiando a 800 W, sendo capazes de produzir níveis sonoros acima de 110 dB a 1 metro do alto-falante na faixa de frequências de 100 Hz a 3,2 kHz. Segundo os autores, altos níveis de ruído são necessários para garantir que o ruído de fundo não tenha significativa participação no ruído produzido pela fonte sonora, principalmente a grandes distâncias de receptor. Um microfone de referência foi utilizado para permitir qualquer ajuste na saída do alto-falante. Para garantir a exata posição da fonte, foi especialmente construído um gabarito. Atenção importante foi dada aos fatores meteorológicos, em especial à velocidade do vento, os quais podem alterar dramaticamente os resultados das medições.

Para determinar a influência do posicionamento do receptor em relação à barreira e à fonte nos resultados, isto é, se fonte e receptor devem estar em um plano perpendicular à barreira ou se podem assumir ângulos diferentes em relação a esta sem afetar os resultados de atenuação fornecida pela barreira, WATTS et al. (1994) compararam os resultados de dois conjuntos de medições: um realizado com o receptor e a fonte situados em uma linha perpendicular ao centro da barreira e outro com esta linha formando um ângulo de 30° com a barreira. Os resultados para a linha fonte/receptor formando o ângulo de 30° foram, em geral, similares àqueles com a linha

fonte/receptor formando um ângulo reto com o plano da barreira. Estes resultados emprestam suporte à consideração de que a perda por inserção relativa de barreiras para uma fonte pontual é similar àquela para uma fonte linear.

Novamente, modelos em tamanho natural são usados para testar a eficiência de novos desenhos de barreiras. Desta vez, FAHY et al. (1995) testam sistemas modulares formados por cavidades triangulares ressonantes e absorventes, com a finalidade de serem acoplados a barreiras já construídas. Antes de ser testado em tamanho normal, entretanto, os modos acústicos das cavidades triangulares foram calculados por análise de elementos finitos, a fim de selecionarem-se as dimensões apropriadas para sintonizar as frequências de interesse. Os testes em tamanho real, foram feitos em uma câmara anecóica utilizando-se medições de resposta impulsiva. Os autores consideram inapropriado avaliar a *performance* de uma barreira não-refletora pela determinação de seu coeficiente de absorção de campo difuso pelas seguintes razões: (i) barreiras são projetadas especificamente para tratar com ruído de tráfego, que incide sob uma pequena faixa de ângulos de elevação, mas sob uma grande faixa azimutal. (ii) sua eficiência depende parcialmente do princípio de refletir o som inofensivamente para cima. Todas as medições foram feitas usando um analisador FFT. O novo sistema de redução de ruído testado, além de apresentar um bom potencial de melhora na *performance* de proteção acústica de barreiras, destaca-se pelo baixo custo relativo e pela resistência aos fatores adversos (intempéries, animais, vandalismo, etc.).

GHARABEGIAN (1995) apresenta um dispositivo de redução de ruído para ser acoplado ao topo de barreiras já construídas. O aparelho foi testado em uma auto-estrada da Califórnia, Estados Unidos, em um segmento reto da estrada, através da medição dos níveis de pressão sonora sem e com o dispositivo instalado. As posições de recepção foram arranjadas em um plano perpendicular à barreira. Utilizou-se quatro medidores de nível sonoro com microfones de incidência aleatória de  $\frac{1}{2}$  ". Adicionalmente, foi utilizado um analisador de frequências em tempo real para obter dados de nível de pressão em terças de oitava. Foi dada atenção também às condições meteorológicas, que podem influenciar significativamente nos resultados. A *performance* apresentada pelo dispositivo redutor de ruído foi superior à esperada para o aumento de altura da barreira, devido à instalação da peça. Entretanto, afirma que testes adicionais de qualificação do dispositivo devem ser feitos antes do seu lançamento comercial.

YAMAMOTO et al. (1995) mostram um dispositivo de redução de ruído similar ao descrito anteriormente, em forma de cogumelo. Testes *in loco*, realizados pela medição do  $L_{eq\ 10\ min}$  de 12 horas no período da noite demonstram que há uma redução significativa do ruído atrás da barreira após a instalação do dispositivo, a exemplo dos resultados descritos por GHARABEGIAN (1995).

WATTS e MORGAN (1996) testam um sistema que pode ser acoplado ao topo de uma barreira para redução de ruído por interferência. O arranjo de medição é similar ao utilizado por WATTS (1994), exposto anteriormente. Os resultados do seu estudo experimental foram bastante similares aos obtidos por modelagem pelo método de elementos de contorno. Melhoras significantes foram introduzidas pelo uso do dispositivo, com um ganho médio de 1,9 dB(A) na redução de ruído comparando-se com a perda por inserção de uma barreira convencional de mesma altura.

Com um trabalho de investigação experimental sobre a eficiência de barreiras paralelas inclinadas em substituição a barreiras paralelas retas, WATTS (1996), utilizando uma configuração de testes similar àquela já descrita para outro trabalho de sua autoria (WATTS, 1994), chega a uma conclusão idêntica à de MENGE (1980), que trabalhou com o mesmo tema, porém utilizando modelos reduzidos. Ambos concluíram que os melhores resultados são alcançados para uma inclinação de 10°, nas condições dos experimentos.

Com base neste trabalho, pode-se identificar uma tendência de uso de modelos em escala natural somente na etapa final de avaliação das propriedades das barreiras, isto é, como validação dos métodos teóricos usados na concepção da forma ou do princípio adotado no projeto.

### 4.1.3 Outros trabalhos

BEHAR e MAY (1980) apresentam os resultados de uma pesquisa experimental sobre duas propriedades de materiais que poderiam ser aplicados em barreiras: sua durabilidade e seus coeficientes de absorção antes e depois da exposição a condições adversas. Foi um trabalho pioneiro nesta área e, por isso, os autores recomendam cautela no uso dos resultados.

OMOTO et al. (1997) desenvolveram um sistema de controle ativo de ruído em barreiras. O primeiro teste, com uma fonte não realística, foi promissor, produzindo melhoras na atenuação em até 6 dB para um receptor a 50 m da barreira, o que significa,

em termos comparativos, uma barreira de 2 a 5 metros mais alta. Entretanto, para uma fonte mais próxima da realidade, um efeito mais moderado foi obtido. Destes experimentos, os autores concluíram que a validade da estratégia principal, isto é, o cancelamento da pressão sonora na borda de difração por controle ativo, foi provada experimentalmente. Ainda assim, é necessária uma investigação mais aprofundada, para verificar-se a estabilidade do funcionamento do sistema e para melhorar o processo iterativo de captação e geração de sinais.

## 4.2 DETERMINAÇÃO DA PERDA POR INSERÇÃO

### 4.2.1 Introdução

A perda por inserção é definida como a razão entre a pressão acústica na posição do receptor com a barreira presente e a pressão acústica na mesma posição sem a barreira. O piso, entretanto, é considerado presente em ambos os casos.

A relação acima descrita, pode ser expressa por,

$$PI = -20 \log_{10} \left| \frac{p(r, r_0)}{p'(r, r_0)} \right| \quad [\text{dB}], \quad (4.1)$$

sendo que,

$p(r, r_0)$  denota a pressão acústica na posição  $r$  (receptor) devida à fonte em  $r_0$ , com a barreira presente;

$p'(r, r_0)$  denota a pressão acústica na posição  $r$  (receptor) devida à fonte em  $r_0$ , apenas com o piso presente.

Experimentalmente, esta relação é obtida através da diferença entre os níveis de pressão sonora (NPS) medidos para a condição com a barreira ausente e presente:

$$PI = \text{NPS}_{\text{sem barreira}} - \text{NPS}_{\text{com barreira}} \quad [\text{dB}] \quad (4.2)$$

Com o objetivo de se validar as predições da eficiência de proteção de uma barreira, tanto por métodos analíticos como por simulação computacional através do método de elementos de contorno, foram realizados ensaios experimentais.

Os equipamentos utilizados, detalhes de montagem da barreira e procedimento experimental são descritos a seguir.

### 4.2.2 Procedimento experimental

A parte experimental foi constituída de medições de nível de pressão sonora, para as quais uma barreira real foi montada na câmara semi-aneecóica do Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

A escolha por efetuar a montagem da barreira em uma câmara semi-aneecóica, ao invés de se realizar experimentos em um ambiente exterior, foi originada a partir da consideração de diversos fatores, como a possibilidade de controle do ambiente e, principalmente, os custos envolvidos num teste em ambiente aberto.

WATTS et al. (1994) realizaram medições experimentais sob condições exteriores, isto é, sujeitos a ventos e a gradientes de temperatura e, por isso, apesar de estarem trabalhando sob condições realísticas, tiveram que controlar muito bem a variação dos parâmetros meteorológicos para que seus resultados não fossem afetados.

Medindo-se em ambiente semi-aneecóico, se por um lado se perde a aproximação com as condições reais de uso das barreiras, por outro ganha-se pela obtenção de um ambiente controlado, sem a interferência de fatores meteorológicos.

O procedimento de aquisição dos dados para a determinação da perda por inserção produzida pela barreira modelada pode ser resumido, de uma maneira geral, pelas seguintes etapas:

#### *a) Planejamento e montagem:*

1. Escolha do mecanismo de excitação (gerador de sinais e fonte sonora) e do transdutor de recepção dos sinais.
2. Seleção da resolução em frequência para os sinais adquiridos.
3. Caracterização do material para a construção da barreira e montagem da barreira dentro da câmara.
4. Determinação da localização da fonte sonora e dos pontos de recepção.
5. Montagem da cadeia de instrumentos de medição.

#### *b) Procedimento experimental*

1. Aquisição e armazenamento dos dados experimentais.
2. Transferência dos dados para o computador e sua conversão para formato de planilhas de cálculo, através de *software* específico.
3. Construção das curvas de perda por inserção e visualização gráfica.

a) Planejamento e montagem

De acordo com o procedimento resumido acima, uma das primeiras preocupações foi a escolha do tipo de fonte sonora. Antes de se explicar as considerações usadas para a fonte em si, é necessário fundamentar-se o emprego do sinal de excitação para a fonte. Em trabalhos anteriores foram empregados diferentes sinais, em particular, sinais impulsivos, estacionários ou tons puros.

No que diz respeito à comparação dos resultados das medições com os resultados de simulação por elementos de contorno, seria ideal o emprego de tons puros, já que os resultados das simulações são calculados para frequências discretas. Desta forma, estar-se-ia eliminando uma possível fonte de distorção nos resultados, decorrente do emprego de tipos diferentes de sinais de excitação.

O emprego de sinais de frequências discretas, entretanto, se vê limitado pelas características da câmara semi-anecóica onde se realizaram as medidas. Os padrões de difração podem ser afetados por reflexões e efeitos de superposição que distorcem os valores medidos, apresentando máximos e mínimos acentuados em certas posições. Além disso, considerando-se o número de frequências discretas e de posições de medição, o seu emprego implicaria em um grande aumento no tempo de realização de cada ensaio. Geralmente, não se emprega este tipo de sinal na prática por ser pouco representativo dos tipos de ruído para os quais se projetam barreiras.

Os sinais impulsivos têm sido amplamente utilizados para modelos em escala reduzida, já que apresentam uma ampla largura de banda (grande conteúdo energético em frequência). Como o objetivo deste estudo é medir-se o comportamento do campo acústico difratado na parte posterior da barreira (zona de sombra), o emprego de um sinal impulsivo não é apropriado, pois se necessitaria boa repetibilidade do sinal, muito difícil de ser obtida na prática quando a técnica empregada é a medição dos níveis de pressão sonora. Entretanto, caso fosse utilizada a técnica de medição de MLS (*Maximum Length Sequences*), o problema poderia ser contornado.

Por estes motivos, optou-se por utilizar um sinal estacionário, composto de ruído aleatório. Para a eleição da faixa de frequências utilizada, recorreu-se à revisão bibliográfica. Uma vez que o estudo foi orientado à redução do ruído produzido pelo tráfego rodoviário de veículos é conveniente frisar-se que este tipo de ruído, segundo VALADARES (1997), é oriundo das diversas fontes presentes na estrutura inerente aos

veículos responsáveis por colocá-los em movimento, bem como da interação deste movimento com o fluido envolvente e a superfície da pista.

EMBLETON (1996) afirma que a maior parte do ruído produzido pelo tráfego de veículos encontra-se na faixa de frequências abaixo de 3 kHz.

Neste trabalho decidiu-se realizar a análise na faixa de frequências entre 100 Hz e 4 kHz, compreendendo, portanto, a porção significativa do espectro de ruído de tráfego e uma faixa adicional, comum a várias fontes usuais de ruído.

O ruído foi gerado por uma fonte sonora (ver lista de equipamentos) que emite ruído rosa na faixa de frequências de 100 Hz a 10000 Hz.

Finalmente, para o emprego da fonte sonora deve ser selecionado um transdutor com boa resposta na faixa de frequências do experimento, sinal estável no tempo e idealmente omnidirecional. A fonte sonora empregada atende a estas exigências, principalmente as relativas à estabilidade do sinal e à resposta em frequência. A direcionalidade horizontal é muito boa na faixa de frequências selecionada, como pode ser visto na Figura 4.1. A vertical, embora apresentando pequena variação com a frequência, ainda oferece boas características de direcionalidade, como pode ser notado na Figura 4.2.

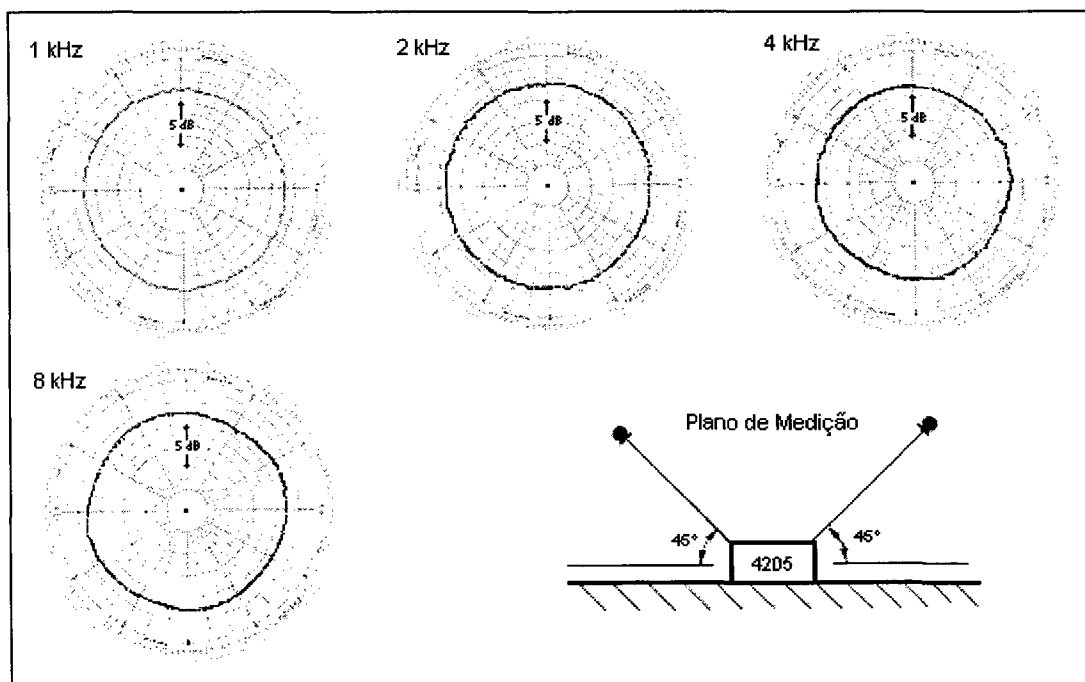


Figura 4.1 – Fonte sonora: direcionalidade horizontal [Fonte: manual Brüel & Kjær 4205].

O receptor utilizado deve ser omnidirecional e de tamanho pequeno, de modo a não produzir distúrbios no campo acústico medido. Por outro lado, deve apresentar alta

sensibilidade e resposta plana em frequência. Para atender a estas exigências selecionou-se um microfone capacitivo de campo livre de  $\frac{1}{2}''$ .

Como o sinal da fonte sonora é emitido em banda larga, é necessário filtrá-lo após sua captação pelo microfone, para que se possa realizar a análise de suas componentes espectrais. A seleção da largura de banda de medição deve levar em conta os requerimentos exigidos pela análise espectral.

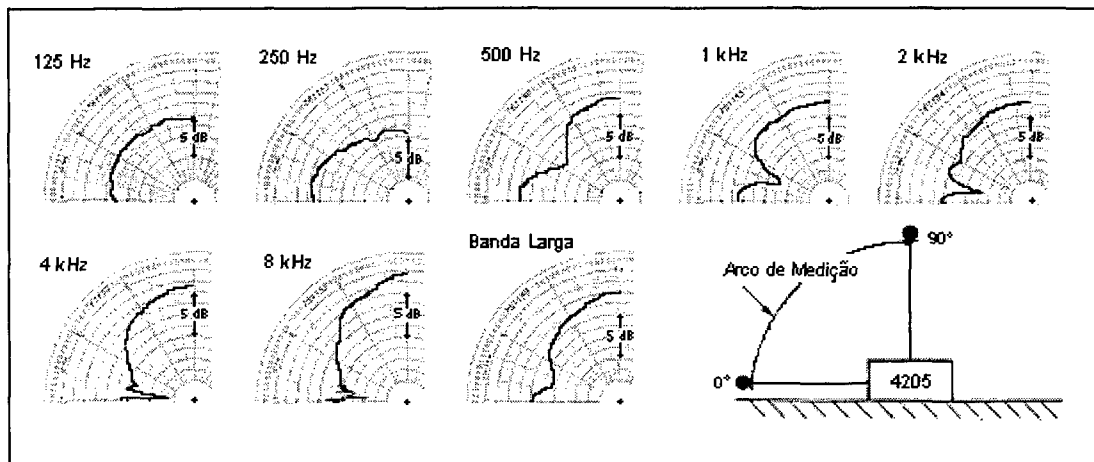


Figura 4.2 – Fonte sonora: direcionalidade vertical [Fonte: manual Brüel & Kjær 4205].

Com o objetivo de analisar-se a influência da largura de banda nos resultados de perda por inserção foram selecionadas três larguras de banda: duas com percentual constante (bandas de  $\frac{1}{3}$  de oitava e  $\frac{1}{24}$  de oitava) e uma com faixa constante (resolução de 8 Hz), tais como adotadas para a simulação numérica.

As primeiras se caracterizam por ter largura de banda sempre igual a uma percentagem fixa da frequência central. A largura de banda é, portanto, variável, dependendo da frequência central. Desta forma, em termos absolutos, a largura de banda para baixas frequências é menor que a largura de banda para frequências mais altas. Por exemplo, para um filtro de  $\frac{1}{3}$  de oitava, os limites da banda da frequência central de 100 Hz são: limite inferior = 89,1 Hz e limite superior = 112 Hz. Desta forma, a largura de banda para esta frequência central é de 22,9 Hz. Já para a frequência central de 3150 Hz, o limite inferior da banda vale 2818 Hz e o superior 3548 Hz, o que equivale a uma largura de banda de 730 Hz. Analogamente, para um filtro de  $\frac{1}{24}$  de oitava, a largura de banda centrada em 100 Hz é de 2,9 Hz e para a centrada em 3150 Hz, equivale 91,3 Hz. Estas medições foram efetuadas por um analisador de frequências em tempo real.



Já a medição utilizando técnicas de FFT permitiu a resolução em frequência constante de 8 Hz em toda a faixa de medição, isto é, os níveis de pressão sonora foram medidos a cada 8 Hz.

Na construção da barreira foram empregadas placas de madeira laminada de 20 mm de espessura, apresentando densidade superficial de aproximadamente 11 kg/m<sup>2</sup>, o que permitiria uma boa atenuação por massa, segundo GERGES (1992) e DAIGLE (1998), os quais sugerem massa superficial situada entre 10 e 16 kg/m<sup>2</sup> para que a transmissão através da parede da barreira seja desprezável. Desta forma, apenas a contribuição das ondas difratadas pela borda superior do elemento de proteção é medida na região de sombra acústica da barreira. Além disso, afirma GERGES (1992), para que a atenuação total, isto é, a soma das atenuações por perda de transmissão através do material da barreira ( $A_{PT}$ ) e aquela produzida por difração ( $A_D$ ), seja a maior possível, é necessário que  $A_{PT} \gg A_D$ . Na prática a perda de transmissão de barreiras deve ser aproximadamente 6 dB maior que a atenuação fornecida por difração.

Para verificar se estas condições são satisfeitas, foi efetuado um cálculo simples da perda de transmissão do material da barreira utilizando-se a Lei das Massas, dada pela seguinte expressão (GERGES, 1992),

$$PT = 20 \log(M.f) - 47,4 \quad [dB] \quad (4.3)$$

sendo,  $M$  – a massa superficial do material [kg/m<sup>2</sup>]

$f$  – a frequência de interesse [Hz]

A Figura 4.3 ilustra os resultados de perda de transmissão da barreira utilizada nos ensaios. Para a barreira testada, os valores de perda de transmissão são superiores aos valores de perda por inserção.

A barreira, constituída por três placas de dimensões iguais a 2,20 m (largura) x 1,00 m (altura) cada, foi submetida a três demãos de verniz sintético esmaltado para aumentar o seu coeficiente de reflexão. Este procedimento também fora adotado por WATTS et al. (1994) em seus ensaios experimentais realizados com barreiras de material similar.

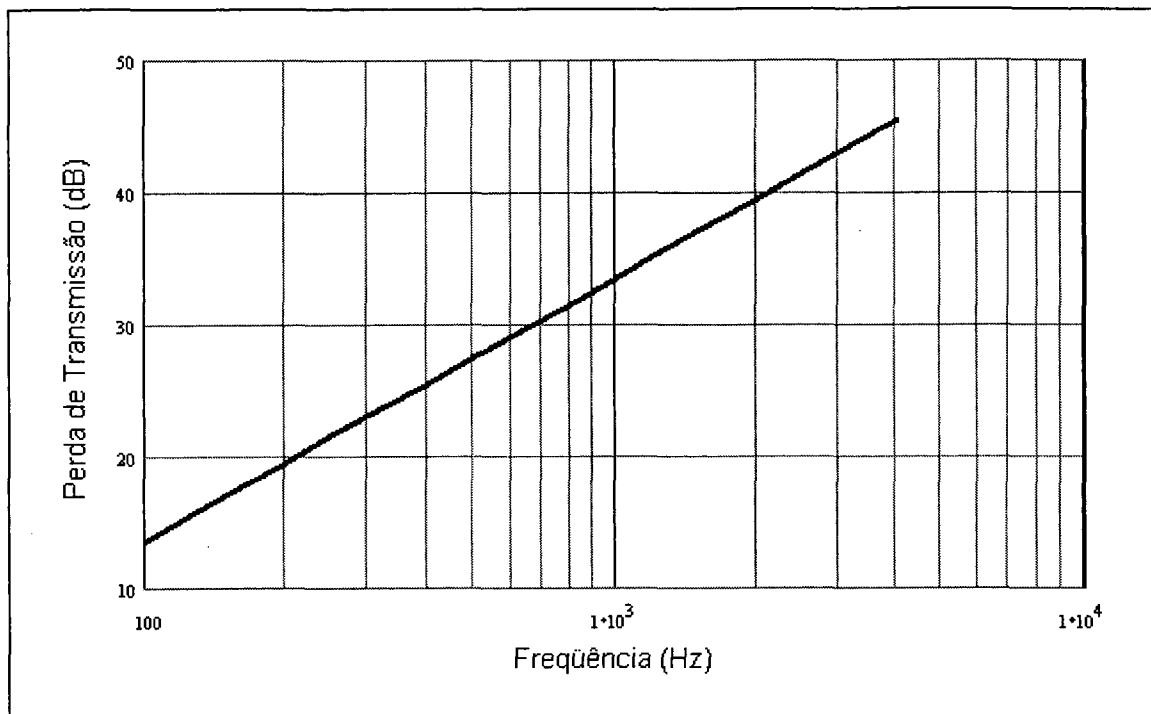


Figura 4.3 – Perda de transmissão da barreira utilizada nos ensaios experimentais. Lei das Massas.

A Figura 4.4 ilustra um esquema da montagem experimental e as fotos da Figura 4.5 e Figura 4.6, mostram um ensaio de medição de nível de pressão sonora e os equipamentos utilizados neste ensaio, respectivamente.

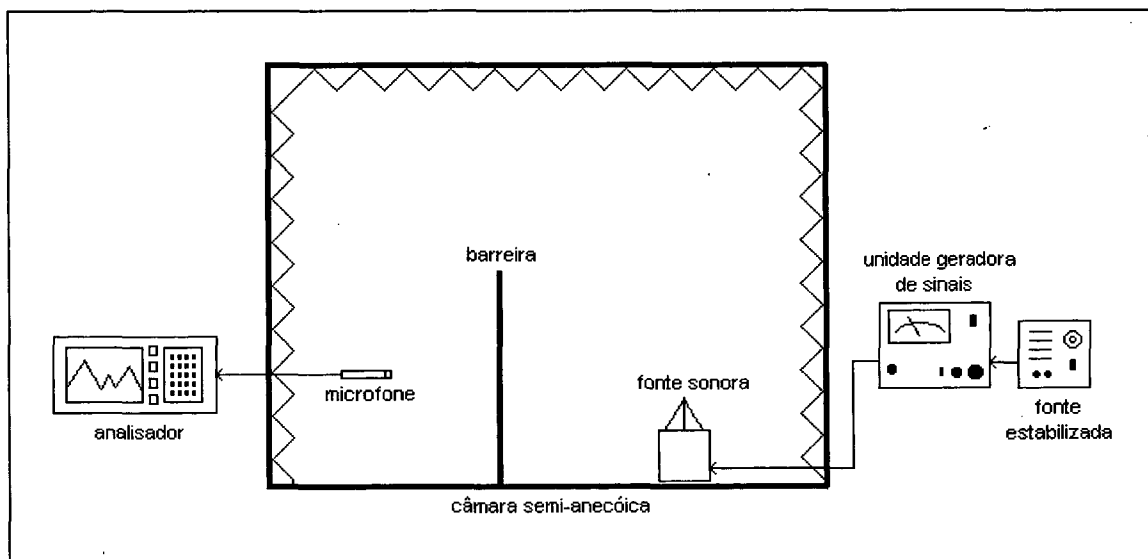


Figura 4.4 – Esquema da montagem experimental para as medições.

Para evitar-se a difração pelas bordas laterais da barreira, estas foram introduzidas nos interstícios entre as cunhas, conforme mostrado na Figura 4.5, até uma

profundidade de 60 cm. Deste modo, satisfaz-se a condição teórica de barreira de comprimento infinito construída sobre piso rígido.

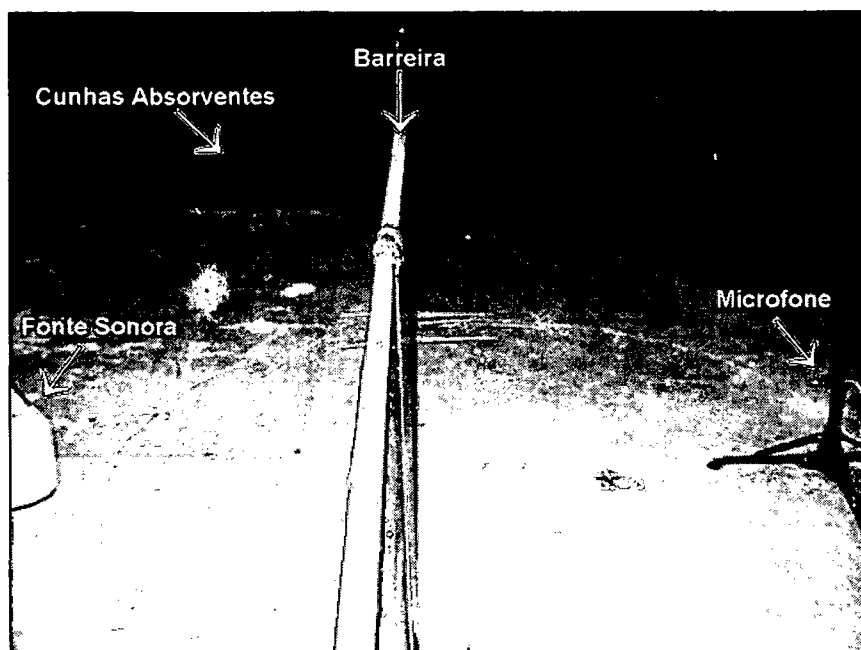


Figura 4.5 – Configuração experimental típica montada na câmara semi-aneecóica

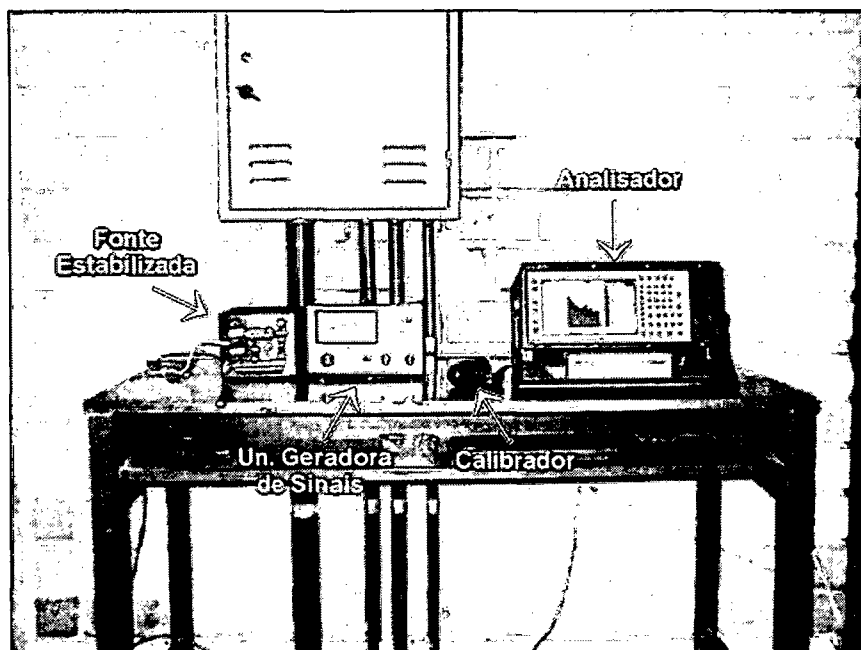


Figura 4.6 – Conjunto de equipamentos de excitação do sistema e aquisição de dados

Por não ser uma estrutura monolítica, pode ocorrer vazamento de ruído através dos espaços entre as placas componentes da barreira e entre a barreira e o piso da câmara se não forem tomadas as devidas precauções. A vedação destas discontinuidades foi executada com massa de calafetar, a qual foi cuidadosamente

empurrada por entre as frestas em toda a extensão da barreira, através da face voltada para a fonte sonora . Para reforçar a vedação, colocou-se sobre as junções entre as placas (duas faces da barreira) e sobre a junção entre placas e piso (lado voltado para o microfone), fita adesiva plástica de 50 mm de largura. A Figura 4.7 mostra a vedação entre as placas e a Figura 4.8 e Figura 4.9, mostram os detalhes de vedação entre placas e piso, e também os elementos de apoio para as placas.

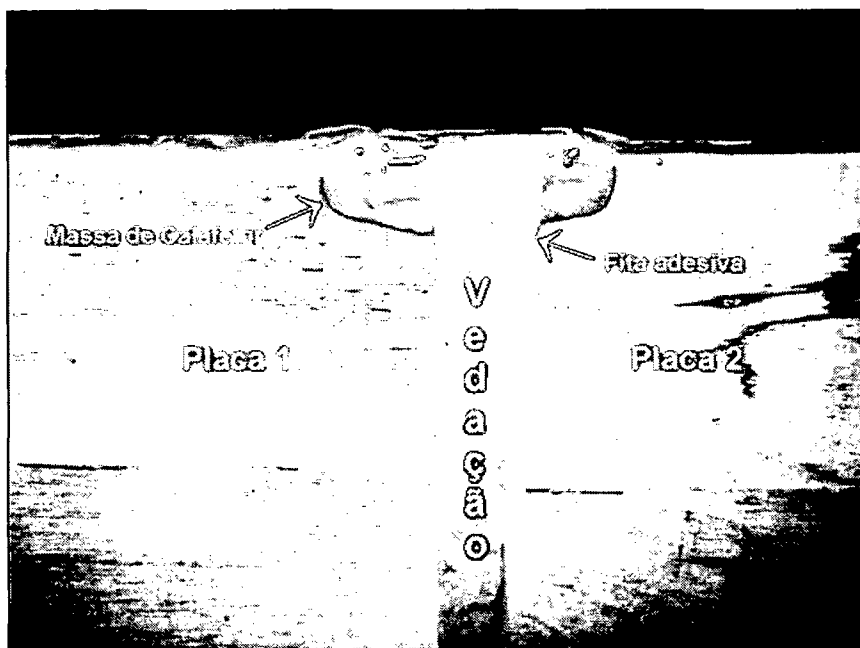


Figura 4.7 – Detalhe da vedação entre as placas componentes da barreira (massa de calafetar e fita adesiva).

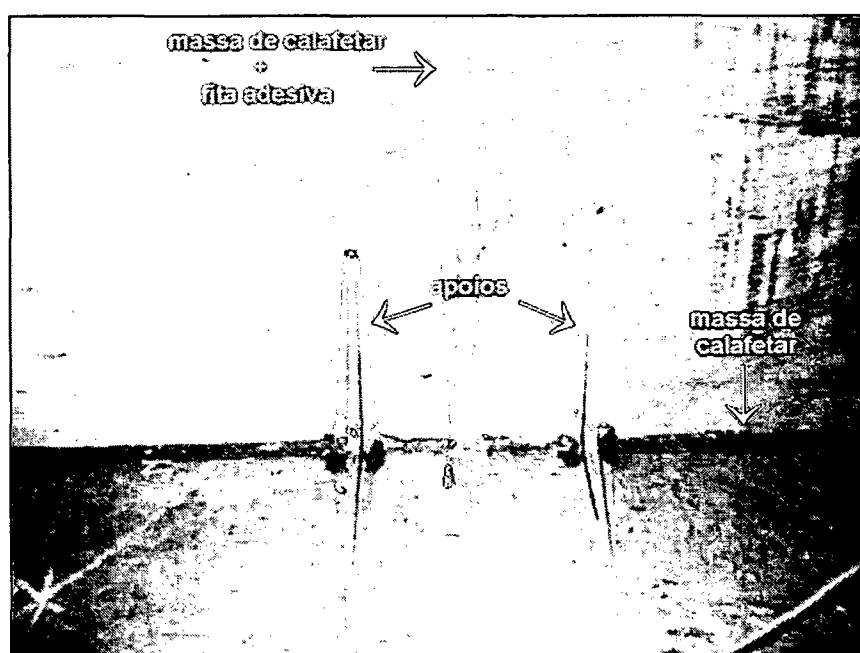


Figura 4.8 – Face voltada para fonte sonora. Apoios para as placas. Detalhe da vedação entre placas e piso: massa de calafetar e fita adesiva.

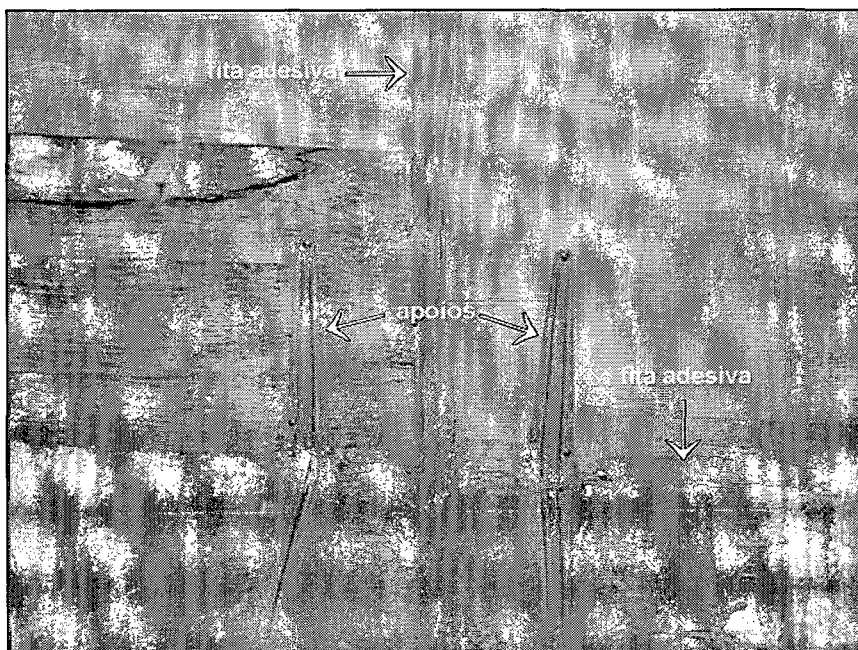


Figura 4.9 – Face voltada para receptor. Apoios para as placas. Detalhe da vedação entre placas e piso: fita adesiva.

Sabe-se que as regiões que mais interferem na melhora das características de proteção acústica de barreiras são suas bordas que, segundo BUTLER (1974), sendo dotadas de propriedades de absorção, podem atenuar boa parte da energia das ondas sonoras que as contornam por difração. Assim, com o objetivo de melhorar as características de reflexão destes pontos críticos, tomou-se o cuidado de recobri-los com fita adesiva plástica.

O posicionamento da fonte sonora e dos pontos de recepção já fora definido no Capítulo 2, entretanto, são rerepresentadas algumas observações feitas na revisão bibliográfica, as quais endossam a escolha e tornam mais claro o seu entendimento. Além disso, cabe ressaltar que as medições são feitas em um espaço tridimensional, enquanto que os cálculos analíticos e simulações numéricas empregadas no presente trabalho são tratados bidimensionalmente. Assim, para garantir condições de comparação entre ambos, a fonte sonora e os pontos de recepção foram posicionados no mesmo plano, sendo este perpendicular à barreira em seu ponto central.

Conforme foi visto anteriormente, WATTS et al. (1994) compararam os resultados de dois conjuntos de medições: um realizado com o receptor e a fonte situados em uma linha perpendicular ao centro da barreira e outro com esta linha formando um ângulo de  $30^\circ$  com a barreira. Os resultados para ambos os conjuntos foram similares, emprestando, portanto, suporte à consideração de que a perda por

inserção relativa de barreiras para uma fonte pontual é similar àquela para uma fonte linear.

WATTS et al. (1994); WATTS (1996); WATTS e MORGAN (1996) realizaram também estudos comparativos entre simulações numéricas e medições, utilizando para a modelagem numérica um modelo bidimensional e espalhamento cilíndrico e para as medições uma fonte pontual. Segundo eles, as diferentes considerações não afetam as comparações de perda por inserção, embora, obviamente, as predições da variação de nível de pressão sonora com a distância sejam afetadas já que são altamente dependentes do tipo de fonte sonora.

HOTHERSALL et al. (1991) também obtiveram boa correlação entre resultados produzidos por simulação bidimensional por elementos de contorno e experimentos utilizando fonte pontual.

Os 25 pontos de medição foram definidos anteriormente e listados no Capítulo 2, especificamente na Tabela 2.1.

O sistema de medição (exceto fonte sonora e microfone) foi montado fora da câmara para evitar-se interferências no campo sonoro. É conveniente, agora, que se relacionem os equipamentos utilizados nos ensaios experimentais, sendo sua montagem esquematizada na Figura 4.4:

- fonte estabilizada de 13,8 V, marca NODAJI;
- fonte de potência sonora, marca Brüel & Kjær, tipo 4205 (constituída de uma unidade geradora de sinais e uma fonte sonora tipo HP 1001);
- analisador de frequências, marca Brüel & Kjær, tipo 2144 + *software* de medição de nível de pressão sonora para o analisador de frequências, marca Brüel & Kjær, tipo 7667;
- analisador FFT, marca Brüel & Kjær, tipo 2144 + *software* de medição de nível de pressão sonora para o analisador FFT, marca Brüel & Kjær, tipo 7651;
- *software* para processamento dos dados, marca Brüel & Kjær, tipo 5306;
- pré-amplificador, marca Brüel & Kjær, tipo 2639;
- microfone capacitivo de  $\frac{1}{2}$ "', marca Brüel & Kjær, tipo 4165;
- calibrador de microfone, 1 kHz – 94 dB, marca Brüel & Kjær, tipo 4230;
- tripé de apoio para o microfone.

## b) Procedimento experimental

Com todo o sistema montado, passou-se à fase de aquisição dos dados. As medições de nível de pressão sonora foram realizadas primeiramente para a situação *sem barreira* e, após a sua montagem, repetida para os mesmos pontos de recepção.

Antes de se iniciar cada medição, o sistema era calibrado utilizando-se um calibrador de cavidade que emite um sinal estável de pressão equivalente a 93,8 dB na frequência de 1 kHz. Deste modo, é possível ajustar a sensibilidade do canal de medição do analisador de frequências de modo a garantir a conversão dos valores do sinal de tensão vindos do pré-amplificador em valores corretos de pressão sonora. Cabe assinalar que este procedimento não é absolutamente necessário, uma vez que as medições visam obter valores relativos de níveis de pressão sonora e, portanto, um erro sistemático, para mais ou para menos, não afetaria os resultados finais. De qualquer forma, é sempre aconselhável proceder à calibração do sistema de medição.

Para as medições em bandas de 1/3 de oitava e 1/24 de oitava, os sinais de resposta em frequência foram, então, captados pelo microfone em cada uma das posições preestabelecidas e enviados ao analisador, que efetuava a média de 20 segundos de aquisição de dados e a registrava em auto-espectros, após a passagem pelos filtros selecionados. Para cada posição foram registrados cinco auto-espectros.

Na medição com resolução em frequência de 8 Hz, o sinal foi medido no domínio do tempo e, através da FFT do analisador, convertido para o domínio da frequência em auto-espectros. Também foram produzidos cinco auto-espectros para cada posição de medição.

Os dados dos auto-espectros foram, então, gravados em disquete e transferidos para o computador para serem convertidos para o formato de planilhas eletrônicas. Para se efetuar esta conversão utilizou-se o *software* modelo 5306 da Brüel & Kjær. Com estes valores em mãos, os espectros de perda por inserção da barreira foram gerados, conforme descrito na Seção 4.2.1.

### **4.2.3 Resultados das medições**

Os resultados das medições são apresentados em forma de curvas de perda por inserção em frequência. A construção destas curvas se deu pela diferença entre a média dos cinco auto-espectros medidos na câmara semi-anecóica em cada posição de receptor

para a situação com a barreira ausente e com a barreira presente. A Figura 4.10, ilustra o modo de obtenção das curvas de perda por inserção.

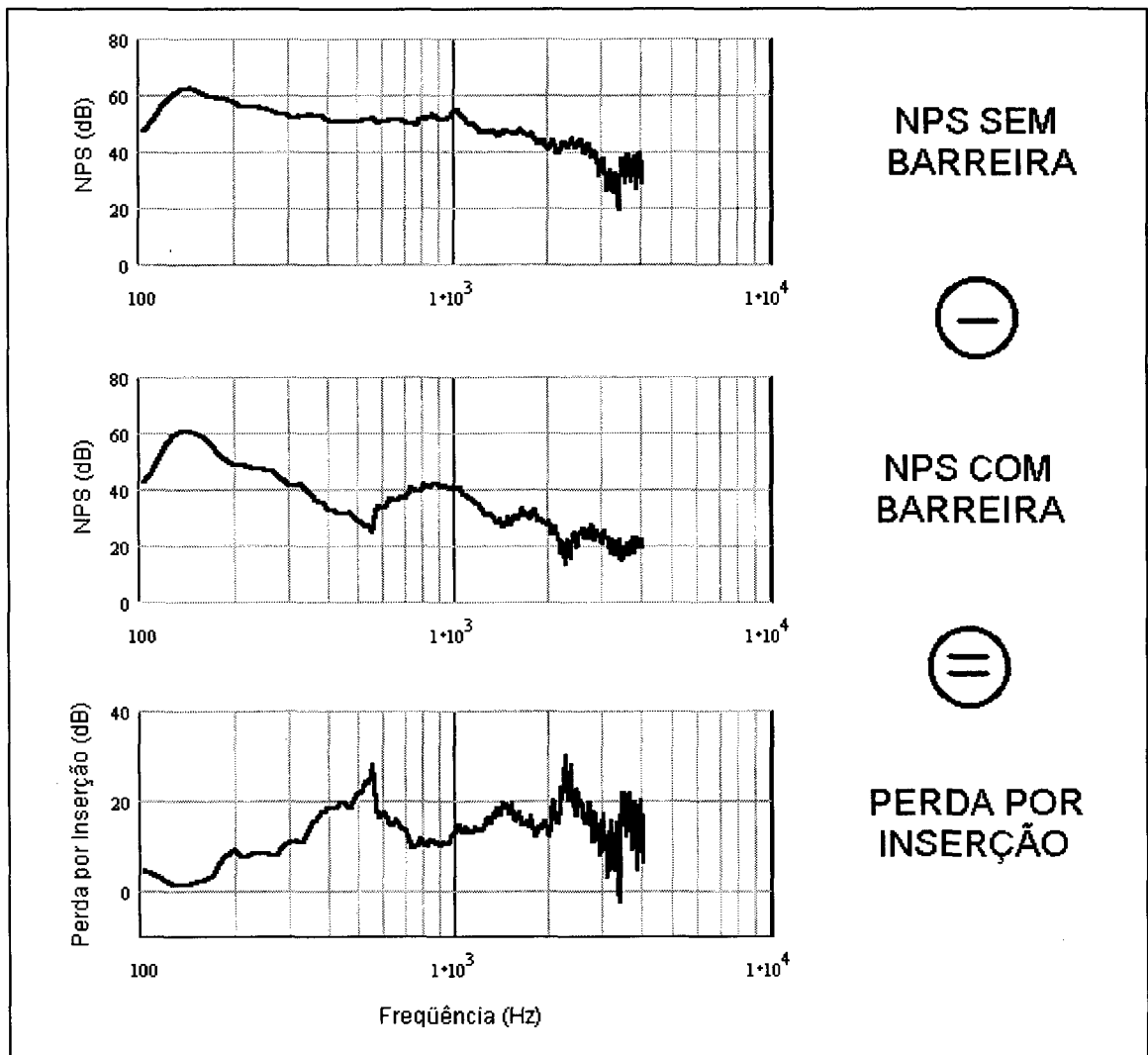


Figura 4.10 – Esquema ilustrativo para determinação das curvas de perda por inserção.

Antes de se prosseguir com a apresentação dos resultados, é necessário um esclarecimento quanto às medições. Inicialmente objetivou-se executar medições apenas em pontos usuais de receptor, os quais correspondem a pontos bem dentro da zona de sombra, caracterizados por alturas menores que a altura da barreira.

Assim, para as primeiras medições, realizadas em bandas de 1/3 de oitava e 1/24 de oitava, somente se dispõe dos resultados referentes às 15 primeiras posições. Desta forma, a análise das medições com o objetivo de comparar-se a largura de banda e seus efeitos nos resultados foi feita para estas 15 posições disponíveis.

Por outro lado, as comparações com os resultados dos cálculos analíticos e das simulações numéricas foram feitas com os resultados das medições realizadas com



largura de banda constante de 8 Hz. A ausência dos dados das medições em 1/3 de oitava e 1/24 de oitava não traz prejuízo algum para a avaliação dos resultados.

As Figuras 4.11 e 4.12 mostram gráficos comparando as diferenças entre as curvas de perda por inserção obtidas para medições efetuadas com as três larguras de banda de frequências empregadas: 1/3 de oitava, 1/24 de oitava e 8 Hz. Atenta-se para o fato de que a expressão dos dados das medições em curvas é feita concentrando-se a energia sonora correspondente a cada banda de frequências na frequência central desta banda, não importando sua largura.

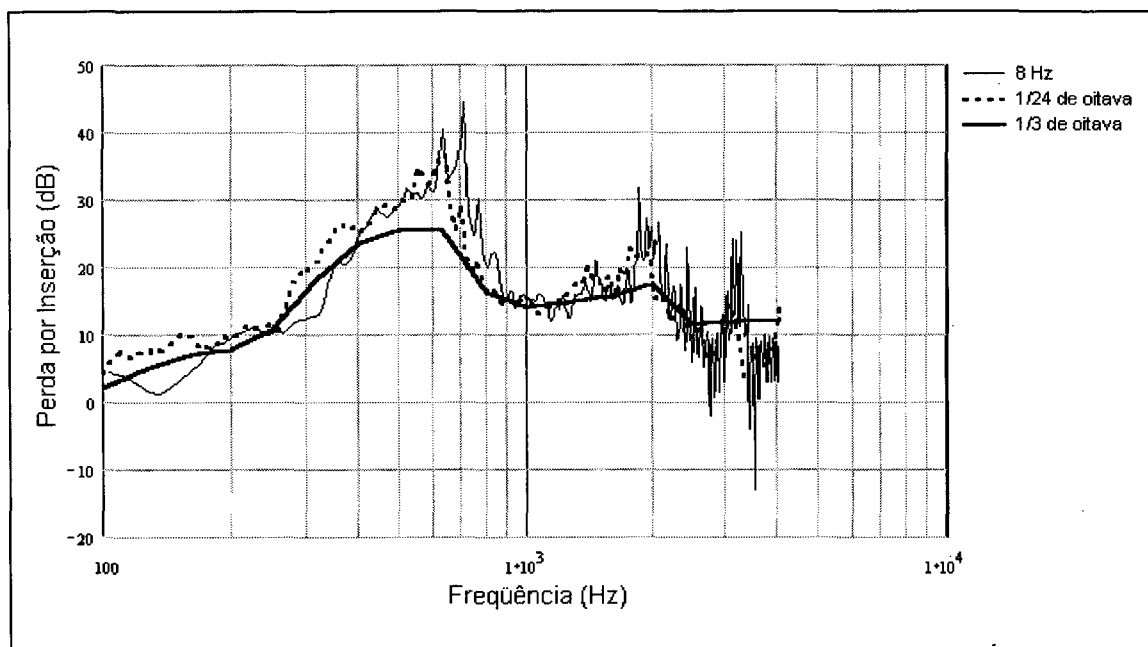


Figura 4.11 – Influência da largura de banda nas medições (posição 08).

Pode-se observar que as curvas de resposta para as medições feitas com largura de banda de 1/3 de oitava (mais largas), apresentam variação suave se comparadas com aquelas feitas utilizando-se larguras de banda mais estreitas, como é o caso das medições em bandas 1/24 de oitava ou com largura constante de 8 Hz. Estas últimas apresentam vários picos e vales de atenuação não identificados nas medições em bandas de 1/3 de oitava. Os picos ocorrem principalmente nas frequências mais altas, onde a diferença entre as larguras de banda é mais significativa.

Pode-se afirmar que a largura de banda tem importância fundamental na identificação de picos de atenuação acústica da barreira, ou seja, quanto menor a largura da banda de medição, melhor a resolução em frequência e mais detalhada a análise.

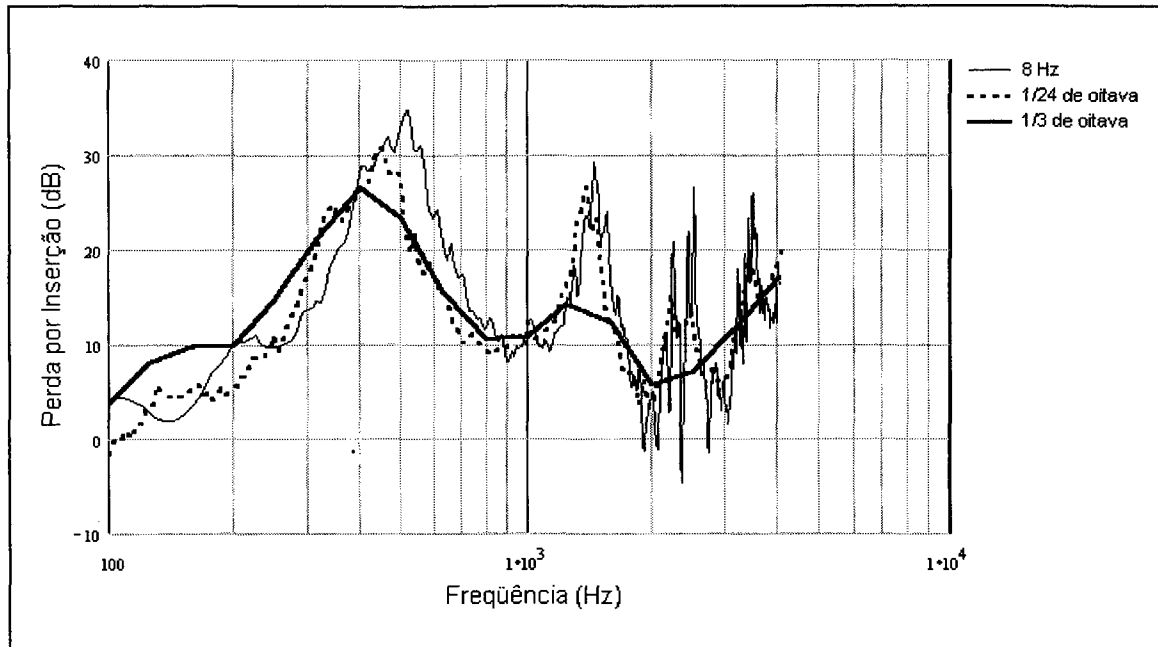


Figura 4.12 – Influência da largura de banda nas medições (posição 15).

Se por um lado se ganha com esta análise minuciosa, por outro dificulta-se um pouco a análise de tendências gerais. Caberá ao pesquisador optar por uma ou outra alternativa.

Embora a diferença na ocorrência de picos e vales entre os resultados obtidos para as três larguras de banda empregadas tenha sido explicada, ainda restam algumas diferenças a serem elucidadas.

Nas baixas frequências as discrepâncias entre os resultados da medição em banda de 1/3 de oitava em relação às outras duas larguras de banda ainda são devidas à diferença nas larguras de banda de frequências utilizadas para cada medição. Entretanto, para as bandas de 1/24 de oitava e de 8 Hz, esperavam-se resultados mais próximos em toda a faixa de frequências investigada, principalmente nas baixas frequências. Observa-se, porém, que de uma forma geral, na faixa de 100 Hz a 200 Hz, as diferenças são relativamente grandes, diminuindo até a frequência de 600 Hz, aproximadamente, a partir da qual os resultados parecem convergir.

Os desvios nas frequências mais baixas (entre 100 Hz e 200 Hz) podem ser explicados pela sua proximidade com a frequência de corte da câmara semi-anechoica, que fica em torno de 150 Hz, o que tornam questionáveis os resultados próximos a esta frequência. Além disso, a fonte sonora emite ruído em banda larga na faixa de frequências entre 100 Hz e 10 kHz. Por medida de segurança, deve-se tomar cuidado com resultados próximos a estes limites.

Além disso, a montagem da barreira para cada ensaio também pode ter influência sobre os resultados, mesmo com todos os cuidados tomados.

Assim, com exceção do incremento do número, amplitude e forma dos picos e vales de atenuação, explicados pela diferença entre a largura de banda empregada em cada medição, pode-se dizer que os resultados apresentaram boa concordância para as frequências acima de 600 Hz.

As Figuras 4.13 a 4.22 mostram as curvas de perda por inserção determinadas por medição em bandas de largura constante de 8 Hz. A exemplo dos procedimentos adotados para análise dos resultados teóricos, as curvas experimentais foram agrupadas segundo critérios para as posições de recepção com a) mesma altura em relação ao piso e b) mesma distância em relação à barreira. As Tabelas 4.1 e 4.2, que são reproduções de tabelas já apresentadas com a mesma finalidade nos Capítulos 2 e 3, resumem as classificações.

Tabela 4.1 – Posições de microfone com mesma altura em relação ao piso.

Grupo	Pontos de recepção	Altura do ponto
A	01 a 05	0,01 m
B	06 a 10	0,25 m
C	11 a 15	0,50 m
D	16 a 20	1,00 m
E	21 a 25	1,50 m

As posições de microfone do grupo A, cujos resultados são apresentados na Figura 4.13, têm altura igual a 1 cm que, em termos práticos, pode ser considerada nula. Nessas posições as curvas de perda por inserção do grupo apresentam padrão de comportamento similar. O aparecimento de picos e vales de atenuação é decorrente do efeito de interferência entre ondas diretas e refletidas no semi-espaço da fonte. Conforme já mencionado, as ondas refletidas têm alteração de fase em relação às diretas no ponto de recepção e a superposição entre estas ondas, ora construtiva, ora destrutiva, determina a ocorrência de picos e vales de atenuação. Com as posições de recepção situadas rente ao piso, o microfone não está sujeito aos efeitos de interferência devidos ao semi-espaço de recepção e, por isso, praticamente não há variação na posição dos picos e vales de atenuação dentro deste grupo. Pode-se notar, também, como esperado,

uma pequena queda na atenuação à medida que o receptor é afastado da barreira, evidenciando a tendência da barreira oferecer maior proteção às posições próximas dentro da zona de sombra.

Tabela 4.2 – Posições de microfone com mesma distância em relação à barreira.

Grupo	Pontos de recepção	Distância do ponto
F	01, 06, 11, 16 e 21	0,50 m
G	02, 07, 12, 17 e 22	1,00 m
H	03, 08, 13, 18 e 23	1,50 m
I	04, 09, 14, 19 e 24	2,00 m
J	05, 10, 15, 20 e 25	2,50 m

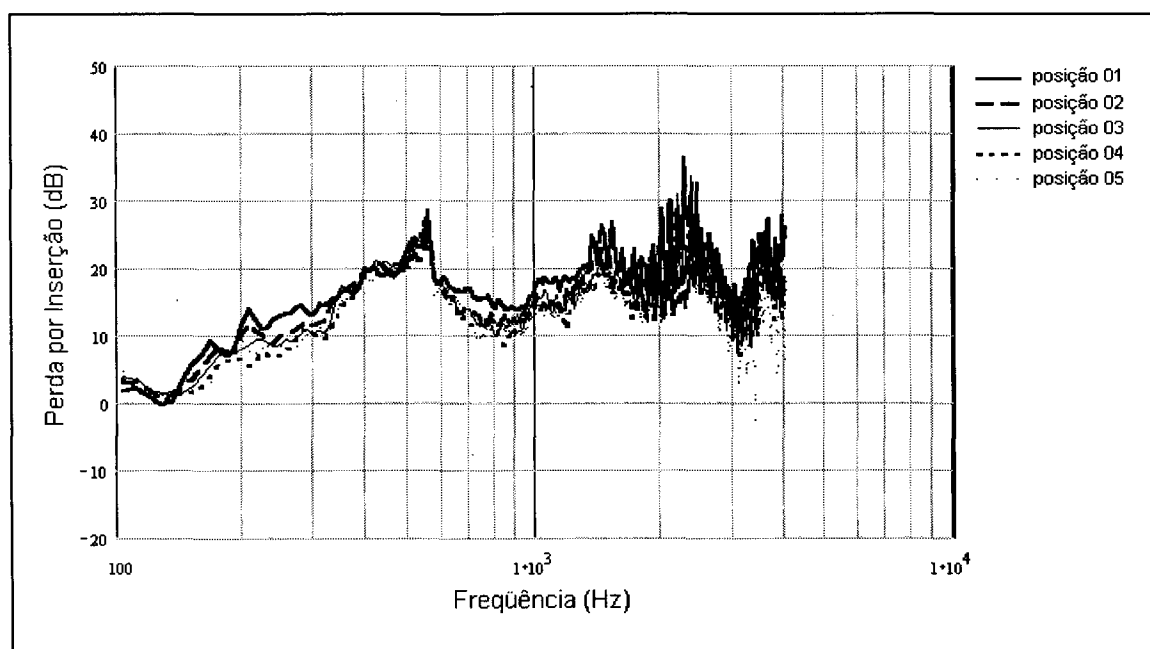


Figura 4.13 – Perda por inserção determinada por ensaios experimentais para posições de recepção com altura de 0,01 m (Grupo A).

Os espectros da Figura 4.14, correspondentes ao grupo B, mostram um deslocamento na frequência, em cada posição de medição, dos picos e vales de perda por inserção. Com o aumento da distância do ponto de recepção em relação à barreira os picos são deslocados para frequências mais altas. Isto ocorre porque nestas posições, além dos efeitos de interferência devidos ao semi-espaço da fonte, o receptor está

sujeito a interferências que ocorrem no semi-espço de recepção, uma vez que situa-se afastado do piso

Ainda assim, observa-se que as curvas seguem um padrão de forma semelhante. As diferenças em amplitude novamente são pequenas, embora causem a falsa impressão de diferenças maiores em virtude do deslocamento dos picos de atenuação na frequência.

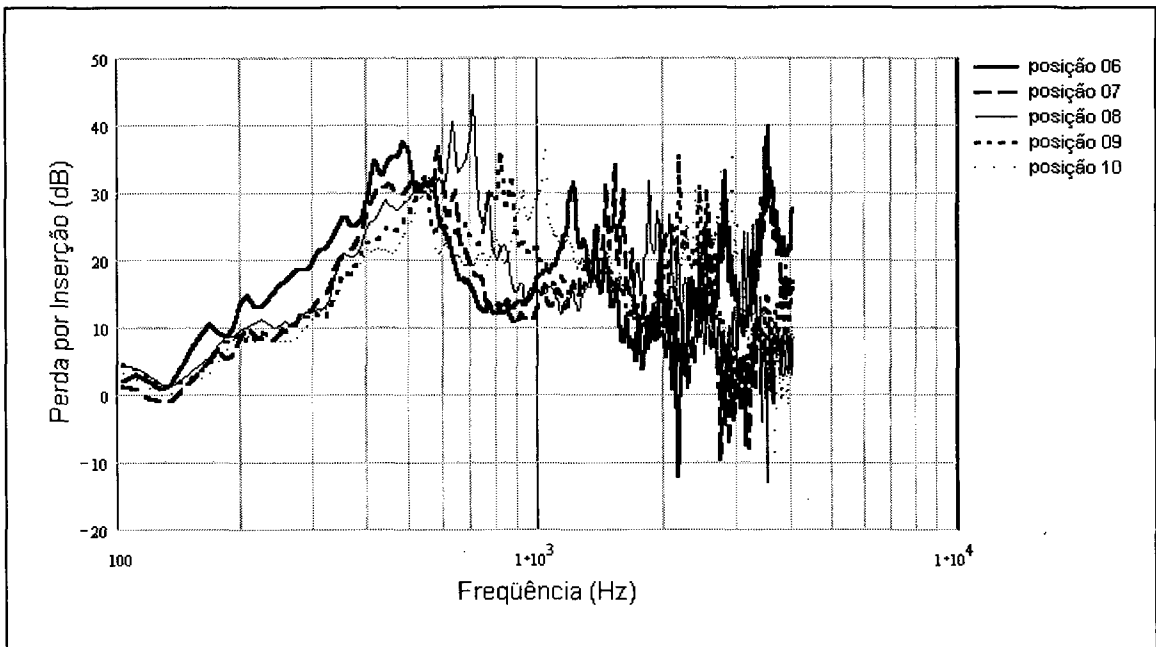


Figura 4.14 – Perda por inserção determinada por ensaios experimentais para posições de recepção com altura de 0,25 m (Grupo B).

A Figura 4.15 mostra as curvas de perda por inserção para as posições de receptor do grupo C. Novamente há uma defasagem na frequência para a ocorrência de picos e vales de atenuação e diferenças em amplitude, devidas aos efeitos de interferência. A identificação de tendências torna-se mais difícil devido à proximidade entre os picos e vales de atenuação.

Para as posições do grupo D, cujos resultados são mostrados na Figura 4.16, a altura do receptor é igual à altura da barreira ( $h_r = H = 1$  m). As observações desenhadas para as curvas do grupo C são válidas também para este grupo de curvas. Pode-se observar, novamente, o aparecimento de atrasos freqüenciais na ocorrência de picos e vales de atenuação, sendo sua amplitude e sua localização no eixo das freqüências determinada pelas suas coordenadas.

Os resultados do grupo de curvas E, ilustrados na Figura 4.17, apresentam uma peculiaridade. A posição 21 encontra-se fora da zona de sombra da barreira. Pode-se

notar que o comportamento da curva correspondente a esta posição é diferenciado e, como esperado, com baixa atenuação comparada com as demais curvas do grupo já que não conta com a proteção direta da parede da barreira. O restante das curvas tende a seguir um comportamento comum, com alternância entre picos e vales de atenuação e defasagem freqüencial principalmente nas freqüências mais altas.

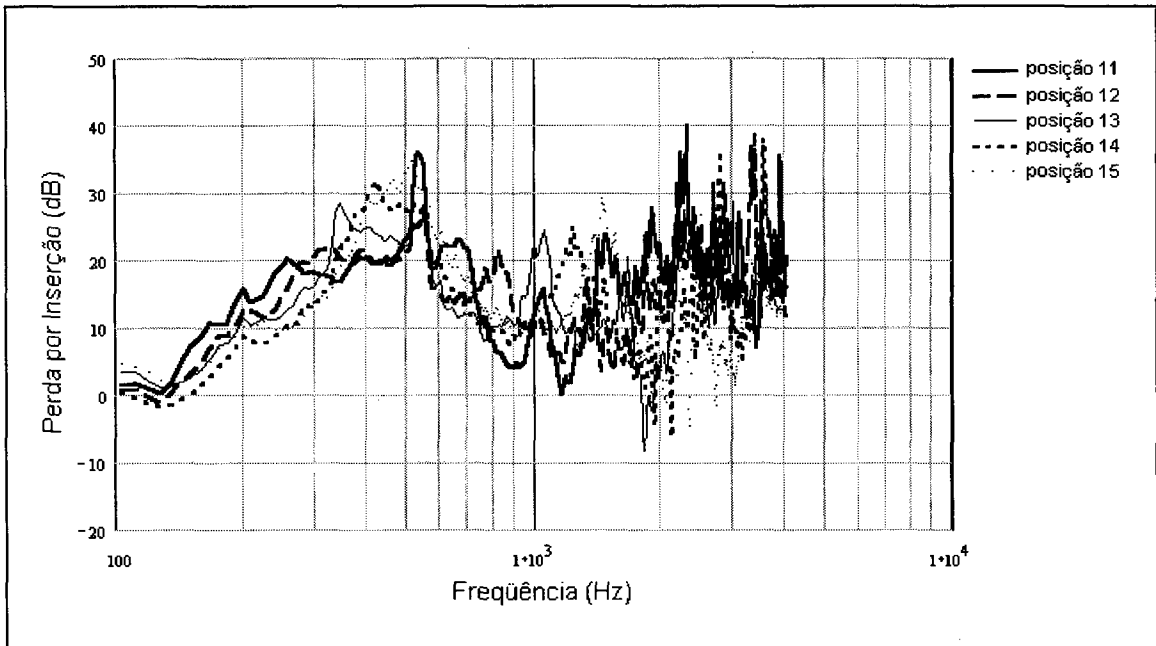


Figura 4.15 – Perda por inserção determinada por ensaios experimentais para posições de recepção com altura de 0,50 m (Grupo C).

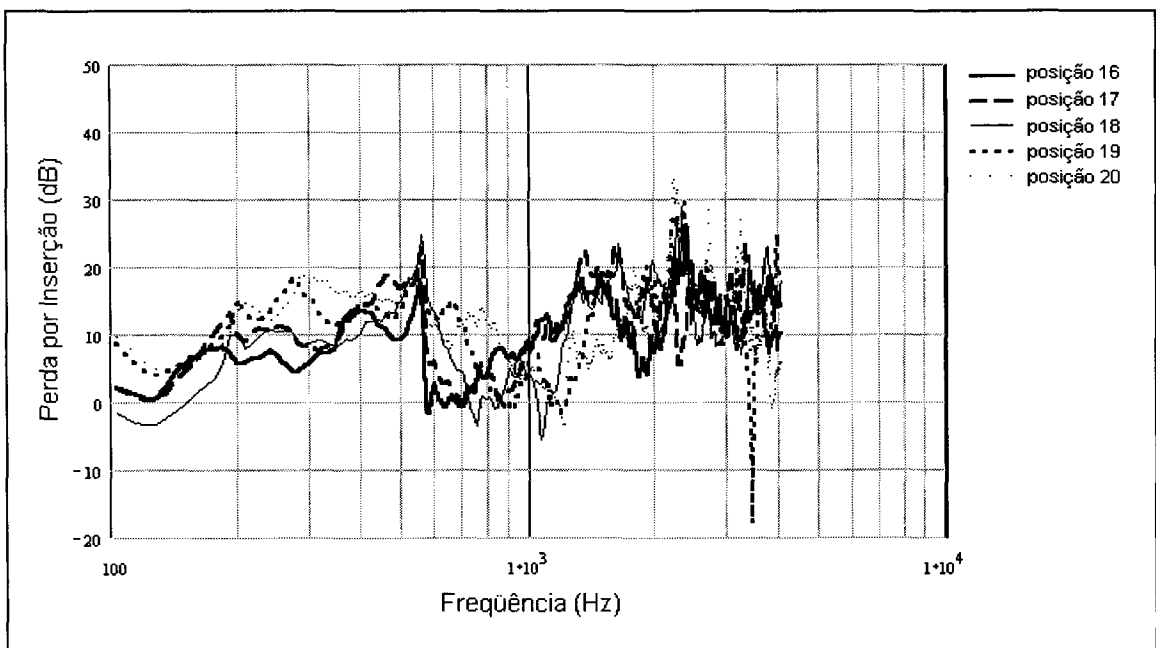


Figura 4.16 – Perda por inserção determinada por ensaios experimentais para posições de recepção com altura de 1,00 m (Grupo D).

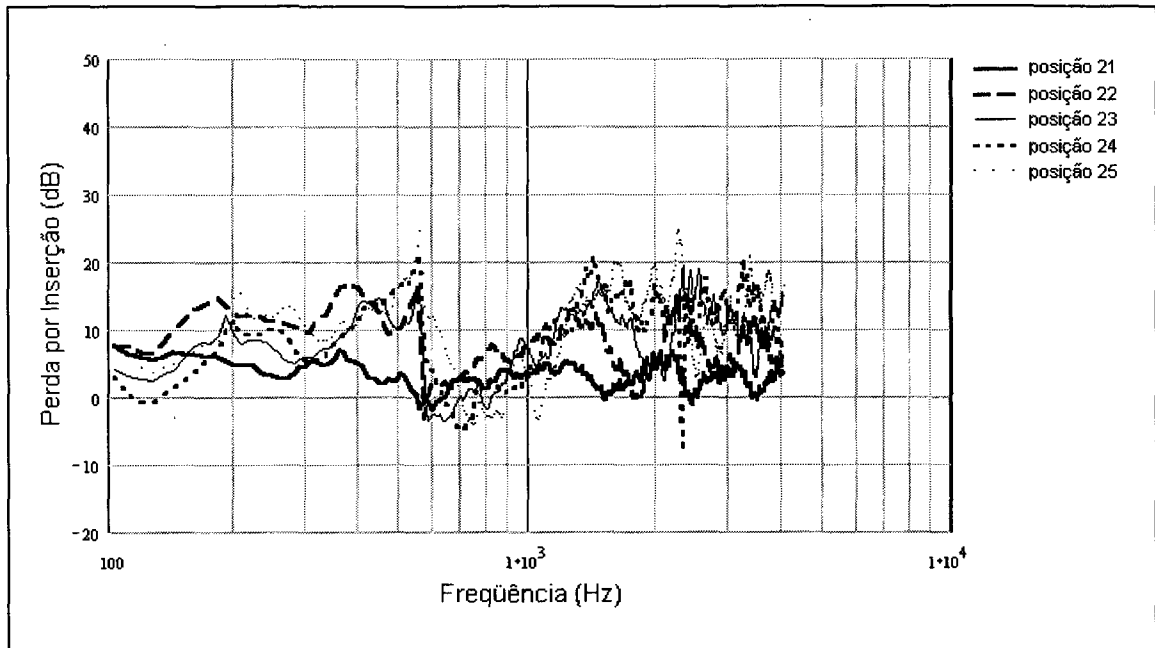


Figura 4.17 – Perda por inserção determinada por ensaios experimentais para posições de recepção com altura de 1,50 m (Grupo E).

Os grupos F até J, que têm mesma distância em relação à barreira, não permitem a observação de semelhanças entre as curvas pertencentes a cada grupo. O que se constata, a partir da observação das Figuras 4.18 a 4.22, é que, à medida que o receptor é afastado da barreira, as curvas do grupo tendem a aproximarem-se. Esta tendência já havia sido observada na Seção 2.4.3, para os cálculos analíticos e na Seção 3.5.1, para as simulações numéricas.

Desta forma, pode-se concluir que a altura do receptor tem maior importância na determinação do espectro das curvas do que sua distância em relação à barreira e que os resultados de perda por inserção tendem a um valor assintótico a grandes distâncias da barreira.

Os resultados apresentados e comentados acima, serão comparados, no Capítulo 5, com os resultados obtidos para a simulação numérica e cálculos analíticos. A partir desta comparação, será possível validar os métodos teóricos de predição da atenuação produzida por barreiras acústicas.

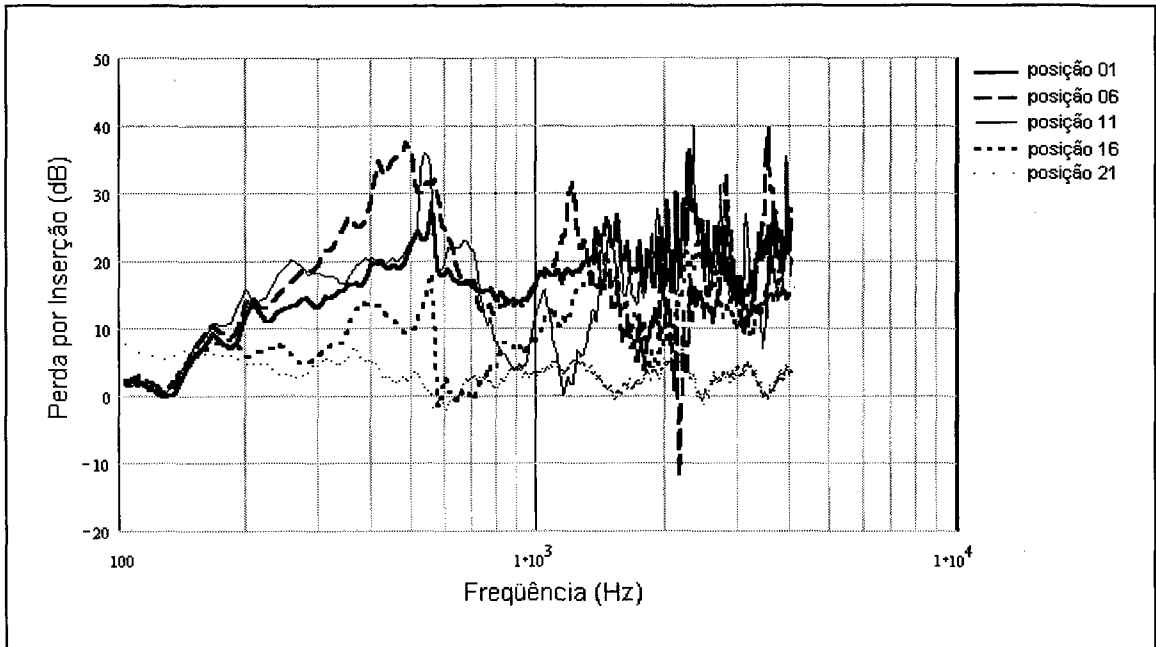


Figura 4.18 – Perda por inserção determinada por ensaios experimentais para posições de recepção com distância de 0,50 m em relação à barreira (Grupo F).

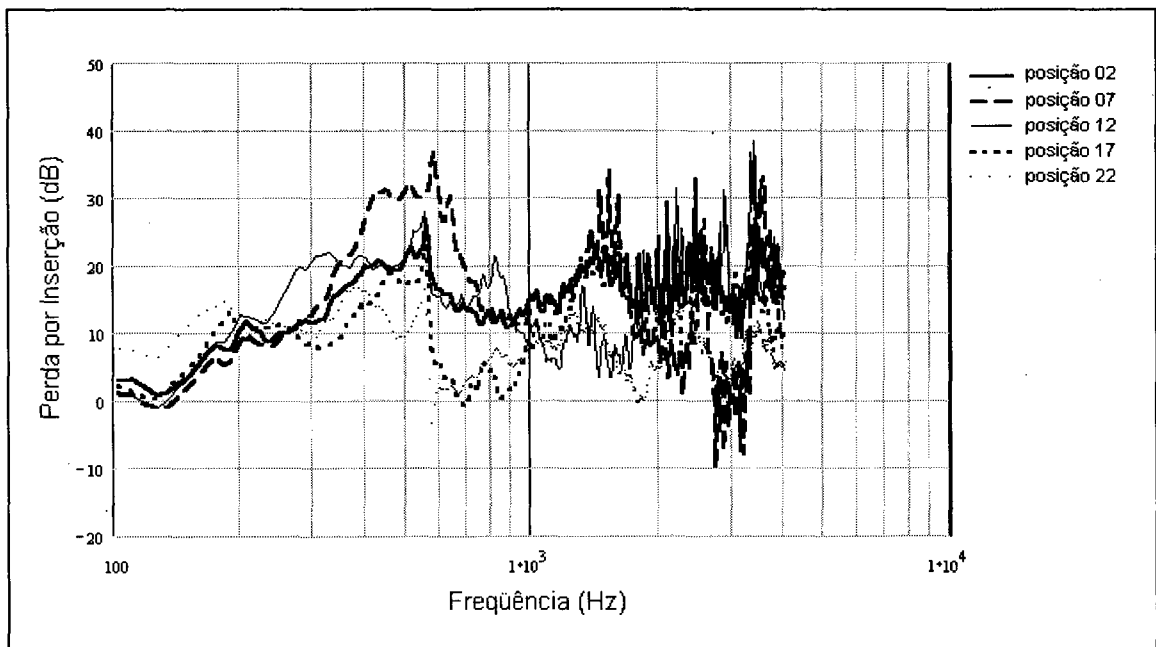


Figura 4.19 – Perda por inserção determinada por ensaios experimentais para posições de recepção com distância de 1,00 m em relação à barreira (Grupo G).



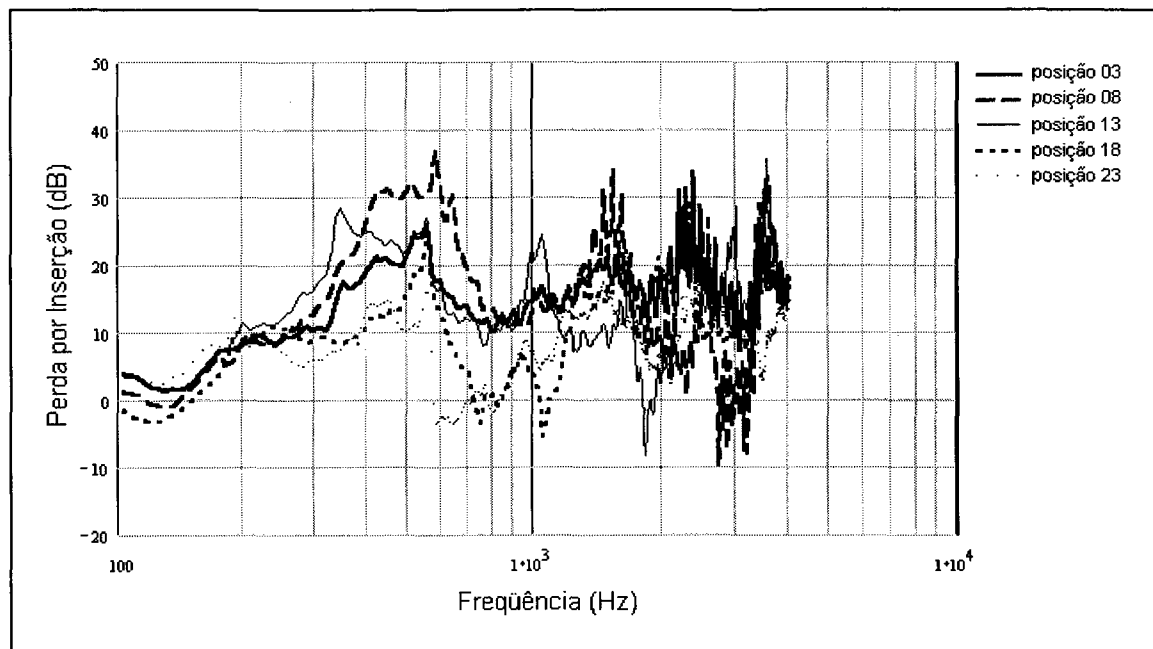


Figura 4.20 – Perda por inserção determinada por ensaios experimentais para posições de recepção com distância de 1,50 m em relação à barreira (Grupo H).

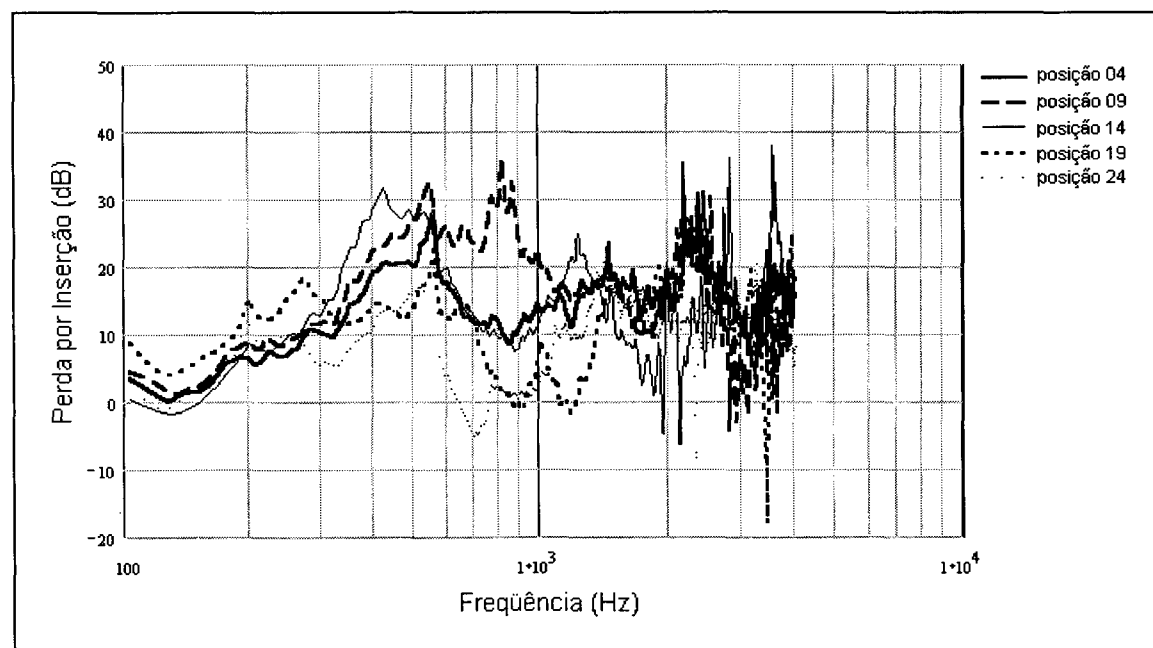


Figura 4.21 – Perda por inserção determinada por ensaios experimentais para posições de recepção com distância de 2,00 m em relação à barreira (Grupo I).

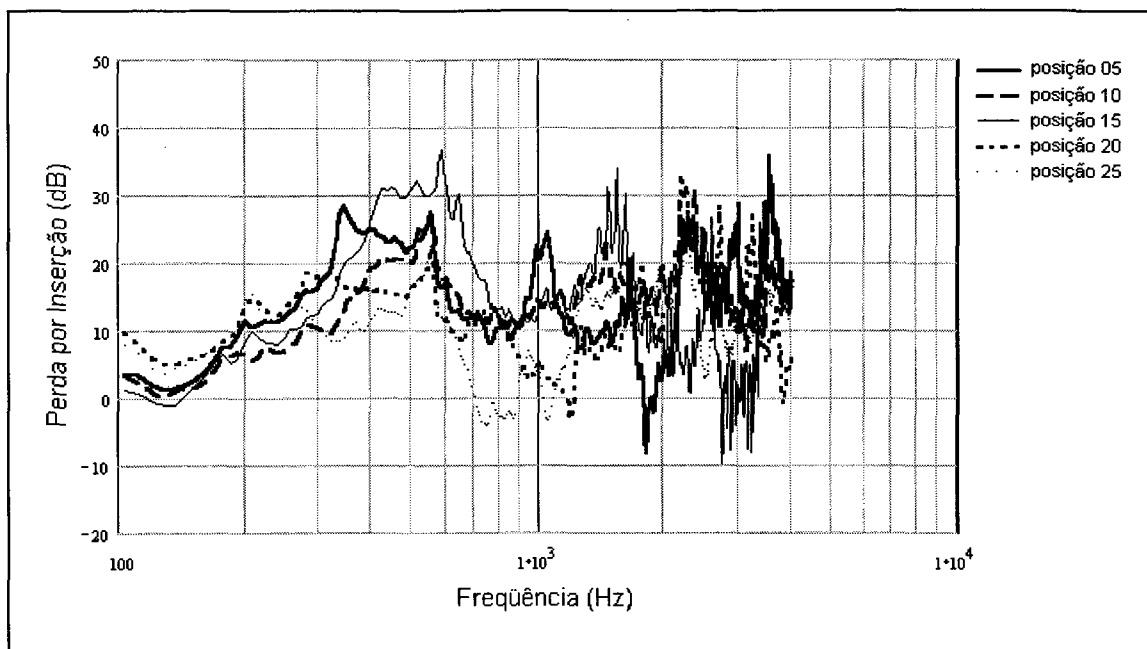


Figura 4.22 – Perda por inserção determinada por ensaios experimentais para posições de recepção com distância de 2,50 m em relação à barreira (Grupo J).

### 4.3 SUMÁRIO

O capítulo de ensaios experimentais iniciou com uma descrição de trabalhos experimentais realizados por diversos autores ao redor do mundo. Logo após, o procedimento experimental adotado foi descrito detalhadamente, com atenção às condições assumidas para a montagem da barreira dentro da câmara e a configuração de fonte sonora e receptores, a fim de que os resultados fossem comparáveis àqueles obtidos através dos métodos analíticos e numéricos de predição da atenuação do ruído.

A influência nos resultados da largura de banda de frequências utilizada nas medições foi abordada, concluindo-se que a escolha por uma banda de frequências mais ou menos larga depende do grau de detalhamento com que se quer analisar o espectro, sendo tanto mais estreita quanto mais detalhes (aparecimento de picos e anti-picos de atenuação) se desejar a respeito dos resultados.

Novamente, na análise em que foram levadas em conta posições de recepção com mesma altura ou mesma distância em relação à barreira, constatou-se, a exemplo do que havia sido concluído para os resultados apresentados nos Capítulos 2 e 3, que posições de recepção com mesma altura apresentam curvas com formatos similares entre si, sugerindo que a altura do receptor é determinante da forma das curvas de atenuação mais do que sua distância em relação à barreira.

## Capítulo 5

### ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, inicialmente são feitas comparações entre os resultados da parte teórica do trabalho, ou seja, entre as formulações analíticas e as simulações numéricas pelo BEM, sendo discutidas as diferenças entre ambas e suas limitações. Em seguida, são comparados os resultados da parte experimental com as predições teóricas. As principais dificuldades encontradas e as restrições dos métodos utilizados são apresentadas.

#### 5.1 ANÁLISE DOS MÉTODOS TEÓRICOS DE PREDIÇÃO

Segundo PIACENTINI et al. (1996), devido à inabilidade dos modelos baseados na acústica geométrica para a consideração dos efeitos difratantes oriundos de uma barreira de pouca espessura interposta entre uma fonte sonora e um receptor, as equações integrais provenientes da equação de Helmholtz-Kirchhoff (BIE's) são preferidas.

Entretanto, os resultados do presente trabalho permitem constatar que, ao menos para o modelo considerado, há ótima correlação entre métodos oriundos destas duas teorias distintas. As Figuras 5.1 a 5.25, apresentam uma comparação entre as curvas obtidas pelos métodos teóricos (três formulações analíticas e BEM). FYFE (1995) ; MURADALLI e FYFE (1998), embora trabalhando com diferentes formulações analíticas, também obtiveram ótima correlação entre a atenuação calculada analiticamente por modelos da acústica geométrica e simulações numéricas pelo método de elementos de contorno.

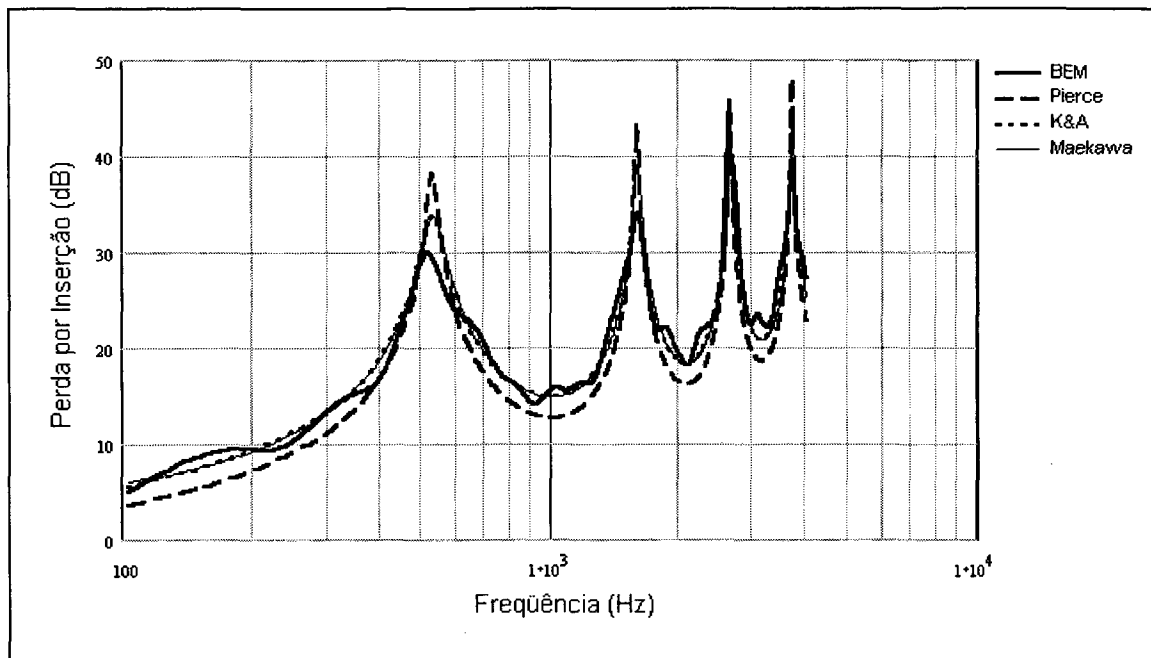


Figura 5.1 – Resposta em freqüência da barreira: BEM *versus* formulações analíticas. Receptor localizado a 0,50 m em relação à barreira e com altura de 0,01 m (posição 01). Zona de Sombra.

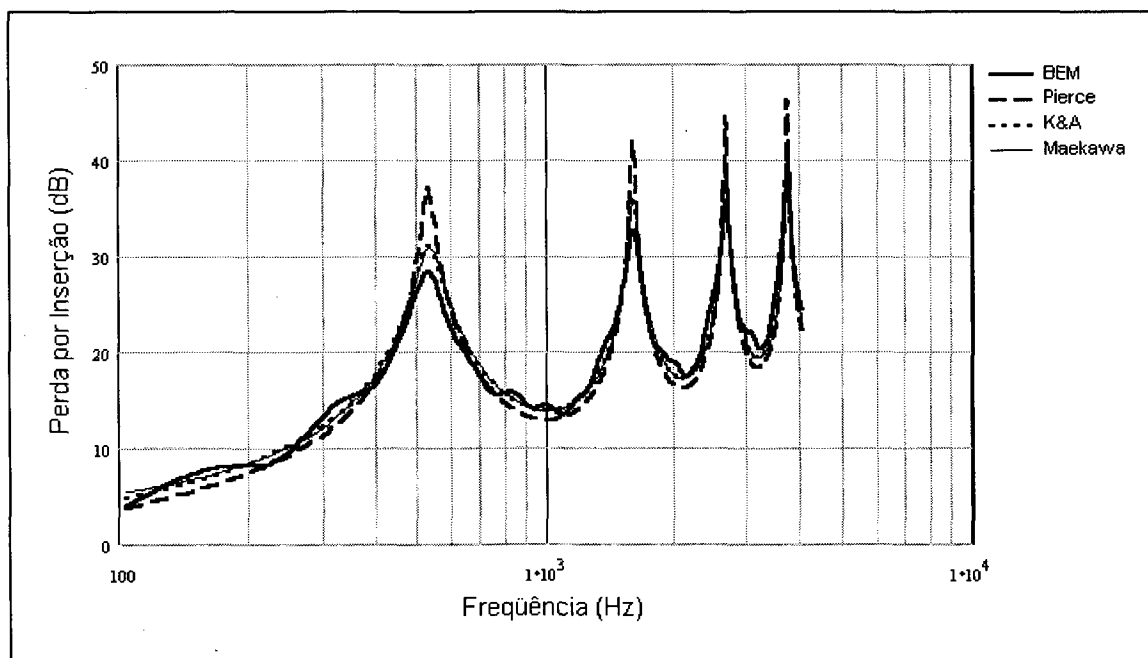


Figura 5.2 – Resposta em freqüência da barreira: BEM *versus* formulações analíticas. Receptor localizado a 1,00 m em relação à barreira e com altura de 0,01 m (posição 02). Zona de Sombra.

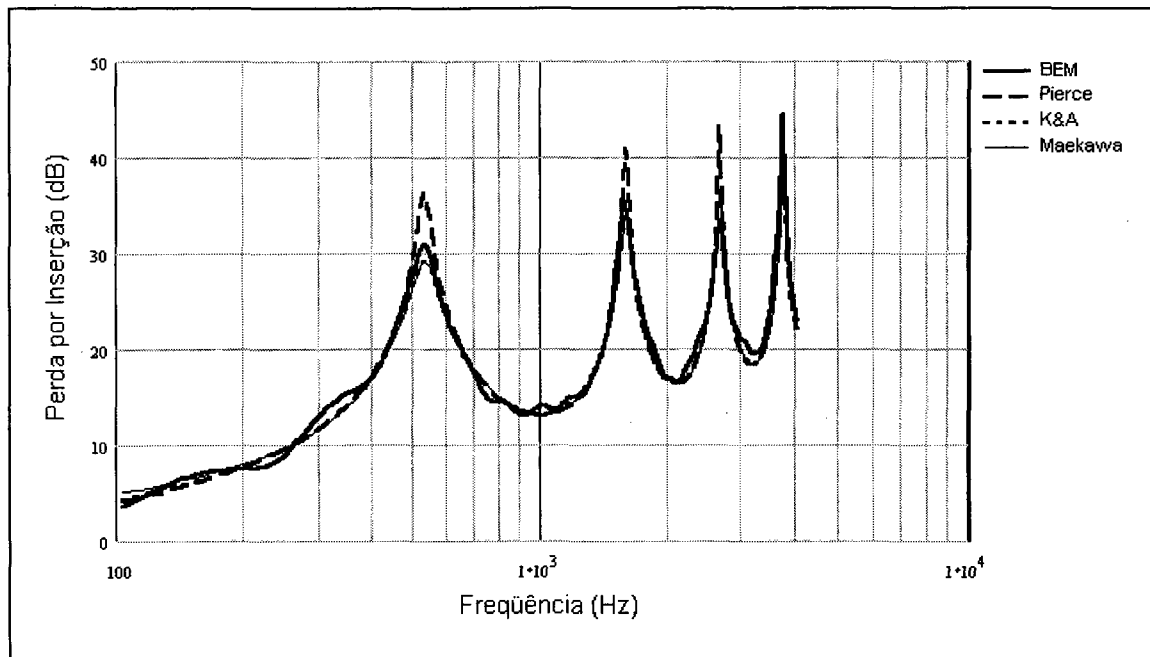


Figura 5.3 – Resposta em freqüência da barreira: BEM *versus* formulações analíticas. Receptor localizado a 1,50 m em relação à barreira e com altura de 0,01 m (posição 03). Zona de Sombra.

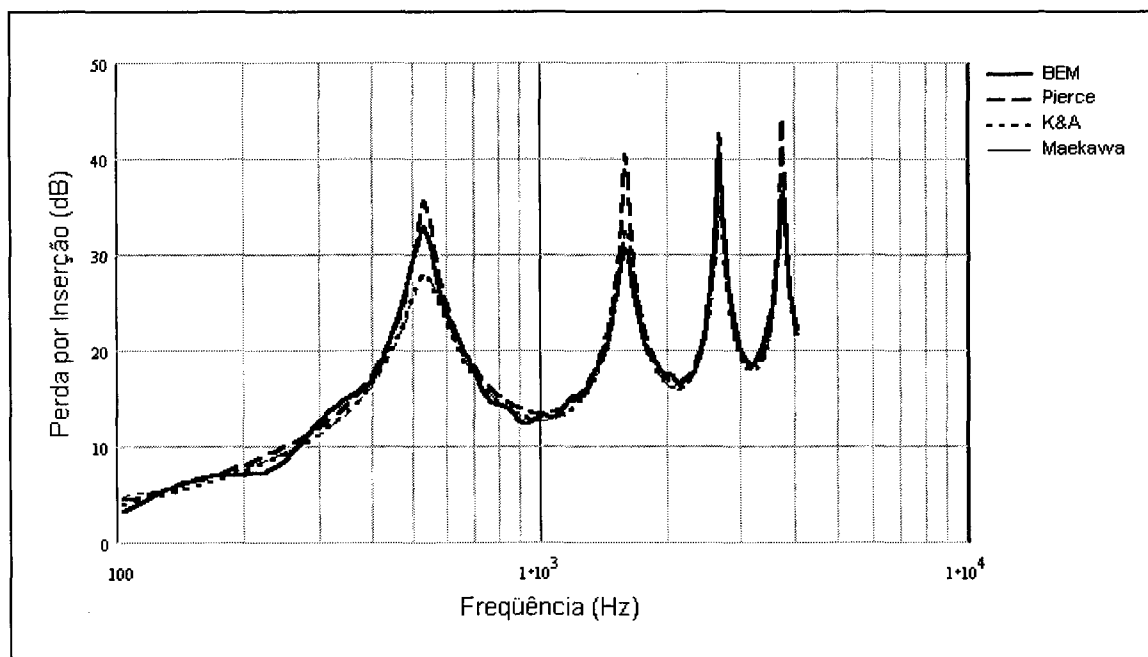


Figura 5.4 – Resposta em freqüência da barreira: BEM *versus* formulações analíticas. Receptor localizado a 2,00 m em relação à barreira e com altura de 0,01 m (posição 04). Zona de Sombra.

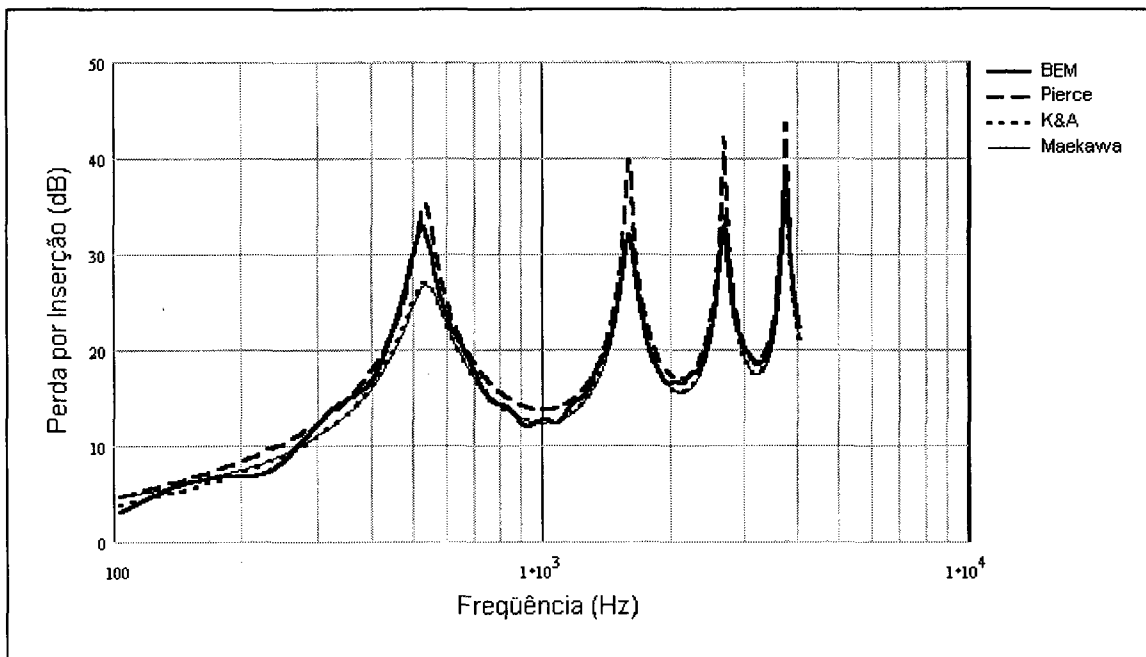


Figura 5.5 – Resposta em frequência da barreira: BEM *versus* formulações analíticas. Receptor localizado a 2,50 m em relação à barreira e com altura de 0,01 m (posição 05). Zona de Sombra.

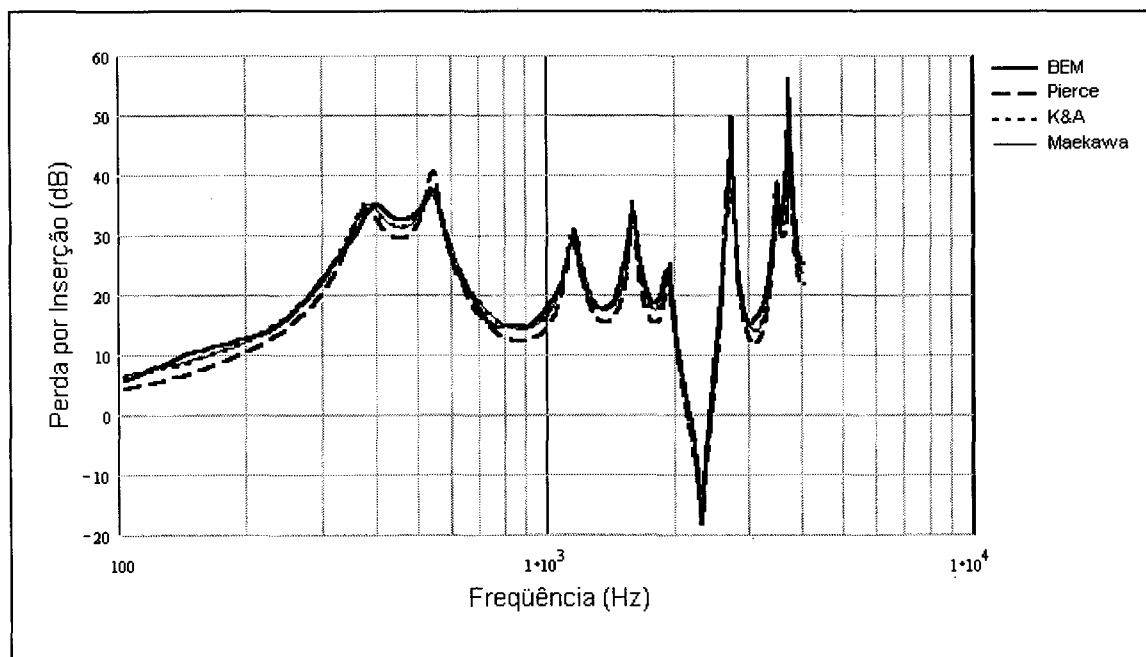


Figura 5.6 – Resposta em frequência da barreira: BEM *versus* formulações analíticas. Receptor localizado a 0,50 m em relação à barreira e com altura de 0,25 m (posição 06). Zona de Sombra.

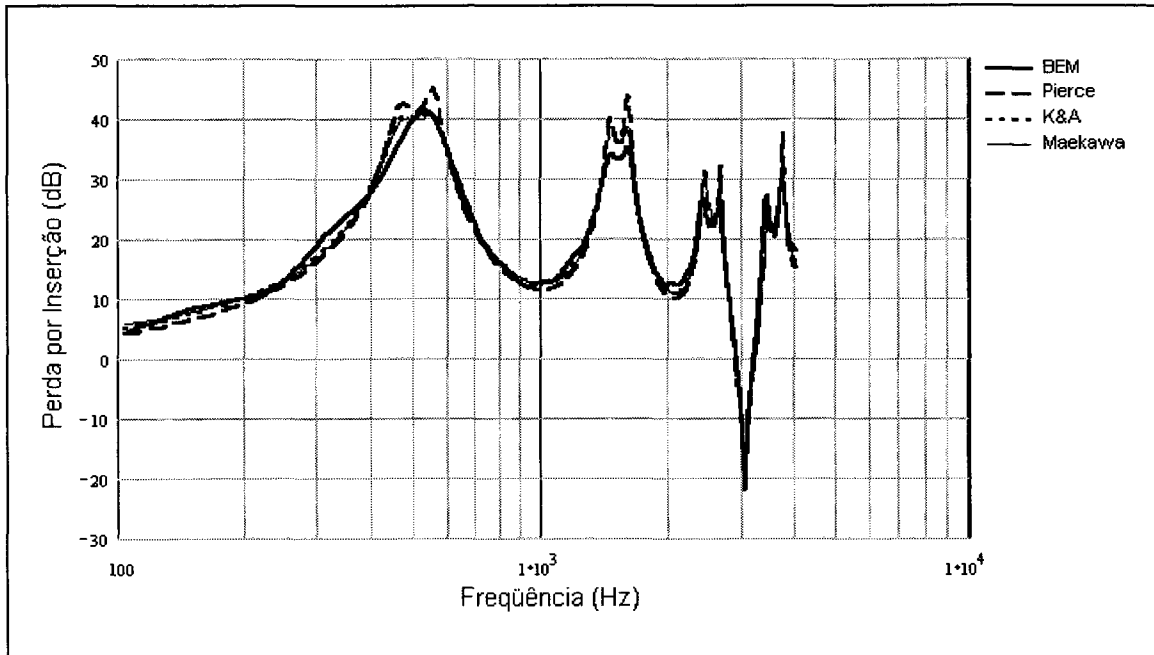


Figura 5.7 – Resposta em frequência da barreira: BEM *versus* formulações analíticas. Receptor localizado a 1,00 m em relação à barreira e com altura de 0,25 m (posição 07). Zona de Sombra.

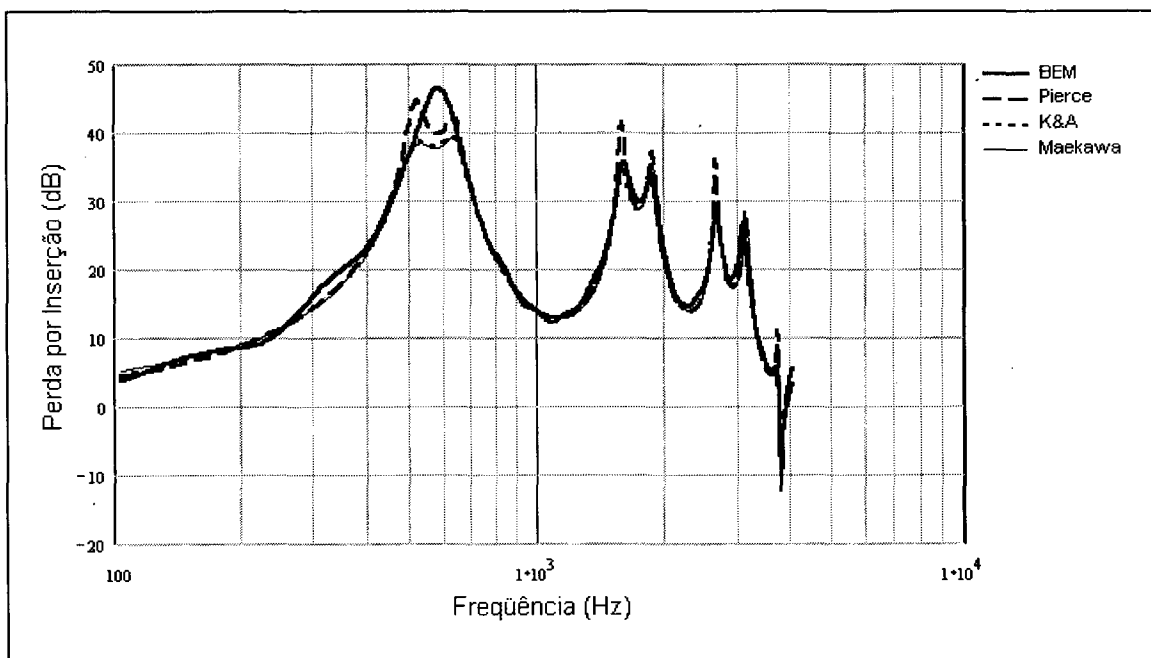


Figura 5.8 – Resposta em frequência da barreira: BEM *versus* formulações analíticas. Receptor localizado a 1,50 m em relação à barreira e com altura de 0,25 m (posição 08). Zona de Sombra.

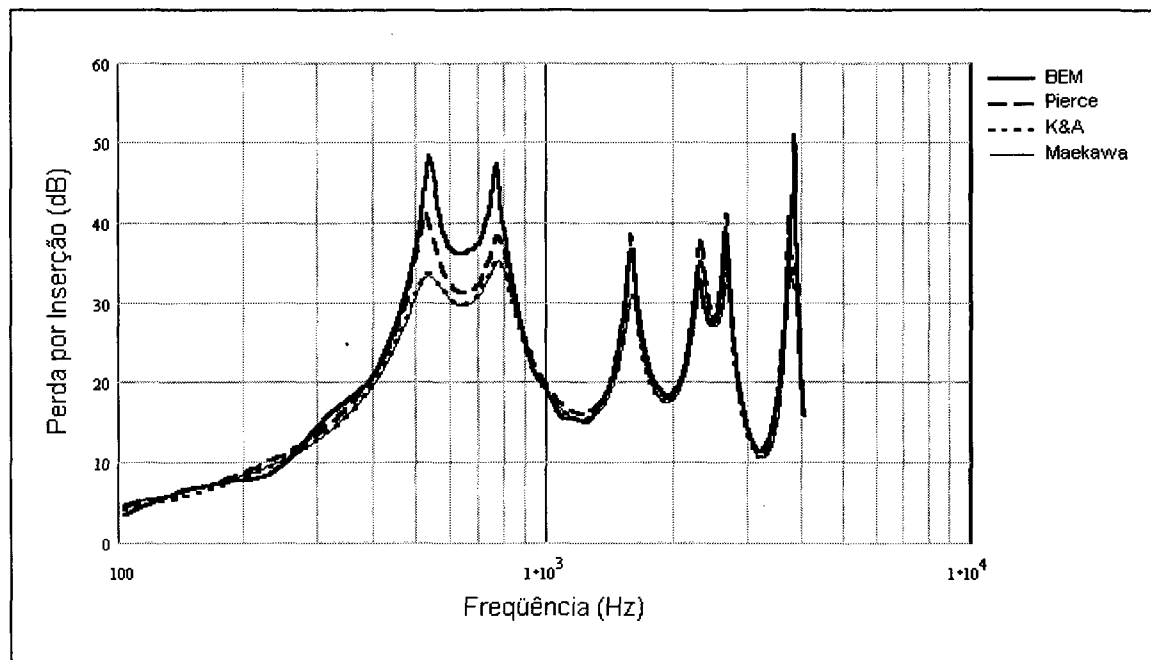


Figura 5.9 – Resposta em frequência da barreira: BEM *versus* formulações analíticas. Receptor localizado a 2,00 m em relação à barreira e com altura de 0,25 m (posição 09). Zona de Sombra.

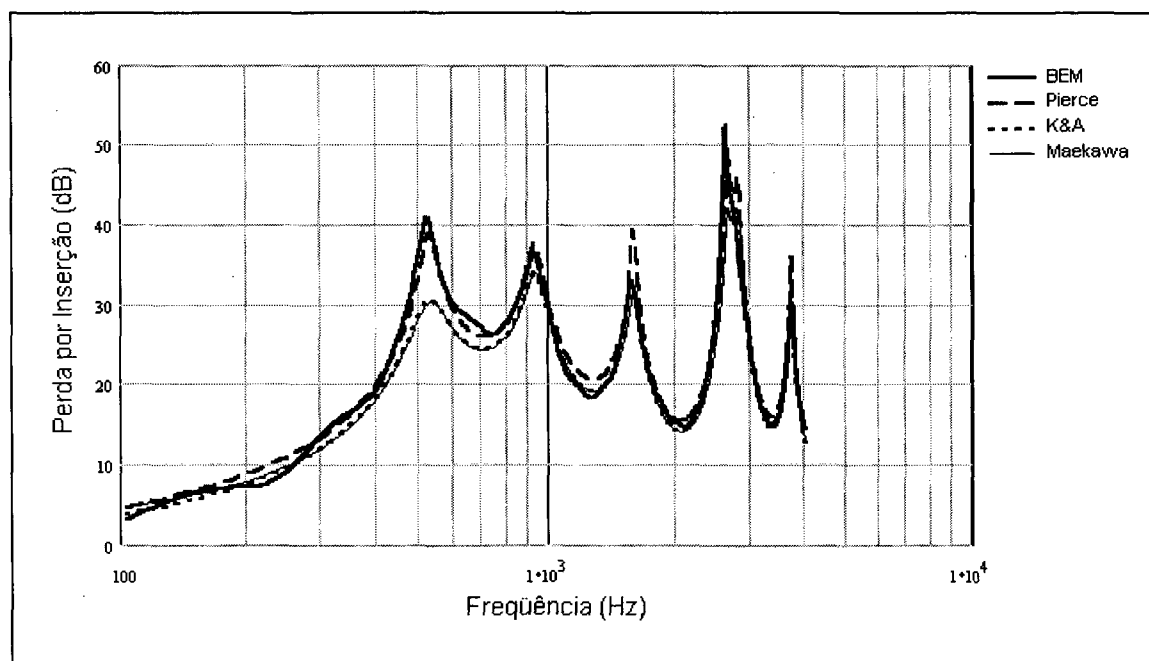


Figura 5.10 – Resposta em frequência da barreira: BEM *versus* formulações analíticas. Receptor localizado a 2,50 m em relação à barreira e com altura de 0,25 m (posição 10). Zona de Sombra.



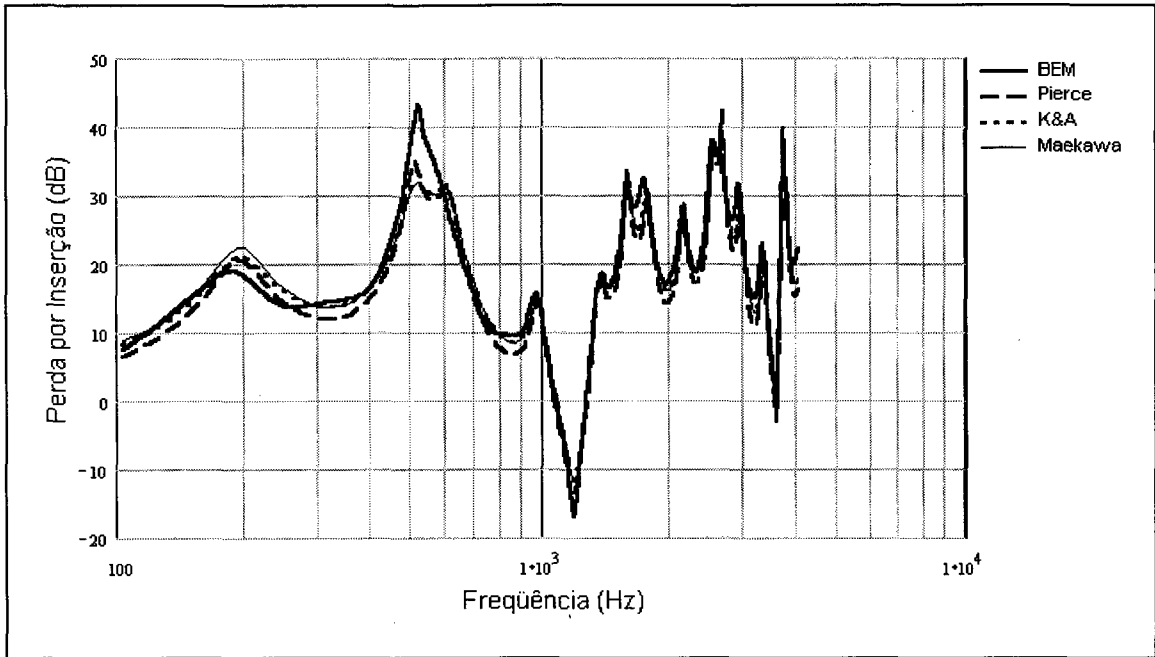


Figura 5.11 – Resposta em frequência da barreira: BEM *versus* formulações analíticas. Receptor localizado a 0,50 m em relação à barreira e com altura de 0,50 m (posição 11). Zona de Sombra.

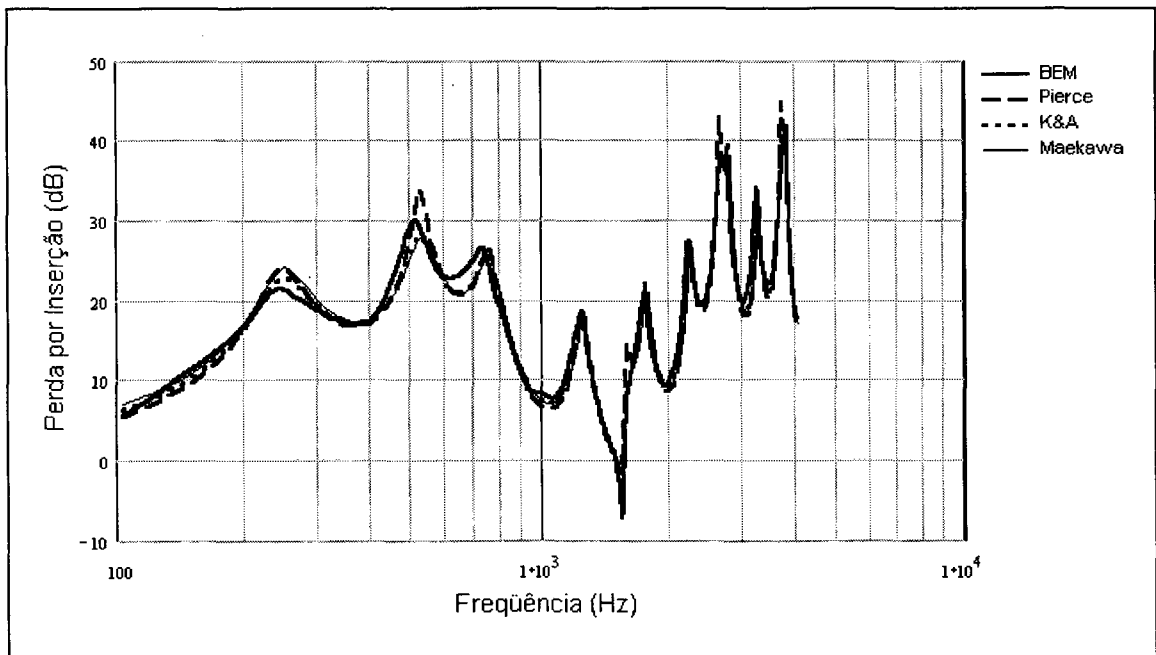


Figura 5.12 – Resposta em frequência da barreira: BEM *versus* formulações analíticas. Receptor localizado a 1,00 m em relação à barreira e com altura de 0,50 m (posição 12). Zona de Sombra.

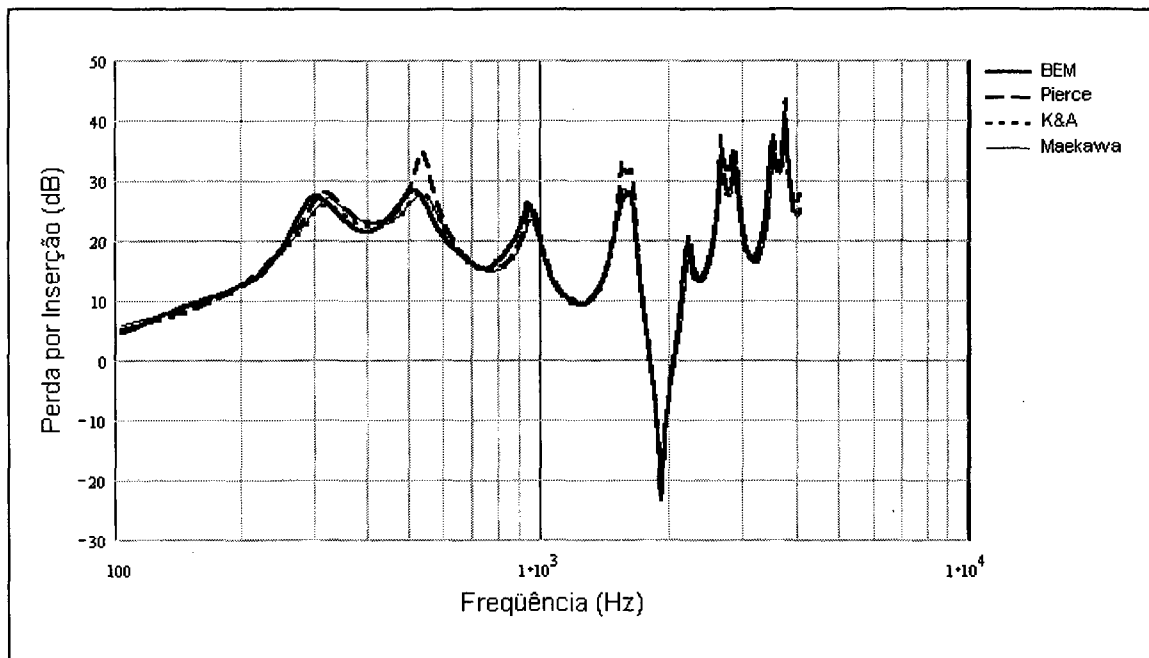


Figura 5.13 – Resposta em frequência da barreira: BEM versus formulações analíticas. Receptor localizado a 1,50 m em relação à barreira e com altura de 0,50 m (posição 13). Zona de Sombra.

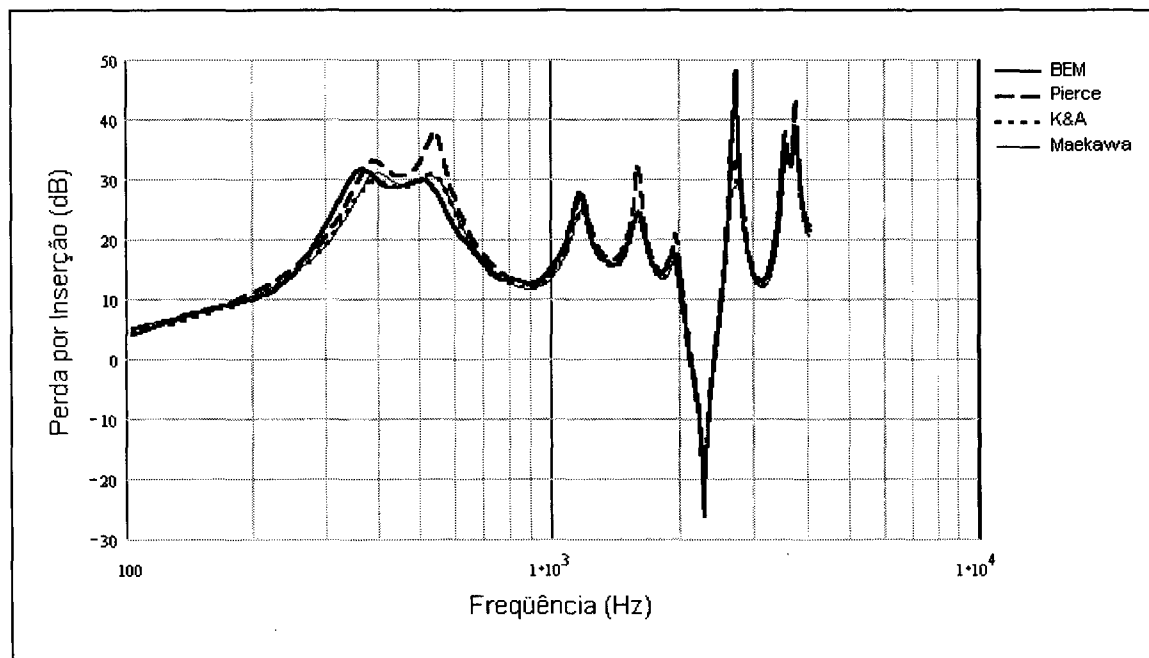


Figura 5.14 – Resposta em frequência da barreira: BEM versus formulações analíticas. Receptor localizado a 2,00 m em relação à barreira e com altura de 0,50 m (posição 14). Zona de Sombra.

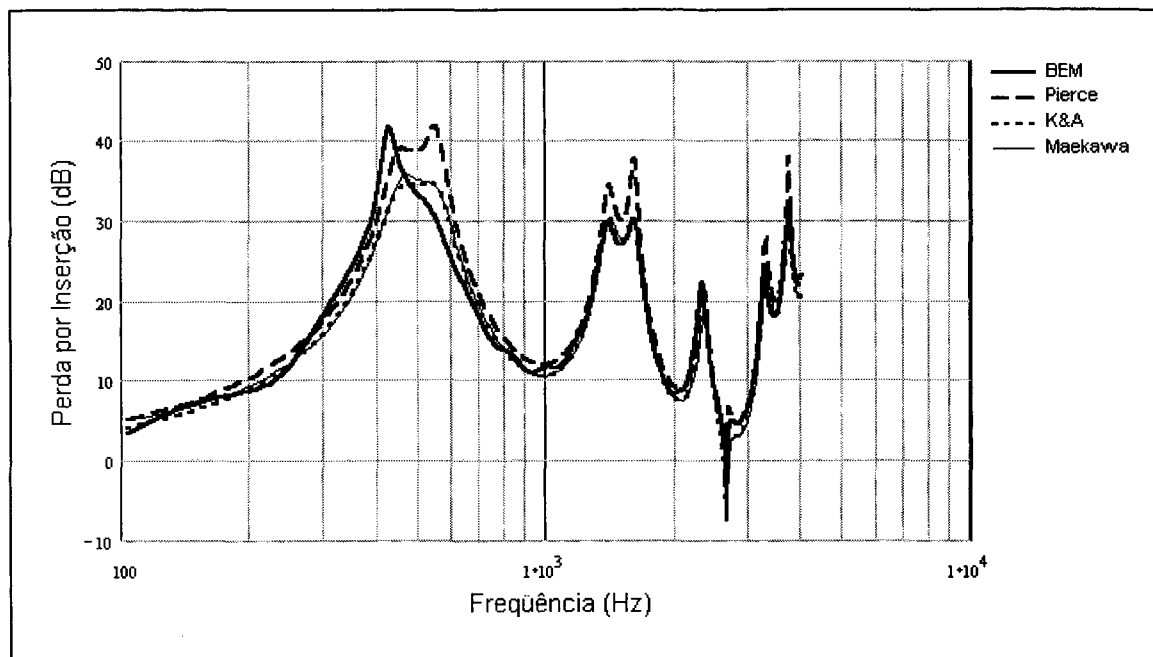


Figura 5.15 – Resposta em freqüência da barreira: BEM *versus* formulações analíticas. Receptor localizado a 2,50 m em relação à barreira e com altura de 0,50 m (posição 15). Zona de Sombra.

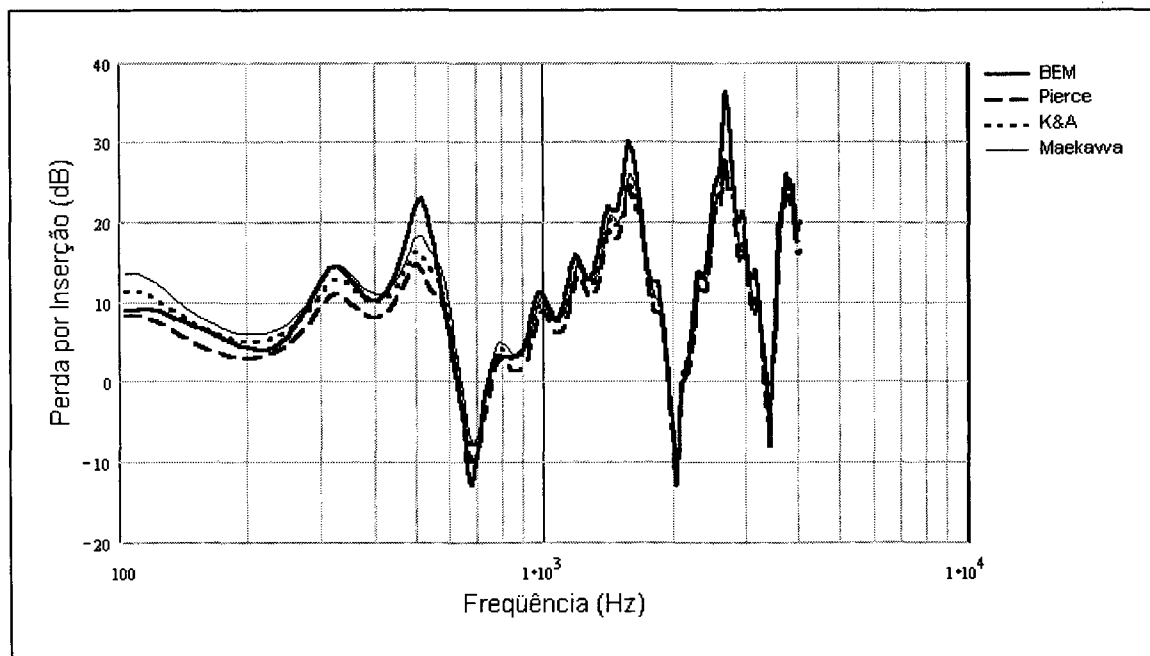


Figura 5.16 – Resposta em freqüência da barreira: BEM *versus* formulações analíticas. Receptor localizado a 0,50 m em relação à barreira e com altura de 1,00 m (posição 16). Zona de Sombra.

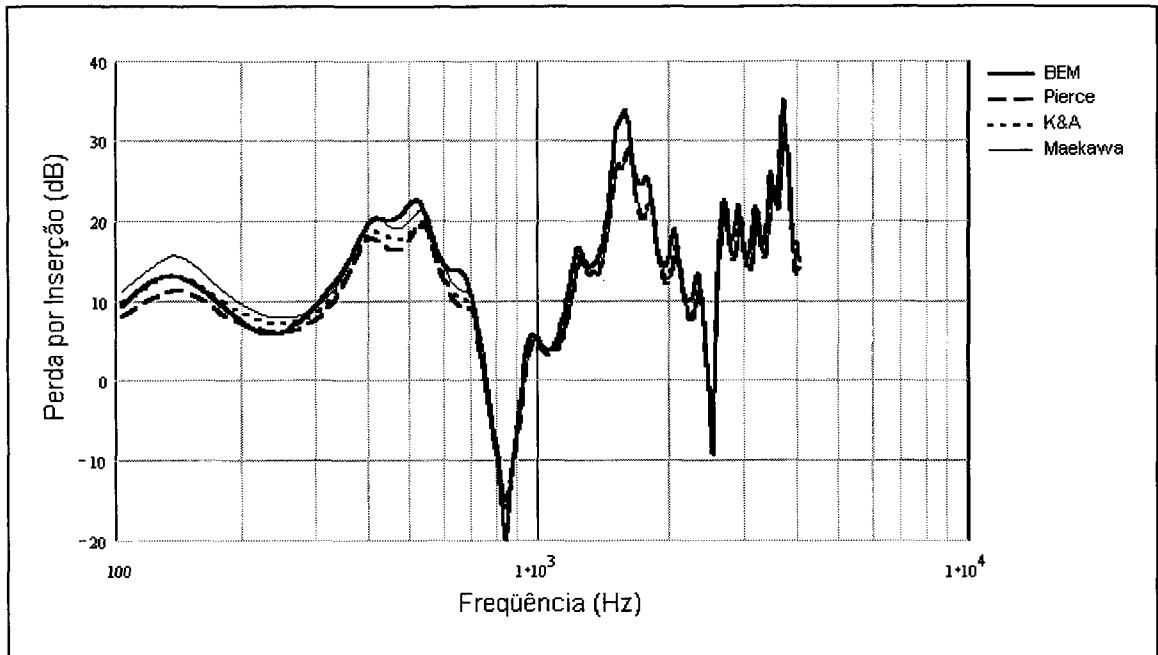


Figura 5.17 – Resposta em frequência da barreira: BEM *versus* formulações analíticas. Receptor localizado a 1,00 m em relação à barreira e com altura de 1,00 m (posição 17). Zona de Sombra.

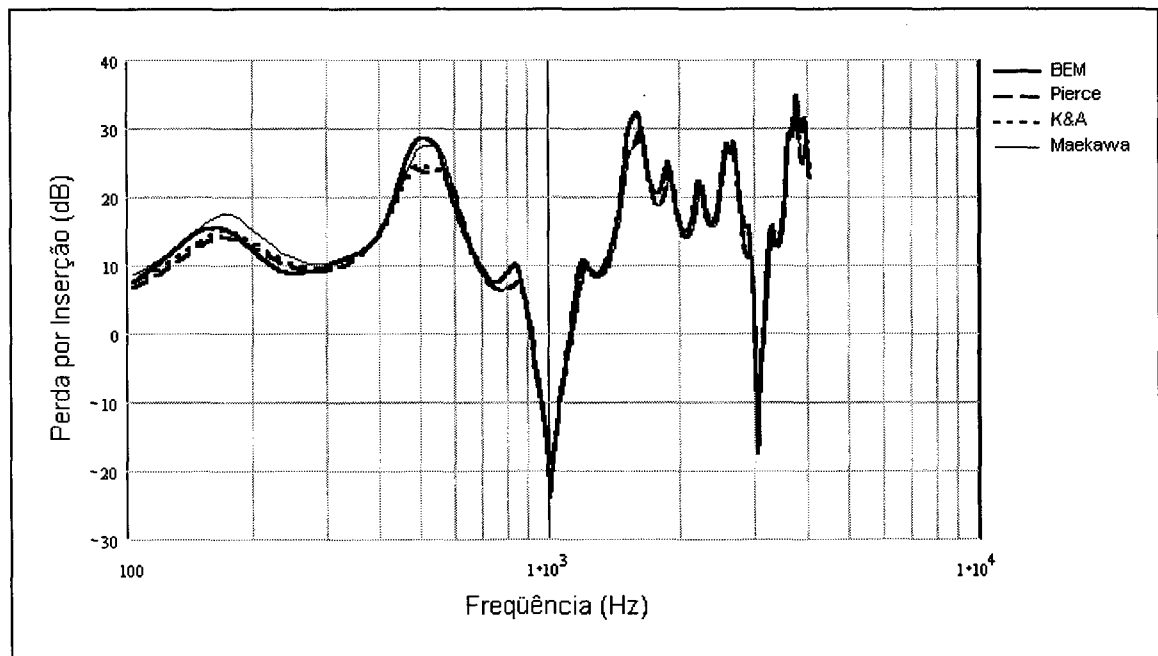


Figura 5.18 – Resposta em frequência da barreira: BEM *versus* formulações analíticas. Receptor localizado a 1,50 m em relação à barreira e com altura de 1,00 m (posição 18). Zona de Sombra.

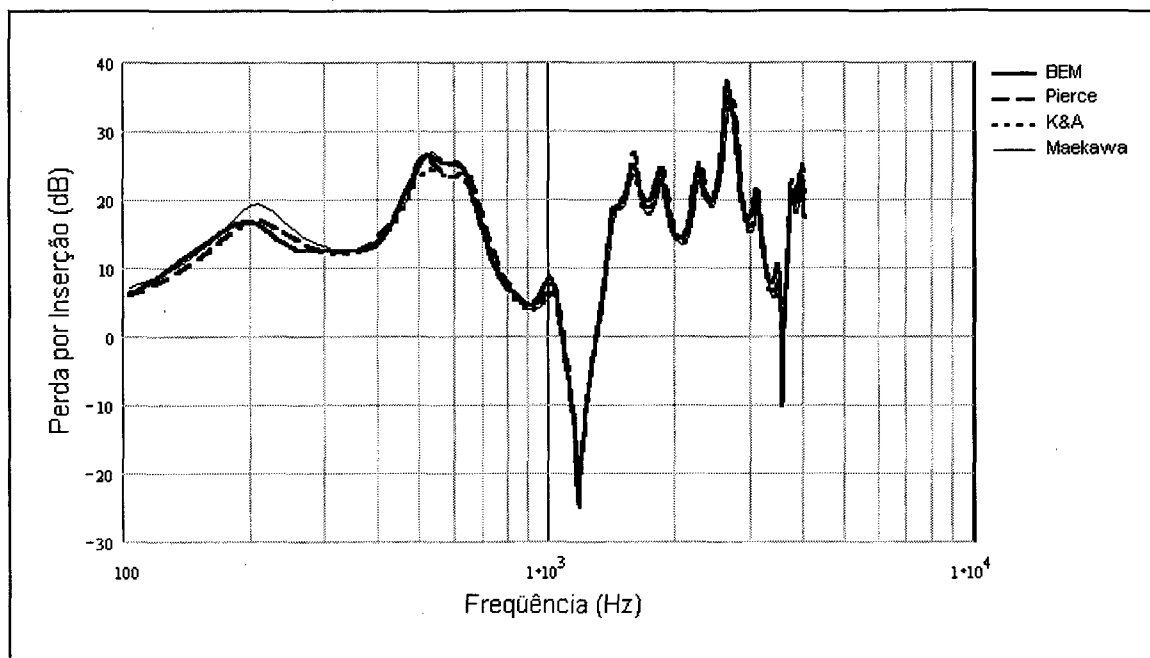


Figura 5.19 – Resposta em frequência da barreira: BEM *versus* formulações analíticas. Receptor localizado a 2,00 m em relação à barreira e com altura de 1,00 m (posição 19). Zona de Sombra.

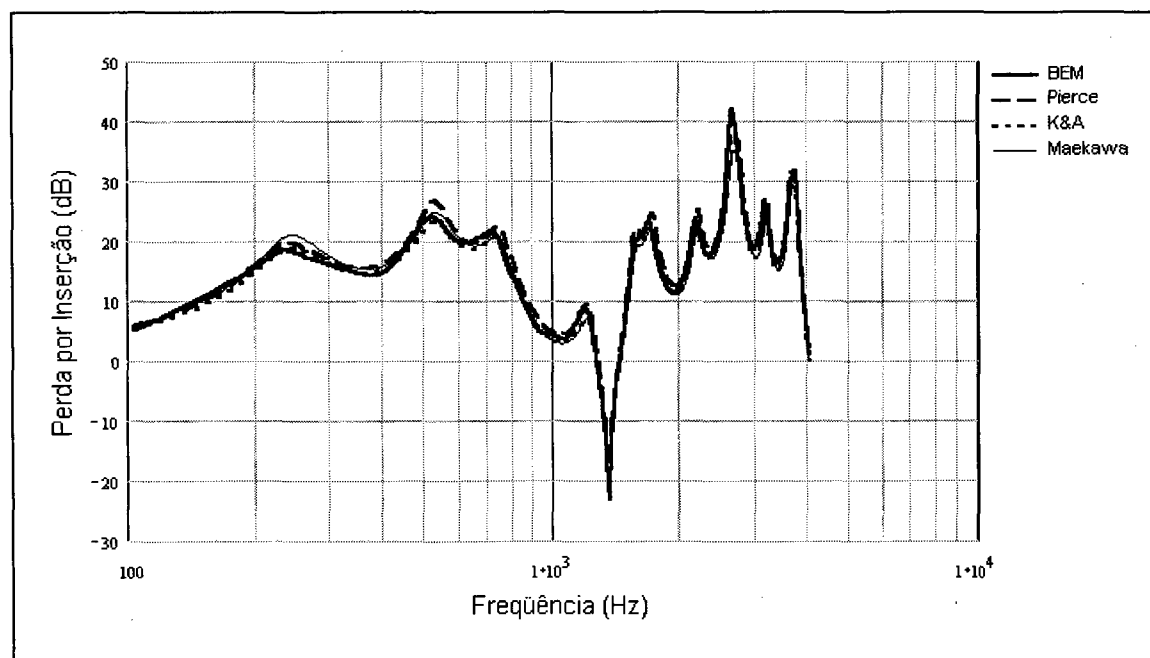


Figura 5.20 – Resposta em frequência da barreira: BEM *versus* formulações analíticas. Receptor localizado a 2,50 m em relação à barreira e com altura de 1,00 m (posição 20). Zona de Sombra.

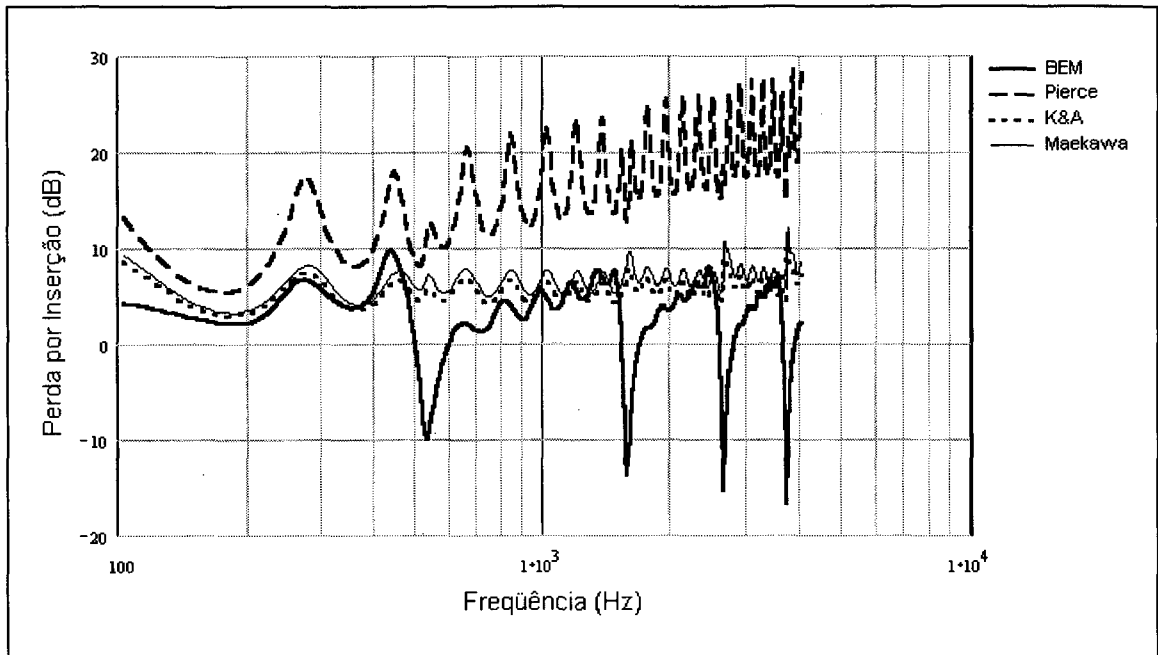


Figura 5.21 – Resposta em frequência da barreira: BEM *versus* formulações analíticas. Receptor localizado a 0,50 m em relação à barreira e com altura de 1,50 m (posição 21). Zona de Brilho.

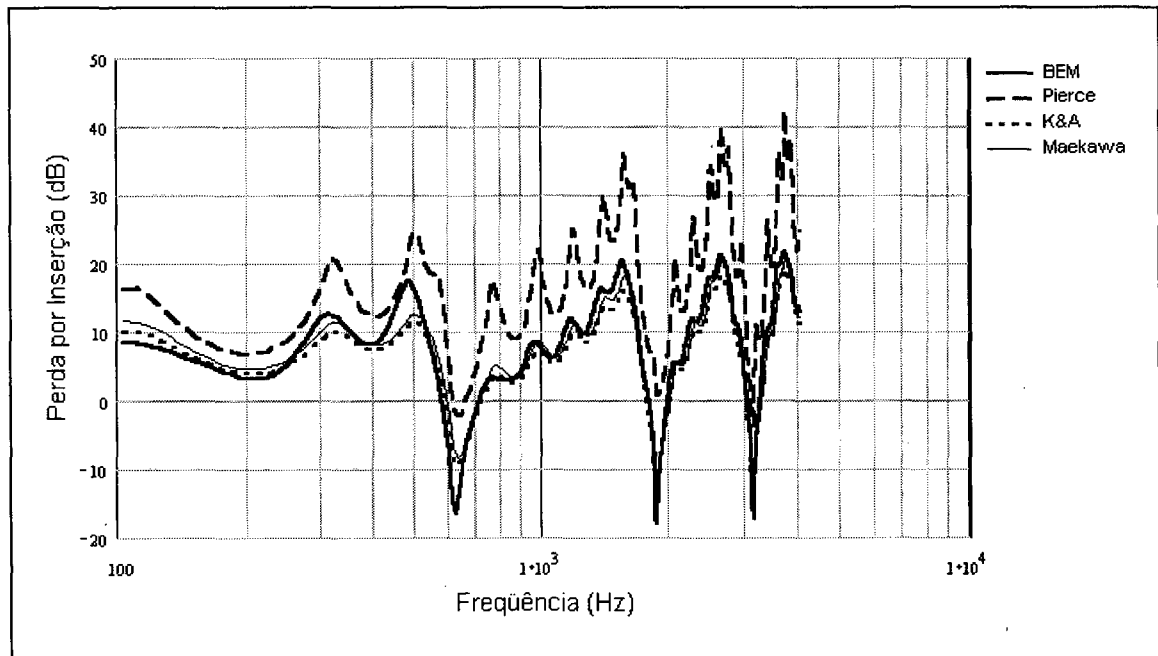


Figura 5.22 – Resposta em frequência da barreira: BEM *versus* formulações analíticas. Receptor localizado a 1,00 m em relação à barreira e com altura de 1,50 m (posição 22). Zona de Transição.

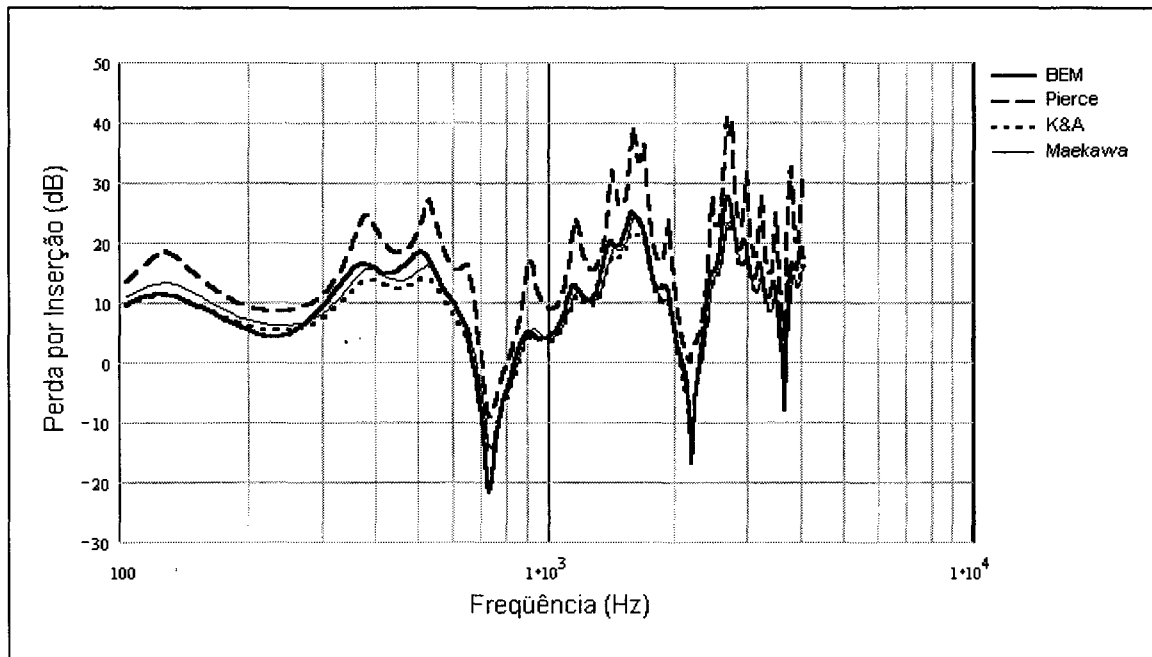


Figura 5.23 – Resposta em frequência da barreira: BEM *versus* formulações analíticas. Receptor localizado a 1,50 m em relação à barreira e com altura de 1,50 m (posição 23). Zona de Transição.

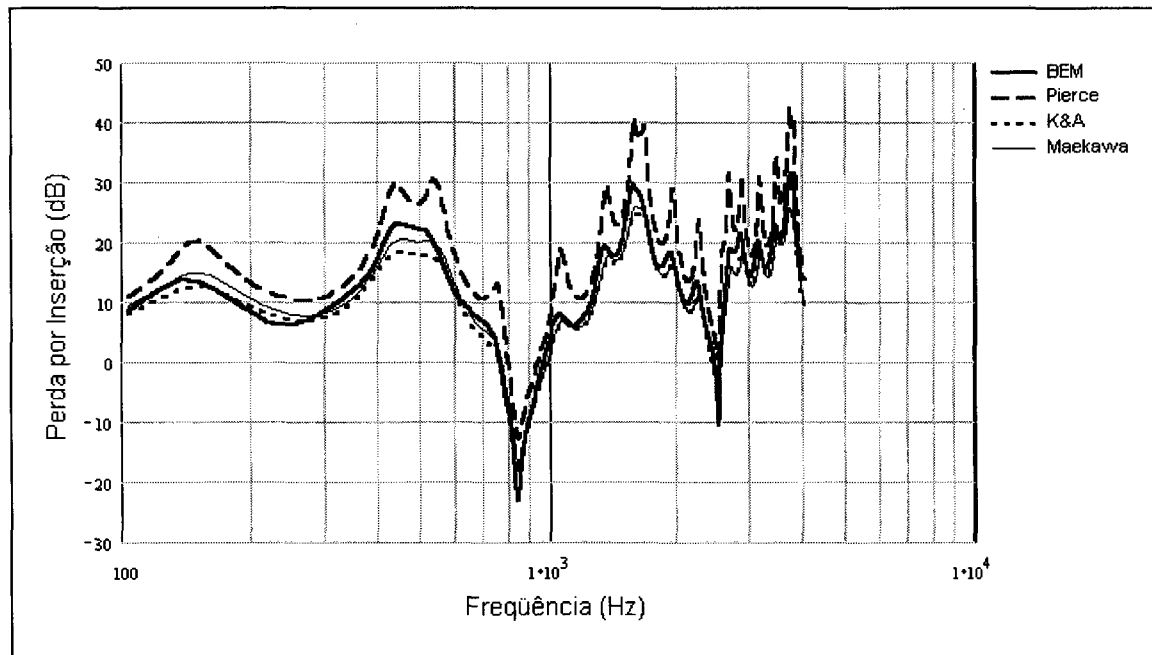


Figura 5.24 – Resposta em frequência da barreira: BEM *versus* formulações analíticas. Receptor localizado a 2,00 m em relação à barreira e com altura de 1,50 m (posição 24). Zona de Transição.

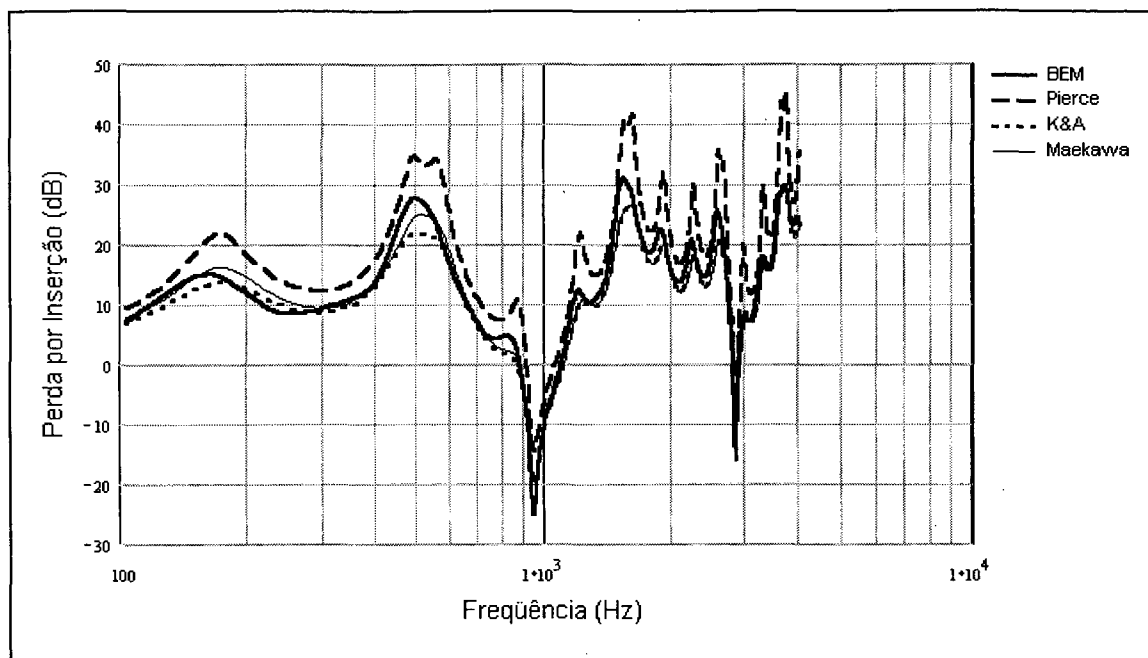


Figura 5.25 – Resposta em frequência da barreira: BEM *versus* formulações analíticas. Receptor localizado a 2,50 m em relação à barreira e com altura de 1,50 m (posição 25). Zona de Transição.

Avaliando-se as técnicas analíticas de cálculo da predição da atenuação produzida pela barreira do modelo, a partir da análise da Figura 5.26, constata-se que na maioria das curvas os resultados provenientes do uso dos algoritmos de Kurze & Anderson e de Maekawa mostram boa concordância com as curvas da simulação numérica. O método devido a Pierce, contudo, também mostra resultados bastante coerentes com os dados da simulação pelo BEM, exceto nas posições de recepção 21 até 25, onde a diferença média cresce bastante em relação às observadas para as outras duas formulações. A completa divergência da curva correspondente à posição 21 é devida à não validade do método de Pierce na predição de atenuação na zona de brilho. As demais posições deste grupo, localizadas próximas à fronteira que divide a zona de sombra da zona de brilho, também são problemáticas.

As Figuras 5.27, 5.28 e 5.29 mostram as diferenças máximas, médias e mínimas dos resultados obtidos através das formulações analíticas de Pierce, Kurze & Anderson e Maekawa em relação aos obtidos pela simulação numérica por BEM, respectivamente, e foram plotadas com mesma escala para facilitar a identificação da ordem de grandeza das diferenças.

Pode-se afirmar, assim, que para o modelo de barreira deste trabalho, os métodos analíticos de predição (com exceção feita para a teoria de Pierce, nos pontos situados na



zona de brilho e zona de transição) mostraram-se à altura do método de elementos de contorno, tido como um dos mais precisos até o momento.

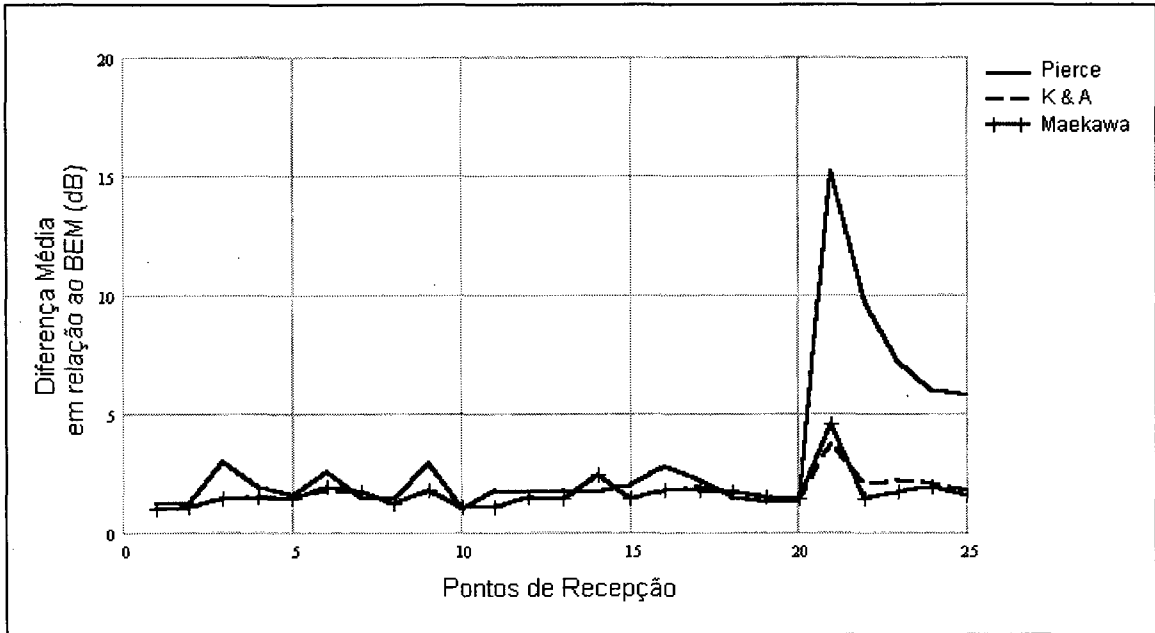


Figura 5.26 – Diferenças médias entre os resultados de perda por inserção obtidos pelas formulações analíticas e os obtidos pelo BEM.

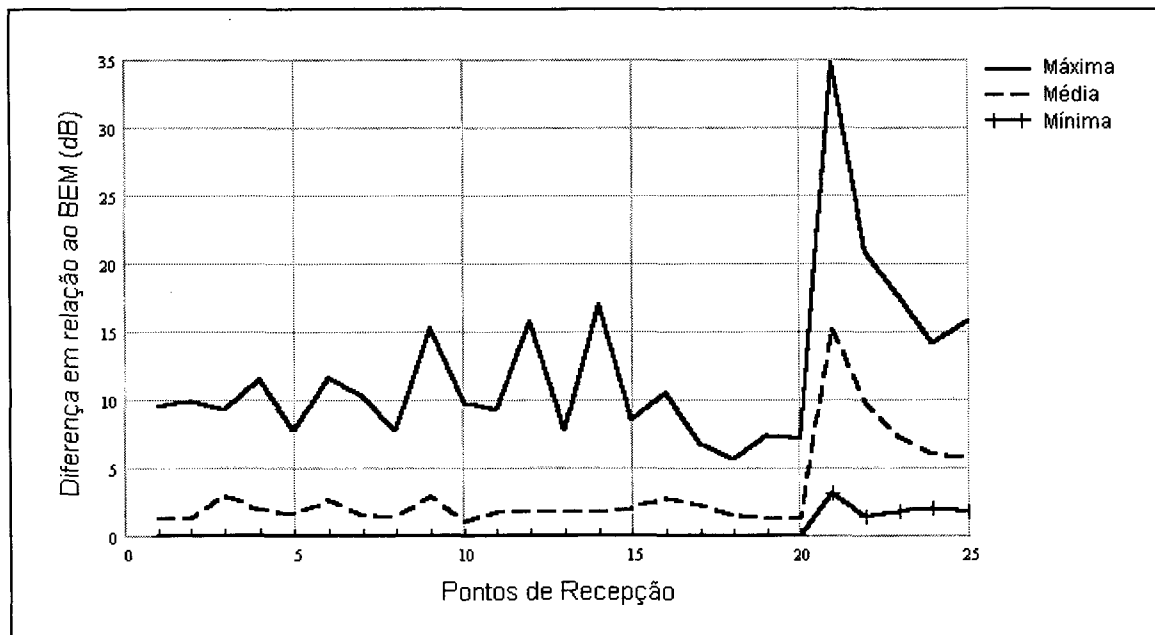


Figura 5.27 – Diferenças entre a formulação analítica de Pierce em relação ao BEM para os 25 pontos de recepção anteriormente definidos.

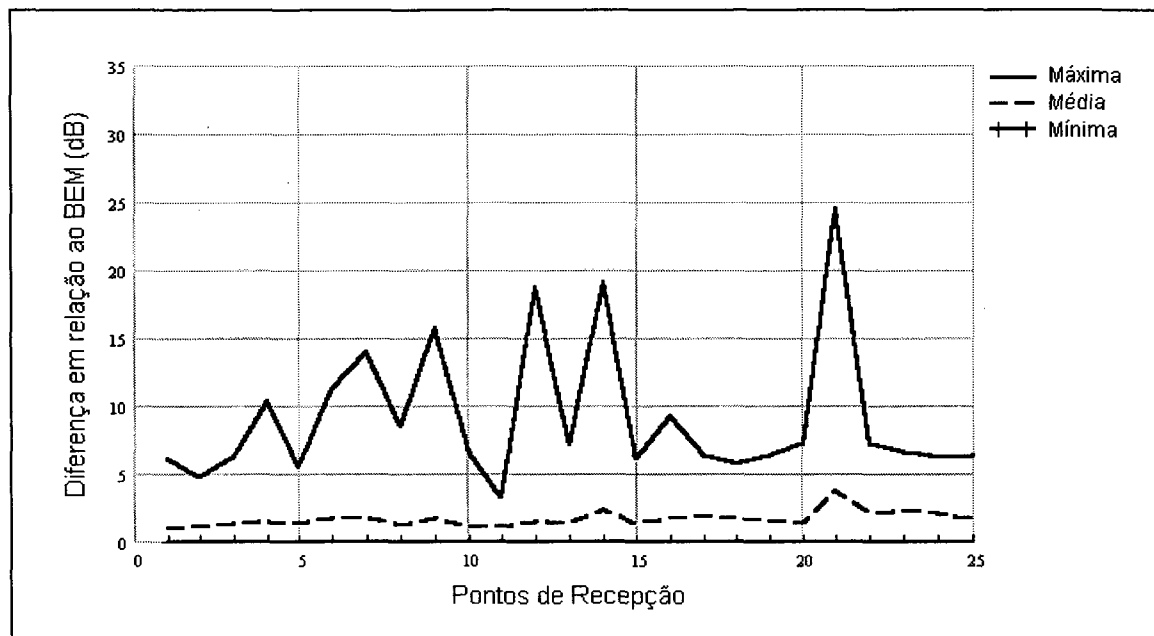


Figura 5.28 – Diferenças entre a formulação analítica de Kurze & Anderson em relação ao BEM para os 25 pontos de recepção anteriormente definidos.

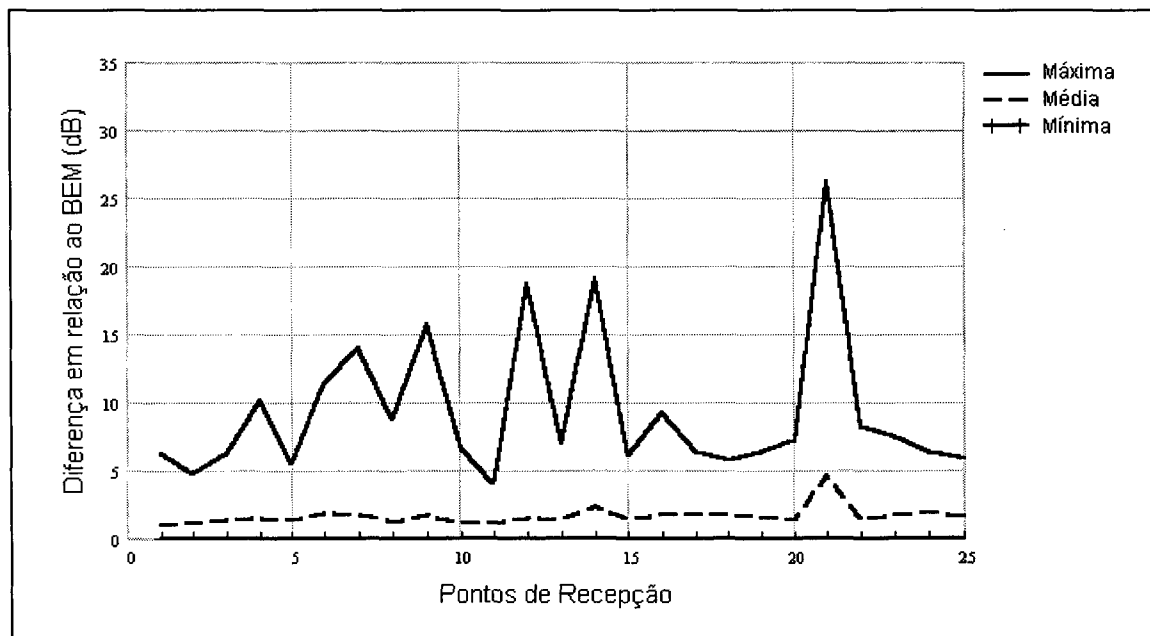


Figura 5.29 – Diferenças entre a formulação analítica de Maekawa em relação ao BEM para os 25 pontos de recepção anteriormente definidos.

Além disso, existem vantagens significativas para as formulações baseadas na teoria geométrica da difração (cálculos analíticos) em relação aos métodos integrais (simulação numérica pelo BEM), tais como a simplicidade e o pequeno número de cálculos envolvidos e, principalmente, a rapidez na solução dos problemas. Enquanto que as formulações de Pierce, Kurze & Anderson e Maekawa levaram poucos minutos para avaliar todos os pontos e frequências envolvidos neste trabalho, o BEM leva cerca de 7,5 horas para fazer a mesma avaliação.

Não se quer, de forma alguma, relegar a segundo plano o uso do método de elementos de contorno como método de predição de atenuação, mas mostrar que ainda há espaço para métodos simplificados de predição e que a pesquisa em torno deles deve ser intensificada para abranger um número maior de situações em que possam ser aplicados.

Contudo, resta ainda a comparação destas curvas com as das medições experimentais antes de se ter maior confiança quanto à validade dos resultados preditos. Esta comparação é realizada na Seção 5.2.

## 5.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS

A análise das curvas das simulações numéricas e das medições foi feita para cada uma das posições de recepção.

Uma vez que os resultados dos métodos teóricos são calculados para frequências discretas, deduziu-se ser mais coerente utilizar na análise conjunta dos resultados das medições, simulações numéricas e cálculos analíticos, as curvas correspondentes às medições com resolução mais estreita em frequência, que correspondem, para o caso presente, à largura de banda de 8 Hz.

Para as frequências entre 100 Hz e 200 Hz, observa-se nas Figuras 5.30 a 5.54, um afastamento entre as curvas experimentais e as teóricas. Este desvio nos resultados já foi discutido na Seção 4.2.3, que trata dos resultados experimentais, e está ligado à banda de frequências de emissão da fonte sonora e à frequência de corte da câmara semi-aneóica.

A melhor concordância entre os resultados das medições e dos métodos teóricos é observada na faixa de frequências entre 200 Hz e 1,5 kHz para a maioria das curvas. Algumas curvas apresentam boa concordância em toda a faixa de frequências acima de 200 Hz e algumas apenas em frequências mais altas.

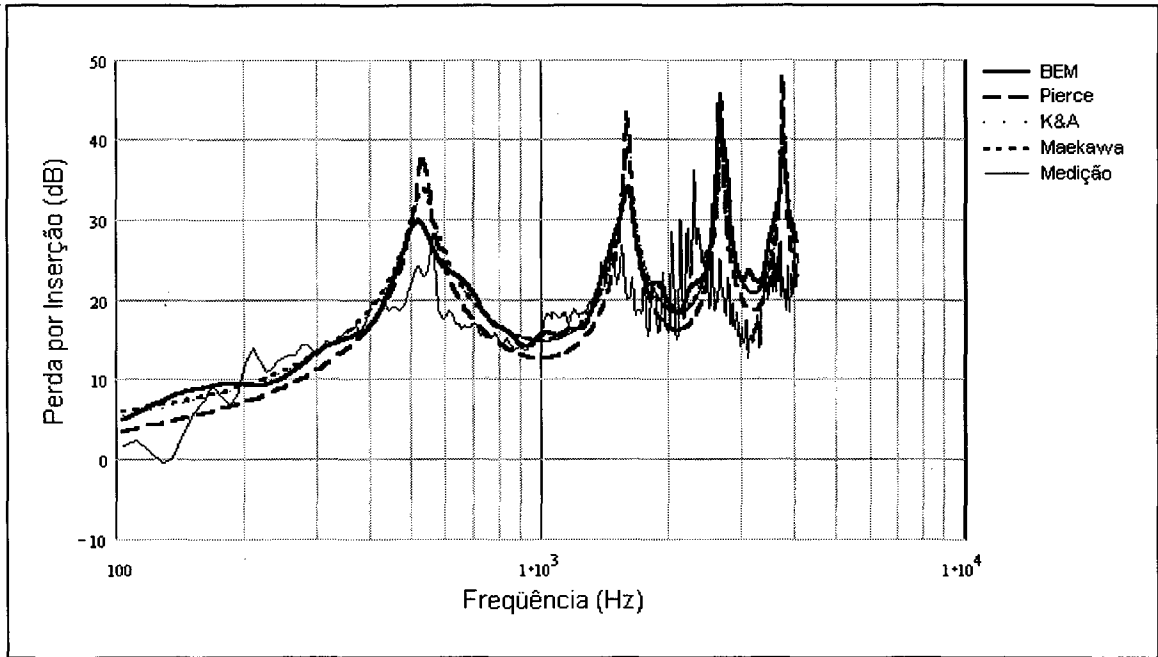


Figura 5.30 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 0,50 m em relação à barreira e com altura de 0,01 m (posição 01). Zona de Sombra.

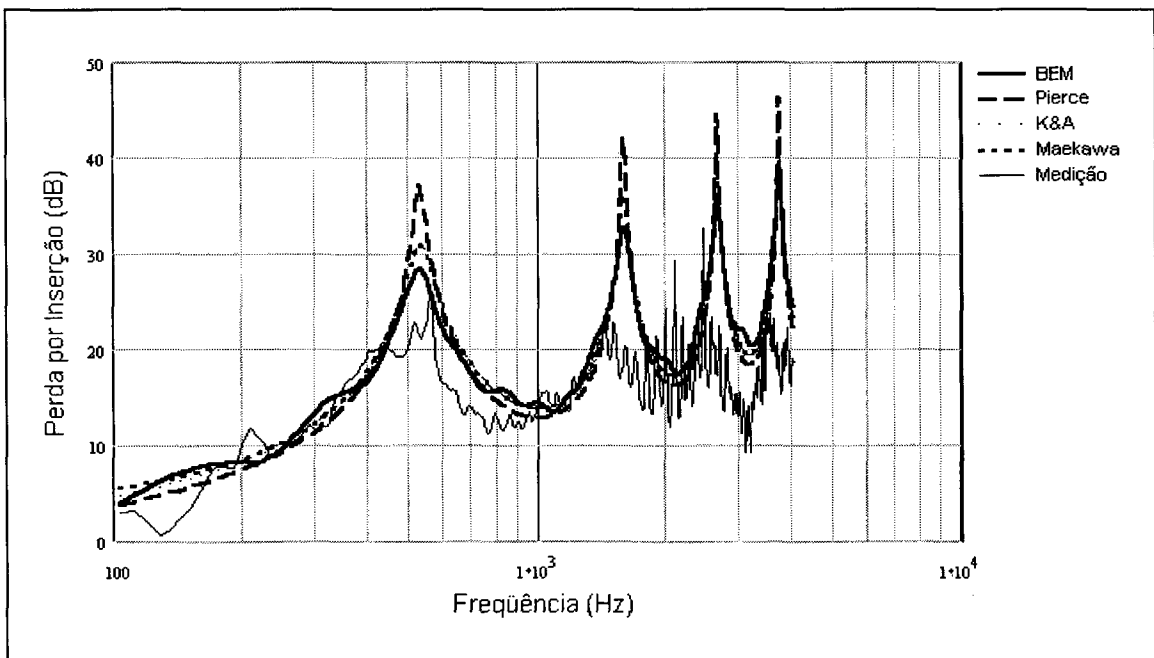


Figura 5.31 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 1,00 m em relação à barreira e com altura de 0,01 m (posição 02). Zona de Sombra.

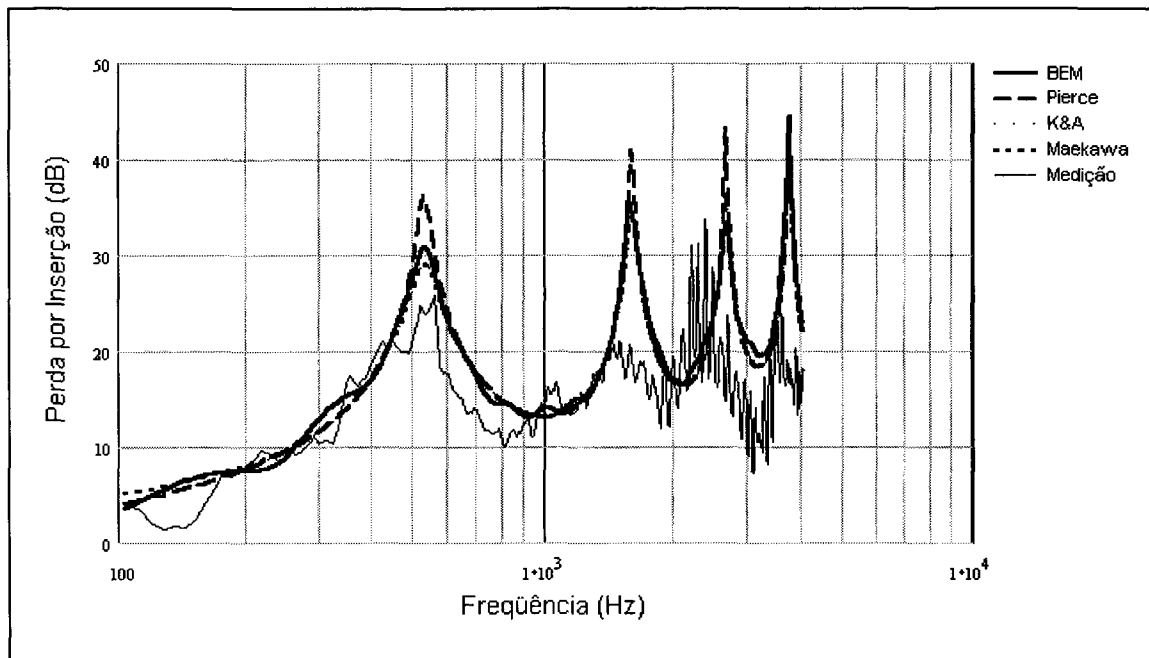


Figura 5.32 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 1,50 m em relação à barreira e com altura de 0,01 m (posição 03). Zona de Sombra.

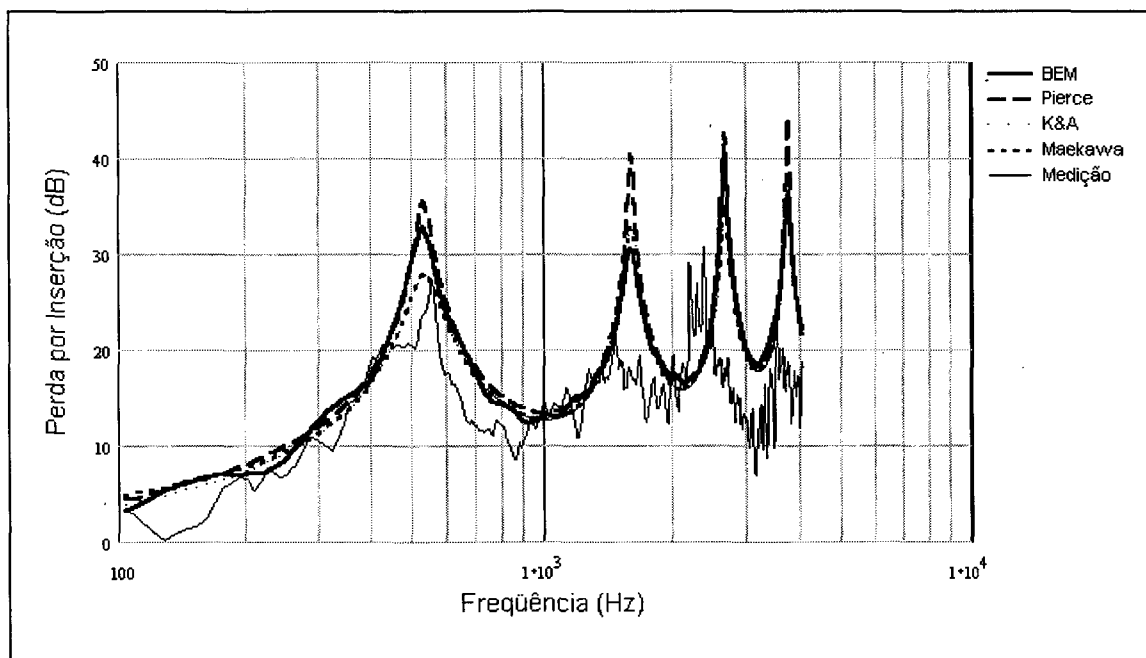


Figura 5.33 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 2,00 m em relação à barreira e com altura de 0,01 m (posição 04). Zona de Sombra.

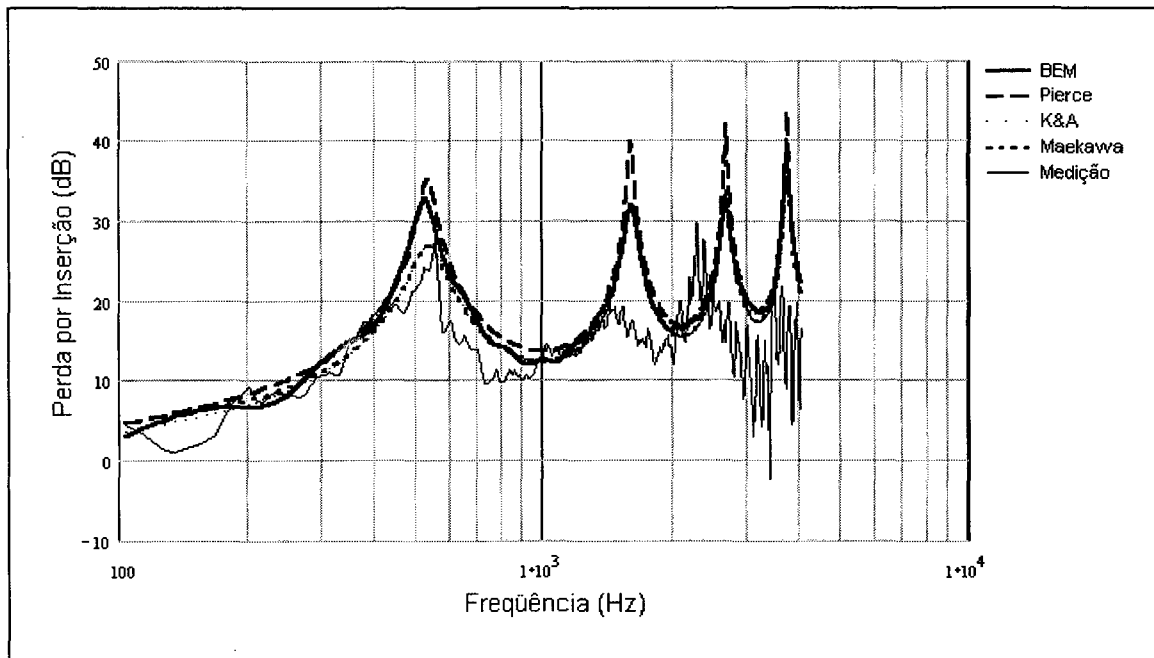


Figura 5.34 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 2,50 m em relação à barreira e com altura de 0,01 m (posição 05). Zona de Sombra.

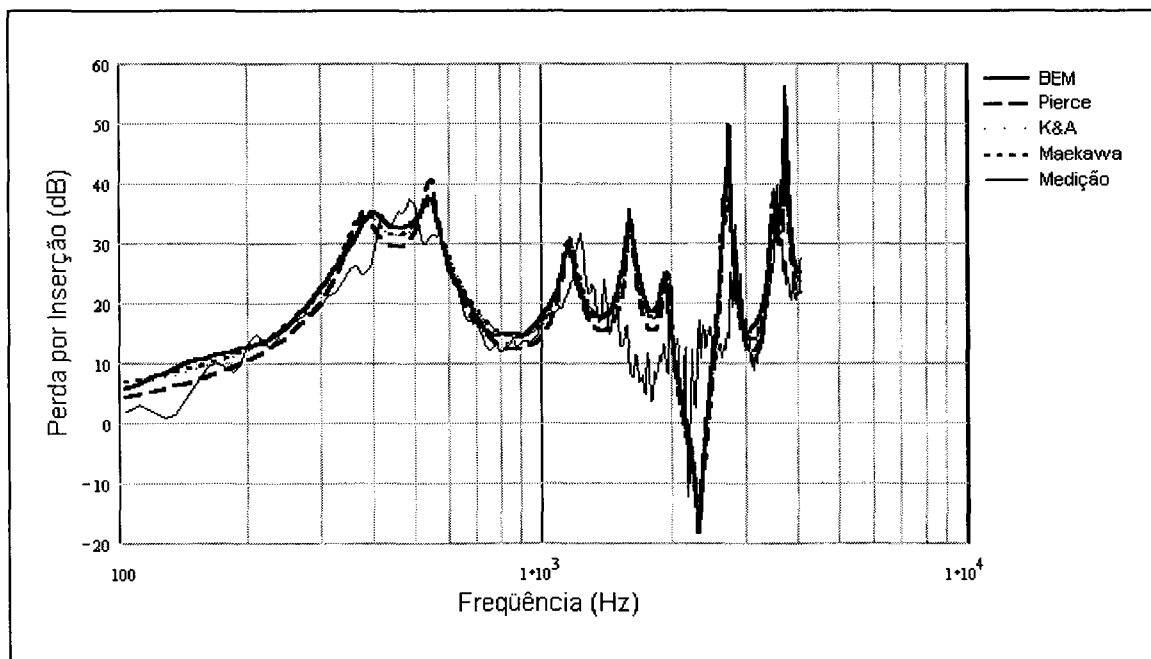


Figura 5.35 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 0,50 m em relação à barreira e com altura de 0,25 m (posição 06). Zona de Sombra.

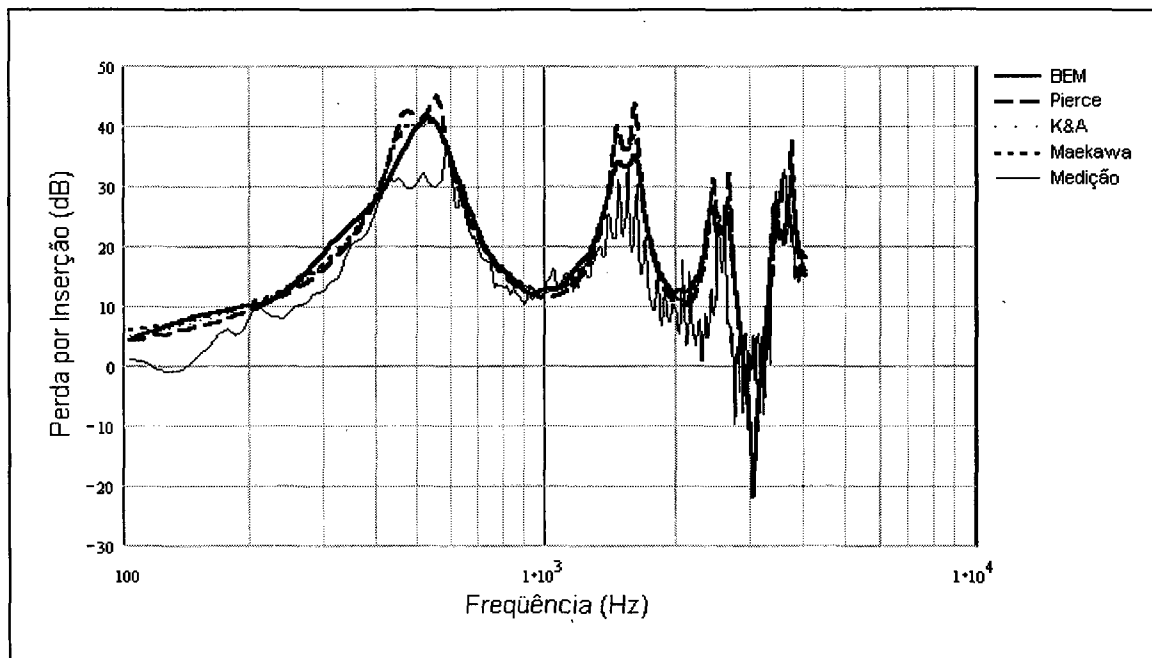


Figura 5.36 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 1,00 m em relação à barreira e com altura de 0,25 m (posição 07). Zona de Sombra.

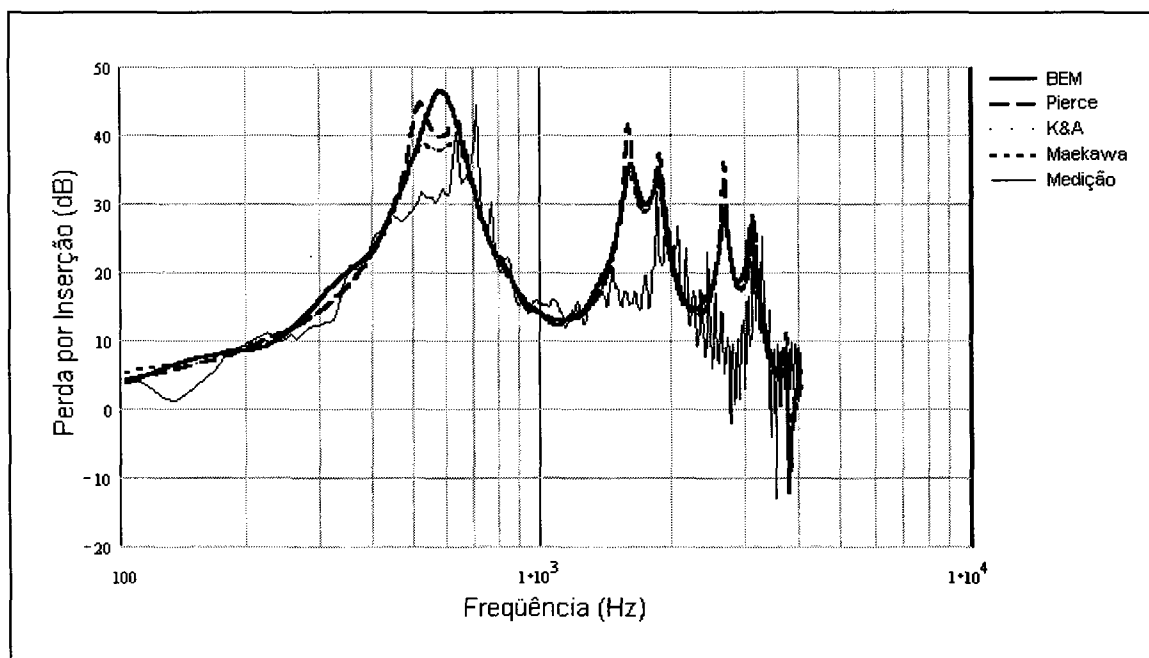


Figura 5.37 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 1,50 m em relação à barreira e com altura de 0,25 m (posição 08). Zona de Sombra.

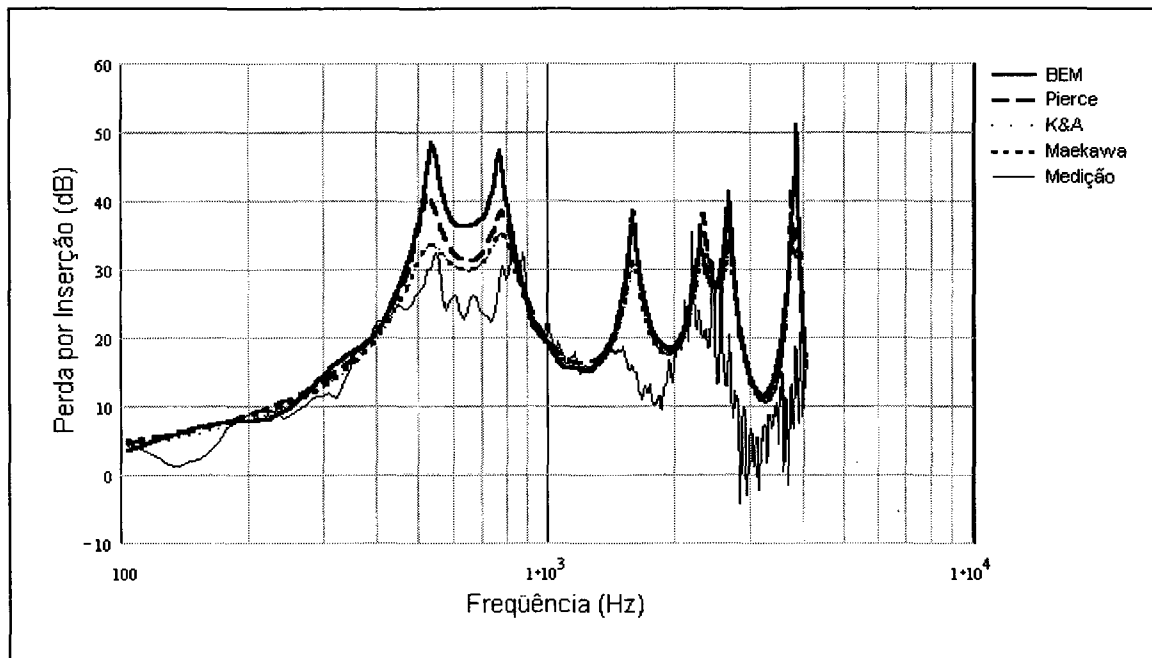


Figura 5.38 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 2,00 m em relação à barreira e com altura de 0,25 m (posição 09). Zona de Sombra.

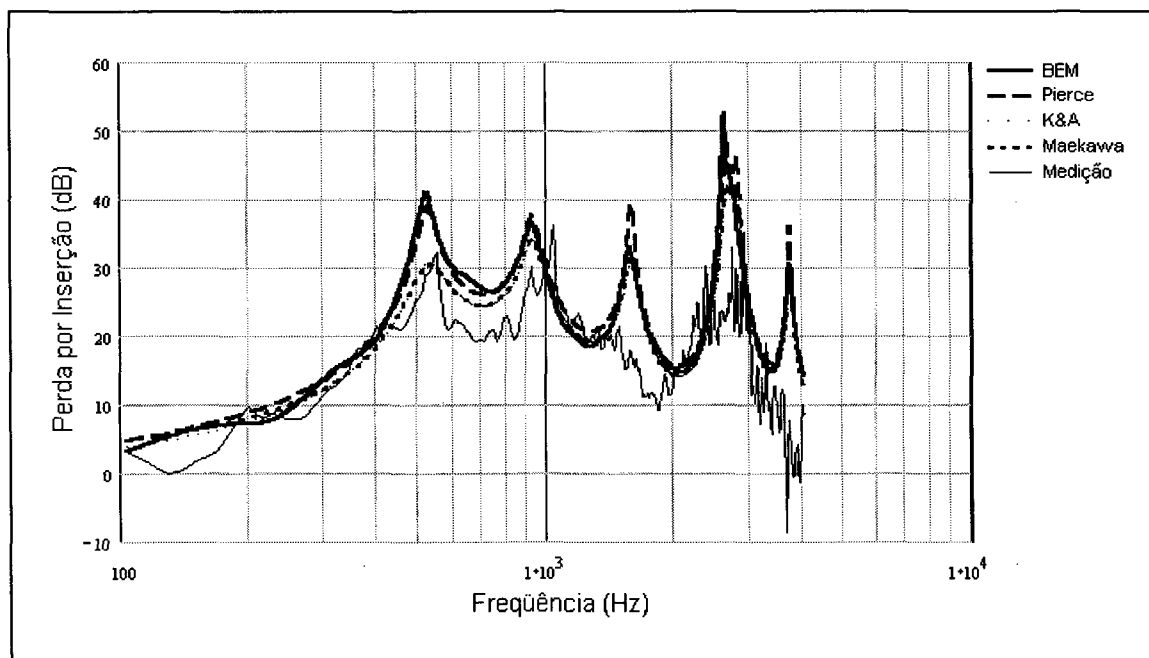


Figura 5.39 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 2,50 m em relação à barreira e com altura de 0,25 m (posição 10). Zona de Sombra.



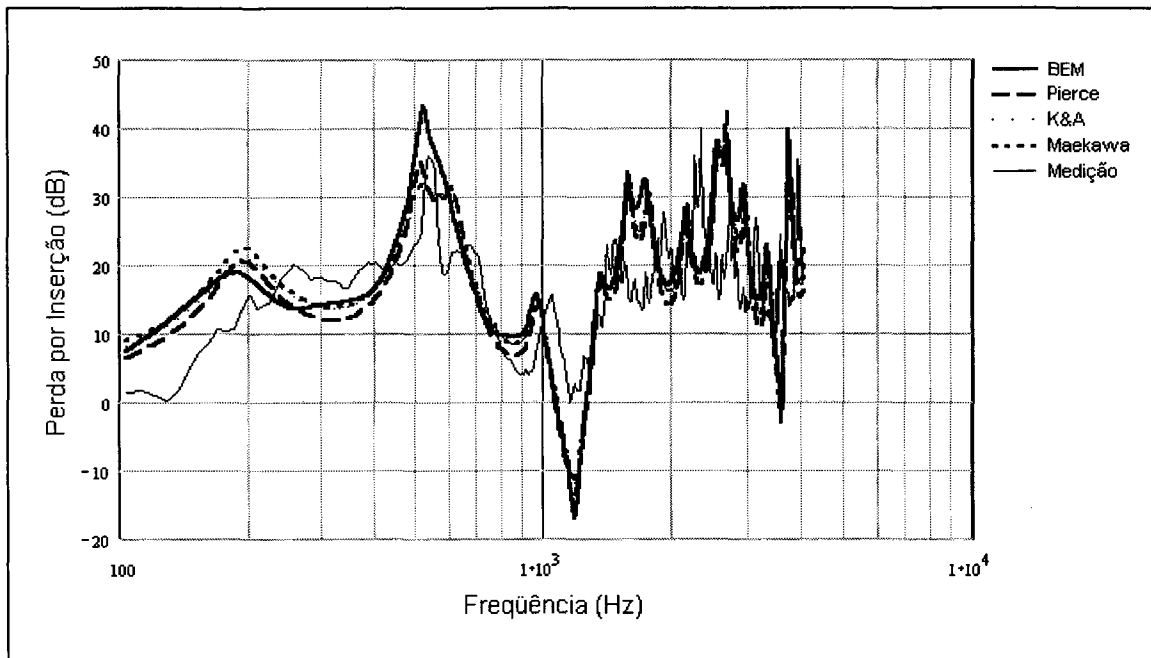


Figura 5.40 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 0,50 m em relação à barreira e com altura de 0,50 m (posição 11). Zona de Sombra.

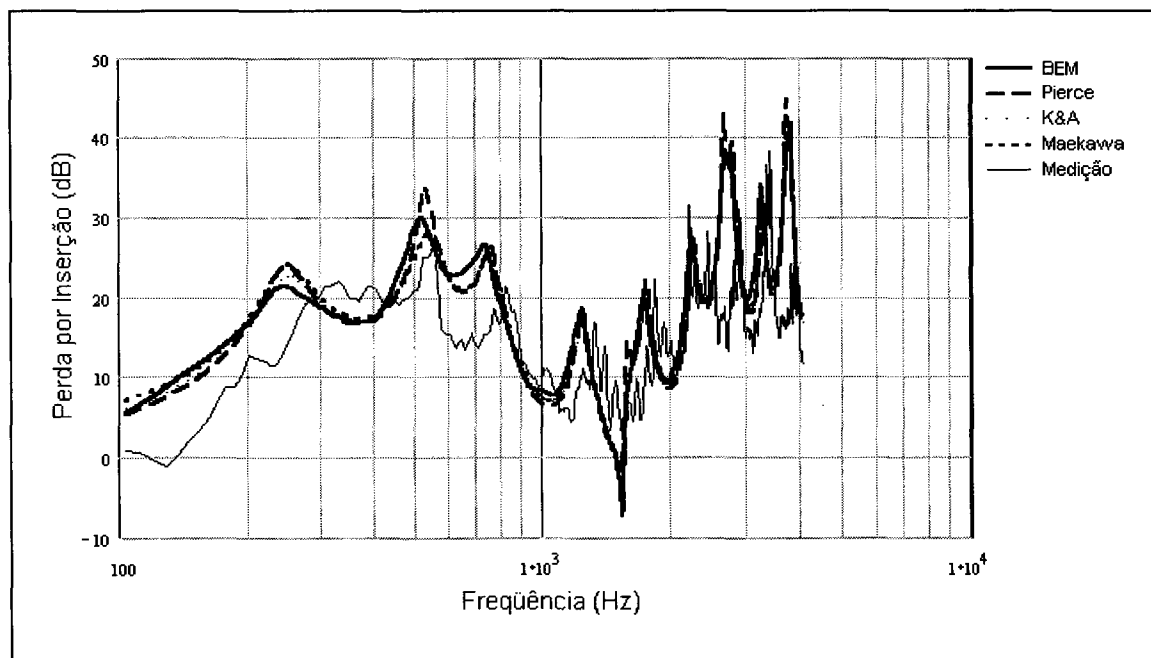


Figura 5.41 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 1,00 m em relação à barreira e com altura de 0,50 m (posição 12). Zona de Sombra.

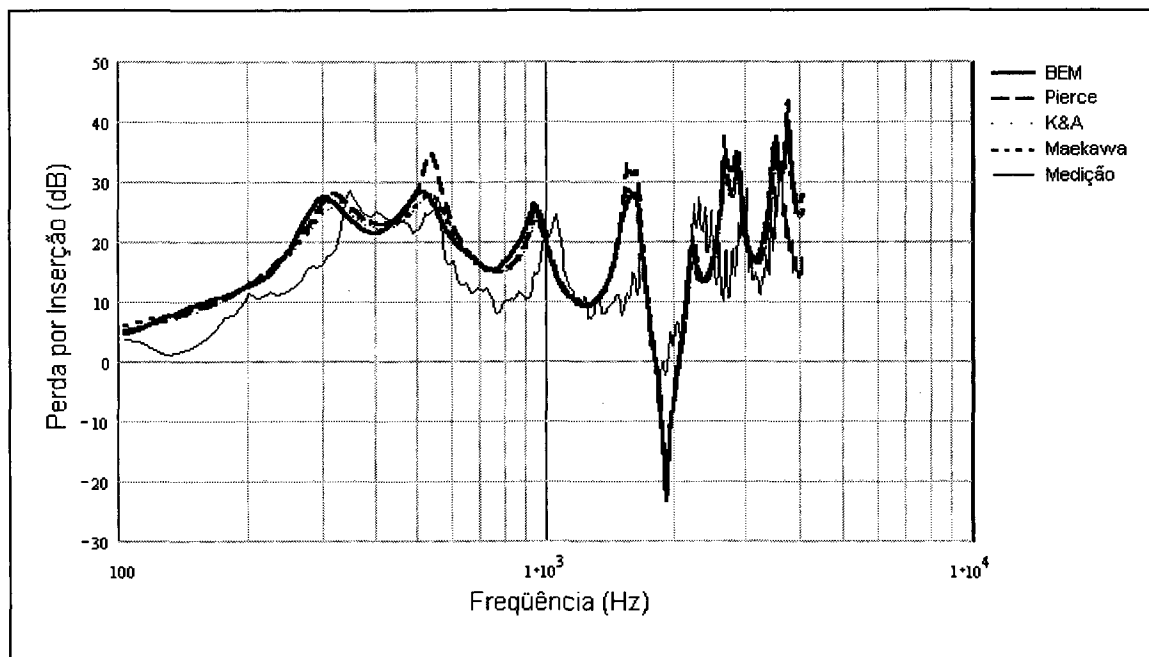


Figura 5.42 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 1,50 m em relação à barreira e com altura de 0,50 m (posição 13). Zona de Sombra.

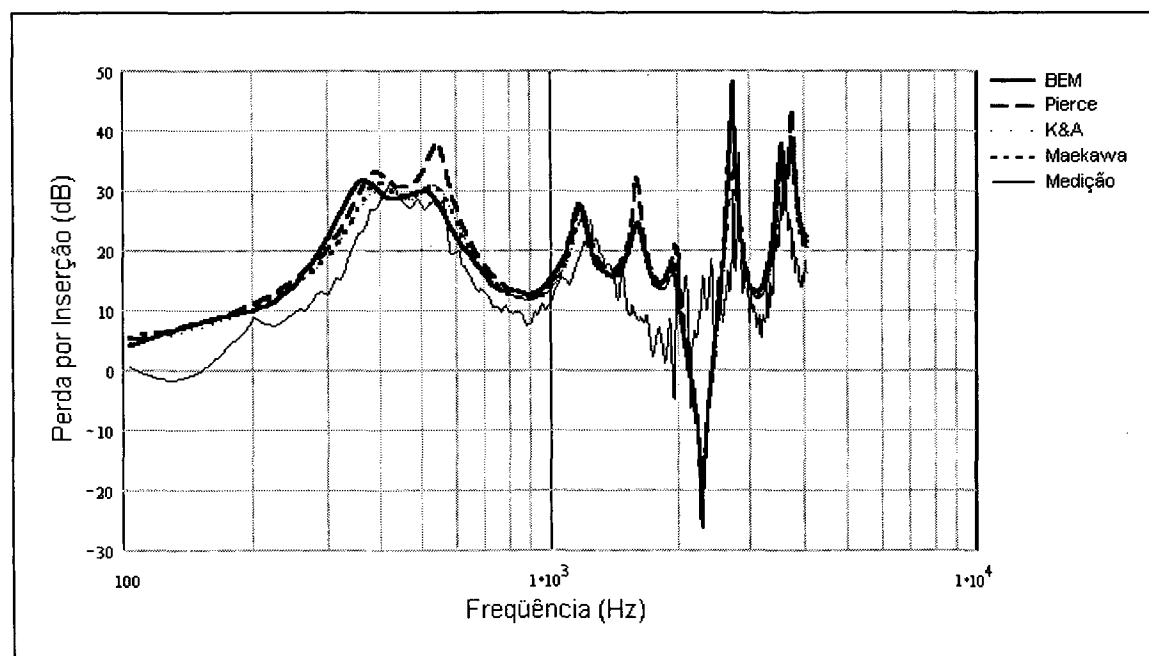


Figura 5.43 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 2,00 m em relação à barreira e com altura de 0,50 m (posição 14). Zona de Sombra.

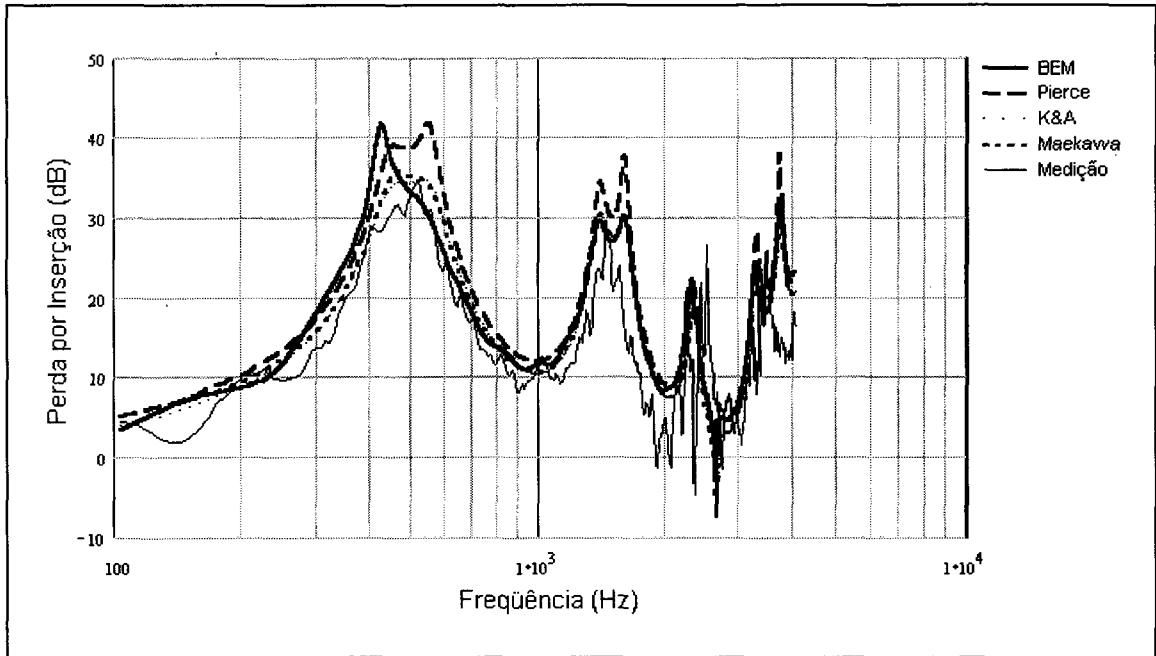


Figura 5.44 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 2,50 m em relação à barreira e com altura de 0,50 m (posição 15). Zona de Sombra.

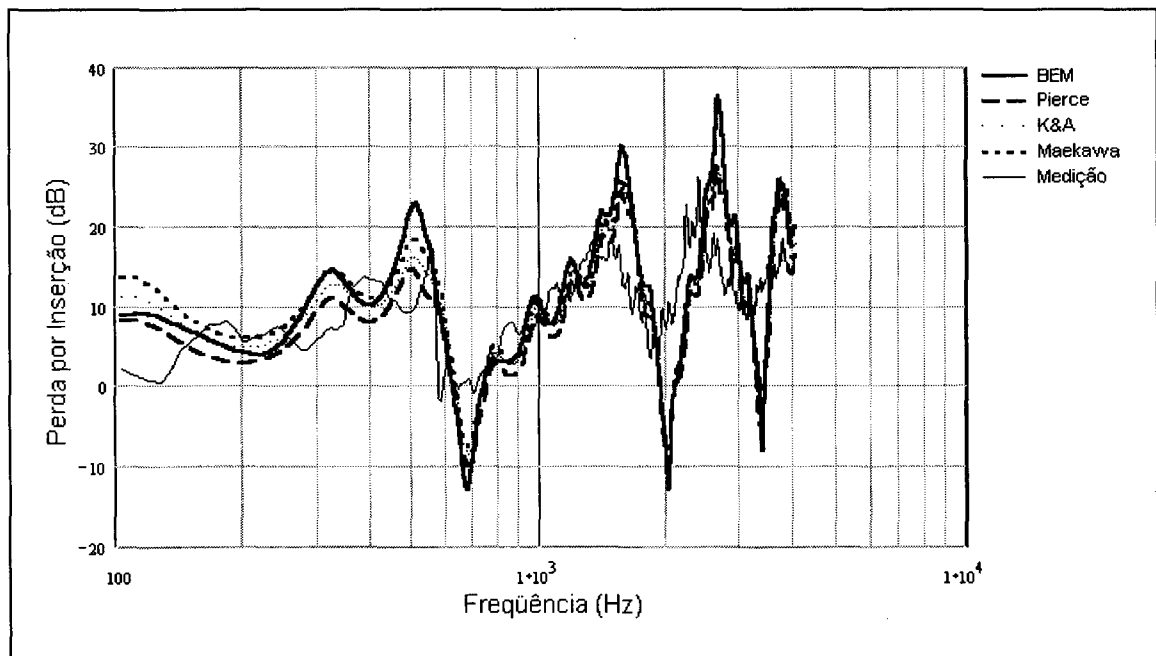


Figura 5.45 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 0,50 m em relação à barreira e com altura de 1,00 m (posição 16). Zona de Sombra.

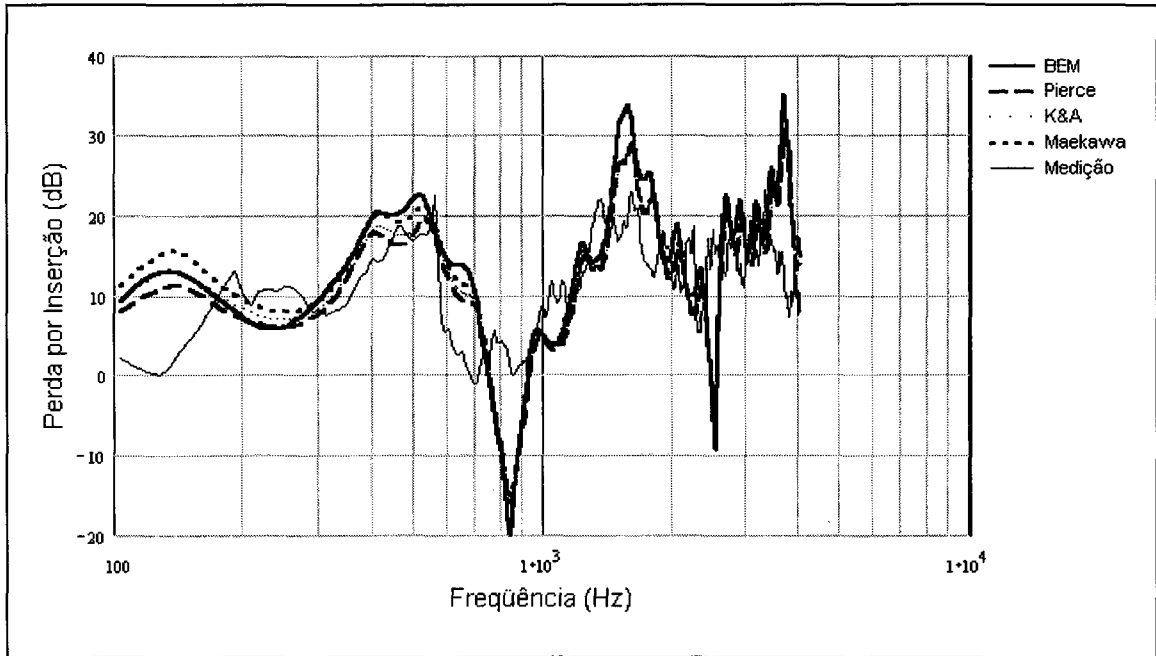


Figura 5.46 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 1,00 m em relação à barreira e com altura de 1,00 m (posição 17). Zona de Sombra.

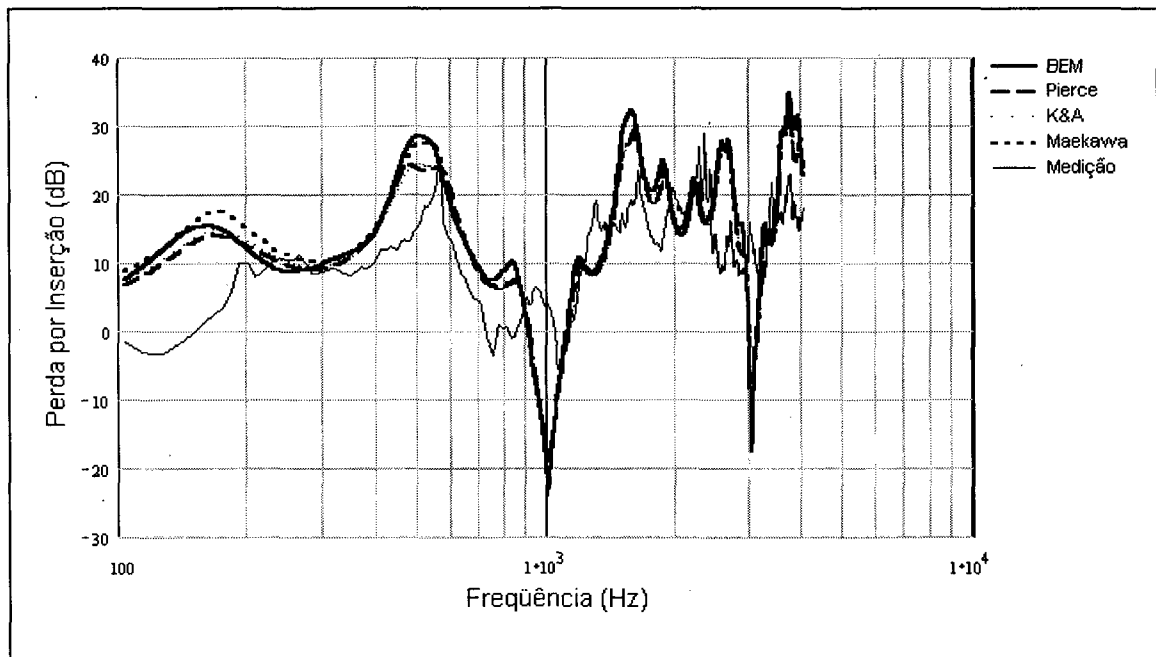


Figura 5.47 – Perda por inserção.– resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 1,50 m em relação à barreira e com altura de 1,00 m (posição 18). Zona de Sombra.

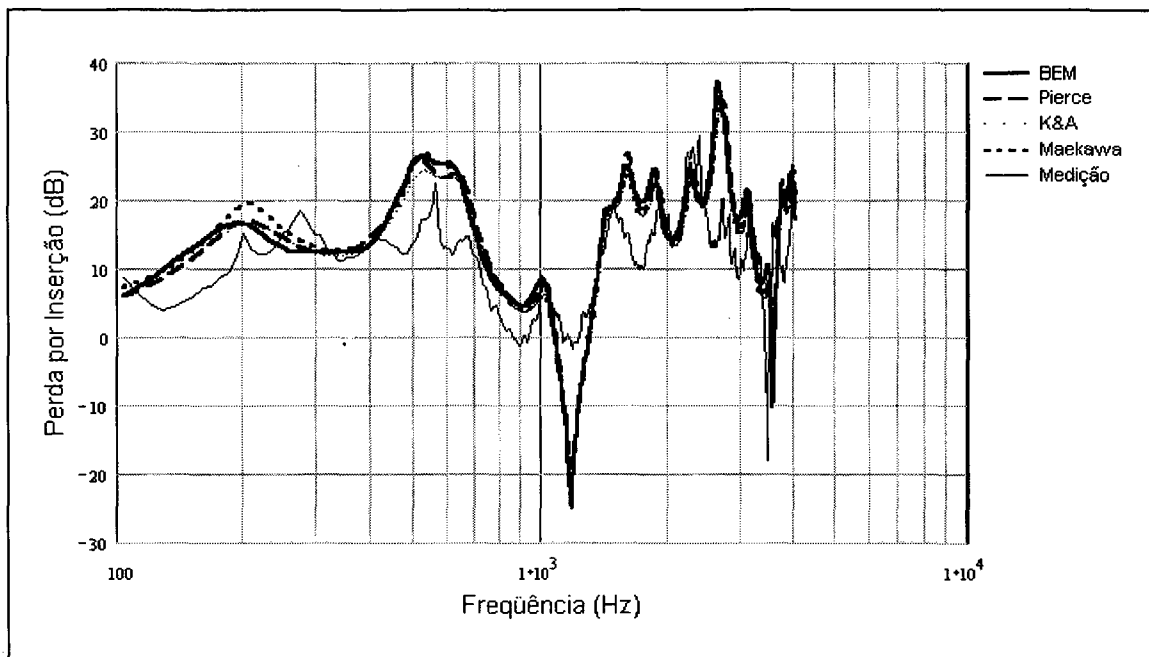


Figura 5.48 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 2,00 m em relação à barreira e com altura de 1,00 m (posição 19). Zona de Sombra.

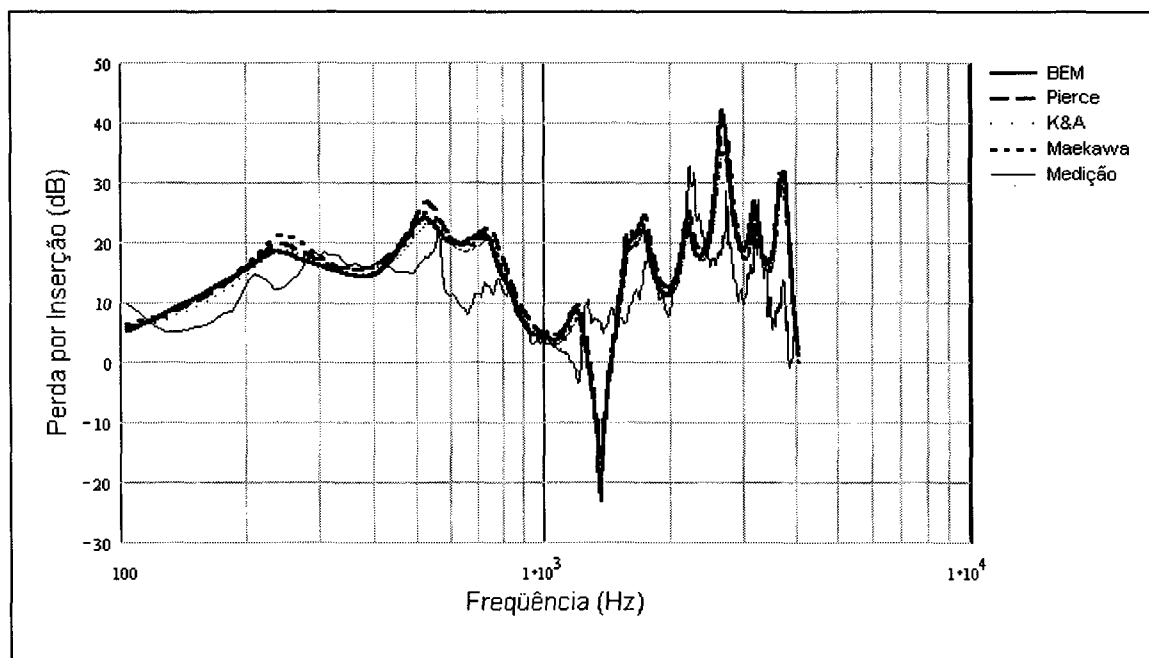


Figura 5.49 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 2,50 m em relação à barreira e com altura de 1,00 m (posição 20). Zona de Sombra.

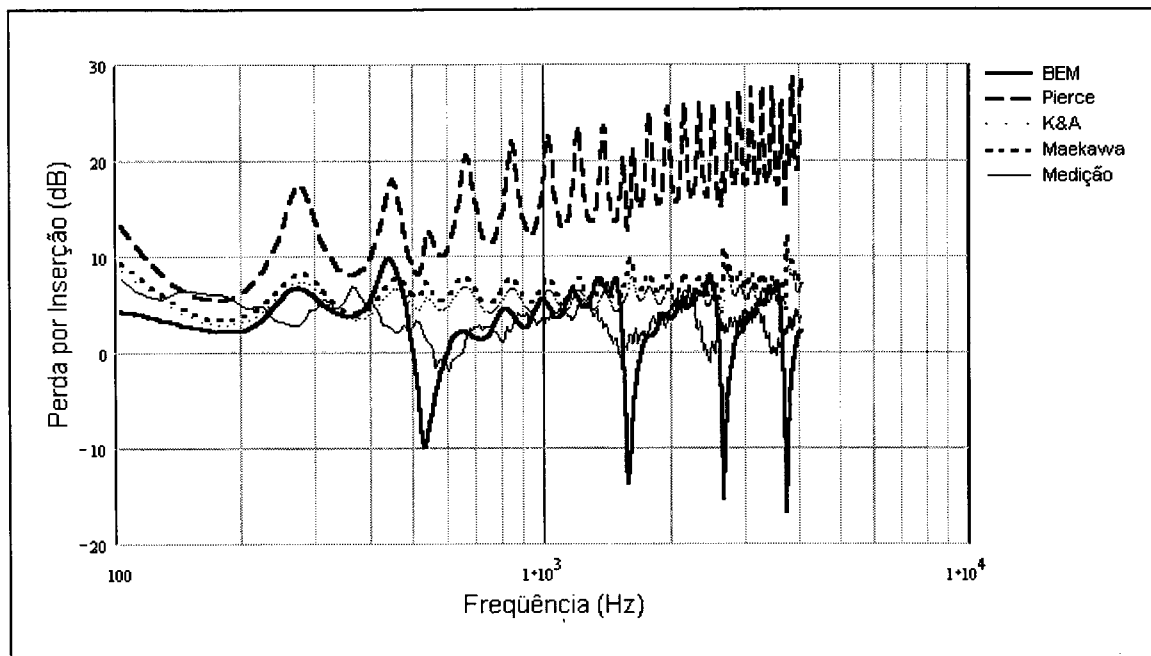


Figura 5.50 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 0,50 m em relação à barreira e com altura de 1,50 m (posição 21). Zona de Brilho.

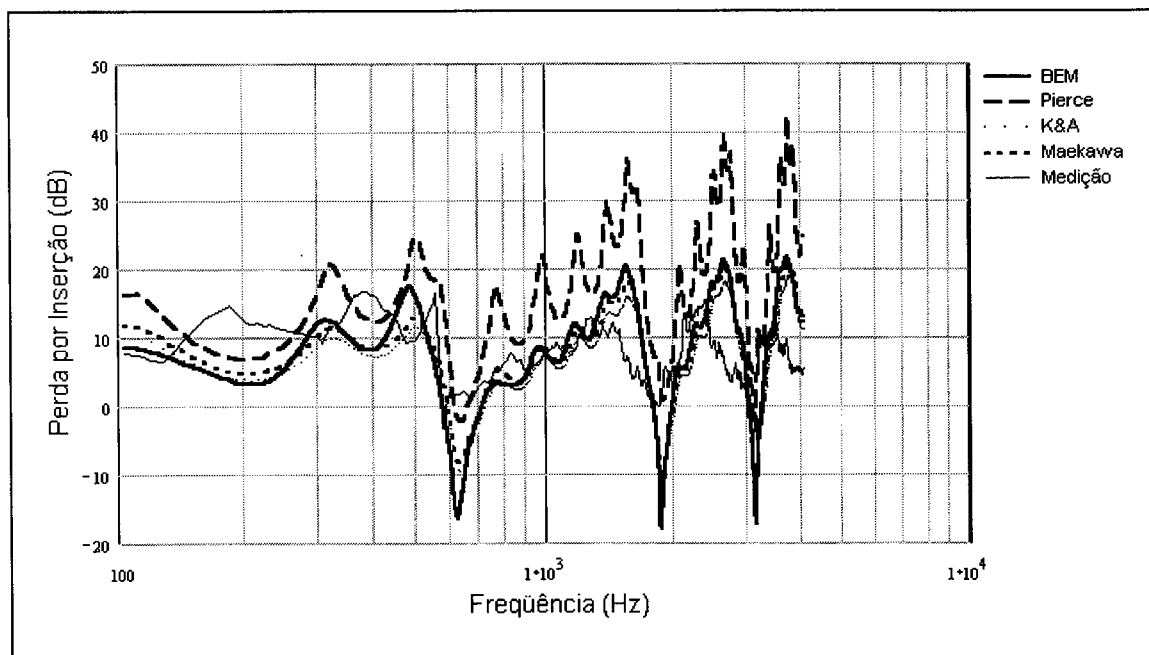


Figura 5.51 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 1,00 m em relação à barreira e com altura de 1,50 m (posição 22). Zona de Transição.

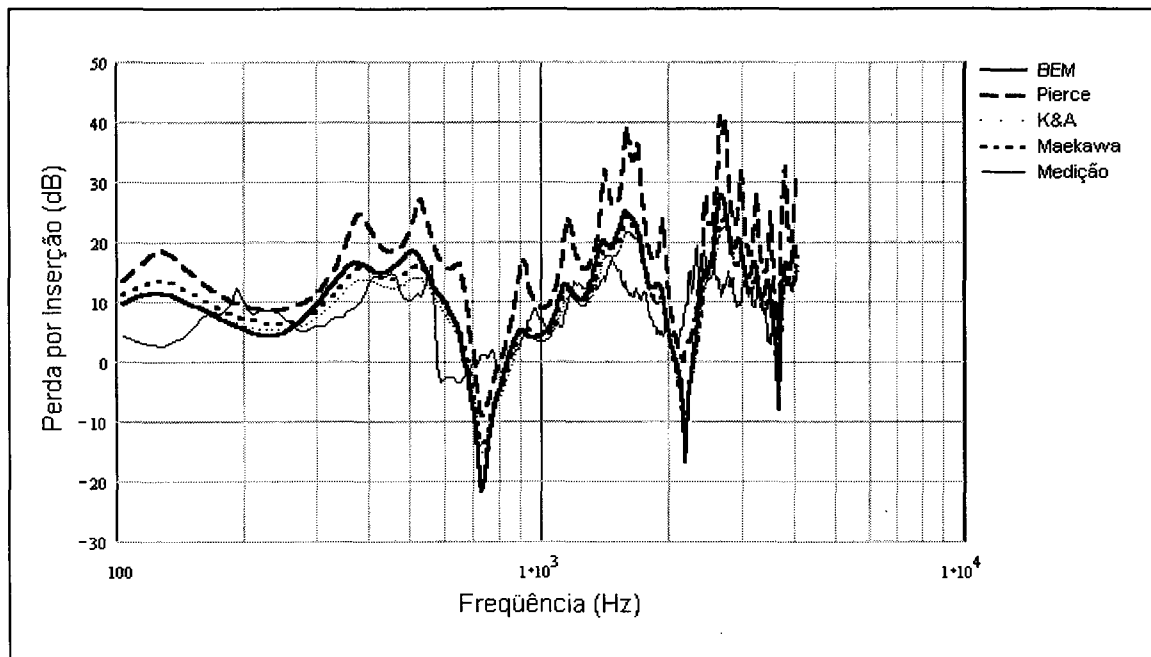


Figura 5.52 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 1,50 m em relação à barreira e com altura de 1,50 m (posição 23). Zona de Transição.

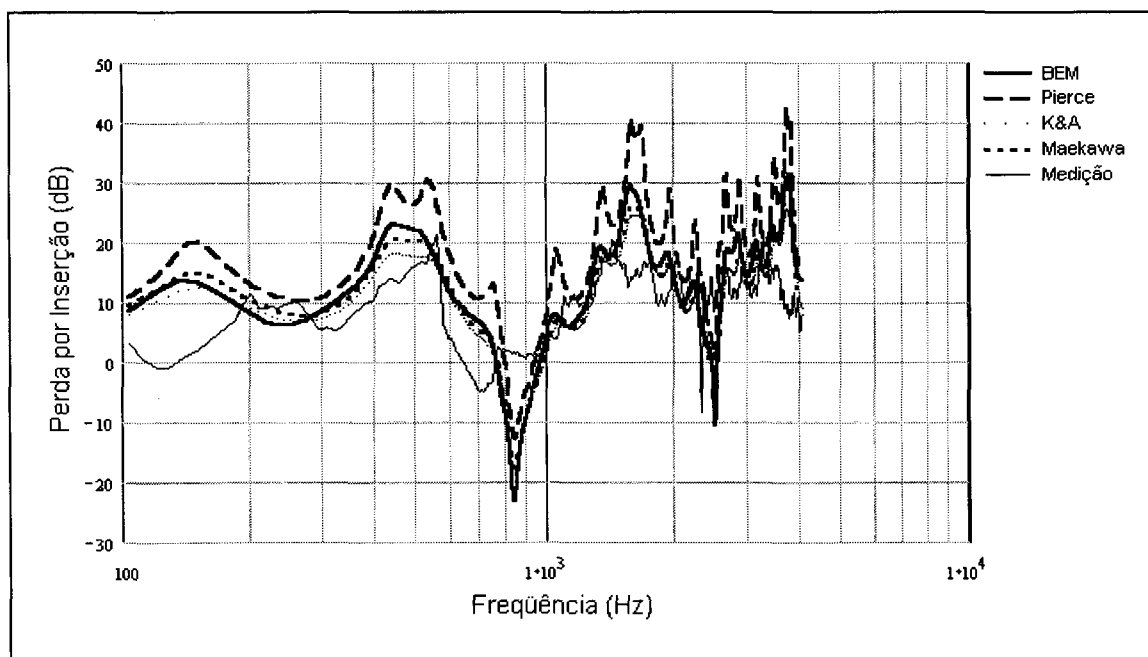


Figura 5.53 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 2,00 m em relação à barreira e com altura de 1,50 m (posição 24). Zona de Transição.

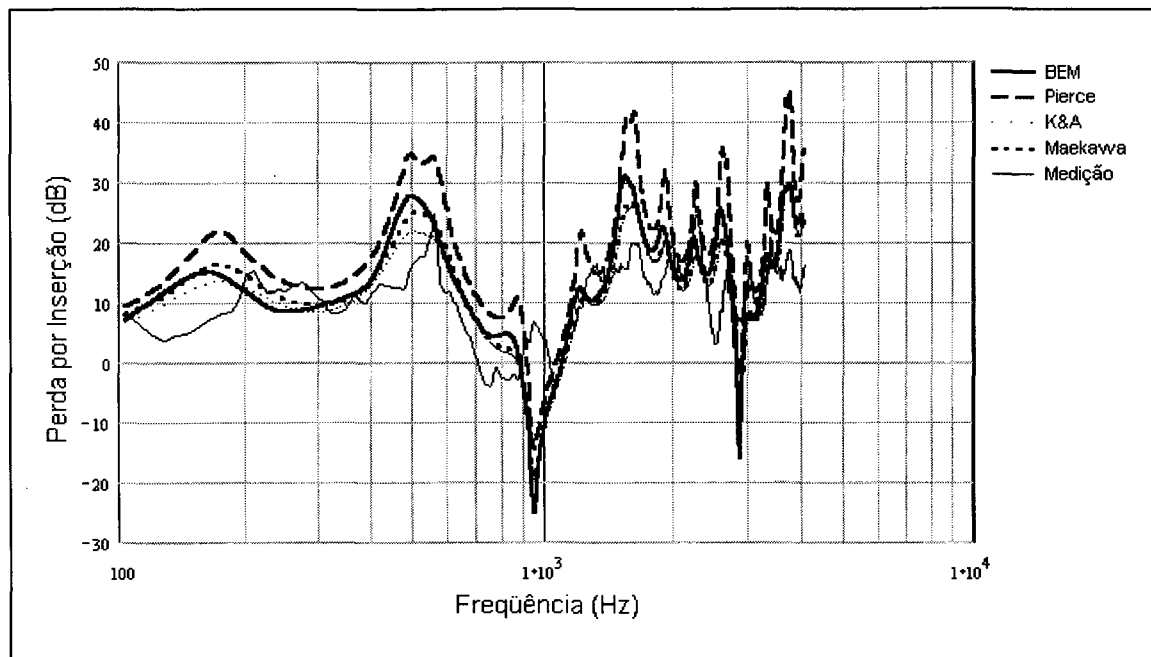


Figura 5.54 – Perda por inserção – resultados teóricos e experimentais. Receptor situado a 2,50 m em relação à barreira e com altura de 1,50 m (posição 25). Zona de Transição.

Globalmente, pode-se afirmar, a partir da comparação visual entre as curvas, que há boa concordância entre os valores preditos e os valores medidos, principalmente no que diz respeito ao padrão de forma das curvas. Em alguns pontos há uma certa defasagem na ocorrência dos picos e vales de atenuação, mas a sucessão de ocorrência destas variações, tanto nos resultados dos métodos teóricos quanto das medições, mostra que os métodos teóricos de predição fornecem boas informações sobre o comportamento real da atenuação oferecida pela barreira.

Em se tratando de valores de perda por inserção, o BEM tende a superestimar os valores de atenuação em quase toda a faixa de frequências investigada e para quase todas as posições de recepção. WATTS et al. (1994) observou comportamento similar na avaliação dos benefícios produzidos por barreiras com perfil T. As maiores diferenças de amplitude de atenuação acontecem nos pontos de picos ou de vales. O BEM apresenta picos bastante acentuados na maioria das frequências, enquanto que as medições comportam-se, na maioria dos casos, de uma forma mais suave. Assim, deve-se interpretar com cuidado os dados fornecidos pela simulação, principalmente nestes pontos, para que não se cometam erros na utilização destas informações.

Dos cálculos analíticos, os métodos de Kurze & Anderson e de Maekawa mostram melhor concordância com as medições em todos os pontos de recepção investigados. O método de Pierce também fornece boas predições nos pontos situados



bem dentro da zona de sombra, porém, deixa um pouco a desejar em relação aos picos e vales de atenuação acentuados. Nas proximidades da fronteira entre a zona de sombra e a zona de brilho os resultados de Pierce afastam-se mais das medições e, no ponto 21 (zona de brilho), a predição é totalmente divergente.

De uma forma geral, as atenuações obtidas experimentalmente foram menores que as preditas pelos métodos teóricos, possivelmente pela ocorrência de vazamento de som através das emendas. A transmissão através do próprio material da barreira poderia ser outra causa das atenuações experimentais terem sido menores que as preditas, uma vez que sua massa superficial, embora dentro dos limites mencionados na literatura técnica, aproximava-se muito do patamar inferior destes limites. Entretanto, como checado no Capítulo 4 e mostrado na Figura 4.3, a perda de transmissão aparentemente está em conformidade com as recomendações práticas comentadas por GERGES (1992).

É importante ressaltar-se que na comparação entre dados de um trabalho experimental e dados teóricos, inevitavelmente haverá diferenças, muitas vezes decorrentes de simplificações adotadas nos modelos teóricos.

Pode-se citar, por exemplo, o problema da fonte sonora. No caso da simulação numérica ou cálculo analítico, a fonte sonora e o receptor são considerados perfeitamente omnidirecionais, obedecendo a modelos idealizados matematicamente. No ensaio experimental é impossível atender com perfeição a estas características ideais.

Além disso, deve-se mencionar a incerteza das medições causadas tanto por limitações internas da cadeia de medição como por agentes externos.

Assim, as diferenças observadas entre os dados experimentais e a os métodos teóricos não comprometem a validade destes métodos para predição da atenuação de barreiras.

Finalizando-se este capítulo, é feita uma comparação adicional entre os resultados das medições em bandas 1/3 de oitava e a formulação de Kurze & Anderson, tomada para sinais senoidais (utilizando-se a equação (2.23)) e para bandas de ruído (com o emprego da equação (2.24)). A escolha pela formulação de Kurze & Anderson não teve motivação especial, pois as mesmas tendências de mudança foram observadas para os métodos de Pierce e de Maekawa.

Pode-se observar nas Figuras 5.55 e 5.56, as quais apresentam a perda por inserção determinada por medição e as calculadas para frequências discretas e bandas de

ruído, que a consideração de um sinal com largura de banda no cálculo analítico produziu a aproximação da curva de predição em relação à curva de medição, diminuindo a amplitude dos picos e vales de atenuação, sobretudo nas frequências mais altas.

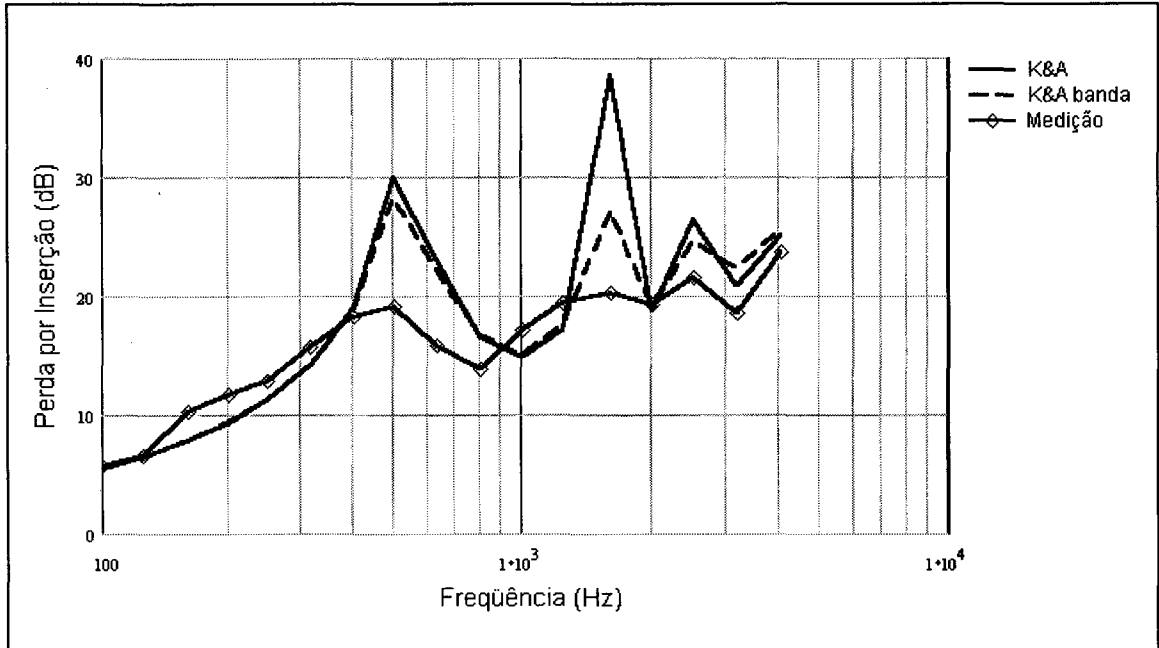


Figura 5.55 – Cálculo analítico para tons puros e para bandas de ruído *versus* medição para bandas de 1/3 de oitava (posição 01).

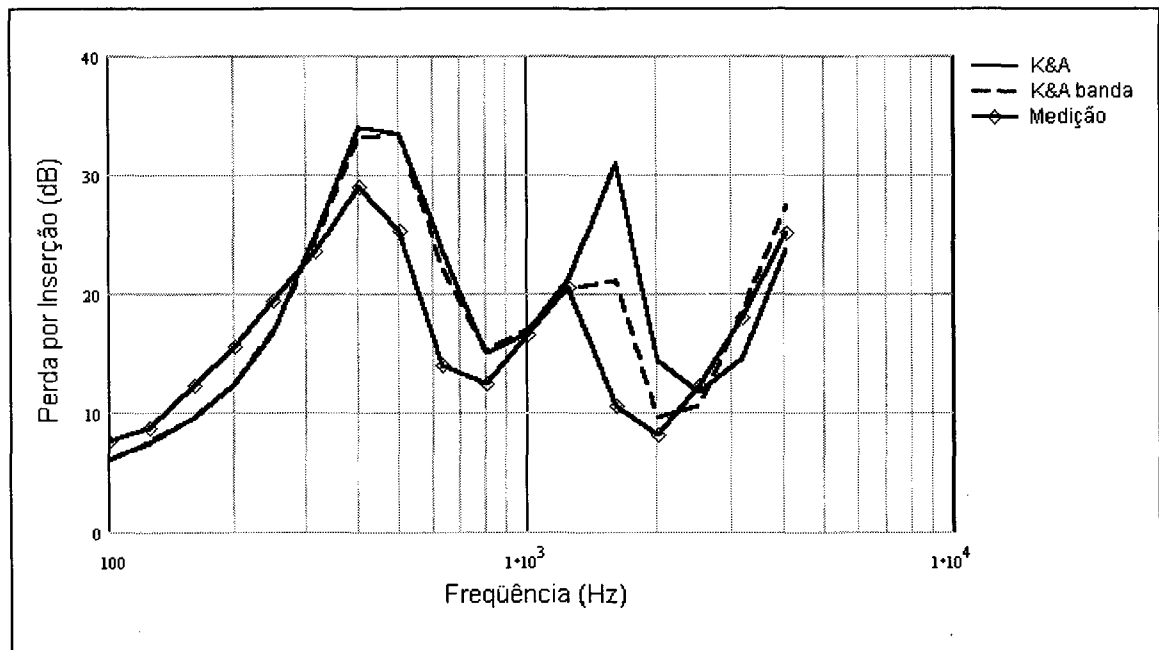


Figura 5.56 – Cálculo analítico para tons puros e para bandas de ruído *versus* medição para bandas de 1/3 de oitava (posição 06).

Como foi visto na Seção 2.4.2, a diferenciação entre os resultados dos cálculos concebidos pela consideração da função de interferência para sinal senoidal, da equação

(2.23), ou para banda de ruído, pela equação (2.24), somente se dá para bandas de frequências relativamente largas, como é o caso da banda de 1/3 de oitava.

Para outras larguras de banda, como as empregadas neste trabalho (1/24 de oitava e 8 Hz), esta consideração não é satisfatória.

### 5.3 SUMÁRIO

Neste capítulo foram feitas comparações entre os métodos de predição da atenuação, descritos nos Capítulos 2 e 3 e resultados das medições realizadas no Capítulo 4. As comparações foram separadas em duas partes.

Primeiramente, foram discutidas as diferenças entre os resultados dos métodos de predição analíticos e das simulações numéricas. Desta comparação, pode-se concluir que, embora todos apresentem curvas com formas similares em cada posição de recepção e, a exemplo do que fora constatado na análise dos resultados das formulações analíticas, realizada no Capítulo 2, as diferenças entre os resultados dos métodos analíticos e os do BEM mostraram ser dependentes da posição do receptor, assumindo valores menores quando o receptor encontra-se na zona de sombra e maiores na zona de transição e de brilho, nesta ordem. Além disso, constatou-se que as formulações de Kurze & Anderson e de Maekawa apresentam valores de atenuação mais próximos àqueles obtidos pelo BEM, mesmo nas zonas de transição e brilho, observando-se diferenças médias entre as formulações e o BEM da ordem de 1,5 a 2,0 dB. A formulação de Pierce, por sua vez, apresenta resultados próximos aos do BEM apenas na zona de sombra, divergindo significativamente nas posições de receptor localizadas na zona de brilho.

A segunda comparação foi feita entre os resultados teóricos (cálculo analítico e simulação numérica) e os dados experimentais. Desta comparação, observou-se que ambos apresentam curvas com formas similares entre si, constatando-se que os métodos de predição proporcionam informações apreciáveis acerca das reais capacidades de atenuação da barreira acústica testada. As curvas de atenuação experimentais mostraram, de uma forma geral, valores um pouco abaixo dos preditos, principalmente nos picos de atenuação, o que pode ser justificado por possíveis vazamentos de ruído pelas junções entre as placas.

## Capítulo 6

# CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foram comparados os resultados de dois métodos teóricos de predição da atenuação proporcionada por barreiras e dados experimentais de uma barreira construída e ensaiada em ambiente semi-anecóico.

O primeiro método de predição abordado foi através de cálculos analíticos. Este método foi implementado através de três formulações baseadas no princípio da Teoria Geométrica da Difração, que foram adaptadas para incorporar o efeito do piso rígido sobre o campo sonoro total.

Da comparação entre os resultados das formulações de Pierce / Rousseaux (referida ao longo do texto, para fins de simplificação, como formulação de Pierce), de Kurze & Anderson / Rousseaux (idem, para Kurze & Anderson), e de Maekawa / Rousseaux (idem, para Maekawa), conclui-se que as mesmas apresentam resultados similares em quase toda a faixa de frequência analisada para os pontos de recepção situados na zona de sombra acústica da barreira, a qual representa, na prática, a região de interesse para o uso de barreiras acústicas como medida de proteção contra ruído. Os resultados das formulações de Kurze & Anderson e de Maekawa apresentam valores muito próximos e mostram curvas com comportamento mais suave, onde picos e vales de atenuação são menos acentuados do que os produzidos pela formulação de Pierce.

O outro método de predição empregado foi o método de elementos de contorno (BEM).

Comparando-se os resultados do BEM com os cálculos analíticos pode-se constatar ótima concordância entre eles na zona de sombra. As principais discrepâncias encontram-se na amplitude dos picos e vales das curvas de atenuação. Nestes pontos o BEM apresenta, geralmente, maiores amplitudes do que os métodos analíticos. De

maneira particular, as formulações de Kurze & Anderson e de Maekawa demonstram concordância mais estreita com o BEM, ao menos para o modelo analisado.

Próximo à fronteira entre a zona de sombra e a zona de brilho, os métodos de Kurze & Anderson e de Maekawa continuam mostrando boa concordância com o BEM; entretanto a formulação de Pierce apresenta desvios de amplitude, porém, permanecendo a forma das curvas dentro de padrões aceitáveis. Este resultado era esperado, uma vez que as formulações de Kurze & Anderson e de Maekawa foram desenvolvidas através de dados experimentais, nos quais foram levados em conta resultados correspondentes a esta região.

A análise do comportamento das predições e medições na zona de brilho, apesar de não fazer parte dos objetivos iniciais deste trabalho, mostrou que a formulação de Pierce não fornece resultados aceitáveis. O algoritmo de Kurze & Anderson e a formulação de Maekawa, contudo, apresentaram resultados coerentes com o BEM e com as medições nesta zona.

Com a observação das curvas correspondentes aos pontos localizados rentes ao piso pode-se concluir que estes mostram-se mais adequados para a comparação da eficiência de proteção relativa entre diferentes barreiras, por não envolverem os efeitos de interferência ocorridos no semi-espaço de recepção, os quais tornam complexa a identificação de tendências. A comparação da eficiência relativa de proteção de barreiras pode ser facilitada quando a fonte sonora e o receptor estiverem situados no nível do piso, evitando-se, assim, qualquer efeito de interferência devido a reflexões.

Após a análise das técnicas de predição foram comparados os resultados destas com os dados experimentais.

As curvas de perda por inserção preditas pelos métodos investigados mostraram boa similaridade de comportamento com as curvas experimentais. Houve diferenças entre a amplitude da atenuação predita pelos métodos teóricos, principalmente nos pontos de picos e vales, onde estes métodos mostram variações mais acentuadas. Nos demais pontos há a tendência dos métodos de predição superestimarem a atenuação real, possivelmente pela ocorrência de vazamento de som através das emendas.

Com base em todas estas observações, pode-se concluir que os métodos de predição analisados fornecem informações apreciáveis sobre a atenuação alcançada por barreiras, sendo bastante úteis para projetos.

Cabe ressaltar que os cálculos analíticos são desenvolvidos para barreiras delgadas, retas e rígidas, as quais são basicamente o padrão para barreiras empregadas

contra o ruído de tráfego. Assim, tem-se em mãos uma ferramenta simples, barata e rápida para projeto. Tanto a formulação de Pierce quanto a de Kurze & Anderson e a de Maekawa podem ser facilmente implementadas em um *software* matemático ou em alguma linguagem de programação. No caso de se recomendar algum algoritmo para propósitos de projeto, o algoritmo de Kurze & 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 de produzirem resultados mais próximos dos obtidos pelo BEM e experimentalmente.

Uma vantagem fundamental dos cálculos analíticos sobre o BEM, como comentado anteriormente, é sua rapidez e simplicidade. Enquanto que as formulações de Pierce, Kurze & Anderson e Maekawa levaram poucos minutos para avaliar todos os pontos e frequências envolvidos neste trabalho, o BEM leva cerca de 7,5 horas para fazer a mesma avaliação.

Entretanto, o BEM tem a seu favor o fato de poder prever o comportamento do campo acústico em qualquer ponto do seu domínio, esteja ele situado na zona de sombra, zona de brilho ou qualquer outro lugar. Além disso, pode-se avaliar perfis diferentes de barreiras e o uso de materiais absorventes para o desenvolvimento de elementos de proteção mais eficientes sem a necessidade de se aumentar a altura da barreira (redutores de ruído para serem acoplados no topo da barreira). Assim, o BEM se configura em uma ferramenta poderosíssima capaz de proporcionar a economia de tempo e dinheiro no projeto de barreiras, através da eliminação da construção de protótipos de elementos para serem testados em escala ou em tamanho natural.

Como sugestões para trabalhos futuros nesta mesma linha de pesquisa, pode-se enumerar:

1. Estudar métodos analíticos que incluam a impedância finita da barreira e do piso e validá-los através dos procedimentos apresentados neste trabalho.
2. Aumentar o número de pontos de recepção, incluindo mais pontos nas zonas de transição e de brilho.
3. Utilizar material de maior massa superficial na construção de uma barreira experimental com mesmas dimensões da ensaiada neste trabalho e verificar se há variação nos resultados.
4. Desenvolver redutores de ruído e pesquisar o uso de bordas randômicas para barreiras através do BEM e posteriormente testá-los através dos procedimentos experimentais descritos no presente trabalho.

5. Investigar o uso de outras técnicas de medição que poderiam ser empregadas para a validação dos resultados teóricos, como o MLS (*Maximum Length Sequences*).
6. Aplicar os métodos de predição aqui estudados em casos práticos, verificando as possíveis diferenças quando empregados em condições mais realísticas de construção e uso de barreiras acústicas.

## Capítulo 7

### BIBLIOGRAFIA

#### 7.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALFREDSON, R.J. ; DU, X. "Special shapes and treatment for noise barriers." Inter-noise 95 Proceedings, p 381-384 (1995).
2. BEHAR, A. ; MAY, D.N. "Durability of sound absorbing materials for highway noise barriers." Journal of Sound and Vibration, 71(1), p 33-54 (1980).
3. BUTLER, G.F. "A note of improving the attenuation given by a noise barrier." Journal of Sound and Vibration, 32 (3), p 367-369 (1974).
4. COLE III, J.E. "Diffraction of sound by a refracting cylindrical barrier." Journal of Acoustical Society of America, 81(2), p 222-225 (1987).
5. COYETTE, J. "Treatment of irregular frequencies related to exterior acoustic boundary elements models." 2nd Worldwide SYSNOISE Users Meeting Proceedings (1995).
6. DAIGLE, G.A. "Technical assessment of the effectiveness of noise walls (draft report)." Noise/News International, p 11-35 (1998).
7. DEFRANCE, J. et al. "Acoustic performance of a T-shaped barrier cap." Euro-noise 98 Proceedings, p 1123-1128 (1998).
8. DELANY, M.E. ; BAZLEY, E.N. "Acoustical properties of fibrous absorbent materials." Applied Acoustics, 3, p 105-116 (1970).
9. DUHAMEL, D. "Efficient calculation of the three-dimensional sound pressure field around a noise barrier." Journal of Sound and Vibration, 197(5), p 547-571 (1996).
10. EMBLETON, T.F.W. "Line integral theory of barrier attenuation in the presence of the ground." Journal of Acoustical Society of America, 67(1), p 42-45 (1980).



11. EMBLETON, T.F.W. “Tutorial on sound propagation outdoors.” *Journal of Acoustical Society of America*, 100(1), p 31-48 (1996).
12. FAHY, F.J. et al. “Development of a novel modular form of sound absorbent facing for traffic noise barriers.” *Applied Acoustics*, p 39-51 (1995).
13. FYFE, K. “BEM analysis of 2D and 3D barrier insertion loss.” *2nd Worldwide SYSNOISE Users Meeting Proceedings* (1995).
14. FUJIWARA, K. ; FURUTA, N. “Sound shielding efficiency of a barrier with a cylinder at the edge.” *Noise Control Engineering Journal*, 37(1), p 5-11 (1991).
15. FUJIWARA, K. ; HOTHERSALL, D.C. “Noise barriers with reactive surfaces.” *Proceedings of Inter-noise 96*, p 819-824 (1996).
16. GAUTSCHI, W. “Error Function and Fresnel Integrals”, in ABRAMOWITZ, M. ; STEGUN, I.A. “Handbook of mathematical functions.” London: Dover Publications, p 295 -329 (1965).
17. GERGES, S.N.Y. “Ruído: Fundamentos e Controle.” Florianópolis: Centro Brasileiro de Saúde Ocupacional, 1992. Capítulo 6: Propagação do Som ao Ar Livre.
18. GHARABEGIAN, A. “Improving soundwall performance using route silent.” *Inter-noise 95 Proceedings*, p 385-388 (1995).
19. GRANAT, C. et al. “Variational formulation using integral equations to solve the problem of sound propagation above an absorbing plane.” *Inter-noise 97 Proceedings*, p 335-338 (1997).
20. HERSTER, P. “Optimization of traffic noise barriers using SYSNOISE.” *2nd Worldwide SYSNOISE Users Meeting Proceedings* (1995).
21. HO, S.S.T. et al. “Noise reduction by a barrier having a random edge profile.” *Journal of Acoustical Society of America*, 101(5), p 2669-2676 (1997).
22. HOTHERSALL, D.C. et al. “Efficiency of single noise barriers.” *Journal of Sound and Vibration*, 146(2), p 303-322 (1991).
23. HOTHERSALL, D.C ; HOROSHENKOV, K.V. “Numerical modelling of noise in some urban conditions.” *Inter-noise 97 Proceedings*, p 309-312 (1997).
24. HUTCHINS, D.A. et al. “Model studies of barrier performance in the presence of ground surfaces. Part I – Thin, perfectly reflecting barriers.” *Journal of Acoustical Society of America*, 75(6), p 1807-1816 (1984).

25. ISEI, T. et al. "Noise reduction by barriers on finite impedance ground." *Journal of Acoustical Society of America*, 67(1), p 46-58 (1980).
26. JONASSON, H. G. "Sound reduction by barriers on the ground." *Journal of Sound and Vibration*, 22, p 113-126 (1972).
27. KAWAI, Y. ; TERAI, T. "Application of integral equation methods to the calculation of sound attenuation by barriers." *Applied Acoustics*, 31(1-3) p 101-117 (1990).
28. KURZE, U.J. "Noise reduction by barriers." *Journal of Acoustical Society of America*, 55(3), p 504-518 (1974).
29. KURZE, U.J. ; ANDERSON, G.S. "Sound attenuation by barriers." *Applied Acoustics*, 4, p 35-53 (1971).
30. KURZE, UJ ; BERANEK, L.L. "Sound propagation outdoors." in BERANEK, L.L. "Noise and Vibration Control", McGraw-Hill, New York (1971).
31. LAI, J. "Application of the Boundary Element Method to assessment of road traffic barriers." 2nd Worldwide SYSNOISE Users Meeting Proceedings (1995).
32. LAM, Y.W. ; ROBERTS, S.C. "A simple method for accurate prediction of finite barrier insertion loss." *Journal of Acoustical Society of America*, 93(3), p 1445-1452 (1993).
33. LAM, Y.W. "Using Maekawa's Chart to calculate finite length barrier insertion loss." *Applied Acoustics*, 42, p 29-40 (1994).
34. MAEKAWA, Z. "Noise reduction by screens." *Applied Acoustics*, 1, p 157-173 (1968).
35. MAY, D.N. ; OSMAN, M.M. "Highway noise barriers: new shapes." *Journal of Sound and Vibration*, 71(1), p 73-101 (1980).
36. MENGE, C.W. "Highway noise: sloped barriers as an alternative to absorptive barriers." *Noise Control Engineering*, 14(2), p 74-78 (1980).
37. MURADALI, A. ; FYFE, K.R. "A study of 2D and 3D barrier insertion loss using improved diffracton-based methods." *Applied Acoustics*, 53(1-3), p 49-75 (1998).
38. OMOTO, A. et al. "Active suppression of sound diffracted by a barrier: an outdoor experiment." *Journal of Acoustical Society of America*, 102(3), p 1671-1679 (1997).

39. PFRENTZSCHNER, J. ; et al. "A rating index for estimating insertion loss of noise barriers under traffic noise conditions." *Acustica - Acta Acustica*, 82(3), p 504-508 (1996).
40. PIACENTINI, A. et al. "Computational acoustics: noise reduction via diffraction by barriers with different geometries." *Computational Methods Applied Mechanical Engineering*, 130(1-2), p 81-91 (1996).
41. PIERCE, A.D. "Diffraction of sound around corners and over wide barriers." *Journal of Acoustical Society of America*, 55(5), p 941-955 (1974).
42. ROUSSEAUX, P. "Sound attenuation by wide barriers on the ground." *Acustica*, 55, p 293-300 (1984).
43. SEYBERT, A. F. "The BEM in acoustics: physical insights and practical examples." 2nd Worldwide SYSNOISE Users Meeting Proceedings (1995).
44. SEYBERT, A.F. ; RENGARAJAN, T.K. "The use of CHIEF to obtain unique solutions for acoustic radiation using boundary integral equations." *Journal of Acoustical Society of America*, 81(5), p 1299-1306 (1987).
45. SEZNEC, R. "Diffraction of sound around barriers: use of the Boundary Elements technique." *Journal of Sound and Vibration*, 73(2), p 195-209 (1980).
46. SHONO, Y. et al. "Development of noise abatement device applied at the top of highway noise barriers." An excerpt from N° (1994-12/VI-25), *Journal of Construction Management and Engineering Japan Society of Civil Engineers* (1994).
47. SIMÓN, F. et al. "Ground influence on the definition of single rating index for noise barrier protection." *Journal of Acoustical Society of America*, 104(1), p 232-236 (1998).
48. TAKAGI, K. "Some remarks on practical methods for calculating acoustical diffraction." *Applied Acoustics*, 31(1) p 119-132 (1990).
49. VALADARES, V.M. "Ruído de tráfego veicular em corredores de transporte urbano: estudo de caso em Belo Horizonte – MG." *Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.*
50. WATTS, G.R. et al. "Acoustic performance of new designs of traffic noise barriers: full scale tests." *Journal of Sound and Vibration*, 177(3), p 289-305 (1994).

51. WATTS, G.R. “Acoustic performance of a multiple edge noise barrier profile at motorway sites.” *Applied Acoustics*, 47(1), p 47-66 (1996).
52. WATTS, G.R. “Acoustic performance of parallel traffic noise barriers.” *Applied Acoustics*, 47(2), p 95-119 (1996).
53. WATTS, G.R.; MORGAN, A.A. “Acoustic performance of an interference-type noise-barrier profile.” *Applied Acoustics*, 49(1), p 1-16 (1996).
54. WIRT, L.S. “The control of diffracted sound by means of thnadners (shaped noise barriers).” *Acustica*, 42(2), p 73-88 (1979).
55. YAMAMOTO, K. et al. ”Measurements of noise reduction by absorptive devices mounted at the top of highway barriers.” *Inter-noise 95 Proceedings*, p 389-392 (1995).
56. YAMAMOTO, K. ; TAKAGI, K. “Expressions of Maekawa’s chart for computation.” *Applied Acoustics*, 37, p 75-82 (1992).

## 7.2 OBRAS CONSULTADAS

1. ANSYS User’s Manual Vol.1, Procedures, 1994.
2. ARENAS, J.P. “Estudio sobre la difraccion y atenuacion introducida por las barreras acusticas.” Tesis (Magister en Fisica), Universidad Austral de Chile, Valdivia, 1996.
3. BERANEK, L.L. “Noise and Vibration Control.” McGraw-Hill, New York 1971.
4. GERGES, S.N.Y. “Ruído: Fundamentos e Controle.” Florianópolis: Centro Brasileiro de Saúde Ocupacional, 1992. 600 p.
5. PIERCE, A.D. “Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications.” McGraw-Hill, New York, 1981.
6. SYSNOISE THEORETICAL MANUAL, Revision 5.3A, NIT, Leuven, Bélgica, 1998.

## APÊNDICE 1

### Apêndice 1.1 – Lista de comandos do SYSNOISE 5.3A utilizados nas simulações de predição dos níveis de pressão sonora com barreira, apresentadas no Capítulo 3

\* Define método de solução

```
Option BEM Direct Collocation Node Exterior Uncoupled  
Unbaffled NoAsymptotic Frequency Return
```

\* Importa malha de elementos

```
Input Mesh Format Ansys File geometria/anec1.cdb Return
```

\* Define valores de referência

Reference

```
Pressure 2.0000e-05 Factor 2.0000e+01  
Velocity 1.0000e-09 Factor 2.0000e+01  
Displacement 1.0000e+00 Factor 1.0000e+00  
Intensity 1.0000e-12 Factor 1.0000e+01  
Power 1.0000e-12 Factor 1.0000e+01  
Return
```

\* Define dimensionalidade do problema

```
TwoDimensional Return  
Check Mesh Return
```

\* Define propriedades do fluido

Material Fluid

```
Name ar  
Sound 343 Rho 1.21  
Return
```

\* Define condições de contorno

```
Boundary Admittance Real 0 Imag 0  
Nodes all  
Return
```

\* Gera pontos de sobredeterminação

Overdetermine

Automatic 5

Return

Check Overdetermination Return

\* Gera piso rígido

Halfspace plane y=0

Rigid

Return

\* Define fonte sonora

Source Name '1' Cylindrical

Amplitude Real 1 Imag 0

Position -1 0.23 0

Vector 0 0 1

Return

\* Define pontos de recepção

Point 2.5 0.01 0 Return

Point 1.5 0.01 0 Return

Point 0.5 0.01 0 Return

Point 2.5 0.5 0 Return

Point 1.5 0.5 0 Return

Point 0.5 0.5 0 Return

Point 2.5 0.25 0 Return

Point 1.5 0.25 0 Return

Point 0.5 0.25 0 Return

Point 2.0 0.01 0 Return

Point 1.0 0.01 0 Return

Point 2.0 0.5 0 Return

Point 1.0 0.5 0 Return

Point 2.0 0.25 0 Return

Point 1.0 0.25 0 Return

Point 0.5 1 0 Return

Point 1.0 1 0 Return

Point 1.5 1 0 Return

Point 2.0 1 0 Return

Point 2.5 1 0 Return

Point 0.5 1.5 0 Return

Point 1.0 1.5 0 Return

Point 1.5 1.5 0 Return

Point 2.0 1.5 0 Return

Point 2.5 1.5 0 Return

Point Plane -2 3 0 To 6 3 0 Divide 20 To -2 -0.5 0 Divide  
10 Return

\* Inicia solução

Response

```
Frequency 104 To 4000 LinStep 8
Save Potentials Step 1
Save Displacements Step 1
Save Results Step 1
Near 2
Far 5
Quadrature 2 2 1
Return
```

\* Determina resultados nos pontos de recepção

PostProcess

```
Points all
Frequency 64 To 4000 LinStep 8
Near 2
Far 5
Quadrature 2 2 1
Save Results Step 1
Return
```

\* Armazena resultados em arquivos

Combine

```
Read Point 1 Pressure Return
Write Function File result/com800_pos01.prn Return
```

Clear

```
Read Point 2 Pressure Return
Write Function File result/com800_pos02.prn Return
```

Clear

```
Read Point 3 Pressure Return
Write Function File result/com800_pos03.prn Return
```

Clear

```
Read Point 4 Pressure Return
Write Function File result/com800_pos04.prn Return
```

Clear

```
Read Point 5 Pressure Return
Write Function File result/com800_pos05.prn Return
```

Clear

```
Read Point 6 Pressure Return
Write Function File result/com800_pos06.prn Return
```

Clear

```
Read Point 7 Pressure Return
Write Function File result/com800_pos07.prn Return
```

Clear

```
Read Point 8 Pressure Return
Write Function File result/com800_pos08.prn Return
```

Clear

```
Read Point 9 Pressure Return
```

```
Write Function File result/com800_pos09.prn Return
Clear
Read Point 10 Pressure Return
Write Function File result/com800_pos10.prn Return
Clear
Read Point 11 Pressure Return
Write Function File result/com800_pos11.prn Return
Clear
Read Point 12 Pressure Return
Write Function File result/com800_pos12.prn Return
Clear
Read Point 13 Pressure Return
Write Function File result/com800_pos13.prn Return
Clear
Read Point 14 Pressure Return
Write Function File result/com800_pos14.prn Return
Clear
Read Point 15 Pressure Return
Write Function File result/com800_pos15.prn Return
Clear
Read Point 16 Pressure Return
Write Function File result/com800_pos16.prn Return
Clear
Read Point 17 Pressure Return
Write Function File result/com800_pos17.prn Return
Clear
Read Point 18 Pressure Return
Write Function File result/com800_pos18.prn Return
Clear
Read Point 19 Pressure Return
Write Function File result/com800_pos19.prn Return
Clear
Read Point 20 Pressure Return
Write Function File result/com800_pos20.prn Return
Clear
Read Point 21 Pressure Return
Write Function File result/com800_pos21.prn Return
Clear
Read Point 22 Pressure Return
Write Function File result/com800_pos22.prn Return
Clear
Read Point 23 Pressure Return
Write Function File result/com800_pos23.prn Return
Clear
Read Point 24 Pressure Return
Write Function File result/com800_pos24.prn Return
Clear
Read Point 25 Pressure Return
Write Function File result/com800_pos25.prn Return
Return
```



**Apêndice 1.2 – Lista de comandos do SYSNOISE 5.3A utilizados nas simulações de predição dos níveis de pressão sonora sem barreira, apresentadas no Capítulo 3**

\* Define método de solução

```
Option BEM Indirect Variational Uncoupled Unbaffled
Frequency Return
```

\* Importa malha de elementos

```
Input Mesh Format Ansys File geometria/free10.cdb Return
```

\* Define valores de referência

Reference

```
Pressure 2.0000e-05 Factor 2.0000e+01
Velocity 1.0000e-09 Factor 2.0000e+01
Displacement 1.0000e+00 Factor 1.0000e+00
Intensity 1.0000e-12 Factor 1.0000e+01
Power 1.0000e-12 Factor 1.0000e+01
Return
```

\* Define dimensionalidade do problema

```
TwoDimensional Return
Check Mesh Return
```

\* Define propriedades do fluido

Material Fluid

```
Name ar
Sound 343 Rho 1.21
Return
```

\* Define condições de contorno

```
Boundary Admittance Real 2.409e-3 Imag 0
Elements all
Return
```

```
Boundary Jump Pressure Real 0 Imag 0
Nodes 1 2
Return
```

\* Gera piso rígido

```
Halfspace plane y=0
Rigid
Return
```

\* Define fonte sonora

```
Source Name '1' Cylindrical
  Amplitude Real 1 Imag 0
  Position -1 0.23 0
  Vector 0 0 1
  Return
```

\* Define pontos de recepção

```
Point 2.5 0.01 0 Return
Point 1.5 0.01 0 Return
Point 0.5 0.01 0 Return
Point 2.5 0.5 0 Return
Point 1.5 0.5 0 Return
Point 0.5 0.5 0 Return
Point 2.5 0.25 0 Return
Point 1.5 0.25 0 Return
Point 0.5 0.25 0 Return
Point 2.0 0.01 0 Return
Point 1.0 0.01 0 Return
Point 2.0 0.5 0 Return
Point 1.0 0.5 0 Return
Point 2.0 0.25 0 Return
Point 1.0 0.25 0 Return
Point 0.5 1 0 Return
Point 1.0 1 0 Return
Point 1.5 1 0 Return
Point 2.0 1 0 Return
Point 2.5 1 0 Return
Point 0.5 1.5 0 Return
Point 1.0 1.5 0 Return
Point 1.5 1.5 0 Return
Point 2.0 1.5 0 Return
Point 2.5 1.5 0 Return
Point Plane -2 3 0 To 6 3 0 Divide 20 To -2 -0.5 0 Divide
10 Return
```

\* Inicia solução

```
Response
  Frequency 104 To 4000 LinStep 8
  Save Potentials Step 1
  Save Displacements Step 1
  Save Results Step 1
  Near 2
  Far 5
  Quadrature 2 2 1
  Return
```

\* Determina resultados nos pontos de recepção

PostProcess

Points all  
Frequency 64 To 4000 LinStep 8  
Near 2  
Far 5  
Quadrature 2 2 1  
Save Results Step 1  
Return

\* Armazena resultados em arquivos

Combine

Read Point 1 Pressure Return  
Write Function File result/sem800\_pos01.prn Return

Clear

Read Point 2 Pressure Return  
Write Function File result/sem800\_pos02.prn Return

Clear

Read Point 3 Pressure Return  
Write Function File result/sem800\_pos03.prn Return

Clear

Read Point 4 Pressure Return  
Write Function File result/sem800\_pos04.prn Return

Clear

Read Point 5 Pressure Return  
Write Function File result/sem800\_pos05.prn Return

Clear

Read Point 6 Pressure Return  
Write Function File result/sem800\_pos06.prn Return

Clear

Read Point 7 Pressure Return  
Write Function File result/sem800\_pos07.prn Return

Clear

Read Point 8 Pressure Return  
Write Function File result/sem800\_pos08.prn Return

Clear

Read Point 9 Pressure Return  
Write Function File result/sem800\_pos09.prn Return

Clear

Read Point 10 Pressure Return  
Write Function File result/sem800\_pos10.prn Return

Clear

Read Point 11 Pressure Return  
Write Function File result/sem800\_pos11.prn Return

Clear

Read Point 12 Pressure Return  
Write Function File result/sem800\_pos12.prn Return

Clear

Read Point 13 Pressure Return  
Write Function File result/sem800\_pos13.prn Return

Clear

Read Point 14 Pressure Return  
Write Function File result/sem800\_pos14.prn Return  
Clear  
Read Point 15 Pressure Return  
Write Function File result/sem800\_pos15.prn Return  
Clear  
Read Point 16 Pressure Return  
Write Function File result/sem800\_pos16.prn Return  
Clear  
Read Point 17 Pressure Return  
Write Function File result/sem800\_pos17.prn Return  
Clear  
Read Point 18 Pressure Return  
Write Function File result/sem800\_pos18.prn Return  
Clear  
Read Point 19 Pressure Return  
Write Function File result/sem800\_pos19.prn Return  
Clear  
Read Point 20 Pressure Return  
Write Function File result/sem800\_pos20.prn Return  
Clear  
Read Point 21 Pressure Return  
Write Function File result/sem800\_pos21.prn Return  
Clear  
Read Point 22 Pressure Return  
Write Function File result/sem800\_pos22.prn Return  
Clear  
Read Point 23 Pressure Return  
Write Function File result/sem800\_pos23.prn Return  
Clear  
Read Point 24 Pressure Return  
Write Function File result/sem800\_pos24.prn Return  
Clear  
Read Point 25 Pressure Return  
Write Function File result/sem800\_pos25.prn Return  
Return

## APÊNDICE 2

### Apêndice 2.1 – Frequências centrais para bandas de 1/3 de oitava [Hz].

100	125	160	200	250	315	400	500	630
800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	

### Apêndice 2.2 – Frequências centrais para bandas de 1/24 de oitava [Hz].

101	262	678	1753
104	270	698	1804
107	278	718	1857
111	286	739	1911
114	294	761	1967
117	303	783	2024
121	312	806	2083
124	321	829	2144
128	330	854	2207
131	340	879	2271
135	350	904	2337
139	360	931	2406
143	370	958	2476
147	381	986	2548
152	392	1015	2623
156	404	1044	2699
161	416	1075	2778
165	428	1106	2859
170	440	1138	2943
175	453	1172	3029
180	466	1206	3117
186	480	1241	3208
191	494	1277	3302
197	508	1314	3398
202	523	1353	3497
208	539	1392	3600
214	554	1433	3705
221	570	1475	3813
227	587	1518	3924
234	604	1562	4039
241	622	1608	
248	640	1655	
255	659	1703	

**Apêndice 2.3 – Frequências centrais para bandas de largura constante de 8 Hz.**

104	464	824	1184	1544	1904	2264	2624	2984	3344	3704
112	472	832	1192	1552	1912	2272	2632	2992	3352	3712
120	480	840	1200	1560	1920	2280	2640	3000	3360	3720
128	488	848	1208	1568	1928	2288	2648	3008	3368	3728
136	496	856	1216	1576	1936	2296	2656	3016	3376	3736
144	504	864	1224	1584	1944	2304	2664	3024	3384	3744
152	512	872	1232	1592	1952	2312	2672	3032	3392	3752
160	520	880	1240	1600	1960	2320	2680	3040	3400	3760
168	528	888	1248	1608	1968	2328	2688	3048	3408	3768
176	536	896	1256	1616	1976	2336	2696	3056	3416	3776
184	544	904	1264	1624	1984	2344	2704	3064	3424	3784
192	552	912	1272	1632	1992	2352	2712	3072	3432	3792
200	560	920	1280	1640	2000	2360	2720	3080	3440	3800
208	568	928	1288	1648	2008	2368	2728	3088	3448	3808
216	576	936	1296	1656	2016	2376	2736	3096	3456	3816
224	584	944	1304	1664	2024	2384	2744	3104	3464	3824
232	592	952	1312	1672	2032	2392	2752	3112	3472	3832
240	600	960	1320	1680	2040	2400	2760	3120	3480	3840
248	608	968	1328	1688	2048	2408	2768	3128	3488	3848
256	616	976	1336	1696	2056	2416	2776	3136	3496	3856
264	624	984	1344	1704	2064	2424	2784	3144	3504	3864
272	632	992	1352	1712	2072	2432	2792	3152	3512	3872
280	640	1000	1360	1720	2080	2440	2800	3160	3520	3880
288	648	1008	1368	1728	2088	2448	2808	3168	3528	3888
296	656	1016	1376	1736	2096	2456	2816	3176	3536	3896
304	664	1024	1384	1744	2104	2464	2824	3184	3544	3904
312	672	1032	1392	1752	2112	2472	2832	3192	3552	3912
320	680	1040	1400	1760	2120	2480	2840	3200	3560	3920
328	688	1048	1408	1768	2128	2488	2848	3208	3568	3928
336	696	1056	1416	1776	2136	2496	2856	3216	3576	3936
344	704	1064	1424	1784	2144	2504	2864	3224	3584	3944
352	712	1072	1432	1792	2152	2512	2872	3232	3592	3952
360	720	1080	1440	1800	2160	2520	2880	3240	3600	3960
368	728	1088	1448	1808	2168	2528	2888	3248	3608	3968
376	736	1096	1456	1816	2176	2536	2896	3256	3616	3976
384	744	1104	1464	1824	2184	2544	2904	3264	3624	3984
392	752	1112	1472	1832	2192	2552	2912	3272	3632	3992
400	760	1120	1480	1840	2200	2560	2920	3280	3640	4000
408	768	1128	1488	1848	2208	2568	2928	3288	3648	
416	776	1136	1496	1856	2216	2576	2936	3296	3656	
424	784	1144	1504	1864	2224	2584	2944	3304	3664	
432	792	1152	1512	1872	2232	2592	2952	3312	3672	
440	800	1160	1520	1880	2240	2600	2960	3320	3680	
448	808	1168	1528	1888	2248	2608	2968	3328	3688	
456	816	1176	1536	1896	2256	2616	2976	3336	3696	