

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

PAOLA DIAMANTE FERREIRA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO ACÚSTICO DE VIDROS DE
DIFERENTES TIPOS E COMBINAÇÕES, EM AMBIENTE
CONTROLADO, EM BANDA DE 1/1 OITAVA DE FREQUÊNCIA**

**CURITIBA
Abril – 2010**

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

PAOLA DIAMANTE FERREIRA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO ACÚSTICO DE VIDROS DE
DIFERENTES TIPOS E COMBINAÇÕES, EM AMBIENTE
CONTROLADO, EM BANDA DE 1/1 OITAVA DE FREQUÊNCIA**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Ciências Exatas e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Renato Barbieri

Co-Orientador: Prof. Dr. Nilson Barbieri

**CURITIBA
Abril – 2010**

Ao meu marido Vinicius, que em todos os momentos esteve ao meu lado me dando, através do seu suporte e amor incondicional, a certeza do sucesso.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo milagre desta conquista.

Aos meus pais, Hermes e Ana Maria, pelo amor incondicional.

Às minhas irmãs, Geniane e Carine, pelo incentivo e ao meu irmão Hermes pelas inúmeras vezes de auxílio nos experimentos.

Aos meus cunhados, Rafael, Jarbas, Carol e Fabrício e, também, aos meus sogros, Sergio e Sara, pelo total apoio.

À empresa Conforto Ambiental que possibilitou o local e equipamentos para a prática deste trabalho.

Ao professor PhD. João Elias Abdala Filho, amigo e eterno mestre, pelas longas conversas tranquilizadoras.

Ao meu orientador professor Dr. Renato Barbieri e co-orientador professor Dr. Nilson Barbieri pelos brilhantes apontamentos e pela preocupação dedicada ao presente trabalho.

Finalmente, ao CAPES que financiou o presente estudo.

RESUMO

O presente trabalho visa à análise do desempenho acústico de diferentes tipos e combinações de vidros analiticamente, bem como, experimentalmente, quando submetidos a ruído rosa em um ambiente controlado, para simulação *in situ*. A apreciação foi feita em bandas de 1/1 de oitava de frequência, com a utilização do equipamento SVAN 943, posicionado em três pontos diferentes dentro do ambiente mencionado. Através dos resultados obtidos, pode-se fazer a comparação do desempenho acústico dos diferentes tipos de vidros testados com os resultados analíticos e também entre eles. Ainda, preliminarmente aos testes no ambiente controlado, foram realizadas medições do ruído urbano nos Eixos Estruturais do município de Curitiba, a fim de se caracterizar o espectro da frequência do local supracitado. Os resultados obtidos são bastante satisfatórios, já que com os dados das frequência predominantes no ruído urbano, adicionado da análise dos vidros testados, pode-se dimensionar, com um custo minimizado e desempenho otimizado, os vidros a serem utilizados em uma edificação. O trabalho também oferece a oportunidade de continuação de estudos correlatos à área envolvida, como por exemplo, o estudo do desempenho acústico de outros materiais usados na construção.

ABSTRACT

The present work sought the analysis of the acoustic acting of different types and combinations of glasses analytically as well as practically, when submitted to pink noise in a controlled atmosphere, for simulation *in situ*. The appreciation was made in bands of 1/1 of frequency octave, with the use of the equipment SVAN 943, positioned in three different points inside the mentioned atmosphere. Through the obtained results, the comparison of the acoustic acting of the different types of glasses tested with the analytical results and also among them could be made. Moreover, before the tests in the controlled atmosphere, measurements of the urban noise were accomplished in the Structural Axes of the municipal district of Curitiba, in order to characterize the spectrum of the frequency of the aforesaid place. The obtained results were a lot satisfactory, given that, with the data of the predominant frequency in the urban noise, added to the analysis of the tested glasses, it enables to scale, with a minimized cost and optimized acting, the glasses to be used in a construction. The work also offers the opportunity of continuation of connected studies with the involved area, as for instance, the study of the acoustic acting of other materials used in construction.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01 – Absorção Sonora	12
Figura 02 – Espectro de Frequência	14
Figura 03 – Curvas de Ponderação	14
Figura 04 – Zoneamento de Curitiba	21
Figura 05 – Vidro Monolítico	27
Figura 06 – Vidro Temperado	27
Figura 07 – Vidro Laminado	28
Figura 08 – Vidros Compostos	29
Figura 09 – Curva Típica para a Isolação Acústica com Vidros Simples	33
Figura 10 – Comparativo dos Resultados Experimentais e Analíticos da Eq(6) para Vidros Simples	35
Figura 11 – Modos de Vibração de Placas Retangulares	36
Figura 12 – Índice de Redução de Ruído para Vidro Simples de 4 mm	37
Figura 13 – Índice de Redução de Ruído para Vidro Simples de 8 mm	37
Figura 14 – Índice de Redução sonora para Janelas Acústicas com Vidros Duplos de 8 e 4 mm em Função da Espessura da Câmara de Ar	40
Figura 15 – TL(ω) para o Isolamento Acústico com Vidros Duplos de 3 mm com Espaçamento Variável	41
Figura 16 – Índice de Redução de Ruídos para Vidros Duplos 8(10)4	43
Figura 17 – Índice de Redução de Ruídos para Vidros Duplos 8(100)4	44
Figura 18 – Frequência de Coincidência para Janelas Acústicas com Vidros Duplos com Espaçamento de 12 mm	45
Figura 19 – Comparativo dos Resultado Experimentais com a solução Analítica para a Frequência de Coincidência em Painéis com Vidros Duplos	46
Figura 20 – Analisador de Frequência SVAN 943	47
Figura 21 – Analisador de Frequência SVAN 943	47
Figura 22 – Calibrador <i>Larson Davis</i>	48
Figura 23 – Pontos de Medição de Ruído Urbano	50
Figura 24 – Medição do Ruído Urbano	51
Figura 25 – Medição do Ruído Urbano	51
Figura 26 – Medição do Ruído Urbano	51
Figura 27 – Medição do Ruído Urbano	51
Figura 28 – Exemplo de Câmara para o Teste de Isolamento Acústico com Vidros	52
Figura 29 – Planta do Ambiente Controlado Utilizado nas Medições	54
Figura 30 – Corte do Ambiente Controlado Utilizado nas Medições	54
Figura 31 – Detalhe das Paredes do ambiente Controlado	55
Figura 32 – Detalhe da Laje	55
Figura 33 – Abertura para Fixação da Amostra	56
Figura 34 – Espuma para Vedação	56
Figura 35 – Detalhe da Espuma de Vedação nas Cantoneiras	57
Figura 36 – Transporte dos Vidros	57
Figura 37 – Ventosas para Auxiliar o Transporte dos Vidros	57
Figura 38 – Fixação das Cantoneiras	57
Figura 39 – Tempo de Reverberação	58
Figura 40 – Ruído de Fundo do Ambiente Controlado	59
Figura 41 – Média das Frequências do Ruído Urbano (08h00 – 08h30)	60
Figura 42 – Média das Frequências do Ruído Urbano (12h00 – 12h45)	61
Figura 43 – Média das Frequências do Ruído Urbano (18h00 – 18h30)	61

Figura 44 – Média das Frequências do Ruído Urbano (Todos os Horários)	62
Figura 45 – Índice de Redução de Ruído Obtido Experimentalmente do Vidro Monolítico de 4 mm	69
Figura 46 – Índice de Redução de Ruído Obtido Experimentalmente do Vidro Monolítico de 6 mm	70
Figura 47 – Índice de Redução de Ruído Obtido Experimentalmente do Vidro Temperado de 6 mm	71
Figura 48 – Índice de Redução de Ruído Obtido Experimentalmente do Vidro Laminado de 6 mm	72
Figura 49 – Índice de Redução de Ruído Obtido Experimentalmente do Vidro Laminado de 8 mm	73
Figura 50 – Índice de Redução de Ruído Obtido Experimentalmente do Vidro Duplo Laminado de 6 mm, Câmara de Ar de 8 mm e Laminado de 4 mm	74
Figura 51 – Índice de Redução de Ruído Obtido Experimentalmente do Vidro Duplo Laminado de 8 mm, Câmara de Ar de 6 mm e Laminado de 4 mm	75
Figura 52 – Resultados Experimentais do Índice de Redução de Ruído de Cada Tipo e Combinação de Vidro com Emissão de Ruído a 75 dBA	76
Figura 53 – Resultados Experimentais do Índice de Redução de Ruído de Cada Tipo e Combinação de Vidro com Emissão de Ruído a 90 dBA	77

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 01 – Atenuação da Percepção Sonora	15
Tabela 02 – STC para Materiais de Construção Mais Usados	17
Tabela 03 – Valores Médios para o Leq de Curitiba	20
Tabela 04 – Níveis de Som para Conforto	23
Tabela 05 – Desempenho Acústico de Janelas de Diferentes Materiais	25
Tabela 06 – Categorias de Controle de Ruídos para Janelas	25
Tabela 07 – Comparativo Entre os Vidros	30
Tabela 08 – Redução Sonora com Vidro Monolítico	31
Tabela 09 – Redução Sonora com Vidro Laminado	31
Tabela 10 – Redução Sonora com Vidros Compostos	31
Tabela 11 – Redução Sonora com Janelas Duplas (faixas secundárias)	31
Tabela 12 – Pontos de Medição do Ruído Urbano	49
Tabela 13 – Vidros Ensaaiados e Siglas Utilizadas	54
Tabela 14 – Níveis Médios de Ruído de Curitiba	62
Tabela 15 – Frequências Naturais de Painéis Simples Pelo Método Analítico	63
Tabela 16 – Continuação Frequências Naturais de Painéis Simples pelo Método Analítico	63
Tabela 17 – Frequências Críticas de Painéis Simples Pelo Método Analítico	63
Tabela 18 – Frequências de Ressonância de Painéis Duplos Pelo Método Analítico ...	64
Tabela 19 – NPSs de Referência (dBA)	64
Tabela 20 – NPSs de Referência Corrigidos (dBA)	64
Tabela 21 – NPSs Medidos, em dBA, para Cada Tipo e Combinação de Vidros com Emissão de 60 dBA	65
Tabela 22 – NPSs Medidos, em dBA, para Cada Tipo e Combinação de Vidros com Emissão de 75 dBA	65
Tabela 23 – NPSs Medidos, em dBA, para Cada Tipo e Combinação de Vidros com Emissão de 90 dBA	65
Tabela 24 – NPSs, em dBA, Corrigidos para Cada Tipo e Combinação de Vidros com Emissão de 60dBA	66
Tabela 25 – NPSs, em dBA, Corrigidos para Cada Tipo e Combinação de Vidros com Emissão de 75dBA	66
Tabela 26 – NPSs, em dBA, Corrigidos para Cada Tipo e Combinação de Vidros com Emissão de 90dBA	66
Tabela 27 – Índice de Redução, em dBA, para Cada Tipo e Combinação de Vidros com Emissão de 75 dBA	67
Tabela 28 – Índice de Redução, em dBA, para Cada Tipo e Combinação de Vidros com Emissão de 90 dBA	67
Tabela 29 – Faixas de Frequência para 1/1 de Oitava	68

LISTA DE SÍMBOLOS

a	comprimento da placa
b	largura da placa
c	velocidade do som
c_B	velocidade da onda de propagação
D	rigidez de flexão
d	distância entre os vidros
E	módulo de Young
f_c	frequência crítica
f_{ij}	frequência natural
f_k	frequência de reflexão no interior da câmara de ar
f_L	frequência limite
f_{res}	frequência de ressonância
H	espessura do painel
k	constante da mola
L_1	nível média de pressão sonora na câmara de emissão
L_2	nível média de pressão sonora na câmara de recepção
L_{eq}	nível sonoro equivalente em dBA
L_f	nível de pressão sonora do ruído de fundo
L_t	nível de pressão sonora da medição
m	densidade por unidade de área
p_o	pressão de referência
p_{rms}	pressão efetiva
R	índice de redução sonora
T_r	tempo de reverberação
TL	perda de transmissão sonora
TL_1	perda de transmissão sonora do painel 1
TL_2	perda de transmissão sonora do painel 2
V	volume da câmara de recepção
ν	coeficiente do Poisson
ρ	densidade
ρ_o	densidade do ar
ϕ	ângulo de incidência
ω	frequência

SUMÁRIO

Capítulo 1 - Introdução	10
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica.....	12
2.1. Grandezas Acústicas.....	12
2.1.1. Isolamento, Isolação e Absorção.....	12
2.1.2. Frequência e Nível de Pressão Sonora.....	13
2.1.3. Curvas de Atenuação.....	14
2.1.4. Frequência Crítica ou de Ressonância.....	16
2.1.5. Redução Sonora e Perda por Transmissão (TL) ou Índice de Redução Sonora.....	16
2.1.6. Ruído de Fundo	16
2.1.7. Classe de Transmissão Sonora (<i>Sound Tranmission Class</i>).....	17
2.1.8. Ruído Branco e Ruído Rosa.....	17
2.1.9. Tempo de Reverberação.....	18
2.2. Ruído Urbano.....	18
2.2.1. Crescimento Urbano e Aumento do Ruído	18
2.3. Janelas	23
2.4. Vidros	26
2.4.1. Painel Simples	32
2.4.2. Painel Duplo	38
2.4.2.1. Frequência de Ressonância para o Sistema Massa-ar-massa	38
2.4.2.2. Índice de Redução de Ruídos para Painéis Duplos	42
2.4.2.3. A Frequência de Coincidência.....	44
Capítulo 3 – Análises Experimentais	47
3.1. Dosímetro e Analisador de Frequência	47
3.2. Calibrador	48
3.3. Descrição da Metodologia das Medições do Ruído Urbano	48
3.4. Descrição do Ambiente Controlado	51
3.5. Descrição da Metodologia das Medições em Ambiente Controlado.....	56
Capítulo 4 – Resultados	60
4.1. Resultados do Ruído Urbano.....	60
4.2. Cálculo das Frequências Críticas e Naturais pelo Método Analítico.....	63
4.3. Medições e Resultados Experimentais.....	64
4.4. Comparativo dos Resultados: Experimental x Analíticos	68
4.5. Comparativo dos Resultados Experimentais entre os Vidros.....	75
Capítulo 5 – Conclusão.....	79
Referências Bibliográficas.....	81

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO

O ruído ou perturbação sonora tornou-se parte da vida urbana em decorrência do crescimento desordenado da população e também pelo grande aumento do número de veículos. Desde então, a poluição sonora e suas consequências na qualidade de vida passaram a ser foco de estudos realizados em diversas partes do mundo.

Para exemplificar, em 1989, na Suécia, no Congresso Mundial sobre Poluição Sonora, o assunto passou a ser considerado questão de saúde pública. Hoje, depois da poluição do ar e da água, o ruído é o problema ambiental que afeta o maior número de pessoas prejudicando o sossego, a segurança e a saúde.

Muitas vezes não é dada a devida importância à poluição sonora, pois é um risco invisível encarado somente como um desconforto. Souza (2000) classifica o ruído como um tipo de poluição tóxica, equiparando-o a emissões de SO₂, NO_x, NH₃, O₃ na baixa atmosfera, CO, agroquímicos e radiação. Sua abrangência é continental, ou seja, atinge toda a população, devido à rápida propagação da onda sonora e das inúmeras fontes – máquinas, fábricas, trânsito, equipamentos etc.

Quando o ouvido humano é submetido a níveis de pressão sonora superiores a 85dB(A) – o que comumente acontece em ambientes industriais – inúmeros danos à saúde podem ocorrer, tais como: aumento nos níveis de estresse, alterações no estado emocional, diminuição da concentração, hipertensão, constrição dos vasos sanguíneos, medo, alteração de atividade estomacal, entre outros.

A audição pode ser considerada o mecanismo de percepção mais sensível do homem, o que a torna alvo de inúmeras pesquisas. Portanto, o conforto acústico não deve ser encarado apenas como fator ambiental, mas como um direito do cidadão. Estudos científicos demonstram que uma pessoa consegue ter relaxamento durante o sono, somente em níveis de ruído de, no máximo, 39dB(A). Já a Organização Mundial da Saúde estabelece como 55dB(A) o nível médio de ruído para uma pessoa viver bem (BARING, 1990).

Atualmente, existem normas técnicas que determinam níveis de pressão sonora máximos em diferentes ambientes – residenciais, industriais, escolares, hospitalares – para se obter o mínimo de conforto. Por este motivo, no Brasil, a ineficiência do isolamento acústico pode ser considerada como defeito de construção, quando os níveis de transmissão de ruído forem superiores aos limites traçados pela NBR 10.152 – Níveis de Ruído para Conforto Acústico.

Novas tecnologias aplicadas a materiais já bastante conhecidos, como o vidro, ajudariam a criar as tendências da arquitetura moderna: fachadas-cortina e pele-de-vidro nas edificações (BLINDEX, 1999). Mas essas estruturas trazem consigo problemas sérios no que diz respeito ao conforto térmico e acústico dos ambientes.

Somando a preocupação com o conforto e bem estar da população no tocante à poluição sonora, tem-se a necessidade do desenvolvimento de sistemas construtivos que visem um bom isolamento sonoro e, conseqüentemente, proporcionem bem estar.

Contudo, deve-se abordar o fato de que os custos de uma edificação com alto padrão de conforto acústico ainda são elevados comparando-se com construções sem o devido isolamento acústico. Sob esse ponto de vista, percebe-se a necessidade do desenvolvimento de materiais e técnicas que venham a reduzir o custo de tais obras. Ainda nesse foco, também se pode considerar a desvalorização imobiliária, pois as habitações são afetadas por ruídos incômodos e muitas vezes insalubres.

Segundo Baring (1990), para que engenheiros e arquitetos futuramente projetem edificações que atendam às normas, garantindo a qualidade de vida dos usuários em centros urbanos, deve-se, rapidamente, aprofundar estudos na área acústica. E, apesar dessa afirmação ter sido feita há algum tempo, ainda deve-se considerá-la, pois os projetos atuais não atendem as normas acústicas para edificações.

1.1 - Objetivos

Para isso, este trabalho tem o objetivo de analisar a perda de transmissão sonora em diferentes tipos e combinações de vidros, em bandas de oitava de frequência, comparando-os para auxílio da escolha do vidro pelo projetista em relação ao desempenho acústico. E, também, comprovar que um ambiente, cujos volumes das salas de emissão e recepção são menores aos estipulados por norma, pode fornecer resultados confiáveis.

Os testes foram realizados em um ambiente controlado projetado pela autora desse estudo e construída com o apoio da empresa Conforto Ambiental Produtos de Alumínio Ltda. Os dados obtidos poderão embasar projetos em qualquer ambiente, proporcionando a minimização de custos.

Como objetivo secundário, foram realizadas medições do ruído urbano em pontos selecionados nos Eixos Estruturais de Curitiba, a fim de se caracterizar o espectro de frequência do ruído. Dessa forma, as bandas de frequência que mais contribuem para o ruído urbano serão foco da análise dos resultados.

Capítulo 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

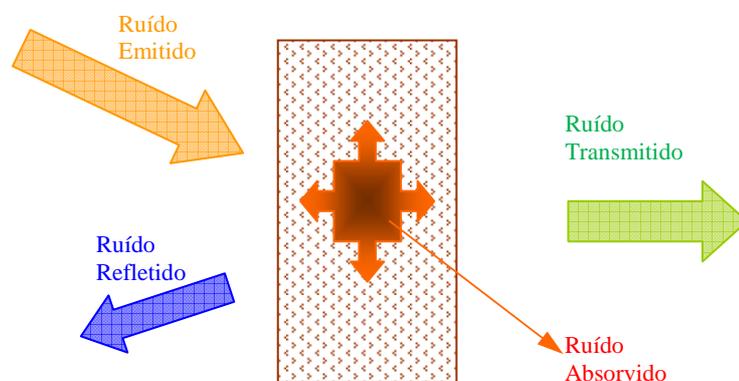
2.1. Grandezas Acústicas

Esse capítulo contém a explicação de conceitos básicos comumente utilizados em estudos acústicos, para um melhor entendimento desta dissertação.

2.1.1. Isolamento, Isolação e Absorção

Os termos isolamento, isolação e absorção sonora têm definições muito distintas, porém, facilmente confundidas. Sendo assim, nos tópicos abaixo serão apresentados alguns esclarecimentos:

- Isolamento: o termo é usado quando se trata de ambientes constituídos de diferentes elementos construtivos. Para se chegar ao valor total do isolamento de um recinto, soma-se a impermeabilidade ao som de cada elemento (TAVARES, 2000);
- Isolação: usa-se esse termo para especificar o desempenho acústico de um único elemento construtivo (TAVARES, 2000);
- Absorção: quando uma onda sonora encontra um obstáculo, ocorre fenômeno físico semelhante ao da passagem da luz quando há mudança de meio, ou seja, uma parte da onda é refletida, uma parte é transmitida e outra absorvida. A diferença entre o ruído emitido e a soma do ruído refletido e transmitido é o valor absorvido pelo material. Portanto, pode-se dizer que a absorção sonora é a transformação de energia mecânica em energia térmica (FERNANDES, 2002) (*Figura 01*).



*Figura 01 – Absorção Sonora.
Fonte: Da Autora.*

2.1.2. Frequência e Nível de Pressão Sonora

A faixa de frequências que o ser humano pode perceber está entre 20 e 20.000 Hz, mas o ouvido as atenua de forma diferente. Esse assunto será melhor explanado a seguir no item Curvas de Atenuação.

Quando o ruído é gerado, diferentes tipos de onda o compõe, portanto, ele pode ser desmembrado para identificar como cada frequência contribui. A esse gráfico dá-se o nome de espectro. (Figura 02).



Figura 02 – Espectro de Frequência.
Fonte: Da Autora.

As frequências podem estar apresentadas entre dois componentes de onda senóide (bandas de oitava) ou com uma relação de aproximadamente 1,26 com a faixa de oitavas (bandas de um terço de oitavas) (LARANJA, 2000). Para análise dos vidros, neste trabalho, serão utilizadas bandas de oitavas de frequência, cujas bandas centrais são: 31,5 Hz, 63 Hz, 125 Hz, 500 Hz, 1.000 Hz, 2.000 Hz, 4.000 Hz, 8.000 Hz e 16.000 Hz.

Somando a intensidade com que cada uma dessas bandas de frequência contribui tem-se o nível de pressão sonora global (NPS). Segundo Laranja (2000), NPS “é o valor RMS das flutuações de pressão sobre e abaixo da pressão atmosférica, devido a uma onda de som”, e pode ser calculado através da equação:

$$NPS = 20 \log (p_{rms} / p_o) \quad [dB] \quad (1)$$

em que:

p_0 : pressão de referência, que é igual a $2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$ na frequência de 1.000 Hz e que corresponde ao limiar da audição humana e, p_{rms} é a pressão efetiva.

A unidade adotada para a medição do NPS é o decibel (dB), que em função de sua grandeza é utilizada em uma escala logarítmica.

2.1.3. Curvas de Atenuação

O ouvido coleta as vibrações sonoras e as transforma em pulsos elétricos. É um órgão extremamente sensível que consegue captar pequenas quantidades de energia. Como essa captação não cessa, nem mesmo durante o sono, essa estrutura mecânica protege-se atenuando os estímulos externos.

Para cada frequência o ouvido humano responde de forma diferente. A sensibilidade é maior para frequências na faixa de 2 kHz a 5 kHz. Essa diferença de percepção é melhor observada para baixos NPS. Por esse motivo, os equipamentos que medem os níveis de pressão sonora utilizam as curvas de ponderação (*Figura 03 e Tabela 01*), com o objetivo de simular o ouvido humano (GERGES, 1992).

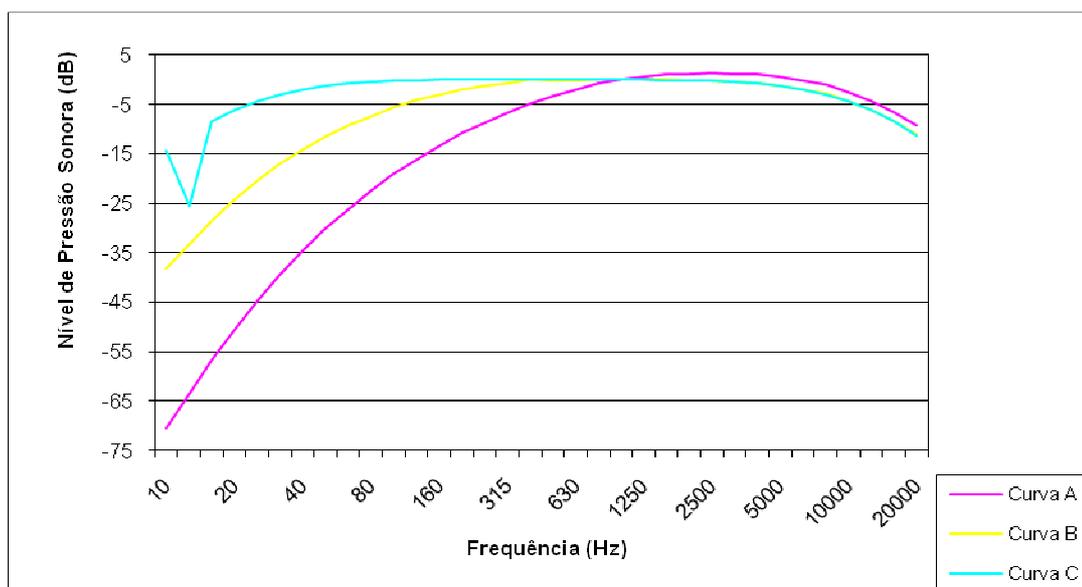


Figura 03 - Curvas de Ponderação
Fonte: Gerges (1992).

Tabela 01 – Atenuação da Percepção Auditiva A, B e C.
 Fonte : Gerges (1992).

Frequência	Curva A	Curva B	Curva C
10	-70,4	-38,2	-14,3
12,5	-63,4	-33,2	-25,6
16	-56,7	-28,5	-8,5
20	-50,5	-24,2	-6,2
25	-44,7	-20,4	-4,4
31,5	-39,4	-17,1	-3
40	-34,6	-14,2	-2
50	-30,2	-11,6	-1,3
63	-26,2	-9,3	-0,8
80	-22,5	-7,4	-0,5
100	-19,1	-5,6	-0,3
125	-16,1	-4,2	-0,2
160	-13,3	-3	-0,01
200	-10,9	-2	0
250	-8,6	-1,3	0
315	-6,6	-0,8	0
400	-4,8	-0,05	0
500	-3,2	-0,3	0
630	-1,9	-0,1	0
800	-0,8	0	0
1000	0	0	0
1250	0,6	0	0
1600	1	0	-0,1
2000	1,2	-0,1	-0,2
2500	1,3	-0,2	-0,3
3150	1,2	-0,4	-0,5
4000	1	-0,7	-0,8
5000	0,5	-1,2	-1,3
6300	-0,1	-1,9	-2
8000	-1,1	-2,9	-3
10000	-2,5	-4,3	-4,4
12500	-4,3	-6,1	-6,2
16000	-6,6	-8,4	-8,5
20000	-9,3	-11,1	-11,2

“O circuito A aproxima-se das curvas de igual audibilidade para baixos NPSs. Os circuitos B e C são análogos ao circuito A, porém para médios e altos NPSs, respectivamente. Hoje, entretanto, somente o circuito A é largamente usado, uma vez que os circuitos B e C não fornecem boa correlação em testes subjetivos.” (GERGES, 1992, p.53).

Observando o gráfico das curvas de atenuação, pode-se notar que, quando as medições de ruído são feitas utilizando as duas escalas “A” e “C”, se a diferença entre os dois valores for grande, há predominância de ruído com baixa frequência.

Quando deseja-se realizar uma medição sem que a simulação do ouvido humano aconteça, então diz-se que a medida é linear.

2.1.4. Frequência Crítica ou de Ressonância

Quando a frequência do ruído sincroniza-se com a frequência natural do material ocorre a ressonância, ou seja, aumenta a amplitude de vibração do material e a transmissão do ruído é alta (GERGES, 1992).

2.1.5. Redução Sonora e Perda por Transmissão (TL) ou Índice de Redução Sonora (R)

Quando é colocada uma barreira entre dois ambientes, este irá proporcionar uma perda de transmissão (TL) ou um índice de redução sonora (R) devido a nova combinação estrutural. Se esse valor, que é dado em decibel (dB), é somado ao da absorção acústica da sala de recepção, então tem-se a redução sonora (LARANJA, 2000).

2.1.6. Ruído de Fundo

Existem várias definições para ruído de fundo. Laranja (2000, p. xxii) define ruído de fundo como “o total de todo ruído em um sistema ou situação, independente da presença do sinal desejado. Em medidas em geral, no sentido exato, o ruído de fundo significa ruído elétrico no sistema de medida.” Já o texto normativo TE-6 da ABNT (1991) determina o ruído de fundo sendo o “conjunto de sons e ruídos que ocorrem conjuntamente com o fato sonoro objeto de interesse ou consideração específica.” A NBR 8735/85 descreve ruído de fundo como “conjunto dos ruídos provenientes de todas as fontes parasitas, num sistema destinado à produção, transmissão detecção, medição ou registro de um sinal.”

Segundo Gerges (1992), já que o ruído de fundo não pode ser eliminado, determina-se ΔL , ou seja, a diferença entre o NPS do ruído de fundo (L_f) e o NPS da medição (L_t), com posse desse valor, as seguintes considerações devem ser feitas:

- $\Delta L \leq 3$ dB: a medição não pode ser considerada, pois o ruído de fundo é excessivo;

- $3 \text{ dB} < \Delta L < 10 \text{ dB}$: define-se o NPS corrigido com a seguinte equação:

$$\text{NPS} = 10 \log [10^{L_t/10} - 10^{L_f/10}] \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

- $\Delta L \geq 10 \text{ dB}$: o ruído de fundo não interfere na medição.

2.1.7. Classe de Transmissão Sonora (*Sound Transmission Class*)

Através da comparação da perda de transmissão sonora nas bandas entre 125 e 4000Hz, medidas em banda de 1/3 de oitava, determina-se um único número que determina a classe de transmissão sonora (STC) do material (*Tabela 02*).

*Tabela 02 – STC para Materiais de Construção mais Usados.
Fonte: Gerges (1982).*

STC	Condições de Privacidade
40	Parede de tijolos de 4 polegadas
42	Parede de bloco de concreto de 6 polegadas
58	Parede de concreto armado de 12 polegadas
65	Parede dupla: tijolos de 8 polegadas com câmara de ar de 2 polegadas e tijolos de 6 polegadas
25	Vidro de ¼ polegada
30	Madeira compensada de ¾ polegada
35	Aço ¼ polegada

2.1.8. Ruído Branco e Ruído Rosa

O ruído rosa tem, para todas as bandas de frequência, a mesma contribuição de energia em dB. A diferença para o ruído branco, é que este último emite somente as frequências audíveis (FERNANDES, 2002).

2.1.9. Tempo de Reverberação

Tem-se um estado estacionário quando a energia emitida pela fonte é igual a energia absorvida pelas paredes do ambiente. Se a absorção é alta, então a estabilização é mais rápida (GERGES, 1992).

Quando uma emissão de ruído é interrompida repentinamente, a energia sonora é absorvida pelo ambiente e o seu NPS diminui, mas não imediatamente, pois o ruído ainda é refletido dentro da sala. O tempo necessário para que essa queda seja de 60 dB, em relação ao NPS inicial, e forme-se uma nova onda estacionária, é o tempo de reverberação do ambiente (LARANJA, 2000).

2.2. Ruído Urbano

Nesse capítulo será explanado como e porque o ruído tem crescido no decorrer dos anos e quais as implicações desse aumento na qualidade de vida dos cidadãos.

2.2.1. Crescimento Urbano e Aumento do Ruído

As estimativas da população urbana mostram que as cidades vêm crescendo em grande escala. Essa explosão demográfica se iniciou principalmente nos anos 40, década em que se desenvolveu a industrialização brasileira.

Esse crescimento ocorreu sem um planejamento adequado, pois, nessa época, a preocupação principal se desviava do controle de ocupação e era direcionada ao desenvolvimento econômico. Este ciclo funciona da seguinte forma: a economia cresce, surgem indústrias, criam-se novas vagas de emprego, aumenta a população urbana à procura dessas vagas, por consequência, é necessário maior número de veículos coletivos e particulares trafegando, o que gera rotatividade de dinheiro que, completando o ciclo, faz a economia crescer.

Mas, este avanço tão almejado por economistas e governantes traz consigo queda da qualidade de vida gerada pelo surgimento de inúmeros problemas ambientais: poluição do ar, excesso de resíduos sólidos, contaminação das águas, poluição sonora, entre outros. Hoje, a degradação ambiental tornou-se um problema constante na vida de todos que habitam tais áreas. E a poluição sonora também atinge a população nesse sentido.

Outro motivo para o aumento do ruído urbano é o distanciamento das áreas residenciais, comerciais e de lazer, o que faz aumentar a demanda por transportes motorizados, que é uma das fontes de ruído que produz maior incômodo à população.

Somado ao crescimento dos centros urbanos, existe o fato de que, no Brasil, a maior parte do transporte de mercadorias é feita por estradas, o que faz novamente subir o tráfego de veículos pesados nas cidades (BARING, 1990).

No caso de Curitiba, houve um crescimento acelerado desde 1966, quando da aprovação do Plano Diretor de Urbanismo, até o Censo de 2000. À época, Curitiba tinha cerca de 600.000 habitantes e uma taxa de crescimento de 7,2% aa. No ano de 2000, a cidade apresenta uma população de 1.586.898 habitantes e uma taxa de crescimento de 1,82% aa, tendo uma área construída de aproximadamente 47 milhões de m² (ROSSI, 2004).

A ordenação no processo de desenvolvimento da cidade começou em 1965, com a criação da COHAB-CT – Companhia de Habitação Popular de Curitiba, do IPPUC – Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba (IPPUC, 2004) e, com o novo plano diretor, o Plano Serete, que tinha como objetivos ordenar a circulação, ordenar a ocupação do solo através de um zoneamento adequado e a preservação do centro histórico, dentre outros. Sendo assim, foram implantados os Eixos Estruturais, direcionando o crescimento linear da cidade, nos sentidos Leste-Oeste e Norte-Sul, por meio da concentração de infra-estrutura, serviços e habitação e por meio de um sistema trinário de circulação, composto por duas vias rápidas para veículos e uma via central exclusiva para ônibus expresso. Estes Eixos propiciavam novas alternativas para a habitação em alta densidade, comércio de médio porte, prestação de serviços e permitiam a implantação de um sistema de transporte de massa adaptável ao progressivo adensamento. O sistema de transporte serviria também como indutor do desenvolvimento urbano ao longo dos Eixos. (BORTOLI e KRÜGER, 2003). Ao longo destes, foi estabelecida uma faixa de zoneamento (zona estrutural – ZE), permitindo a construção de edifícios altos, gerando assim uma nova paisagem urbana. A tipologia das construções ao longo dos Eixos foi definida pelo plano Massa, que destina as áreas do térreo e mezanino dos edifícios para o comércio.

Após alguns anos, importantes alterações socioeconômicas são percebidas em Curitiba como o aumento do número de lojas e supermercados para satisfazer às necessidades da população, crescimento da frota de transportes coletivos e aumento do fluxo de veículos de abastecimento de mercadorias. Esse intenso tráfego provoca o incremento do ruído urbano (PREFEITURA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE, 1992) que está estritamente relacionado com os tipos e fluxos de veículos automotores que trafegam pelas vias da cidade.

Torna-se importante, nesse momento, que o monitoramento do ruído seja realmente monitorado por órgãos específicos vinculados à Prefeitura a fim de garantir um planejamento urbano voltado à qualidade de vida.

Em alguns pontos, mesmo os planejamentos recentes, deixam a desejar, como por exemplo, a reinauguração do Aeroporto Internacional Afonso Pena, na cidade de São José dos Pinhais, em 26 de julho de 1996, reformado para comportar aeronaves de grande porte como o Boeing 747. Tornou-se o oitavo maior aeroporto do país, atendendo mais de três milhões de passageiros por ano e tendo como rota de pousos e decolagens o centro de Curitiba, contribuindo muito com o aumento do ruído.

Não se tem em vista que o planejamento urbano futuro da cidade de Curitiba mostre alguma preocupação com os altos níveis de ruído. Existe em andamento o projeto de implantação do metrô, sendo uma grande parte de superfície, que seria construído acima das vias reservadas exclusivamente para ônibus dos eixos estruturais. Várias discussões estão surgindo no âmbito da poluição visual e do ar, mas praticamente nada tem se falado sobre a poluição sonora.

A figura 4 mostra o zoneamento da cidade de Curitiba de acordo com o estudo realizado por Zannin *et al* (2002). Neste estudo os autores realizaram a avaliação do nível de pressão sonora equivalente (L_{eq}) em diversos pontos da cidade e os resultados médios obtidos podem ser vistos na abaixo (*Tabela 03*).

*Tabela 03 – Valores Médios para o L_{eq} de Curitiba.
Fonte: Zannin et al (2002).*

	Região da Cidade de Curitiba				
	Residencial	Mista	Serviços	Centro	Industrial
Legislação Vigente (dBA)	55	60	65	70	70
Medido (média) (dBA)	75,6	76,4	74,0	73,4	78,1

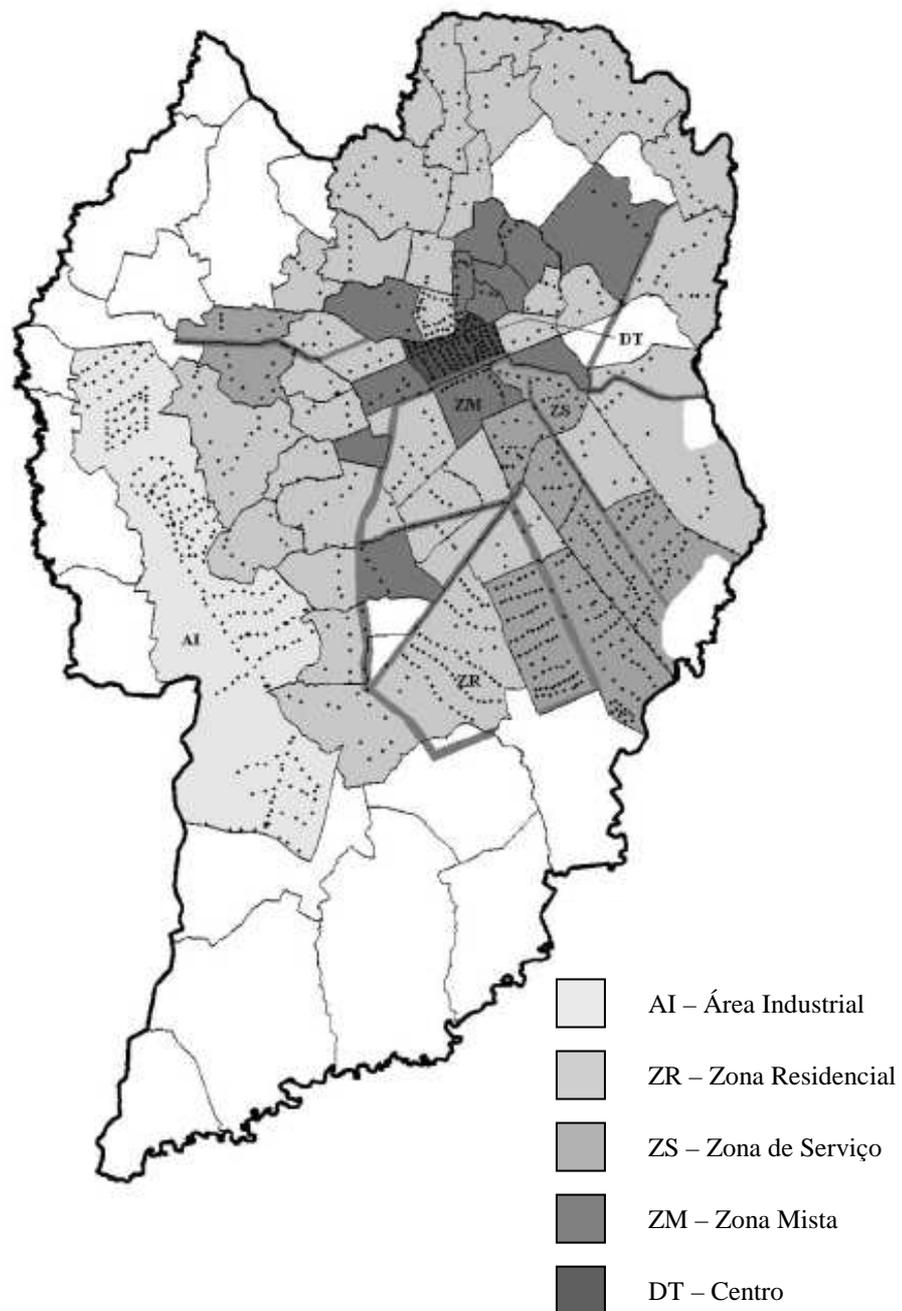


Figura 04 – Zoneamento de Curitiba.
 Fonte: Zannin et al (2002).

Embora este resultado seja interessante e mostre claramente que o ruído ambiental na cidade de Curitiba está completamente fora de controle, os autores não mostram as faixas de frequência onde os níveis de ruído são mais acentuados. Estes resultados no domínio da frequência são necessários para o projeto adequado do isolamento acústico utilizando janelas de vidros.

O ruído urbano não perturba somente a segurança, o sossego e a saúde dos moradores, afeta também economicamente uma região inteira, porque há uma desvalorização dos imóveis inseridos em áreas poluídas. Este problema também não pode ser resolvido vedando ou diminuindo as dimensões das janelas, pois iria comprometer a iluminação natural e a ventilação, e, dessa forma, aumentariam os custos com energia elétrica (BARING, 1990).

Considerando que nem sempre é possível isolar a fonte do ruído – melhor opção de tratamento – seja ela um motor ou um vizinho barulhento, moradores investem em soluções defensivas, ou seja, fazem obras na residência com o objetivo de não permitir que o ruído seja transmitido para o interior. Mesmo assim, as cobranças de medidas para o controle do ruído não podem deixar de existir. Deve-se exigir dos órgãos responsáveis o devido afastamento dos zoneamentos residenciais, comerciais e industriais e, também, o cumprimento das normas que determinam níveis sonoros máximos permitidos dentro e fora de ambientes (Tabela 04).

Tabela 04 - Níveis de Som para Conforto
Fonte: NBR 10.152.

LOCAIS	dB(A)	Curvas NC
Hospitais		
Apartamentos, Enfermarias, Berçários, Centros Cirúrgicos	35 -45	30 -40
Laboratórios, Áreas para uso público	40 - 50	35 -45
Serviços	45 -55	40 -50
Escolas		
Bibliotecas, Salas de música, Salas de desenho	35 -45	30 - 40
Salas de aula, Laboratórios	40 -50	35 - 45
Circulação	45 - 55	40 - 50
Hotéis		
Apartamentos	35 - 45	30 - 40
Restaurantes, Salas de estar	40 - 50	35 - 45
Portaria, Recepção, Circulação	45 - 55	40 - 50
Residências		
Dormitórios	35 - 45	30 - 40
Salas de estar	40 - 50	35 - 45
Auditórios		
Salas de concerto, Teatros	30 - 40	25 - 30
Salas de Conferências, Cinemas, Salas de uso múltiplo	35 - 45	30 - 35
Restaurantes	40 - 50	35 - 45
Escritórios		
SALAS DE REUNIÃO	30 - 40	25 - 35
Salas de gerência, Salas de projetos e de administração	35 - 45	30 - 40
Salas de computadores	45 - 65	40 - 60
Salas de mecanografia	50 - 60	45 - 55
Igrejas e Templos	40 - 50	35 - 45
Locais para esportes		
Pavilhões fechados para espetáculos e ativ. esportivas	45 - 60	40 - 55

Estudos realizados pela Universidade de Amsterdã mostram evidências de que a “estimulação cardíaca” durante o sono está fortemente ligada ao nível de ruído. A frequência cardíaca varia de acordo com as características do barulho que está perturbando o indivíduo durante o sono. Isso ocorre mesmo que ele não desperte. (HOFMAN *et al*, 1995). Portanto, quando é feito o projeto para as edificações, os ambientes devem ter um desempenho considerável no que diz respeito ao conforto acústico. Os níveis de ruído máximos e toleráveis devem estar de acordo com a norma NBR 10.152 (*Tabela 04*), mas o que realmente acontece é que, tanto construtores como proprietários, a ignoram totalmente.

Embasados por essa norma, proprietários de imóveis podem exigir da construtora um laudo acústico da edificação comprovando que os níveis de ruído estão adequados. Desta forma, a lei seria cumprida e deixaria de ser responsabilidade do cliente arcar com gastos para isolamento dos ambientes.

Mas o que de fato ocorre é que as edificações brasileiras têm um péssimo isolamento acústico, tanto para fachadas quanto para paredes internas. Os elementos determinantes são portas e principalmente janelas que não apresentam absorção sonora suficiente para assegurar o conforto acústico do usuário. (KRÜGER e ZANNIN, 2006)

2.3. Janelas

As características de diferentes tipos de janelas, assim como o desempenho exigido pelas normas serão comentadas neste capítulo.

O ruído que incide em um obstáculo procura a passagem que ofereça menor resistência. Quando se trata da fachada, a janela, comparada aos materiais que compõem a parede, é o elemento que possui menor isolamento sonoro, deixando que o som seja transmitido com maior facilidade, principalmente quando os cuidados necessários na instalação não são tomados.

A iluminação e ventilação parecem ser uma antítese ao conforto acústico, pois, já que a janela é o elemento fraco da fachada, quanto maior o tempo de permanência da janela fechada e menor a sua área, maior será o isolamento acústico, mas para melhor iluminação a área deve ser maior e para ventilação a janela aberta é essencial. Portanto, esse deve ser o ponto de partida para o cálculo do dimensionamento, para a definição do material e para a escolha da tipologia das esquadrias, adequando as três funções.

Muitos projetos para o desenvolvimento dessa área tão importante para a construção civil foram realizados, com esforço para o incremento de novos *design* focando-se

em seguir tendências, mas, sem dúvida, o desempenho acústico foi deixado de lado. Sempre que se planeja uma janela para uma edificação pensa-se em iluminação, ventilação e estética, mas também é necessário que o engenheiro ou arquiteto responsável pela escolha, tenha um amplo conhecimento do ambiente acústico em que estará inserida.

No mercado atual, a variedade de materiais e tipologias das esquadrias é imensa, por isso é necessário um estudo atencioso do projetista para especificar as janelas que serão instaladas. A NBR 10.821 – Caixilhos para Edificações – Janelas (ABNT 1989), traz outras funções que a janela deve desempenhar, além da iluminação e ventilação:

- Durabilidade;
- Economia;
- Estanqueidade à água da chuva;
- Estanqueidade a insetos e poeiras;
- Estanqueidade ao ar;
- Facilidade de manuseio;
- **Isolação sonora;**
- Manutenção;
- Resistência a cargas de ventos;
- Resistência aos esforços de uso.

Mesmo após atender a todos esses quesitos funcionais, a janela ainda deve suprir itens como a estética da construção e a privacidade dos ocupantes em relação ao mundo externo. Para que o projetista possa fazer a opção das esquadrias, o fabricante deve fornecer todos os dados com relação as exigências da norma certificadas em laboratório.

Duas questões são cruciais para a recomendação da janela correta, do ponto de vista acústico: características das fontes sonoras existentes e futuras e o cômodo da habitação onde será instalada. Caracterizar a fonte é o primeiro problema que se encontra, pois dificilmente tem-se um espectro de frequência do ambiente e, mesmo se o conseguir, não existe literatura a ser consultada que indica o desempenho acústico de janelas e vidros frequência a frequência. As tabelas 05 e 06 mostram as categorias que as janelas se enquadram e o desempenho acústico de janelas de diferentes materiais, mas não explicam se têm o desempenho necessário nas faixas de frequência da fonte a ser isolada.

Tabela 05 – Desempenho Acústico de Janelas de Diferentes Materiais.
Fonte: Vue Windows.

Material da Esquadria da Janela Analisada	Características	R (dB)
Madeira	Vidro monolítico de 3 mm	19,1
Alumínio		17,8
Ferro		21,1
PVC		20

Tabela 06 – Categorias de Controle de Ruídos para Janelas.
Fonte: Vue Windows.

Categorias de Controle de Ruído	Coefficiente de Isolamento medido <i>in situ</i> ISO 717-1 (R)	Coefficiente de Isolamento medido em laboratório ISO 717-1 (R)
1	25 – 29	≥ 27
2	30 – 34	≥ 32
3	35 – 39	≥ 37
4	40 – 44	≥ 42
5	45 – 49	≥ 47
6	≥ 50	≥ 52

O indicador de desempenho STC (Classe de Transmissão Sonora) determina que quanto maior o seu valor, maior será a eficiência na atenuação sonora. Entretanto o desempenho acústico das janelas pode ser reduzido, caso a montagem da esquadria em si ou a instalação em obra não forem realizadas cumprindo os requisitos dos fabricantes. Por exemplo, quando a vedação de todas as juntas da esquadria ou da janela com a parede não é feita corretamente, resulta em pequenas aberturas que permitirão a entrada de ruído. “Uma abertura de 1% da área total provoca uma redução da perda de transmissão (TL) de 30 para 19,6 dB, ou seja, uma redução de 10,4 dB” (GERGES, 1992, p. 211). Sem dúvida o tipo de material da janela também influencia no desempenho acústico.

Também deve-se dar atenção para a possibilidade de ressonância, que ocorrerá quando o ruído emitido tiver a mesma frequência que a frequência natural da janela ou do vidro, deixando o som passar como se a barreira praticamente não existisse.

Tendo consciência de tudo isto, também faz-se necessário o estudo dos materiais existentes no mercado para que os novos projetos de fachadas atendam às

recomendações das normas, e, dessa maneira, garantam o bem estar e economia dos proprietários de imóveis nas grandes cidades.

Novas tecnologias vêm surgindo na área de acústica, como exemplo, a multinacional Alcoa Alumínio S.A. lançou uma linha de janelas no Brasil, em 2003, chamada Linha Fórmula. Todo o projeto foi desenvolvido na Itália priorizando o conforto térmico e acústico. O sistema *Thermal Break*[®] foi uma das evoluções apresentadas, que consiste em um perfil de resina plástica que liga a estrutura externa e interna da janela. Além da versatilidade estética – as esquadrias podem ter uma cor para fachada e outra para o ambiente interno – esse perfil funciona como uma barreira ao fluxo de calor e às vibrações, que ajudam no isolamento do som.

2.4. Vidros

Nesse capítulo faz-se o estudo das características de diferentes tipos e combinações de vidros, assim como os cálculos necessários para determinação das frequências de ressonância e de mergulho (*dip*) para painel simples e duplo. Estão também apresentados resultados analíticos e práticos de autores comparados com a teoria utilizada nessa tese.

O vidro, como material presente na construção, teve seu uso intensificado a partir do século XIII. Desde então, novos processos de aperfeiçoamento do material foram sendo desenvolvidos, como por exemplo, a têmpera, a metalização e a laminação. Com esses adventos a capacidade de isolamento sonora dos vidros sofreram consideráveis incrementos.

Os vidros são materiais capazes de atender a diversas exigências em uma obra, tais como proteção contra fogo, proteção contra choques, isolamento térmico e isolamento acústico. Pode-se considerar esta última propriedade como uma das mais importantes, uma vez que para um eficaz controle de som, e dependendo da gama de frequências de ruídos as quais o ambiente está exposto, o vidro não necessita de tratamentos que venham a aumentar bruscamente o custo total da obra.

Dentre os principais tipos de vidros comercializados no mercado mundial, destacam-se os seguintes:

- Vidros simples ou monolíticos: os mais usados no Brasil. Para compor as janelas, a espessura comumente utilizada varia de 2 a 4 mm. Este tipo de vidro não deve ser empregado em ambientes que exijam isolamento acústico (*Figura 05*);



*Figura 05 – Vidro Monolítico Quebrado.
Fonte: University of Reading.*

- Vidros Temperados: são vidros monolíticos que passam por um tratamento chamado tempera que aumenta a resistência por compactação das camadas superficiais e expansão nas camadas internas. Esse tratamento consiste em expor o vidro comum a temperaturas de aproximadamente 650°C e depois resfriá-lo causando um choque térmico. Vidros temperados são utilizados principalmente quando serão expostos à média e altas temperaturas ou quando expostos a possibilidade de choques (*Figura 06*).



*Figura 06 – Vidro Temperado Quebrado.
Fonte: ZDNET.*

- Vidros laminados: sua utilização vem crescendo principalmente devido à sua propriedade mecânica de absorção de choques. Esses vidros podem ser usados, em variadas espessuras e combinações para o conforto acústico.

As combinações de vidros laminados utilizam o butiral de polivinil – também chamado de PVB – para unir as duas placas de vidro. Esse produto tem sido fabricado desde a década de 30 e, após tantos anos de comercialização por companhias mundiais, nenhuma mudança foi feita em sua composição. O PVB é um adesivo que torna as duas peças de vidros um único corpo e também fornece ao conjunto mais dureza e flexibilidade sem diminuir a transparência, mesmo quando possui cor. O conjunto de vidros com o PVB entre eles é prensado para retirar o ar e gerar a união das camadas, finalizando com o aquecimento e nova carga de pressão, para garantir a aderência. (*Figura 07*)



Figura 07 – Vidro Laminado Quebrado.
Fonte: Glazing Innovations.

- Vidros especiais: são aqueles utilizados em obras que possuem projetos fora do usual. Têm-se como exemplos os blindados e os compostos por combinações de vidros monolíticos, temperados e laminados. São utilizados em joalherias, bancos, hotéis etc.

Os vidros compostos possuem uma grande flexibilidade de utilização, inclusive no que diz respeito à acústica. Podem ser empregados em diversos tipos de esquadrias, como alumínio, madeira, PVC, ferro e aço. Vidros duplos são compostos por temperados ou monolíticos, vidros triplos, por um laminado e outro monolítico ou temperado e os quádruplos, por dois laminados (*Figura 08*). Todas essas características o tornam um material com grande capacidade de atenuação sonora.

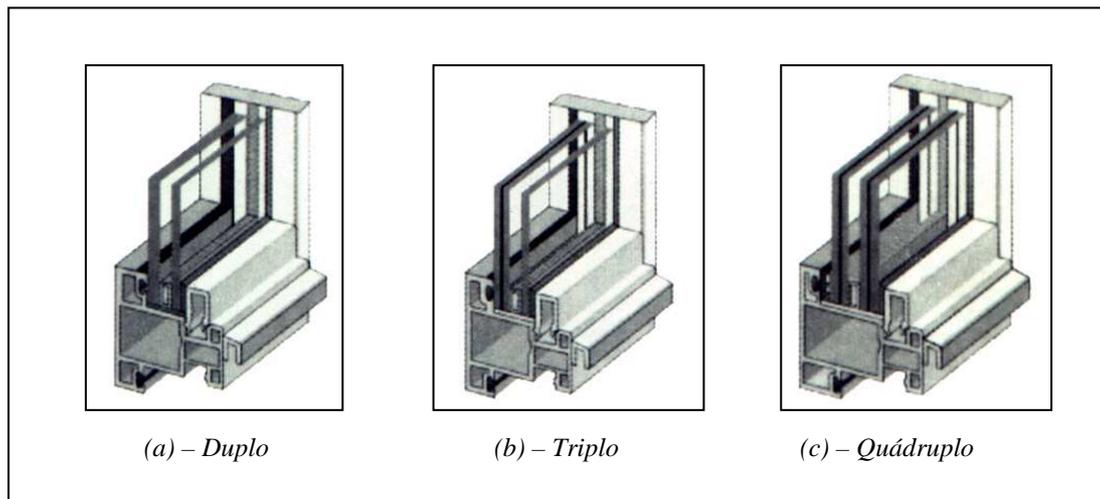


Figura 08 – Vidros Compostos.
Fonte: Conforto Ambiental.

Os vidros compostos possuem câmara de ar, por isso precisam de uma vedação especial para retirar a umidade entre as lâminas. Se isso não for feito, pode ocorrer a formação de mofo e o vidro deve ser trocado. Então, merecem atenção especial, podendo ser fator determinante para a escolha do projetista, no que diz respeito a custos. Loturco (2004) diz que

“Apesar de parecer contraditório, por vezes a escolha de um vidro simples acarreta em melhor resultado do que o uso de vidros duplos. O consultor em acústica José Augusto Nepomuceno afirma que duas chapas de vidro de 3mm separadas por 6mm têm *Sound Transmission Class* (STC) 28 dB enquanto um vidro monolítico tem STC 37 dB.”

A tabela 07 as vantagens e desvantagens dos tipos de vidros.

Tabela 07 – Comparativo entre os Vidros
 Fonte: Da autora.

Vidros	Vantagens	Desvantagens	Custo*	Segurança
Monolítico	Fácil de encontrar, portanto tem rapidez na entrega.	Baixa resistência e grandes estilhaços pontiagudos quando se rompe	Baixo	Baixa
Temperado	Maior resistência a impactos do dia-a-dia e pequenos estilhaços sem pontas	Não é encontrado em todas as vidraçarias e nem para pronta entrega, pois necessita de um tratamento	Médio	Média
Laminado	Maior resistência a impactos do dia-a-dia e os estilhaços ficam presos ao PVB, mantendo a abertura fechada	Não é encontrado em todas as vidraçarias e nem para pronta entrega, pois necessita da aplicação do butiral	Médio	Média
Especiais	Atende as necessidades específicas do cliente	Demora na entrega e profissionais especializados para fabricar e instalar	Alto	Alta

* Baixo – R\$5,00 a R\$10,00 o m². Médio - R\$30,00 a R\$50,00 o m². Alto – Acima de R\$90,00 o m².

Sem dúvida, com qualquer tipo ou combinação de vidros, o isolamento acústico será melhor quanto maior for a espessura e menor a área do conjunto. Observa-se também que os vidros laminados têm um desempenho acústico maior que os monolíticos de mesma espessura (*Tabela 08 e 09*). Isso provavelmente ocorre devido a presença do PVB que diminui a frequência de ressonância, que nos monolíticos está na faixa da voz humana – 1000 a 2000 Hz. Uma espessura do adesivo de 0,38mm já é suficiente para notar essa diferença, sendo 1,14 mm a espessura ideal. Os vidros duplos devem possuir câmara de ar de no mínimo 100 mm de espessura para ter um desempenho acústico admissível, e de 300 mm, para ser ideal, mas essa última espessura é inviável para ser aplicada, portanto, a de 200 mm é satisfatória (*Tabela 10 e 11*).

Tabela 07 – Redução Sonora com Vidro Monolítico.
Fonte: Vue Windows.

Espessura Nominal (mm)	Média Externa TL 125 – 400Hz (dB)	Interior STC Rating (dB)
3	24	26
4	25	28
5	26	29
6	27	31
8	29	33
10	30	34
12	32	36
15	34	38
19	35	39

Tabela 08 – Redução Sonora com Vidro Laminado.
Fonte: Vue Windows.

Espessura Nominal (mm)	Média Externa TL 125 – 400Hz (dB)	Interior STC Rating (dB)
6.38	29	34
6.5	32	36
6.76	31	34
8.38	33	35
10.38	35	36
10.5	36	39
12.38	36	39

Tabela 09 – Redução Sonora com Vidros Compostos.
Fonte: Vue Windows.

Espessura Nominal (mm)	Composição (mm)	Média Externa TL 125 – 400Hz (dB)	Interior STC Rating (dB)
20	4.0/12.0 espaço de ar/4.0	27	27
22	5.0/12.0 espaço de ar /5.0	27	27
24	6.0/12.0 espaço de ar /6.0	26	26
24.38	6.38/12.0 espaço de ar /6.0	34	34

Tabela 10 – Redução Sonora com Janelas Duplas (faixas secundárias).
Fonte: Vue Windows.

Espessura Nominal (mm)	Composição (mm)	Média Externa TL 125 – 400Hz (dB)	Interior STC Rating (dB)
110	6.0/100.0 abertura/4.0	44	46
160	6.0/150.0 abertura/4.0	45	47
216	10.0/200.0 abertura/6.0	49	49

2.4.1. Painel Simples

A figura 09, Bies e Hansen (2003), mostra a perda de transmissão sonora (TL) para cada frequência (ω) típica para painéis isotrópicos simples em função da frequência onde nota-se as seguintes regiões:

- Região Controlada pela Rigidez: em baixa frequência, a perda de transmissão, $TL(\omega)$, é controlada pela rigidez do painel. Nesta faixa o módulo de Elasticidade e a espessura do painel são os dois parâmetros mais importantes para o isolamento do ruído;
- Região da Primeira Frequência Natural do Painel: na frequência coincidente com a primeira frequência natural do painel a transmissão do som é alta e, conseqüentemente, a $TL(\omega)$ é bastante reduzida e passa por um mínimo local que é controlado pelo amortecimento do sistema. É nesta região que as condições de contorno (vínculo do vidro com a estrutura da janela) e o amortecimento do vidro influenciam de maneira mais significativa o isolamento de ruído destas janelas;
- Região Controlada pela Lei das Massas: para frequências acima da primeira frequência natural do sistema o comportamento da $TL(\omega)$ passa a ser controlada pela densidade superficial do painel. Esta região é conhecida como faixa controlada pela lei das massas (*mass law range*) devido ao fato de que a $TL(\omega)$ apresenta uma dependência aproximadamente linear com relação à massa do painel. A $TL(\omega)$ aumenta com a frequência a uma taxa de 6 dB por oitava;
- Região de Coincidência: a região de coincidência, também conhecida como *coincidence dip*, é caracterizada pela redução significativa da $TL(\omega)$ e é onde a frequência de propagação da onda de deformação por flexão coincide com a velocidade de propagação do som no meio;
- Região de Alta Frequência: finalmente, após a região de coincidência a $TL(\omega)$ volta a crescer com o aumento da frequência e é controlada pelo amortecimento do sistema. Nesta região a taxa de crescimento da $TL(\omega)$ é da ordem de 9 dB por oitava.

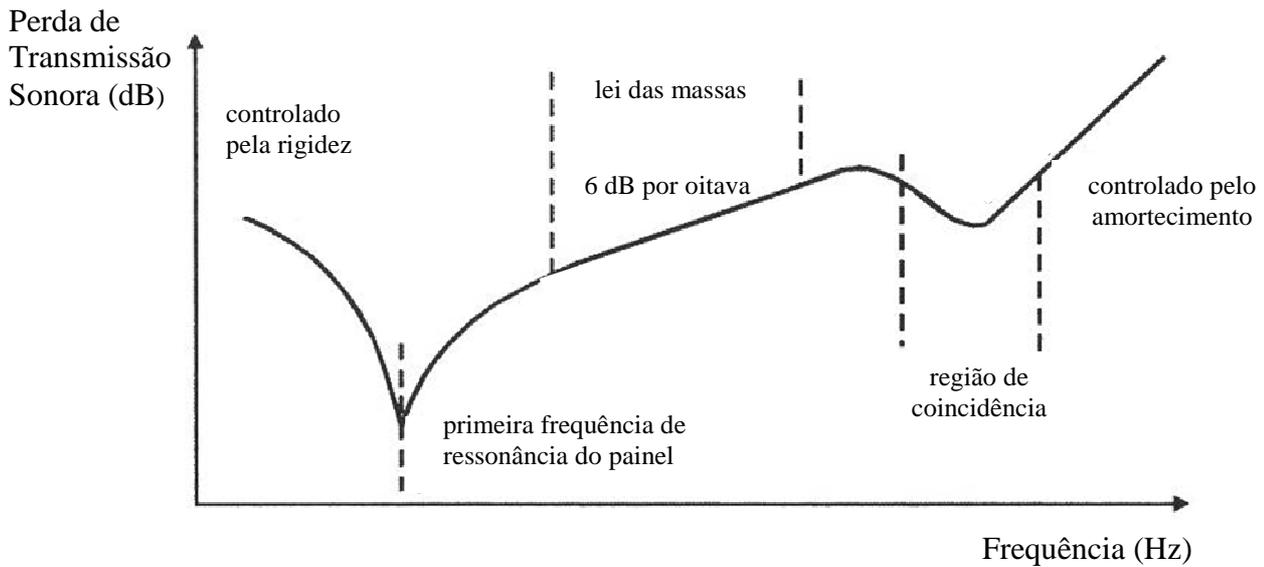


Figura 09 – Curva Típica para a Isolação Acústica com Vidros Simples.
 Fonte: Adaptado de Bies e Hansen (2003).

A maioria dos autores utiliza a teoria de placas finas para a análise do isolamento de ruído com o emprego de painéis de vidro. Deve-se salientar que esta teoria só apresenta resultados satisfatórios quando a razão entre o menor comprimento dividido pela espessura for maior do que 100.

Empregando esta teoria de placa fina, a velocidade de propagação da onda de deformação por flexão para material isotrópico, c_B , é dada pela seguinte expressão: (BERANEK, 1980; MÉNDEZ et al, 1994; BIES e HANSEN, 2003; PAIXÃO e GERGES, 2004)

$$c_B = \left(\frac{D \omega^2}{m} \right)^{1/4} \quad [\text{m/s}] \quad (3)$$

sendo que D é a rigidez de flexão da placa e é dada por:

$$D = \frac{E h^3}{12(1-\nu^2)} \quad [\text{kg m}^2/\text{s}^2] \quad (4)$$

Nestas equações, (3) e (4), E e ν são duas das constantes elásticas do material que representam o módulo de Young do material (módulo de Elasticidade Longitudinal) e o

coeficiente de Poisson, respectivamente; h é a espessura do painel, ω é a frequência e $m = \rho h$ é a densidade por unidade de área do painel, em que ρ é a densidade do material do painel.

Como pode ser visto na Eq.(5), a velocidade de propagação da onda de deformação por flexão para placa fina aumenta proporcionalmente com a raiz quadrada da frequência de excitação. Portanto, deve existir uma frequência onde esta velocidade da onda de flexão seja igual à velocidade de propagação do som no meio que envolve o painel. Esta velocidade é chamada de frequência de coincidência (*coincidence frequency*) e sua expressão matemática é:

$$\omega = \left(\frac{c}{\sin \phi} \right)^2 \sqrt{\frac{\rho h}{D}} \quad [\text{rad/s}] \quad (5)$$

onde ϕ é o ângulo de incidência da onda de pressão sonora relativo à direção perpendicular ao painel e c é a velocidade do som no meio.

A frequência crítica ou frequência de coincidência (f_c) é obtida fazendo $\phi=90^\circ$ e sua expressão é:

$$f_c = \frac{c^2}{1.81h} \sqrt{\frac{\rho(1-\nu^2)}{E}} \quad [\text{Hz}] \quad (6)$$

Pode-se notar que essa frequência crítica muda dependendo do tipo de vidro que está sendo analisado, pois ela depende da densidade do material. Portanto, torna-se extremamente necessário o espectro de frequência da fonte e do desempenho acústico dos vidros para desenvolver um projeto eficaz de isolamento acústico.

O comparativo dos resultados experimentais com os valores obtidos através da Eq.(6), mostrados por Kim *et al* (2002) (*Figura 10*), demonstram que a aplicação desta equação produz resultados bastante satisfatórios para vidros simples.

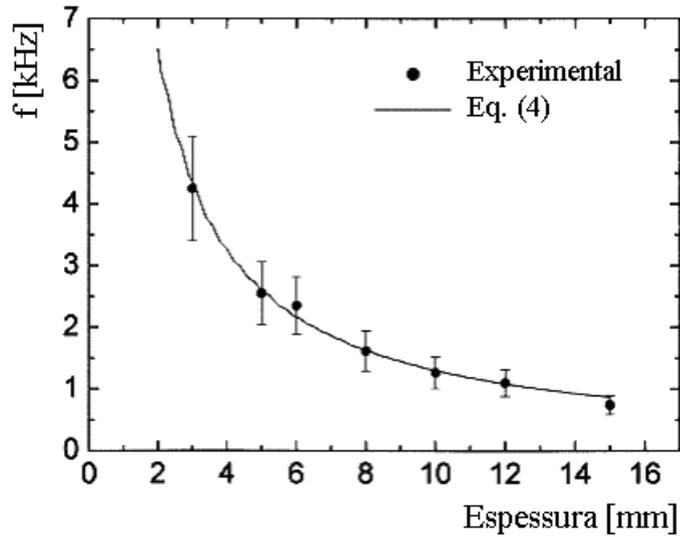


Figura 10 – Comparativo dos Resultados Experimentais e Analíticos da Eq.(4) para Vidros Simples.
 Fonte: Kim et al (2002).

Para um painel retangular simplesmente apoiado em todos os lados a expressão para o cálculo das suas frequências naturais vale:

$$f_{ij} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{i^2}{a^2} + \frac{j^2}{b^2} \right) \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \quad [\text{Hz}] \quad (7)$$

com $i, j = 1, 2, 3, 4, \dots$

em que a e b denotam o comprimento dos lados do retângulo e o par (i, j) identifica o modo de vibração (Figura 11).

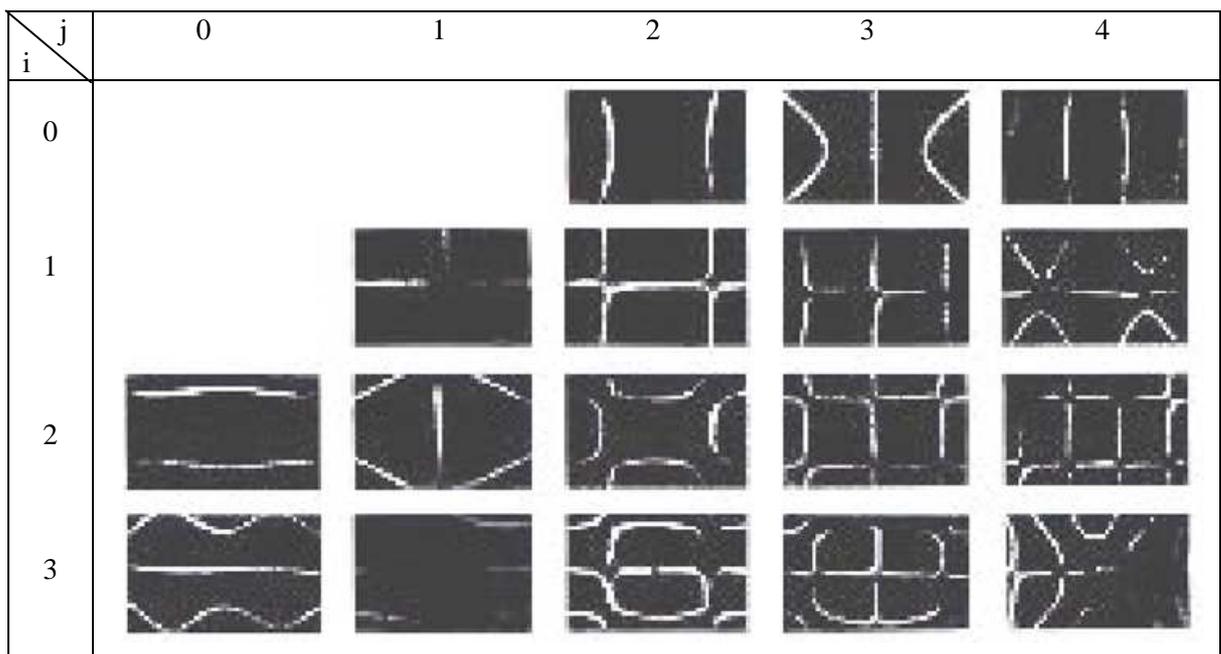


Figura 11 – Modos de Vibração de Placas Retangulares.
 Fonte: SILVA.

Para a região controlada pela lei das massas, Kim *et al* (2002), utilizam a seguinte fórmula para o cálculo da perda de transmissão sonora (TL) para cada frequência (ω):

$$TL(\omega) \cong 10 \log \left[1 + \left(\frac{\omega m}{3,61 \rho_o c} \right)^2 \right] \quad [\text{dB}] \quad (8)$$

onde $\rho_o c$ (produto da densidade do meio e da velocidade do som) é a impedância característica do meio, ω é a frequência e m é a densidade do material do painel por unidade de área.

Analisando esta expressão nota-se que a $TL(\omega)$ para uma janela com um único vidro aumenta com o aumento da espessura do vidro (aumento de m) e com o aumento da frequência.

As figuras 12 e 13 mostram o comparativo dos resultados experimentais obtidos por Tadeu & Mateus (2001) com os modelos descritos no início deste capítulo. Os resultados para o isolamento acústico com vidro simples de 4 mm de espessura e nota-se claramente que os índices de redução de ruído experimentais aproximam-se das expressões analíticas somente da região controlada pela lei das massas. Nota-se também que em torno de 100 Hz existem picos nos níveis da aceleração indicando uma provável frequência natural do vidro. Resultados experimentais em alta e baixa frequência não estão em concordância com as curvas matemáticas (*Figura 12*).

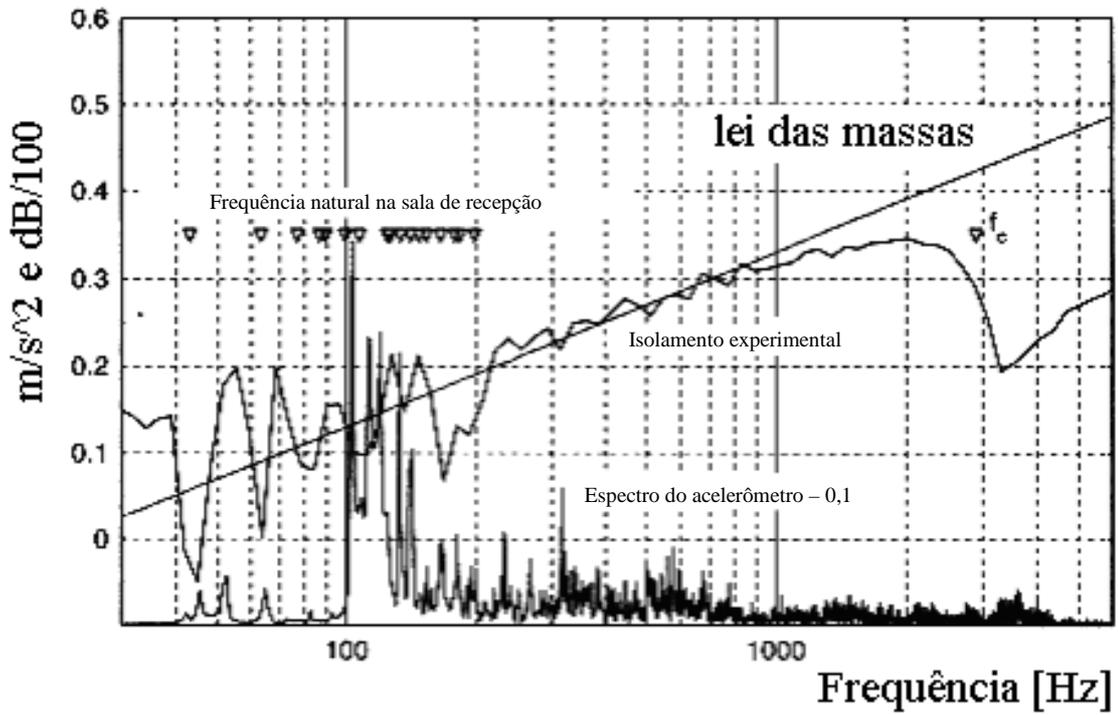


Figura 12 – Índice de Redução de Ruído para Vidro Simples de 4 mm.
 Fonte: Adaptado de Tadeu e Mateus (2001)

Os resultados para vidro simples com 8 mm de espessura são os mesmos resultados verificados para o vidro de 4 mm, porém, na região da frequência de coincidência a vibração do vidro também tem um aumento significativo de amplitude (Figura 13).

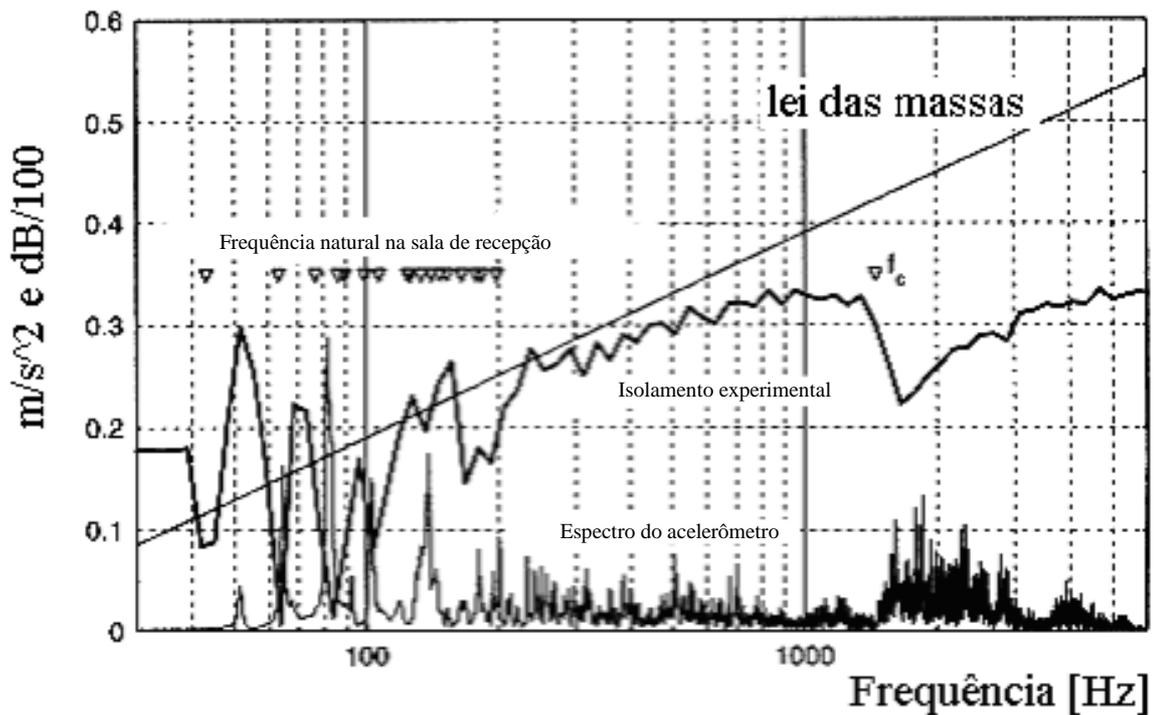


Figura 13 – Índice de Redução de Ruído para Vidro Simples de 8 mm.
 Adaptado de: Tadeu e Mateus (2001)

Fig

Estes ensaios foram realizados em uma câmara com dimensões 4,0 x 2,7 x 2,7 m na sala de recepção e 3,0 x 2,7 x 2,7 m na sala de emissão. A amostra utilizada foi de 1,48m x 1,45m. Todos esses valores são muito próximos dos utilizados nessa dissertação.

2.4.2. Painel Duplo

Normalmente, o índice de redução de ruído é melhorado quando são utilizadas as janelas com vidros duplos separados por uma cavidade de ar. Entretanto, a cavidade de separação também pode provocar pontos adicionais de redução significativa no isolamento devido à resposta dinâmica dos vidros e das sucessivas reflexões na cavidade de ar.

O modelo empregado para painéis duplos é descrito na sequência e foi apresentado por Tadeu e Mateus (2001) que compila o resultado de diversos autores.

2.4.2.1. Frequência de Ressonância para o Sistema Massa-ar-Massa

Em baixa frequência o painel duplo pode ser visto como sendo duas massas (m_1 e m_2) atuando em conjunto como se fosse um único painel onde a cavidade de ar não contribui para o comportamento do sistema. O comportamento da janela é como se fosse um único painel com massa por unidade de área $m=m_1+m_2$.

À medida que a frequência cresce, o ar da cavidade entre os dois vidros passa a ter um comportamento significativo na resposta. O conjunto passa a se comportar como se fosse duas massas separadas por uma mola cuja constante (k) é dada por:

$$k \cong \frac{\rho_o c^2}{d \cos^2 \phi} \quad (9)$$

em que d é a distância entre os dois vidros, $\rho_o c$ (produto da densidade do ar e da velocidade do som) é a impedância característica do meio e ϕ representa o ângulo de incidência da onda de pressão sonora

Se a rigidez e o amortecimento dos dois painéis são ignorados, o problema fica bastante simplificado e a frequência de ressonância pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$\omega = \sqrt{k \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2}} \quad [\text{rad/s}] \quad (10)$$

Utilizando condições normais de umidade a temperatura (60%, 20°C) e fazendo o ângulo de incidência igual a 90°, a frequência de ressonância pode ser obtida com a seguinte expressão:

$$f_{res} \cong 59,8 \sqrt{\frac{1}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \quad [\text{Hz}] \quad (11)$$

A expressão (12) é sugerida por Bies e Hansem (2003) para o cálculo desta frequência de ressonância. Note que a diferença entre a Eq.(11) e a Eq.(12) é o fator 1.8 que foi sugerido por Shap (1973) como fator de correção das massas dos dois painéis vibrantes para o ajuste com dados experimentais.

$$f_{res} \cong \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1,8 \rho_o c^2}{d} \left(\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \right)} \quad [\text{Hz}] \quad (12)$$

ou

$$f_{res} \cong 80,23 \sqrt{\frac{1}{d} \left(\frac{m_1 + m_2}{m_1 \times m_2} \right)} \quad [\text{Hz}] \quad (13)$$

para as condições normais de umidade a temperatura (60%, 20°C).

Se a frequência de incidência da onda de pressão sonora é muito maior do que esta frequência de ressonância a cavidade de ar absorve parte da energia sonora resultando em um isolamento acústico muito maior do que o isolamento com um painel simples com mesma massa. Portanto, é desejável que esta frequência de ressonância esteja localizada em uma região de baixa frequência (geralmente abaixo de 100 Hz), o que somente será possível de ser obtido com janelas com vidros comuns de baixa espessura com câmara de ar relativamente grande.

Esta conclusão aparece muito clara na figura 14 que foi adaptada a partir dos dados experimentais de Tadeu e Mateus (2001). Nota-se que a partir da espessura de 20 mm é que a taxa de crescimento do índice de redução de ruídos torna-se grande. Uma redução da ordem de 40 dBA é conseguido com cavidade da ordem de 100 a 200 mm de espessura.

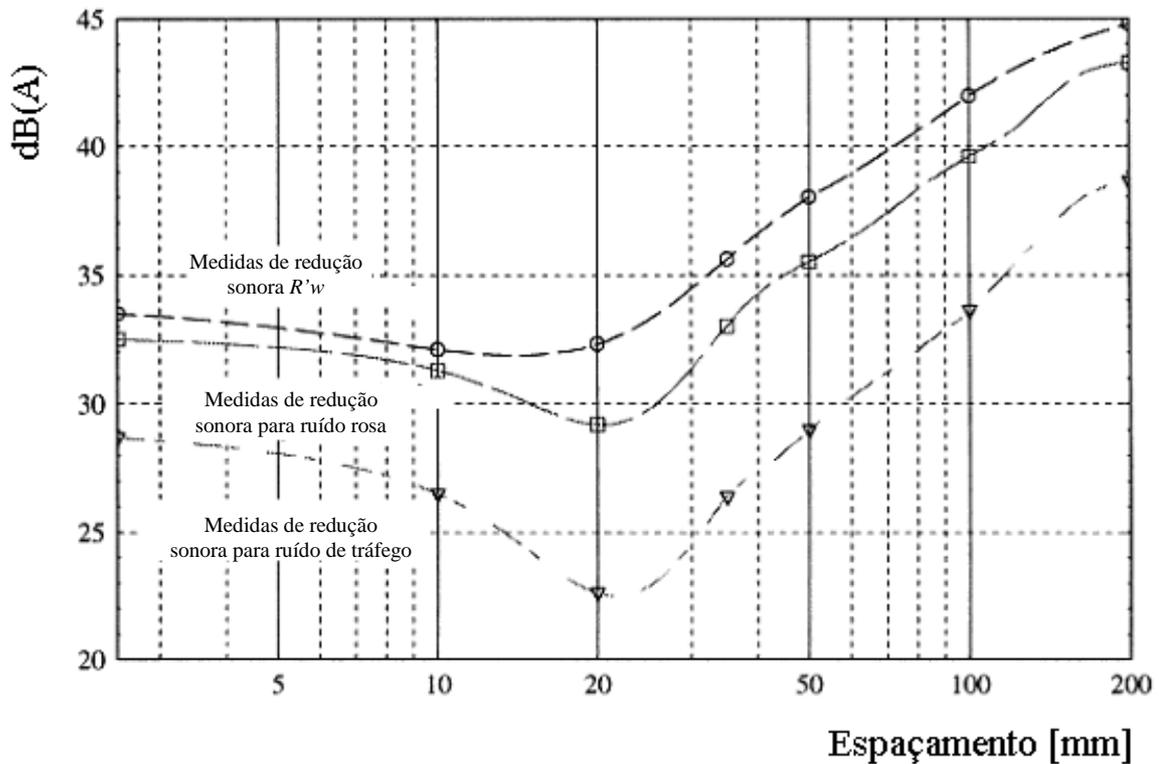


Figura 14 – Índice de Redução Sonora para Janelas Acústicas com Vidros Duplos de 8 e 4 mm em Função da Espessura da Câmara de Ar.

Fonte: Adaptado de Tadeu e Mateus (2001).

Tendo como base os resultados experimentais Tadeu e Mateus (2001) chega-se a duas conclusões significativas com relação ao isolamento acústico com janelas de vidros duplos:

- o isolamento com vidros duplos só produz resultados melhores do que o isolamento com vidros simples se a espessura da câmara de ar for maior do que 50 mm ou muito pequena;
- o isolamento acústico de janelas com dois vidros idênticos apresenta uma redução muito significativa nas frequências naturais. Esta redução é muito maior do que para as soluções com dois vidros com espessura diferente

Outros resultados que também confirmam a hipótese de que o isolamento acústico com vidros duplos produz resultados satisfatórios quando o espaçamento é muito pequeno ou quando o espaçamento é acima de 50 mm foi mostrado no estudo comparativo realizado por Kim *et al* (2002) (Figura 15). Estes resultados foram obtidos com vidros duplos de espessura igual a 3 mm (vidros monolíticos) variando a espessura da cavidade de ar que separa os dois vidros, indicada entre parênteses, em milímetros. No trabalho de Jones (1981) e Quirt (1983), nota-se que a curva da $TL(\omega)$ para composição sem câmara de ar, 3(0)3 é

semelhante às curvas para espaçamento de câmara de ar de (63) e de (80), enquanto as curvas para espaçamento de câmara de ar de (6) e de (12) apresentam um patamar menor para a perda de transmissão.

Além disso, observa-se nesta figura que os resultados obtidos por Jones (1981) e Quirt (1983) para (6) apresentam discrepâncias com relação aos resultados mostrados pela ISO 140-III na região de baixa frequência. Uma provável explicação para este comportamento em baixa frequência pode estar associado ao comportamento dinâmico do painel que depende das condições de vínculo (condições de contorno).

Outra conclusão que se pode visualizar nos resultados de Kim *et al* (2002) é que a frequência de coincidência não depende da espessura da câmara de ar. Estas mesmas evidências foram observadas por Quirt (1982,1983) e na nota técnica ISO 140-III (*Asahi Technical Data on Glass*).

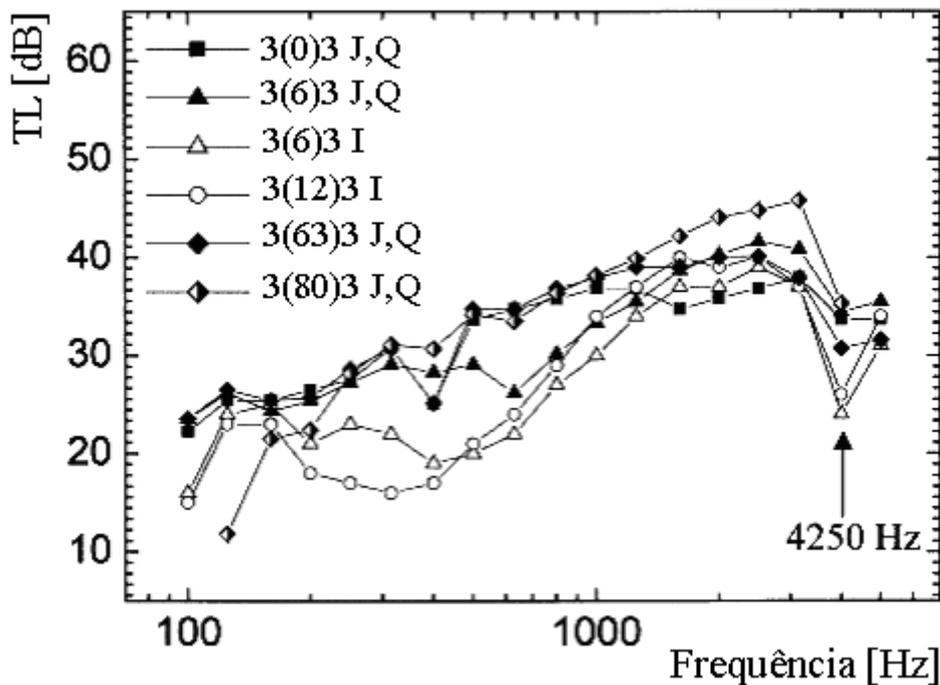


Figura 15 – $TL(\omega)$ para o Isolamento Acústico com Vidros Duplos de 3 mm com Espaçamento Variável Obtidos por Jones (J), Quirt (Q) e ISO 140-III (I).
Fonte: Kim *et. al.* (2002)

Reflexões sucessivas podem ocorrer no interior da câmara de ar gerando ondas estacionárias. Este fenômeno ocorre quando a espessura da câmara de ar é um múltiplo do meio comprimento de onda ($n\lambda/2$). Desta forma, pode-se definir a frequência como sendo:

$$f_k = k \frac{c}{2d} \quad k = 1,2,3,\dots \quad [\text{Hz}] \quad (14)$$

De acordo com Tadeu e Mateus (2001), a análise desta equação leva à conclusão de que para distância d pequena este valor pode ser localizado fora da zona de sensibilidade do ouvido humano. Ainda, para painéis leves com câmaras de ar pequenas, a queda na redução do nível de ruído devido aos efeitos dinâmicos pode ser mais significativa do que a causada pelas reflexões na câmara de ar.

2.4.2.2. O Índice de Redução de Ruídos para Painéis Duplos

O isolamento acústico e a previsão do índice de redução de ruído para painéis duplos são temas que têm sido amplamente estudados por diversos autores. Entretanto, de acordo com Tadeu e Mateus (2001) a descrição matemática do fenômeno envolvendo o isolamento acústico com vidros duplos é muito complexa. Estudos realizados neste sentido são conduzidos considerando apenas um número restrito de variáveis e, embora seja limitado o modelo descrito na sequência, ajuda a entender um pouco o fenômeno do isolamento acústico com paredes duplas.

Tadeu e Mateus (2001) utilizam as mesmas fórmulas sugeridas por Sharp (1973) para o cálculo da $TL(\omega)$ para o isolamento com vidros duplos que são:

$$TL(\omega) = \begin{cases} 20 \times \log[(m_1 + m_2) \times f - 47] & f < 2 f_{res} / 3 \\ TL_1 + TL_2 + 20 \times \log(fd) - 29 & f_{res} < f < f_L \\ TL_1 + TL_2 + 6 & f \geq f_L \end{cases} \quad (15)$$

onde f_{res} é obtida com a Eq.(11) ou (12) e f_L é denominada por Bies e Hansen (2003) como frequência limite e vale:

$$f_L = \frac{c}{2\pi d} \quad [\text{Hz}] \quad (16)$$

Na expressão (15) TL_1 e TL_2 indicam a perda de transmissão calculada para cada painel separadamente e de acordo com Bies e Hansen (2003), os resultados obtidos com a expressão (15) dificilmente serão obtidos na prática, o que foi verificado por Tadeu e Mateus (2001) e Kim et al.(2003).

Alguns resultados experimentais obtidos por Tadeu e Mateus (2001), (*Figura 16 e 17*), mostram este comportamento e apontam discrepâncias acentuadas com relação aos modelos teóricos disponíveis na literatura mesmo na faixa controlada pela lei das massas.

Nota-se na figura 16 que existe uma diferença em torno de 10 dB na região controlada pela lei das massas. Nesta configuração a espessura da cavidade de ar é de 10 mm. Este fato não se repete quando a espessura da cavidade de ar é de 100 mm.

Pelo menos mais dois fatos importantes podem ser observados nestas duas figuras: quedas acentuadas no índice de redução de ruído para frequências próximas das frequências de ressonância da cavidade (assinalada como f_{res} nas figuras) não foram detectadas experimentalmente e próximo das frequências de coincidências (assinaladas como f_{c1} e f_{c2} nas figuras) não são observadas as pronunciadas quedas nos níveis de redução do ruído.

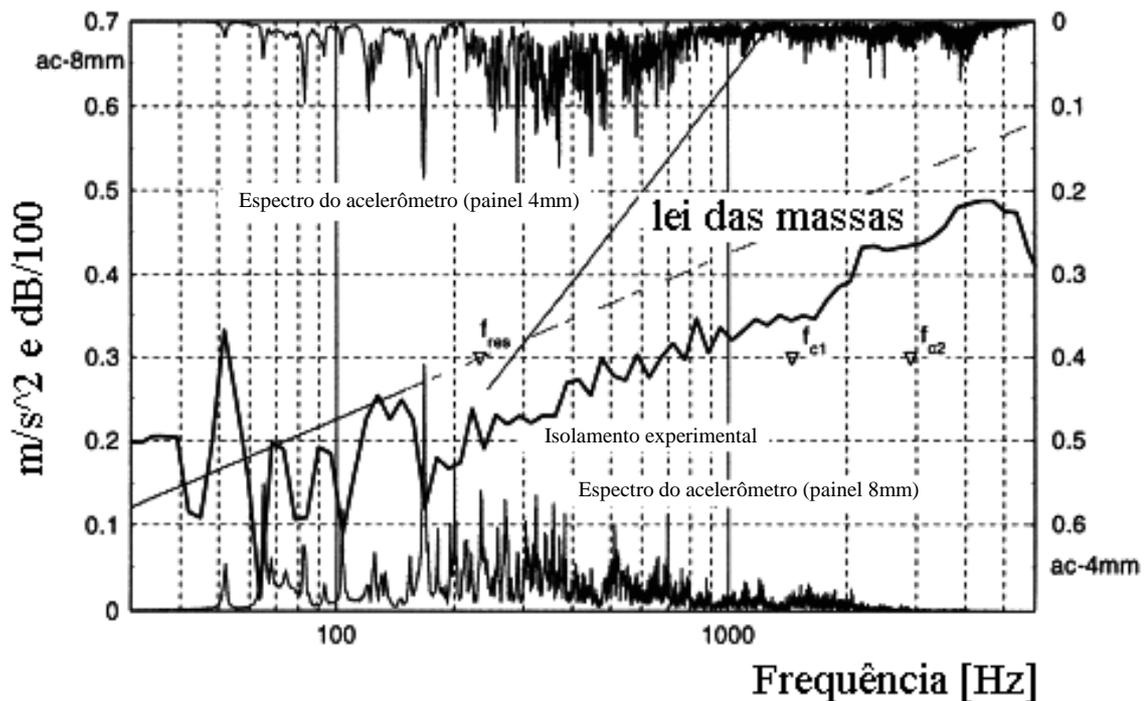


Figura 16 – Índice de Redução de Ruído para Vidros Duplos 8(10)4.
 Fonte: Adaptado de Tadeu e Mateus (2001).

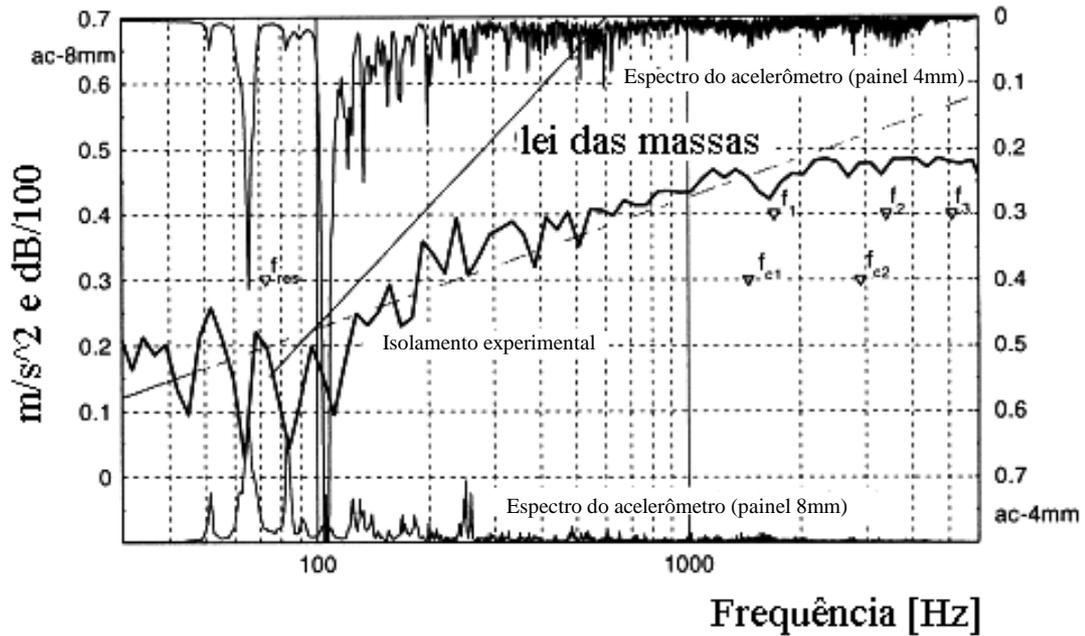


Figura 17 – Índice de Redução de Ruído para Vidro Duplo 8(100)4.
Adaptado de: Tadeu e Mateus (2001)

2.4.2.3. A Frequência de Coincidência

As curvas obtidas por Kim *et al* (2002) (Figura 18) mostram que a frequência crítica ou de coincidência (*coincidence dip*) não depende da espessura da cavidade de ar entre os vidros da parede dupla.

A figura 18 mostra os resultados experimentais obtidos por Kim *et al* (2002) para a frequência de coincidência obtidos com 3 janelas acústicas diferentes. Estas janelas foram confeccionadas com vidros duplos de 6, 8 e 10 mm com espessura da câmara igual a 12 mm.

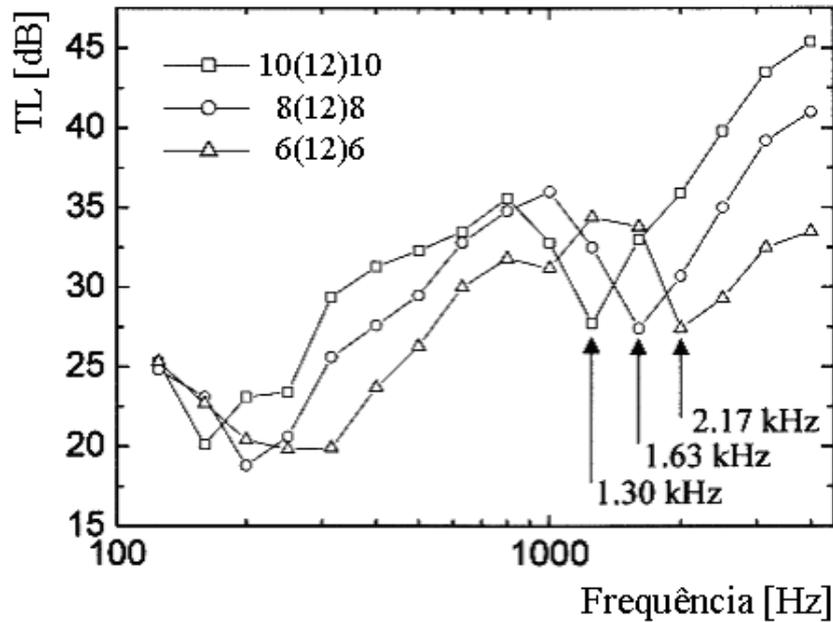


Figura 18 – Frequência de Coincidência para Janelas Acústicas com Vidros Duplos com Espaçamento de 12 mm.
 Fonte: Kim et al (2002)

De acordo com Kim *et al* (2002), a frequência de coincidência é calculada com precisão empregando a mesma fórmula utilizada para o cálculo de vidros simples e utilizando as propriedades do vidro interno (o vidro voltado para o ambiente onde deseja-se a redução do nível de ruído).

Na figura 19, estes resultados e outros obtidos por Quirt (1983), Jones (1981) e da ISO 140-III foram compilados por Kim *et al* (2002) e comparados com os resultados obtidos com a Eq. (6) empregando as características do vidro interno. Nota-se que nestas condições a Eq. (6) produz resultados muito próximos dos observados em laboratório, embora os resultados obtidos por Tadeu e Mateus (2001) não mostrem esta tendência (Figuras 17 e 18).

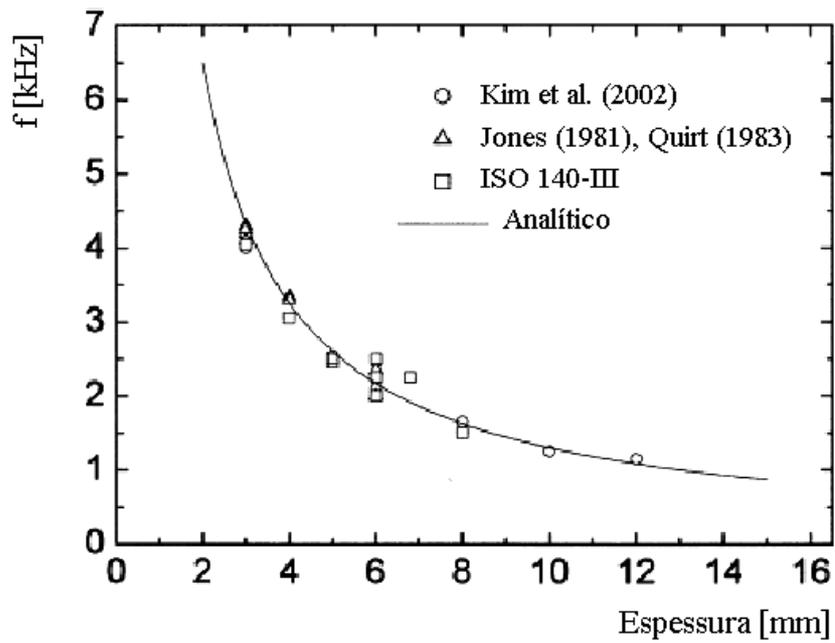


Figura 19 – Comparativo dos Resultados Experimentais com a Solução Analítica para a Frequência de Coincidência em Painéis com Vidros Duplos.
 Fonte: Adaptado de Kim et al (2002).

Capítulo 3 – ANÁLISES EXPERIMENTAIS

A descrição dos equipamentos e do ambiente utilizado para realização da prática, assim como os vidros testados e a metodologia empregada nesta dissertação estão explicados a seguir.

3.1. Dosímetro e Analisador de Frequência

O equipamento SVAN 943 (Figuras 20 e 21), utilizado para as medições, é da marca *Svantek*, fabricado na Polônia. O instrumento é um medidor e analisador de som de precisão, com classificação do Tipo I, de acordo com a IEC 60.651 e a IEC 60.804, e filtros Tipo I, conforme IEC 1.260.

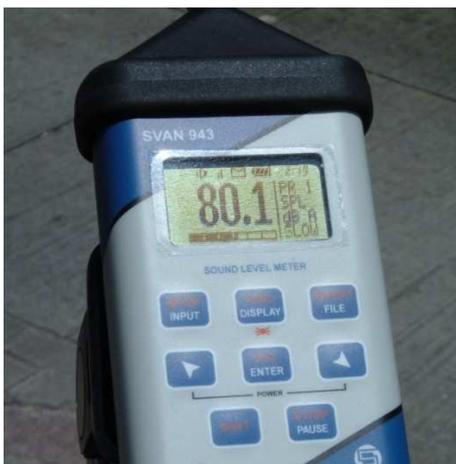


Figura 20 – Analisador de Frequência SVAN 943.
Fonte: Da Autora.



Figura 21 – Analisador de Frequência SVAN 943.
Fonte: Da Autora.

Três parâmetros (dBA, dBC e linear) podem ser medidos simultaneamente e com padrões independentes, aferindo para cada um deles o NPS, o espectro de frequência, entre outros.

A faixa de nível sonoro que o equipamento capta é de 26 a 133 dBA, tendo 20 μ Pa como referência de medição de ruído, e com tempo de resposta rápido, lento e impulsivo. Nas medições foi utilizado o filtro em bandas de oitava de frequência com centros de 31,5 Hz a 16.000 Hz.

3.2. Calibrador

O analisador de frequência deve ser calibrado antes de iniciar cada ensaio. O calibrador utilizado é o modelo CAL 150 da marca *Larson Davis*, fabricado nos Estados Unidos (*Figura 22*). Foi usado o adaptador ADP 024 para microfone de 1/4 de polegada, também fabricado pela *Larson Davis*, já que o encaixe do calibrador é para microfone de 3/8 de polegada.



*Figura 22 – Calibrador Larson Davis.
Fonte: Da Autora.*

O nível de pressão sonora foi calibrado em 94 dB, tendo 20 μ Pa como referência de medição de ruído, e a frequência em 1.000 Hz. Quando a temperatura do ambiente a ser medido está entre $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, e umidade relativa do ar entre 10 a 90%, a calibração do nível de pressão sonora pode ter variações menores que $\pm 0,5\text{ dB}$ e, da frequência, menores que $\pm 2\%$, atendendo às normas ANSI S1.4-1984, *Specification for Acoustic Calibrators*, e IEC 60.942-1997 *Class 2, Sound Calibrators*, para um calibrador do Tipo II.

3.3. Descrição da Metodologia das Medições do Ruído Urbano

Como foi mencionado, o objetivo de realizar estas medições foi estabelecer o nível de ruído por faixa de frequência. Os locais, o tempo de medição, os dias da semana e o horário das medições foram estabelecidos seguindo as seguintes regras:

- Determinação dos sítios de medição: todos os pontos foram locados nos Eixos Estruturais de Curitiba, de forma que diferentes regiões da cidade fossem contempladas, como está apresentada na página a seguir (*Tabela 12 e Figura 23*). As estruturais foram escolhidas como referências, pois são avenidas com intenso tráfego e circundadas por edifícios.

- Hora de medição: foram realizadas, no mesmo ponto, três medições por dia entre os seguintes horários: 8:00 – 8:30, 12:20 – 12:45, 18:00 – 18:30, pois considerou-se que nos limites dos horários comerciais há um maior número de veículos transitando e consequentemente o ruído é mais intenso.

- Dias da semana: sextas-feiras, sábados, domingos e segundas-feiras foram descartados por serem considerados dias atípicos do trânsito da cidade, já que são dias influenciados pelos fins-de-semana. E, de modo análogo, também foram rejeitadas datas próximas aos feriados.

- Tempo de medição: utilizou-se cinco minutos porque foi o período necessário para caracterizar o espectro de frequência do ruído urbano. Dessa forma registrou-se diversos tipos de veículos (carros, motos, ônibus, caminhões etc.) em diferentes situações (semáforo aberto e fechado, subida e descida, arranque, frenagem etc.).

Tabela 12 – Pontos de Medição do Ruído Urbano.

Fonte: Da autora.

Ponto	Data	Semana	Local
1	12/01/05	Quarta-feira	R. 24 de Maio x R. André de Barros
2	12/01/05	Quarta-feira	R. Des. Westphalen x R. André de Barros
3	18/01/05	Terça-feira	Av. Sete de Setembro x R. Alferes Poli
4	18/01/05	Terça-feira	Av. Iguaçu x Av. República Argentina
5	20/01/05	Quinta-feira	Av. Mal. Floriano Peixoto x R. Conselheiro Dantas
6	26/01/05	Quarta-feira	R. da Paz x Av. Presidente Affonso Camargo
7	01/02/05	Terça-feira	R. Pe. Anchieta x R. Cap. Souza Franco
8	02/02/05	Quarta-feira	Av. República Argentina x R. Vital Brasil
9	02/02/05	Quarta-feira	Av. República Argentina x R. Pedro Zagonel
10	22/02/05	Terça-feira	R. Augusto Severo x Av. João Gualberto
11	22/02/05	Terça-feira	R. Holanda x Av. Paraná
12	23/02/05	Quarta-feira	Av. Mal. Floriano Peixoto x R. Roberto Hauer
13	23/02/05	Quarta-feira	Av. Mal. Floriano Peixoto x R. Cel. Luiz José dos Santos

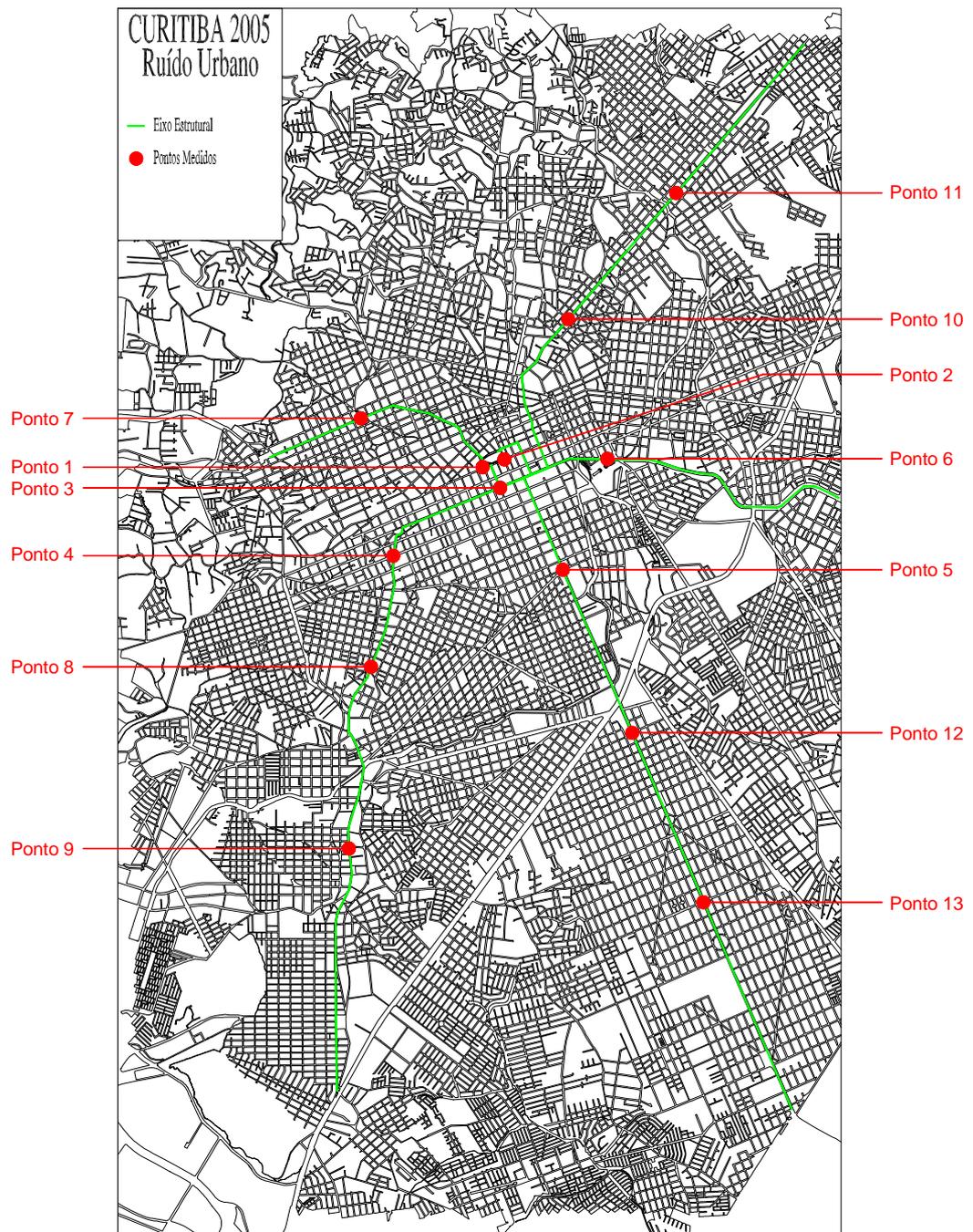


Figura 23 – Pontos de Medição do Ruído Urbano.
Fonte: Da autora.

As figuras 24, 25, 26 e 27 mostram mais detalhes das medições nos eixos estruturais.



Figura 24 – Medição do Ruído Urbano.
Fonte: Da autora.



Figura 25 – Medição do Ruído Urbano.
Fonte: Da autora.



Figura 26 – Medição do Ruído Urbano.
Fonte: Da autora.



Figura 27 – Medição do Ruído Urbano.
Fonte: Da autora.

3.4. Descrição do Ambiente Controlado

Para a medição do índice de redução do ruído em laboratório são necessárias duas câmaras: a emissora e a receptora. Entre estas câmaras são colocadas as amostras para os testes. Na figura 28 é mostrado o esquema utilizado por Tadeu *et al* (2003) para a avaliação da redução de ruídos com uso de vidros.

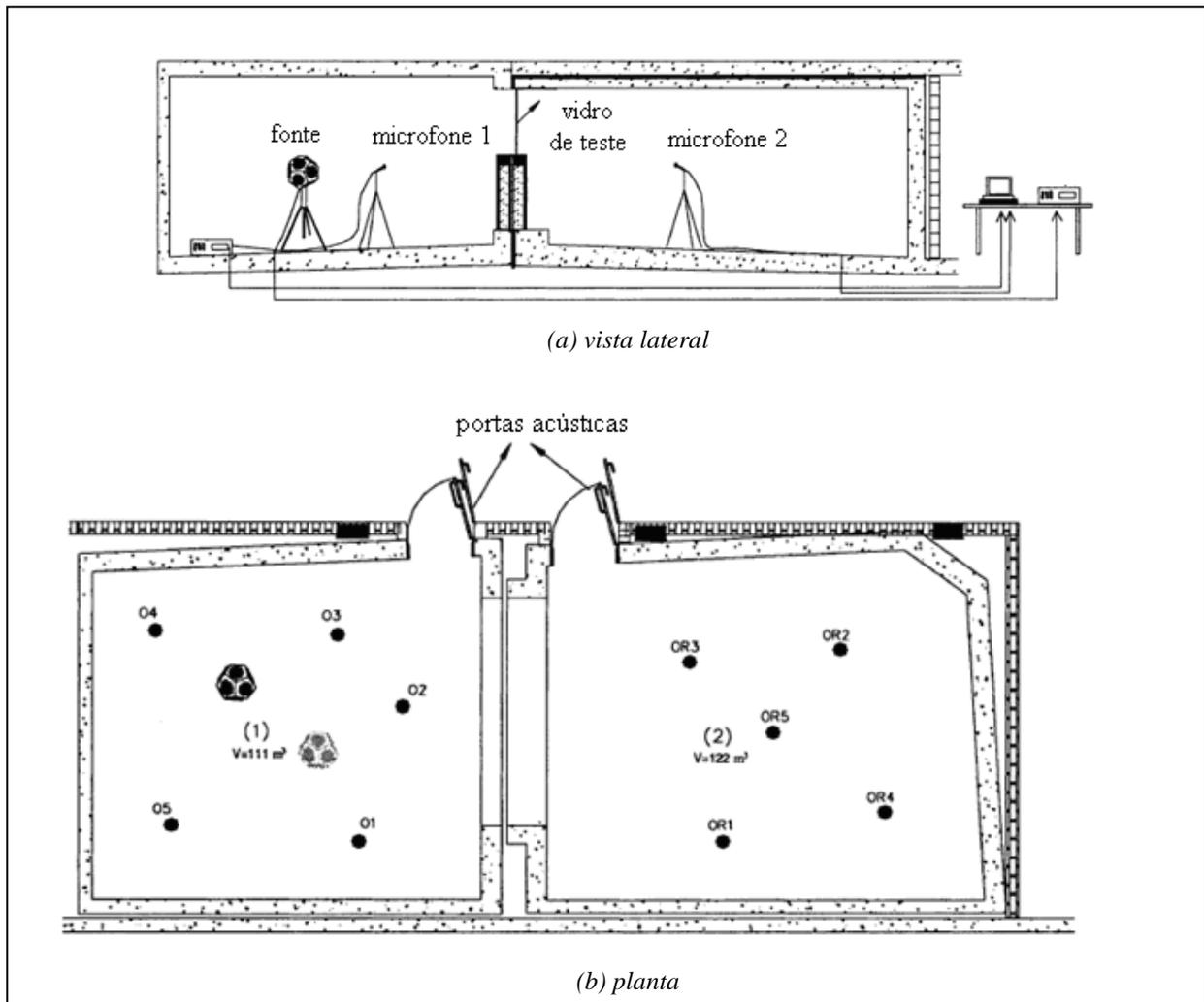


Figura 28 – Exemplo de Câmaras para o Teste de Isolamento Acústico com Vidros.
Fonte: Adaptado de Tadeu et al (2003).

Para análise experimental foi construída uma câmara em concreto e paredes opostas não são paralelas para evitar a formação de ondas estacionárias em cada ambiente de medição. O índice de redução de ruído (R) é calculado com a norma ISO140-3 levando em consideração o fenômeno da reverberação e não somente a diferença dos níveis de pressão sonora nas duas salas.

Nota-se que o volume das câmaras utilizadas por Tadeu *et al* (2003) é de 111 m^3 para a câmara emissora e 122 m^3 para a câmara receptora. Estes dados estão de acordo com a norma ISO 140-3 que recomenda o volume mínimo de 50 m^3 para cada câmara e que a diferença de volume das câmaras seja, no mínimo, de 10%.

O ambiente de medição utilizado neste trabalho foi disponibilizado pela empresa Conforto Ambiental Ltda. localizada na cidade de Curitiba – PR. O volume destas

salas não está de acordo com as recomendações da ISO 140-3 para a caracterização da redução do ruído para vidros em laboratório.

No entanto, o objetivo principal deste trabalho é avaliar *in situ* o índice da redução de ruído em ambientes pequenos típicos das moradias existentes nas grandes cidades brasileiras (apartamentos e casas). Estudo semelhante foi realizado por Tadeu e Mateus (2001) onde as câmaras de recepção e emissão mediam (4,0 x 2,7 x 2,7) m, 29,16 m³ e (3,0 x 2,7 x 2,7) m, 21,87 m³, respectivamente. Estes autores utilizaram os procedimentos da norma portuguesa NP-2073 para avaliar a redução de ruído que é dada por:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \left(\frac{10 \times T_r}{0.16 \times V} \right) \quad [\text{dB}] \quad (17)$$

onde L_1 e L_2 correspondem aos níveis médios da pressão sonora (dB) nas câmaras de emissão e recepção, respectivamente; V é o volume da câmara de recepção (m³) e T_r indica o tempo de reverberação médio (s) para uma dada frequência.

A figura 29 ilustra a planta das do ambiente controlado onde foram realizados os ensaios de redução de ruído de vidros. As dimensões da sala de recepção são 2,5 x 2,5 x 2,5 m, 15,6 m³, e as dimensões da sala de emissão são 1,5 x 2,5 x 2,5 m, 9,37 m³, e, portanto, a diferença de volume das duas câmaras supera os 10% citados na norma. As paredes e a laje das salas são levemente inclinadas porque, segundo Gerges (1992), quando faz-se as paredes não paralelas, cria-se um campo difuso que distribui uniformemente a energia sonora em todo o ambiente (*Figura 29 e 30*).

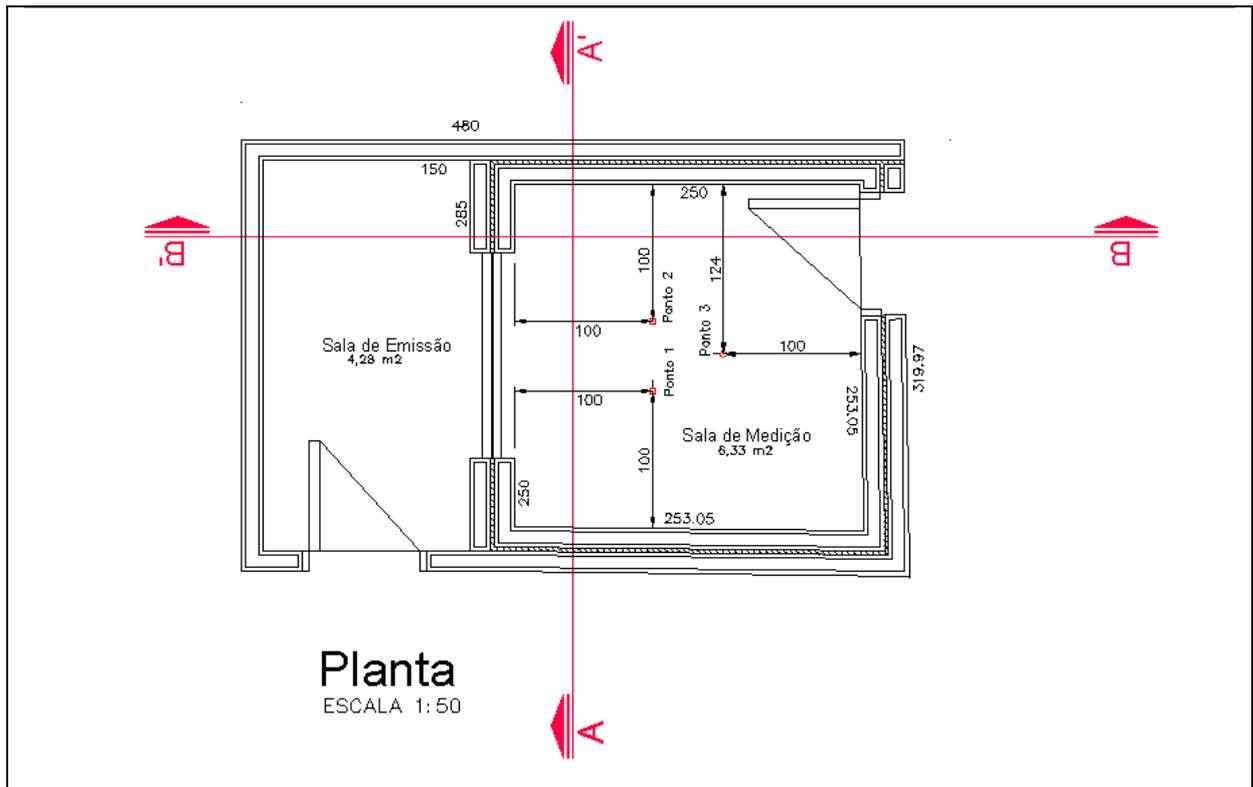


Figura 29 – Planta do Ambiente Controlado Utilizado nas Medições.
Fonte: da Autora.

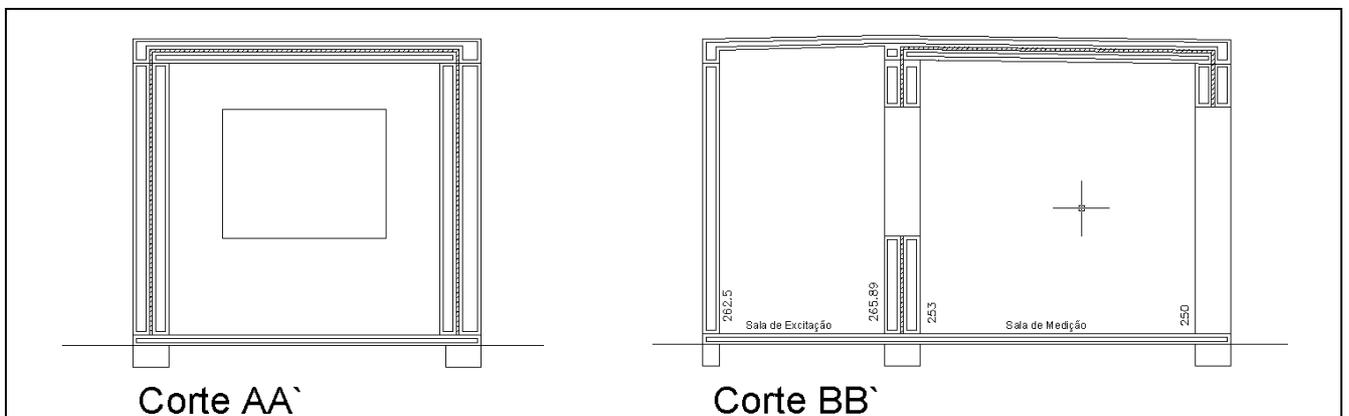


Figura 30 – Cortes do Ambiente Controlado Utilizado nas Medições.
Fonte: da Autora.

Na sala de medição foram marcados 3 pontos, distantes entre si 0,5 m, a altura do microfone foi mantida em 1,29 m e distante, no mínimo, de 1 m das paredes, conforme a exigência da norma NBR 10.151 de dezembro de 1987. Para cada NPS, foram realizadas as medidas nos três pontos.

As paredes da sala de recepção são duplas, compostas por blocos cerâmicos de seis furos com 14 cm cada uma. A espessura de 2,5 cm entre os blocos é preenchida com lã de

vidro de densidade 60 kg/m^3 , envolvida por um plástico escuro (*Figura 31*). Os lados que ficam expostos, de cada uma das paredes, são chapiscadas, emboçados, rebocados e pintados. Internamente as paredes são revestidas com espuma absorvente de espessura 50 mm para diminuir o tempo de reverberação, assim como foi realizado em Tadeu e Mateus (2001).



*Figura 31 – Detalhe das Paredes do Ambiente Controlado.
Fonte: Da Autora.*

Similar às paredes, o teto da sala de medição também possui, entre duas lajes pré-moldadas, lã de vidro com a mesma densidade utilizada no preenchimento entre as paredes. O piso da sala de medição é composto por cimento, cal, areia e pequenos pedaços de borracha substituindo a brita para evitar a passagem de vibração, e, por cima, uma camada de argamassa com espessura de 1 cm para dar acabamento. Para melhorar a absorção do ruído o piso é revestido com carpete de náilon com espessura de 3 mm. (*Figura 32*).



*Figura 32 – Detalhe da Laje.
Fonte: Da Autora.*

A abertura entre a sala de medição e a sala de emissão utilizada para a fixação dos vidros é de 1,20 x 1,50 m (*Figura 33*). Um perfil de alumínio maciço circunda esse espaço caso seja necessário encaixar amostras ou fechar o vão para ensaiar amostras com menor área menor. Para esse último, os sulcos devem ser fechados com uma espuma de PVC expandido.



*Figura 33 – Abertura para a Fixação da Amostra.
Fonte: Da Autora.*

3.5. Descrição da Metodologia das Medições em Ambiente Controlado

Para fixar os vidros entre as duas salas, foram utilizadas cantoneiras parafusadas no perfil de alumínio, ficando em ambos os lados da amostra a ser ensaiada. Para que a vedação fosse garantida, foi colada uma espuma no lado interno da cantoneira, parte que fica em contato com o vidro (*Figura 34*).



*Figura 34 – Espuma para Vedação.
Fonte: Da Autora.*

As figuras 35, 36, 37 e 38, mais algumas fotos que mostram mais detalhes da câmara e da metodologia.



*Figura 35 – Detalhe da Espuma de Vedação nas Cantoneiras.
Fonte: Da Autora.*



*Figura 36 – Ventosas para Auxiliar o Transporte dos Vidros.
Fonte: Da Autora.*



*Figura 37 – Transporte dos Vidros.
Fonte: Da Autora.*



*Figura 38 – Fixação das Cantoneiras.
Fonte: Da Autora.*

O som emitido para a realização dos ensaios foi o ruído rosa: todas as bandas de frequência contribuem com a mesma energia (dB) (FERNANDES, 2002).

Nas medições foi usado o *compact disc* (CD) de Aplicações Técnicas para Áudio Profissional da SPX Sistemas Eletroacústicos Ltda., produzido por Solon Petraru. A faixa do ruído rosa tem um minuto de duração e os testes realizados, 30 segundos.

O analisador de frequência foi posicionado e programado com 15 segundos de atraso para o início da medição, dessa maneira, era possível sair da sala de medição e ligar a fonte sonora sem perturbar a análise. O tempo de reverberação medido da sala é de aproximadamente 3s, portanto, a onda medida já era estacionária (*Figura 39*). Foi utilizado

esse método para evitar a influência do início e do final da faixa do CD no espectro de frequência. Dessa forma, foram eliminadas interferências externas garantindo uma uniformidade da captação do ruído.

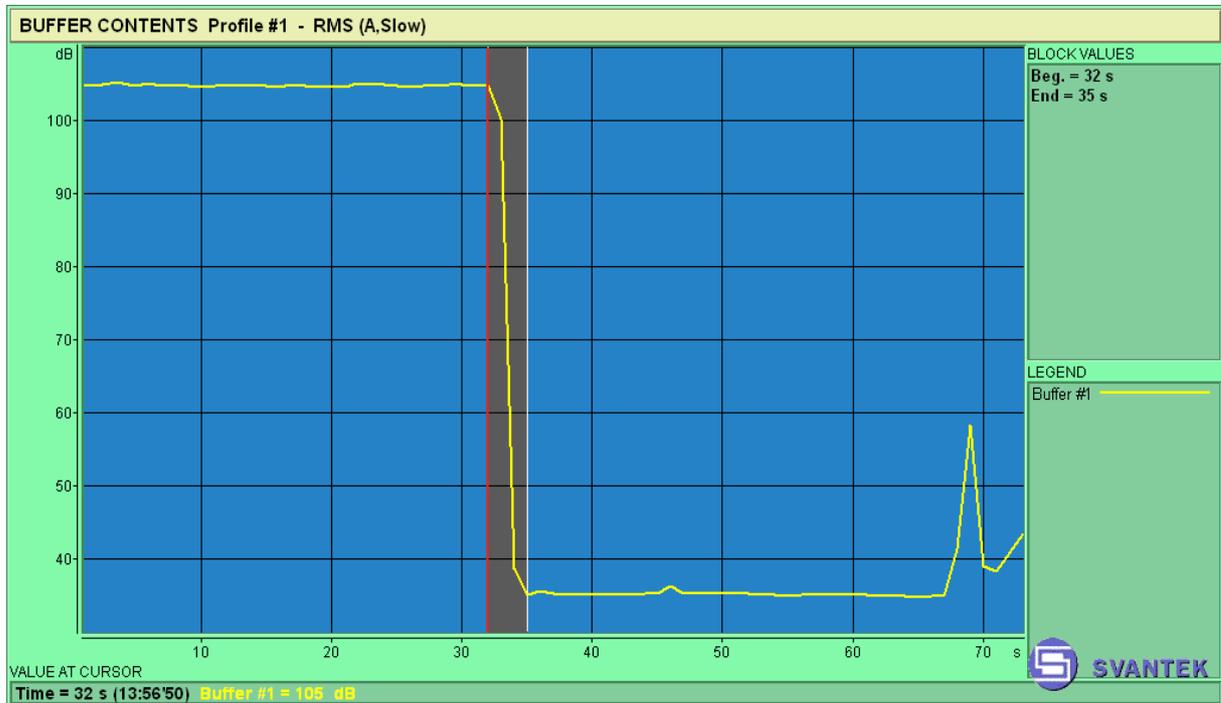


Figura 39 – Gráfico do Tempo de Reverberação.
Fonte: Da Autora.

As medições ocorreram em duas partes: na primeira, o vão ficou livre durante a emissão de ruído rosa, dessa forma, os microfones aferiram os espectros de frequência sem barreira – valores de referência. Na segunda etapa, fixou-se o vidro a ser ensaiado e, utilizando a mesma metodologia de medição, registrou-se o espectro de frequência. Comparando as duas medições, pôde-se caracterizar os vidros, pois a atenuação ocorrida deve-se a barreira de vidro colocada entre as duas salas.

O ruído de fundo da câmara acústica também foi avaliado e a figura 40 apresenta o NPS em banda de 1/1 oitava de frequência obtido.

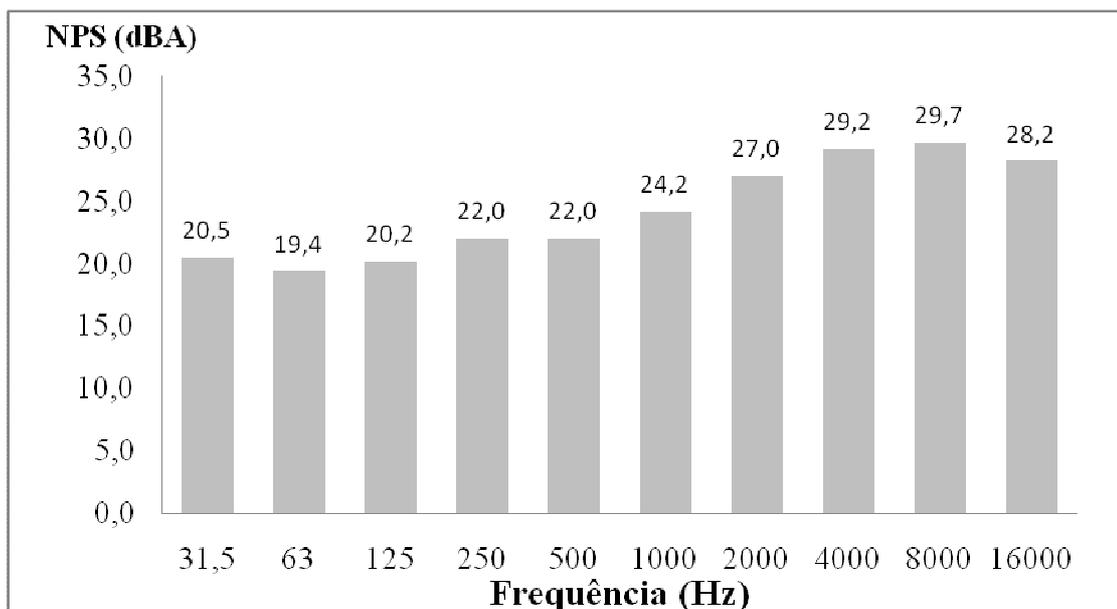


Figura 40 – Ruído de Fundo do Ambiente Controlado.
 Fonte: Da autora.

Os vidros escolhidos para os testes estão na tabela 13, que também traz a codificação utilizada para apresentar os resultados. Todas as amostras possuem a dimensão de 1,20 x 1,50 m, respeitando a restrição – razão entre o menor comprimento dividido pela espessura deve ser maior do que 100 – para utilizar a teoria de placas finas explanada no capítulo 3.

Tabela 13 – Vidros Ensaaiados e Codificação.
 Fonte: Da Autora.

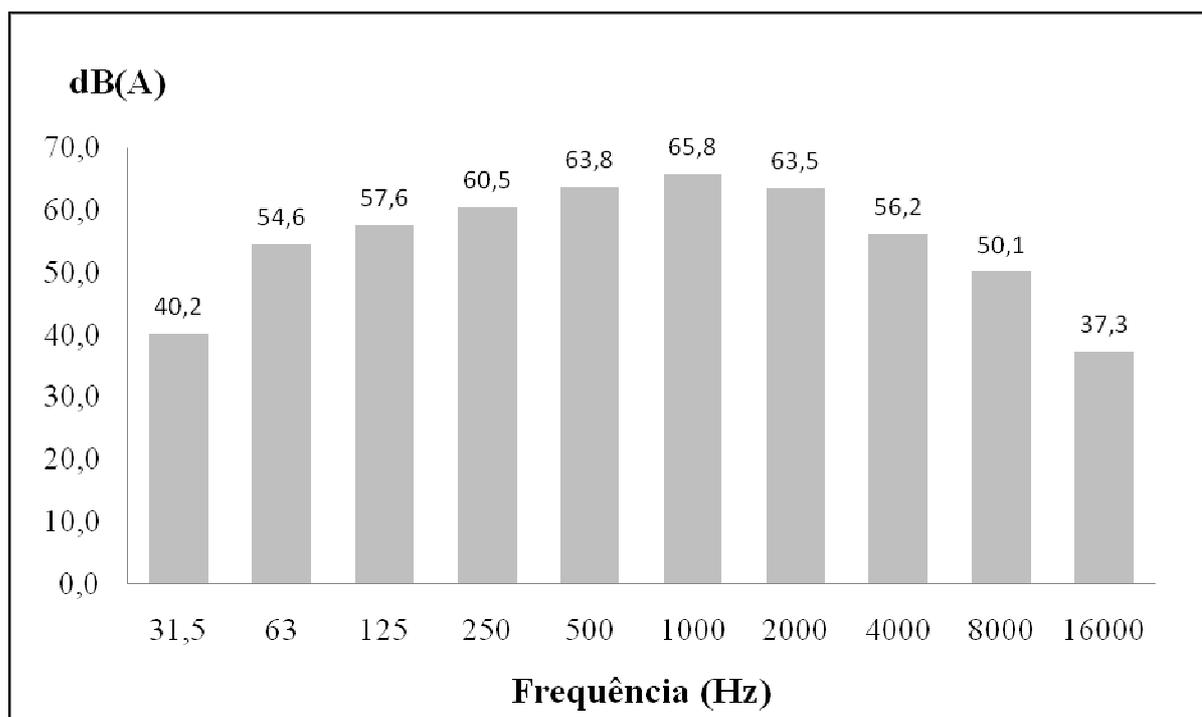
Vidro	Sigla
Monolítico 4mm	Mono 4
Monolítico 6mm	Mono 6
Temperado 6mm	Temp 6
Laminado 3mm+butiral+3mm	Lam 3+3
Laminado 4mm+butiral+4mm	Lam 4+4
Duplo Laminado 8mm+câmara de ar 6mm+monolítico 4mm	Dp 8+6+4
Duplo Laminado 6mm+câmara de ar 8mm+monolítico 4mm	Dp 6+8+4

Capítulo 4 – RESULTADOS

Nesta seção são mostradas as medições do ruído urbano e no ambiente controlado, os cálculos analíticos e experimentais, assim como os resultados obtidos.

4.1. Resultados do Ruído Urbano

Foram analisados os ruídos gerados pela cidade de Curitiba para saber quais as faixas de frequências predominantes. Através dos gráficos (*Figuras 41, 42, 43 e 44*), constatou-se que as bandas de 250 Hz a 2.000 Hz são as que mais contribuem para o NPS total. Portanto, as análises dos vidros foram focadas nessas frequências.



*Figura 41 – Média das Frequências do Ruído Urbano (08h00 – 08h30).
Fonte: Da autora.*

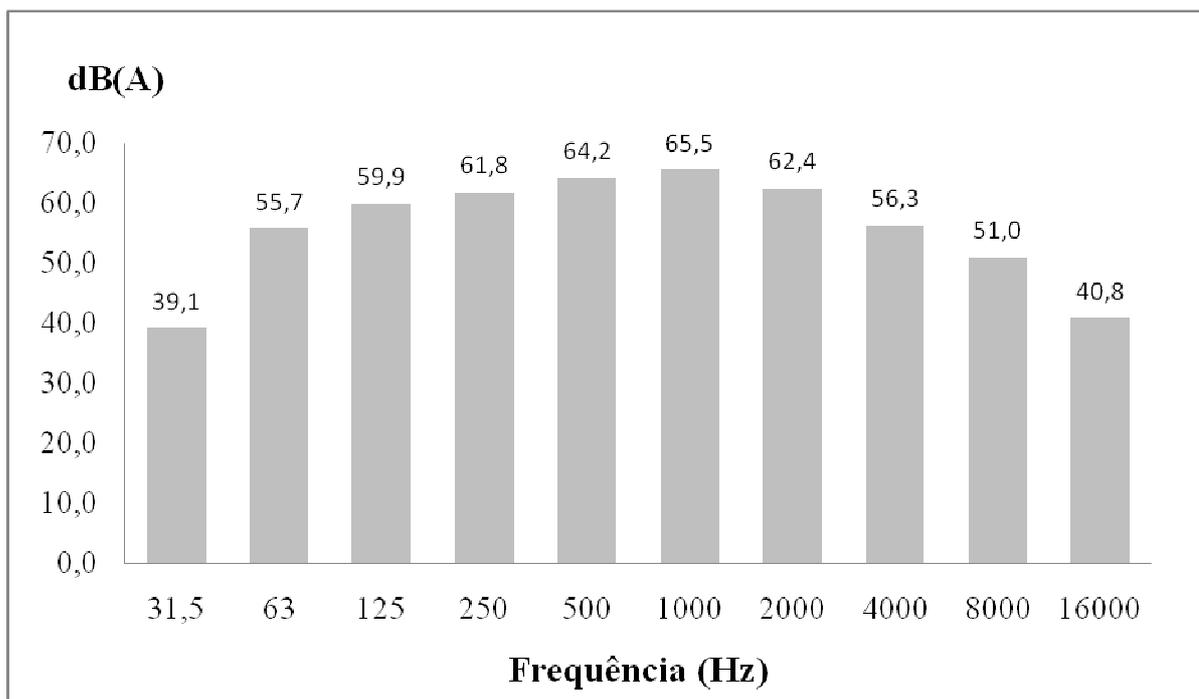


Figura 42 – Média das Frequências do Ruído Urbano (12h00 – 12h45).
 Fonte: Da autora.

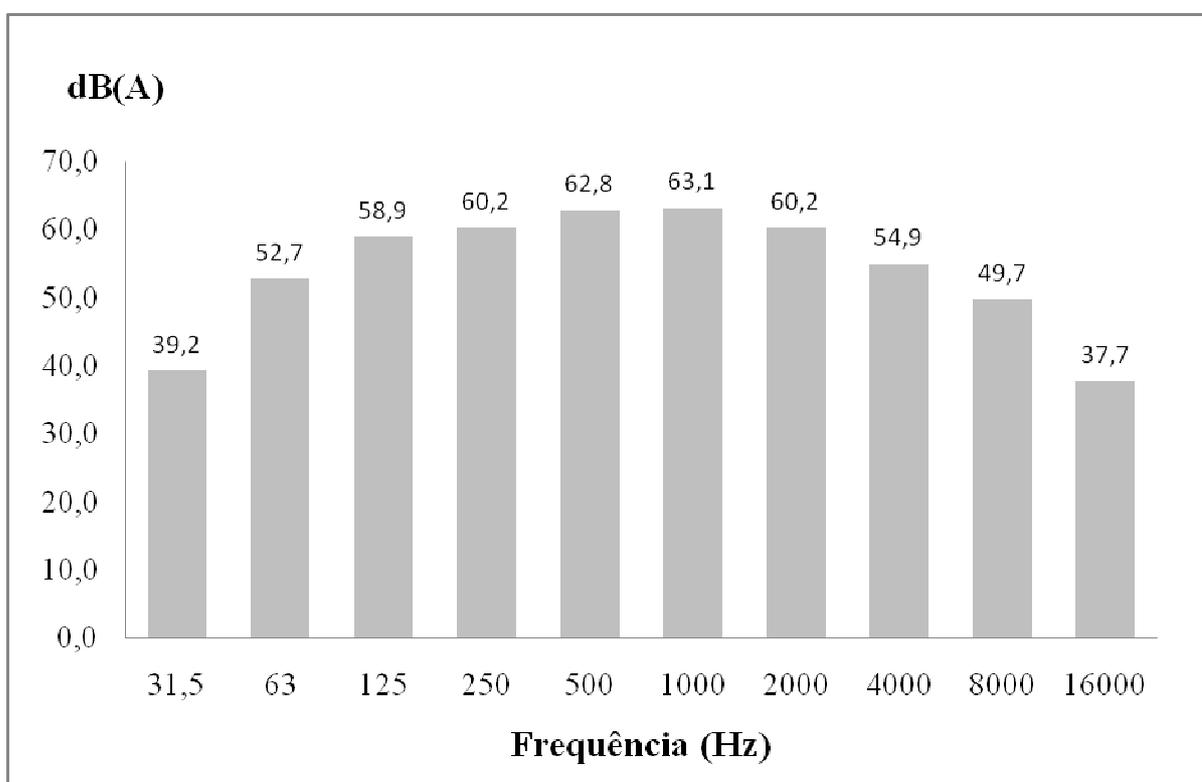


Figura 43 – Média das Frequências do Ruído Urbano (18h00 – 18h30).
 Fonte: Da autora.

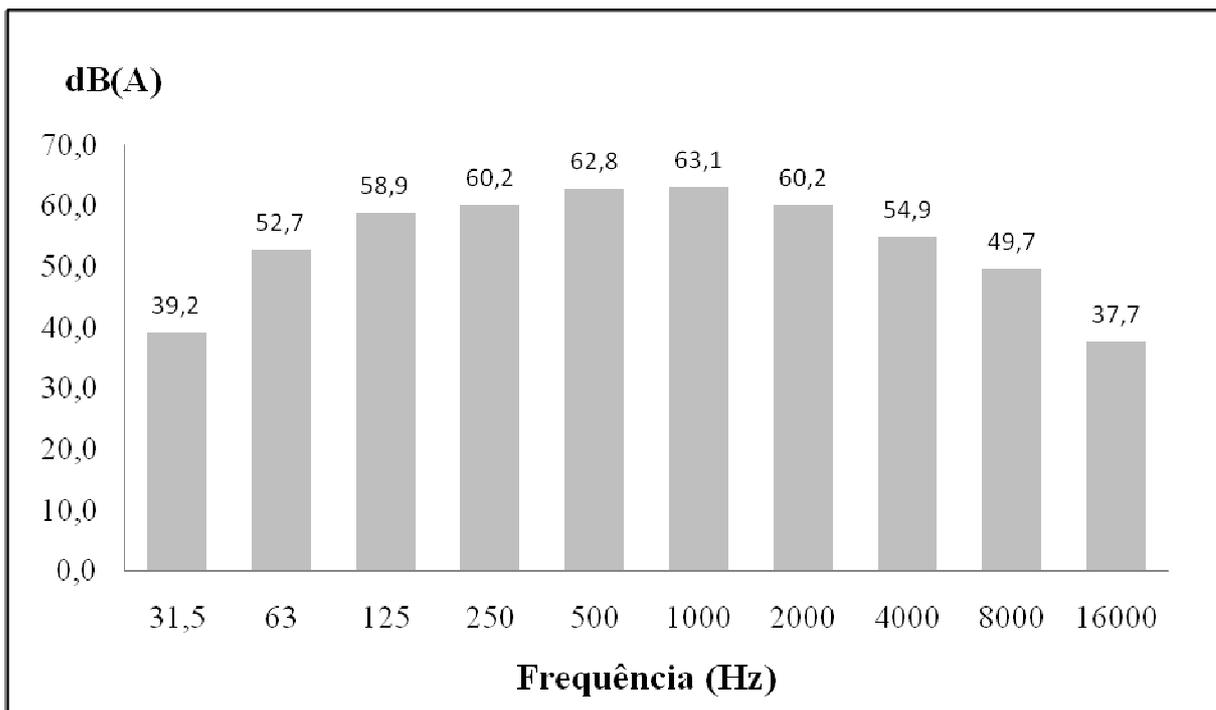


Figura 44 – Média das Frequências do Ruído Urbano (Todos os Horários).
 Fonte: Da autora.

Os níveis médios de ruído (L_{eq}) medidos estão na tabela 14:

Tabela 14 – Níveis Médios de Ruído de Curitiba.
 Fonte: Da Autora.

	L_{eq} (dBA)
08h00 – 08h30	74,8
12h00 – 12h45	73,4
18h00 – 18h30	75,0
Todos os Horários	74,4

No capítulo 2, o estudo realizado por Zannin *et al* (2002) mostra os NPS's equivalentes em diversos pontos da cidade de Curitiba. Levando em consideração as áreas mista, serviço e centro – locais que foram medidos nesta dissertação – tem-se a média de 74,6 dBA, muito próximo da média encontrada para todos os horários.

4.2. Cálculos das Frequências Críticas e Naturais pelo Método Analítico

Através das equações (6) e (7) do capítulo 2, determinou-se as frequências que limitam a região controlada pela lei das massas (*Tabela 15, 16 e 17*).

Tabela 15 – Frequências Naturais de Painéis Simples pelo Método Analítico.

Fonte: Da Autora.

Vidro	Frequências Naturais – f_{ij} (Hz)				
	f_{11}	f_{12}	f_{21}	f_{22}	f_{23}
Mon 4	13,07	28,37	36,98	52,28	77,78
Mon 6	18,21	39,54	51,53	72,85	108,39
Temp 6	11,36	24,67	32,15	45,46	67,63
Lam 3+3	23,90	51,89	67,63	95,62	142,26
Lam 4+4	18,17	39,45	51,41	72,69	108,14

Tabela 16 – Continuação das Frequências Naturais de Painéis Simples pelo Método Analítico.

Fonte: Da Autora.

Vidro	Frequências Naturais – f_{ij} (Hz)				
	f_{32}	f_{33}	f_{34}	f_{43}	f_{44}
Mon 4	92,13	117,63	153,33	173,42	209,12
Mon 6	128,38	163,92	213,67	241,65	291,41
Temp 6	80,10	102,28	133,32	150,78	181,83
Lam 3+3	168,50	215,14	280,44	317,18	382,48
Lam 4+4	128,09	163,54	213,18	241,10	290,74

Tabela 17 – Frequências Críticas de Painéis Simples pelo Método Analítico.

Fonte: Da Autora.

Vidro	Frequência Crítica – f_c (Hz)
Mon 4	2.523
Mon 6	1.810
Temp 6	2.902
Lam 3+3	1.379
Lam 4+4	1.815

E para o cálculo das frequências de ressonância dos painéis duplos, utilizaram-se as equações (11), (12) e (13) do capítulo 2, tendo como a densidade do ar (ρ_0) igual a 1,21 kg/m³ e velocidade do som no ar (c), 341m/s (*Tabela 18*).

Tabela 18 – Frequências de Ressonâncias de Painéis Duplos pelo Método Analítico.

Fonte: Da Autora.

Vidro	Frequência Ressonância (Hz) Eq. (11)	Frequência de Ressonância (Hz) Eq. (12)	Frequência de Ressonância (Hz) Eq. (13)
Dp 8+6+4	299,00	399,30	401,15
Dp 6+6+4	272,95	364,51	366,20

Os índices de redução sonora experimentais dificilmente corroboram com os resultados analíticos – como comentado na seção 2.4.2.2 – os valores práticos aferidos serão comparados com os resultados de Tadeu e Mateus (2001) (*Figuras 15 e 16*).

4.3. Medições e Resultados Experimentais

A metodologia utilizada está descrita no capítulo 3. Os níveis de emissão de ruído rosa foram de 60, 75 e 90 dBA. Esses valores foram escolhidos, pois as medições de ruído urbano feitas nesta dissertação variam de 60 a 90 dBA.

Estipularam-se como referência os NPS's da sala de medição, sem vidro na abertura entre as duas salas do ambiente controlado (*Tabela 19*).

Tabela 19 – NPS's de Referência (dBA).

Fonte: Da Autora.

Sem Vidro										
Emissão (dBA)	Frequências (Hz)									
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
60	21,4	24,8	30,5	38,6	42,6	48,5	45,8	40,7	40,2	31,0
75	36,6	39,8	45,4	55,1	58,7	64,7	62,0	56,9	56,4	44,2
90	49,0	54,1	59,8	68,6	73,0	78,6	76,1	72,3	70,7	57,3

Os valores de referência foram corrigidos, quando necessário, devido ao ruído de fundo, segundo as considerações feitas no capítulo 2 (*Tabela 20*).

Tabela 20 – NPS's de Referência Corrigidos (dBA).

Fonte: Da Autora.

Sem Vidro - Corrigido										
Emissão (dBA)	Frequências (Hz)									
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
60	0,0	23,3	30,1	38,5	42,5	48,5	45,7	40,4	39,8	0,0
75	36,5	39,8	45,4	55,1	58,7	64,7	62,0	56,9	56,4	44,1
90	49,0	54,1	59,8	68,6	73,0	78,6	76,1	72,3	70,7	57,3

Os resultados aferidos para cada tipo e combinação de vidros, nos NPSs mencionados, estão apresentados nas tabelas 21, 22 e 23.

Tabela 21 – NPSs Medidos, em dBA, para Cada Tipo e Combinação de Vidros com Emissão de 60 dBA.

Fonte: Da Autora.

60 dBA										
Vidro	Frequências (Hz)									
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Dp 8+6+4	19,5	20,7	20,2	22,2	22,3	24,4	27,0	29,0	29,5	28,1
Dp 6+8+4	18,0	20,5	20,6	22,7	22,2	24,4	27,0	29,1	29,6	28,1
Lam 3+3	21,0	20,0	21,8	23,0	22,8	24,8	27,0	29,1	29,6	28,1
Lam 4+4	19,9	19,7	20,6	22,0	22,5	24,7	27,1	29,1	29,6	28,1
Mono 4	18,5	20,1	22,1	24,0	23,7	25,3	27,2	29,4	29,7	28,2
Mono 6	20,8	20,8	23,9	24,5	23,1	24,7	27,3	29,2	29,6	28,2
Temp 6	19,6	20,8	21,9	24,4	23,8	24,7	27,2	29,1	29,7	28,2

Tabela 22 – NPSs Medidos, em dBA, para Cada Tipo e Combinação de Vidros com Emissão de 75 dBA.

Fonte: Da Autora.

75 dBA										
Vidro	Frequências (Hz)									
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Dp 8+6+4	18,1	21,4	27,6	31,9	30,6	28,3	27,4	29,2	29,5	28,1
Dp 6+8+4	18,8	24,0	29,2	34,4	31,2	28,7	27,5	29,2	29,5	28,1
Lam 3+3	18,4	23,8	28,6	31,8	30,0	29,5	28,8	29,3	29,6	28,2
Lam 4+4	18,2	24,2	30,3	32,0	30,9	30,6	29,1	29,3	29,6	28,1
Mono 4	20,1	24,3	33,1	36,7	35,7	34,7	30,8	34,1	29,9	28,3
Mono 6	19,2	26,4	31,0	32,5	31,0	31,1	32,8	30,0	30,0	28,2
Temp 6	18,2	27,0	30,2	31,9	30,3	30,6	31,6	30,0	29,6	28,3

Tabela 23 – NPSs Medidos, em dBA, para Cada Tipo e Combinação de Vidros com Emissão de 90 dBA.

Fonte: Da Autora.

90 dBA										
Vidro	Frequências (Hz)									
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Dp 8+6+4	19,4	42,7	41,6	46,7	45,5	41,8	34,5	31,2	29,6	28,2
Dp 6+8+4	18,9	33,6	41,8	47,7	44,3	40,5	32,8	29,9	29,6	28,1
Lam 3+3	20,0	36,4	42,8	45,5	43,7	42,5	38,7	32,7	29,9	28,2
Lam 4+4	21,1	34,2	41,7	44,0	42,3	41,4	37,2	30,5	29,9	28,1
Mono 4	20,6	33,9	45,1	48,4	48,5	46,9	41,4	45,2	32,9	28,6
Mono 6	20,2	39,8	43,3	45,3	43,9	43,3	45,8	37,4	33,9	28,5
Temp 6	20,4	40,5	43,6	44,9	44,1	43,6	44,9	37,6	33,7	28,4

Mas são necessárias as correções para retirar a influência do ruído de fundo (Tabela 24, 25 e 26).

Tabela 24 – NPSs, em dBA, Corrigidos para Cada Tipo e Combinação de Vidros com Emissão de 60 dBA.
Fonte: Da Autora.

60 dBA										
Vidro	Frequência (Hz)									
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Dp 8+6+4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Dp 6+8+4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Lam 3+3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Lam 4+4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mono 4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mono 6	0,0	0,0	21,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Temp 6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela 22 – NPSs, em dBA, Corrigidos para Cada Tipo e Combinação de Vidros com Emissão de 75 dBA.
Fonte: Da Autora.

75 dBA										
Vidro	Frequência (Hz)									
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Dp 8+6+4	0,0	0,0	26,7	31,4	30,0	26,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Dp 6+8+4	0,0	22,1	28,6	34,1	30,6	26,8	0,0	0,0	0,0	0,0
Lam 3+3	0,0	21,8	28,0	31,4	29,3	28,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Lam 4+4	0,0	22,4	29,9	31,5	30,3	29,4	0,0	0,0	0,0	0,0
Mono 4	0,0	22,5	32,8	36,5	35,5	34,3	28,5	32,5	0,0	0,0
Mono 6	0,0	25,4	30,6	32,1	30,4	30,1	31,4	0,0	0,0	0,0
Temp 6	0,0	26,1	29,7	31,4	29,6	29,4	29,7	0,0	0,0	0,0

Tabela 23 – NPSs, em dBA, Corrigidos para Cada Tipo e Combinação de Vidros com Emissão de 90 dBA.
Fonte: Da Autora.

90 dBA										
Vidro	Frequência (Hz)									
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Dp 8+6+4	0,0	42,7	41,6	46,7	45,4	41,7	33,6	0,0	0,0	0,0
Dp 6+8+4	0,0	33,4	41,8	47,7	44,3	40,4	31,5	0,0	0,0	0,0
Lam 3+3	0,0	36,3	42,8	45,4	43,7	42,4	38,4	30,1	0,0	0,0
Lam 4+4	0,0	34,1	41,7	44,0	42,2	41,3	36,8	0,0	0,0	0,0
Mono 4	0,0	33,8	45,1	48,4	48,5	46,9	41,2	45,1	30,1	0,0
Mono 6	0,0	39,7	43,2	45,3	43,8	43,2	45,7	36,7	31,9	0,0
Temp 6	0,0	40,4	43,6	44,9	44,0	43,5	44,8	37,0	31,6	0,0

Para o NPS de 60 dBA, NPS de 75 dBA, nas frequências de 31,5 Hz e 4.000 a 16.000 Hz e, também, para o NPS de 90 dBA, nas frequências de 31,5 Hz e 16.000 Hz, os vidros ensaiados não podem ser analisados. Os valores zeros significam que o ruído de fundo é alto comparado com a potência da fonte. O vidro monolítico de 6 mm, com emissão de 60 dBA, na frequência de 125 Hz, permitiu a passagem de ruído. Esse fato pode ser explicado pela frequência de ressonância já mencionada no capítulo 4.

Utilizando a eq. (17), em que L_1 são os valores de referência, ou seja, valores medidos sem vidro na abertura entre as salas e L_2 os valores corrigidos de cada vidro, têm-se os índices de redução de ruído (R) de cada tipo e combinação de vidros obtidos experimentalmente (Tabela 27 e 28).

Tabela 27 – Índice de Redução, em dBA, o para Cada Tipo e Combinação de Vidros com Emissão de 75 dB(A).
Fonte: Da Autora.

75 dBA - Resultado										
Vidro	Frequências (Hz)									
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Lam 3+3	0,0	28,8	28,2	34,5	40,2	47,4	0,0	0,0	0,0	0,0
Lam 4+4	0,0	28,2	26,3	34,4	39,2	46,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mono 4	0,0	28,0	23,3	29,3	34,0	41,2	44,2	35,2	0,0	0,0
Mono 6	0,0	25,2	25,6	33,7	39,1	45,4	41,3	0,0	0,0	0,0
Temp 6	0,0	24,4	26,5	34,5	39,9	46,0	43,0	0,0	0,0	0,0
Dp 8+6+4	0,0	0,0	29,5	34,5	39,6	49,3	72,8	0,0	0,0	0,0
Dp 6+8+4	0,0	28,3	27,6	31,5	38,9	48,7	72,8	0,0	0,0	0,0

Tabela 28 – Índice de Redução, em dBA, para Cada Tipo e Combinação de Vidros com Emissão de 90 dB(A).
Fonte: Da Autora.

90 dBA - Resultado										
Vidro	Frequências (Hz)									
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Lam 3+3	0,0	28,6	27,8	33,9	40,1	46,9	48,4	0,0	0,0	0,0
Lam 4+4	0,0	30,8	29,0	35,4	41,5	48,0	50,1	83,1	0,0	0,0
Mono 4	0,0	31,1	25,5	31,0	35,2	42,5	45,6	38,0	51,4	0,0
Mono 6	0,0	25,2	27,4	34,1	39,9	46,1	41,1	46,3	49,6	0,0
Temp 6	0,0	24,5	27,0	34,4	39,7	45,8	42,1	46,1	49,9	0,0
Dp 8+6+4	0,0	22,2	29,0	32,7	38,3	47,6	53,3	0,0	0,0	0,0
Dp 6+8+4	0,0	31,4	28,8	31,6	39,4	48,9	55,4	0,0	0,0	0,0

4.4. Comparativo dos Resultados: Experimental x Analítico

As frequências podem estar apresentadas entre dois componentes de onda senóide (bandas de oitava) ou com uma relação de aproximadamente 1,26 com a faixa de oitavas (bandas de um terço de oitavas) (LARANJA, 2000). Somando a intensidade com que cada uma dessas bandas de frequência contribui tem-se o nível de pressão sonora global (NPS).

Para análise dos vidros, neste trabalho, foram utilizadas bandas de 1/1 oitava de frequência, cujas bandas centrais são: 31,5 Hz, 63 Hz, 125 Hz, 500 Hz, 1.000 Hz, 2.000 Hz, 4.000 Hz, 8.000 Hz e 16.000 Hz, cujas respectivas faixas de abrangências estão na tabela abaixo (*Tabela 29*). Sendo assim, os valores analíticos calculados estão contidos na banda de oitava central.

*Tabela 29 – Faixas de Frequências para 1/1 de Oitava.
Fonte: Gerges, 1992.*

Frequência Inferior (Hz)	Frequência Central (Hz)	Frequência Superior (Hz)
44	63	88
88	125	177
177	250	355
355	500	716
716	1000	1420
1420	2000	2840
2840	4000	5680
5680	8000	11360
11360	16000	22720

Como este estudo tem por objetivo a empregabilidade de vidros para isolamento em construções atuais e sendo o ruído urbano a principal causa de incômodo, as frequências com foco principal estão entre 250 Hz e 2000 Hz, conforme as medições realizadas e apresentadas na seção 4.1.

Segundo os gráficos das figuras 45, 46, 47, 48, 49, 50 e 51 obtidos experimentalmente, observa-se uma corroboração dos resultados analíticos.

As frequências naturais teóricas dos painéis simples são muito próximas umas das outras nas baixas frequências, e acumularam-se em uma banda central de 125 Hz, como mostram os resultados. Também as frequências de coincidência teóricas estão bastante evidentes nos resultados.

A frequência crítica analítica do vidro monolítico de 4 mm é de 2.523 Hz. No gráfico da figura 35, a frequência crítica experimental visualizada (*Figura 45*), concentra-se na banda central de 4 kHz. Isso pode ser explicado pela proximidade do valor teórico dos limites das bandas centrais de 2 kHz e 4 kHz.

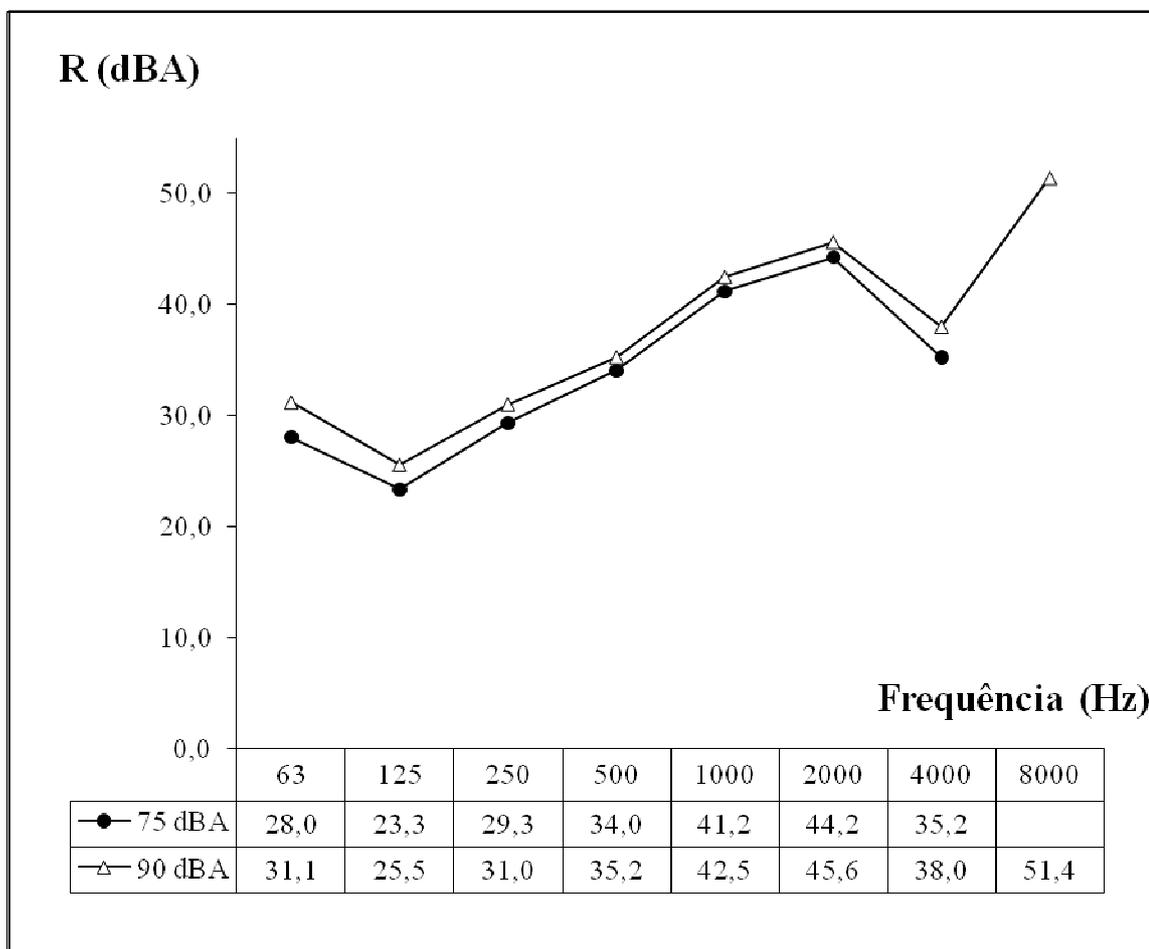


Figura 45 – Índice de Redução de Ruído Obtido Experimentalmente do Vidro Monolítico de 4 mm. Fonte: Da Autora.

Para o vidro monolítico de 6mm, o valores teórico é de 1.810 Hz para a frequência crítica (*Figura 46*).

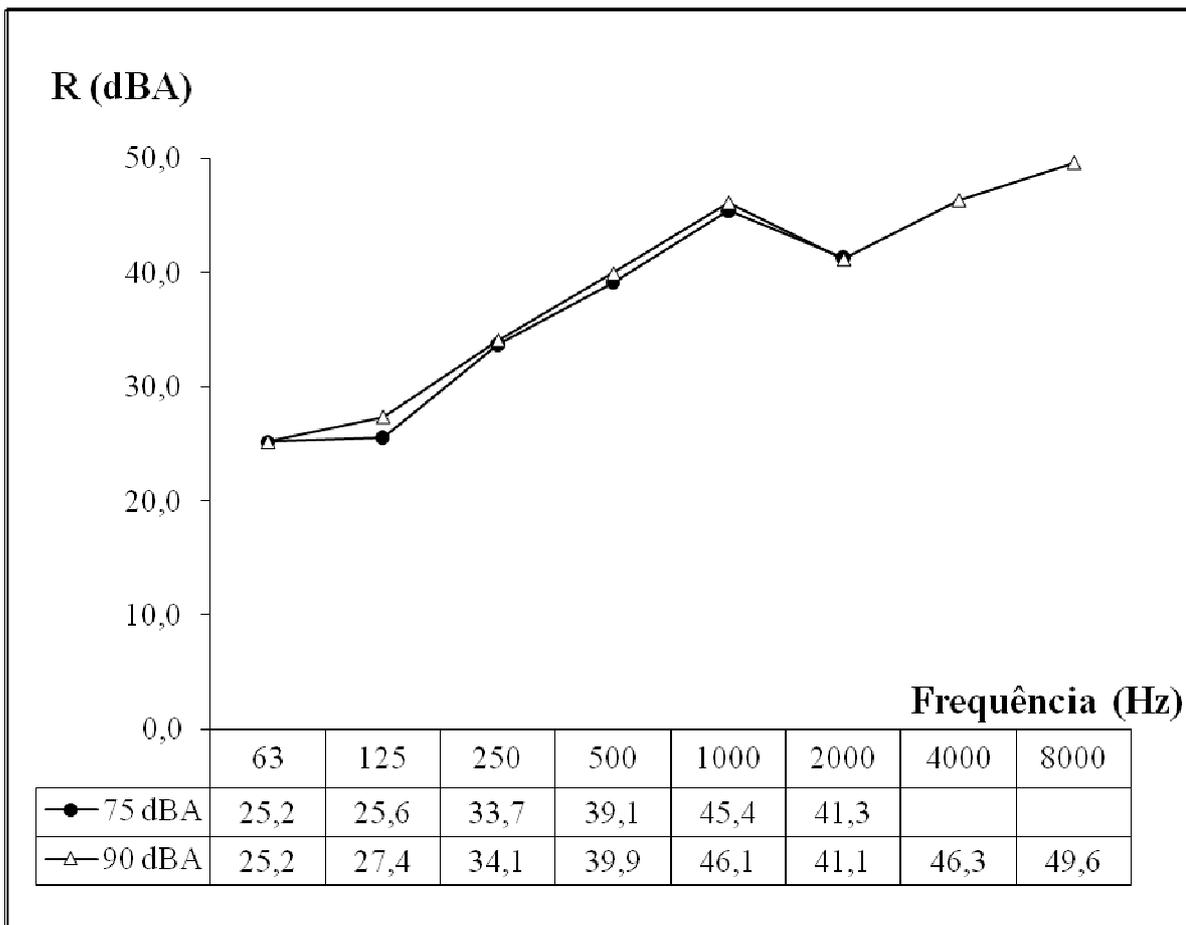


Figura 46 – Índice de Redução de Ruído Obtido Experimentalmente do Vidro Monolítico de 6 mm.
 Fonte: Da Autora.

A frequência crítica do vidro temperado de 6 mm calculada é 2.902 Hz. Assim como para o monolítico de 4 mm, o valor analítico da frequência crítica, encontra-se muito próximo dos limites das bandas centrais de 2 kHz e 4 kHz (Figura 47). Nota-se que o tratamento de têmpera pode ter ocasionado uma pequena alteração na perda de transmissão sonora do vidro, dependendo da frequência analisada, já que, comparando com os resultados do vidro monolítico de mesma espessura, há diferença nos índices de redução de ruído.

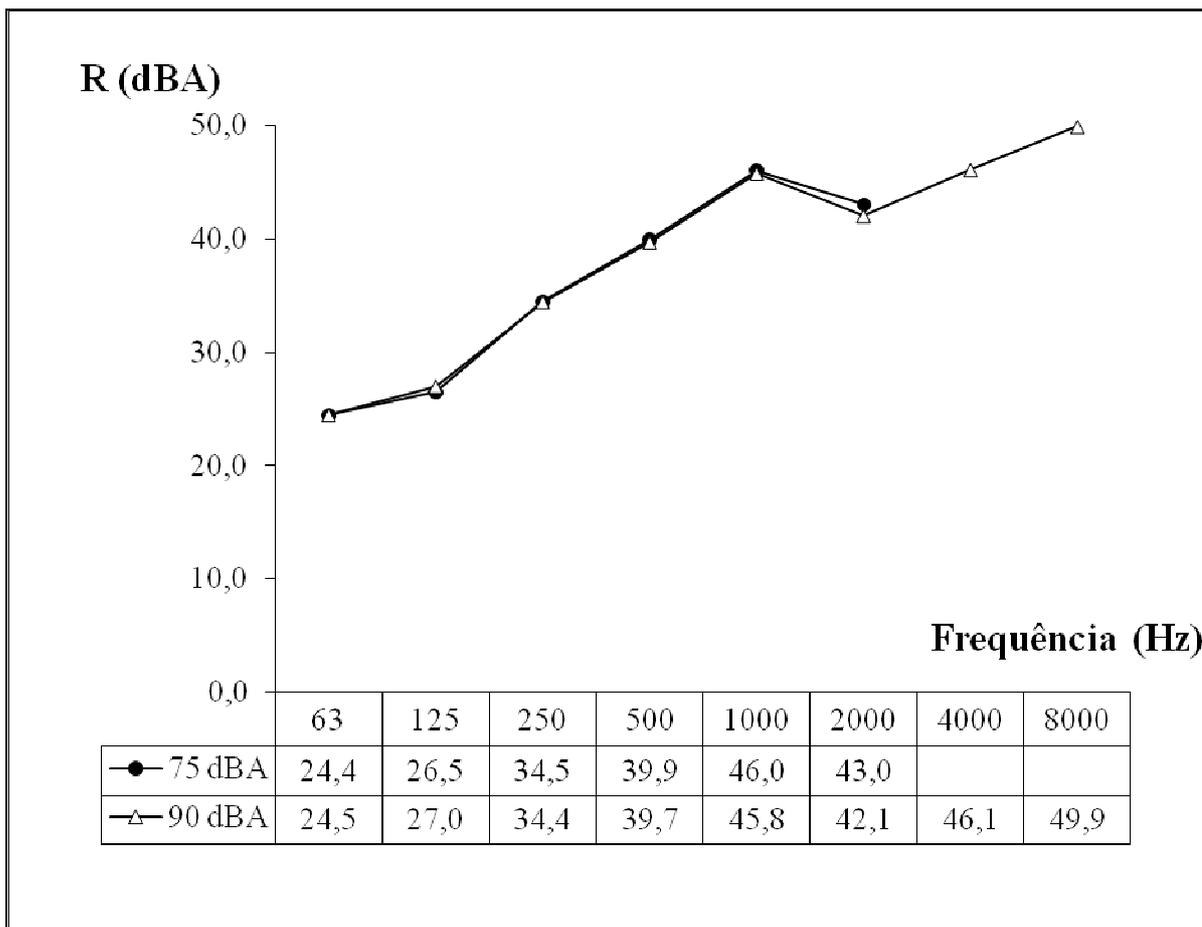


Figura 47 – Índice de Redução de Ruído Obtido Experimentalmente do Vidro Temperado de 6 mm.
 Fonte: Da Autora.

Para o vidro laminado de 6 mm, o valor teórico da frequência crítica foi calculado em 1.815 Hz (Figura 48). Também pode-se perceber que, apesar de possuir a mesma espessura que um dos vidros monolíticos e o vidro temperado testados, o vidro laminado sofreu alterações no índice de redução, sendo uma das possíveis causas a presença do butiral que funciona como um amortecedor, melhorando o desempenho do vidro, principalmente na frequência de mergulho.

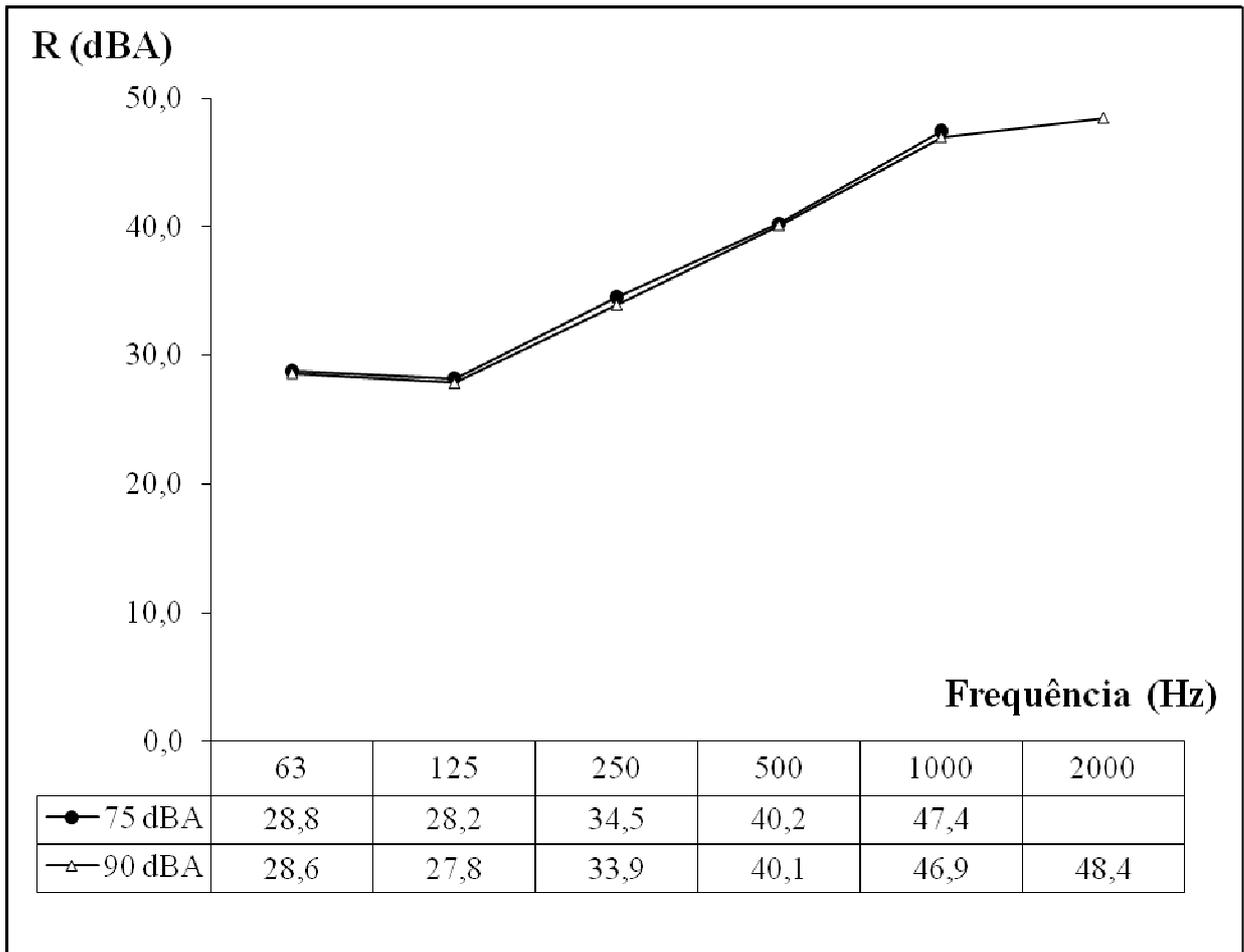


Figura 48 – Índice de Redução de Ruído Obtido Experimentalmente do Vidro Laminado de 6 mm.
 Fonte: Da Autora.

A frequência crítica calculada para o vidro laminado de 8 mm, 1.379 Hz, assim como o vidro laminado de 6 mm, não é visualizada nos resultados práticos, sendo uma das possibilidades, a influência da película de PVB, que une os vidros, funcionando como amortecedor da vibração gerada pelo ruído emitido (Figura 49).

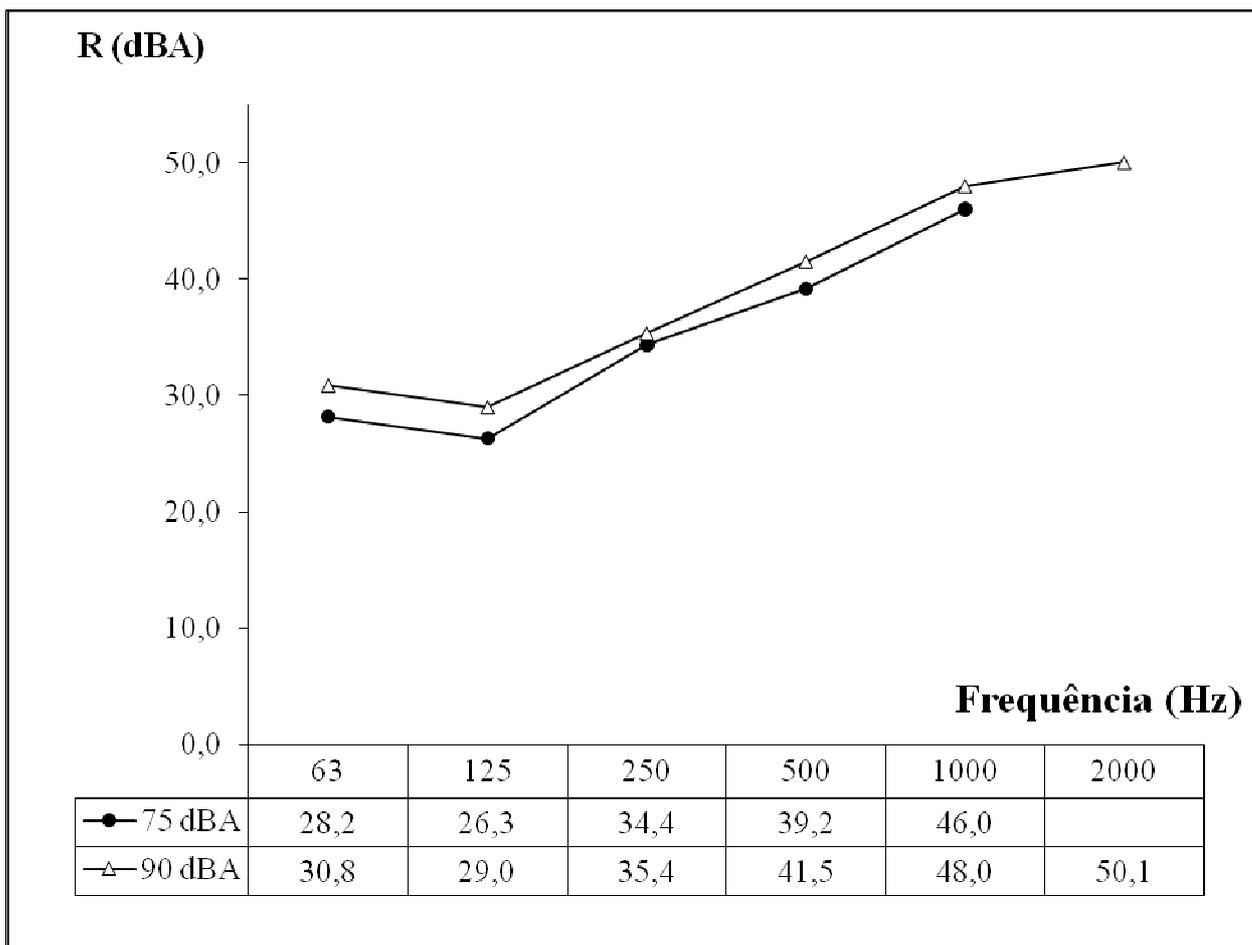


Figura 49 – Índice de Redução de Ruído Obtido Experimentalmente Experimental Vidro Laminado de 8 mm.
 Fonte: Da Autora.

Nos resultados experimentais dos vidros duplos (Figuras 50 e 51) verificou-se que, para um ruído médio de 75 dBA o vidro com mais massa tem um desempenho melhor. Já para um excitação com maior energia, de 90 dBA, tem melhor isolamento acústico aquele que possui a maior câmara de ar e menor massa, nas baixas frequências – 63 Hz a 250 Hz. Enquanto que nas médias frequências – 500 Hz a 2 kHz – ocorre uma inversão, sendo, maior massa maior isolamento, corroborando com a Lei das Massas.

Comparando com os resultados de Tadeu e Mateus (2001), pode-se perceber que, para vidros duplos, são bastante satisfatórios, mesmo com as medições tendo sido realizadas em um ambiente com volume menor que o especificado pela norma.

Também se deve destacar que, utilizando vidros de diferentes espessuras, quando um entra em ressonância, o outro continua isolando, não ocasionando uma maior passagem do ruído, como mostrado na figura 15.

Para o vidro duplo composto de laminado de 6 mm, câmara de ar de 8 mm e laminado de 4 mm, a frequência de ressonância está na faixa de 299 a 402 Hz (Figura 50).

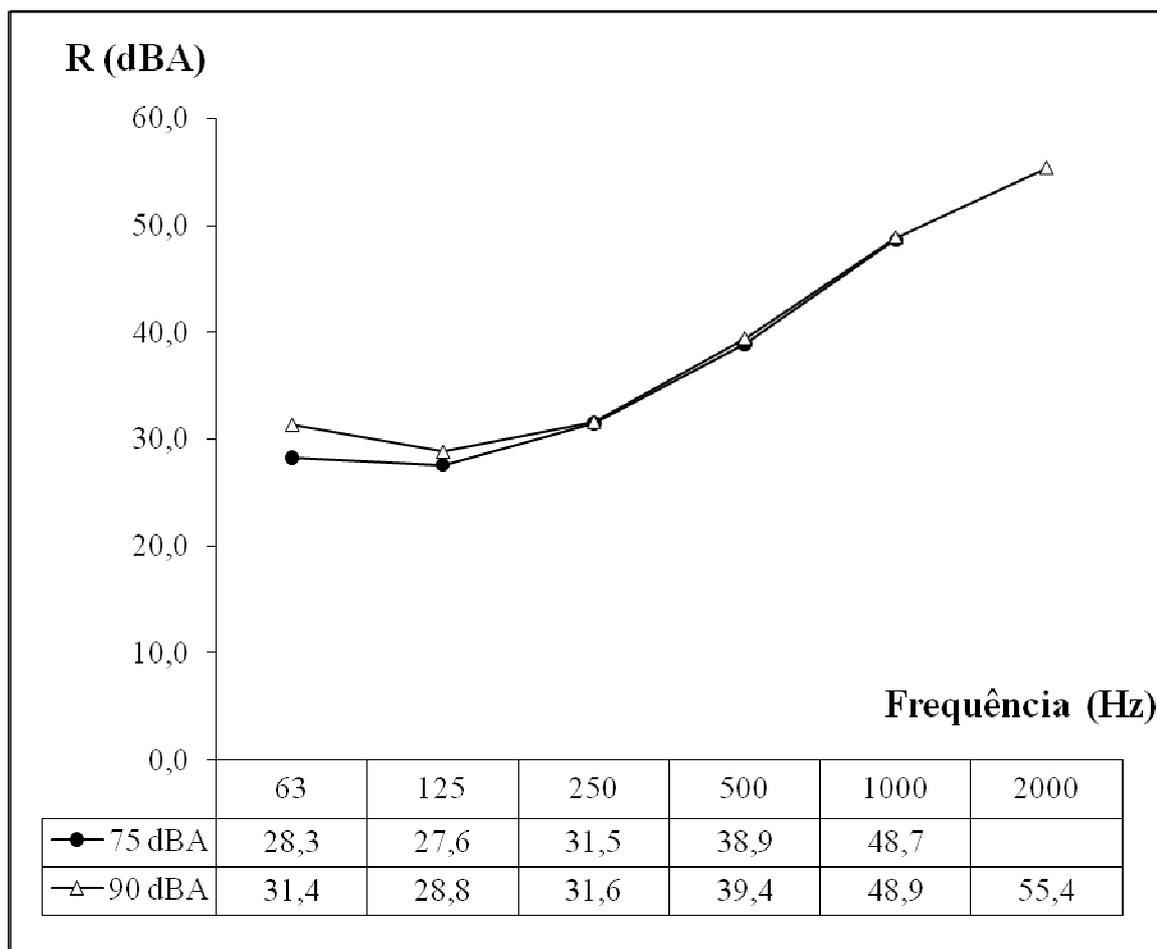


Figura 50 – Índice de Redução de Ruído Obtido Experimentalmente do Vidro Duplo Laminado de 6 mm, Câmara de Ar de 8 mm e Laminado de 4 mm.
 Fonte: Da Autora.

Para o vidro duplo composto de laminado de 8 mm, câmara de ar de 6 mm e laminado de 4 mm, a frequência de ressonância está na faixa de 272 a 366 Hz (Figura 51).

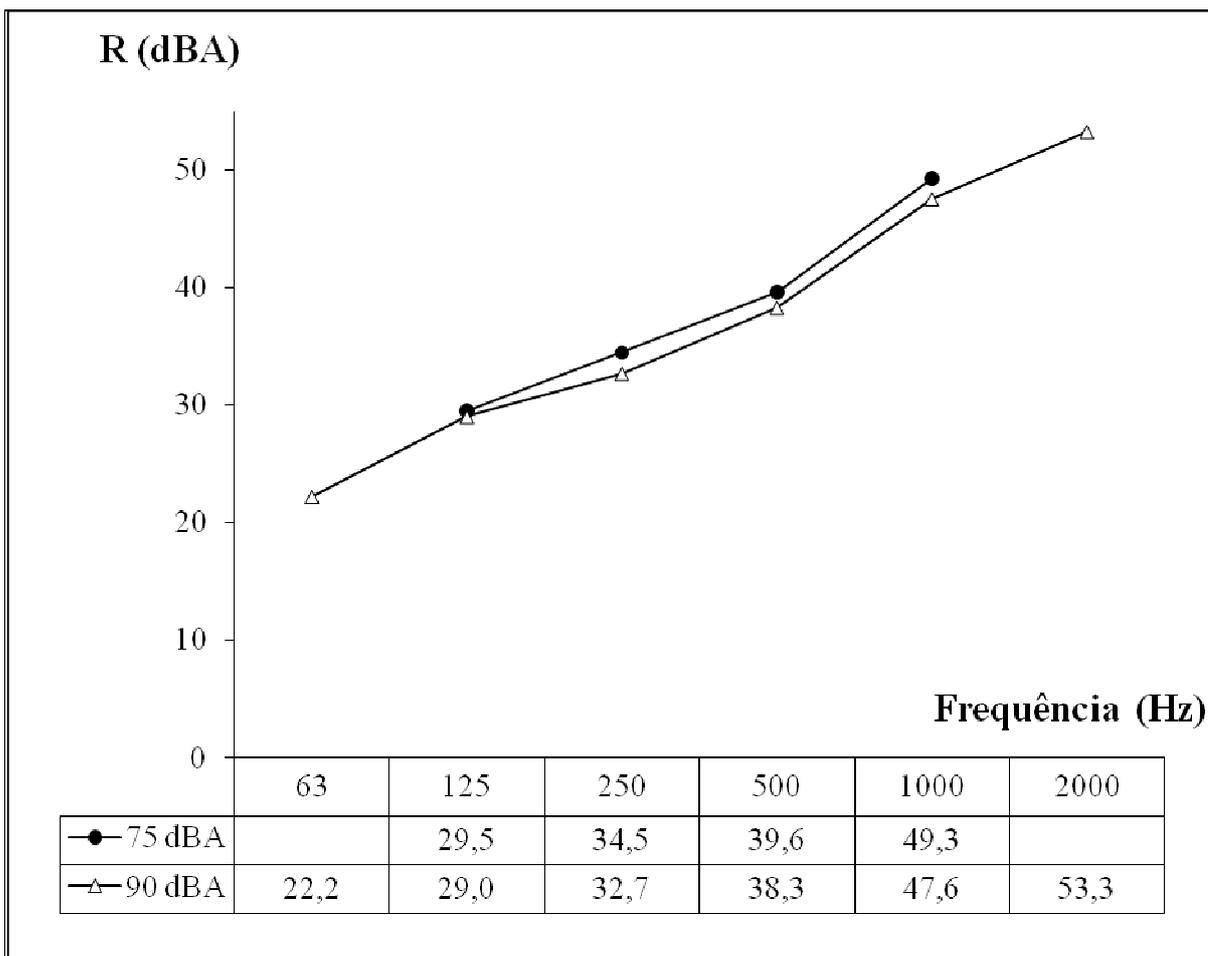


Figura 51 – Índice de Redução de Ruído Obtido Experimentalmente do Vidro Duplo Laminado de 8 mm, Câmara de Ar de 6 mm e Laminado de 4 mm.
 Fonte: Da Autora.

4.5. Comparativo dos Resultados Experimentais entre os Vidros

Para uma melhor comparação do desempenho acústico dos vidros testados, foram incluídos, no mesmo gráfico, frequência a frequência, os valores de perda de transmissão sonora de cada tipo e combinações de vidro, com emissão de ruído a 75 dBA (Figura 52) e a 90 dBA (Figura 53).

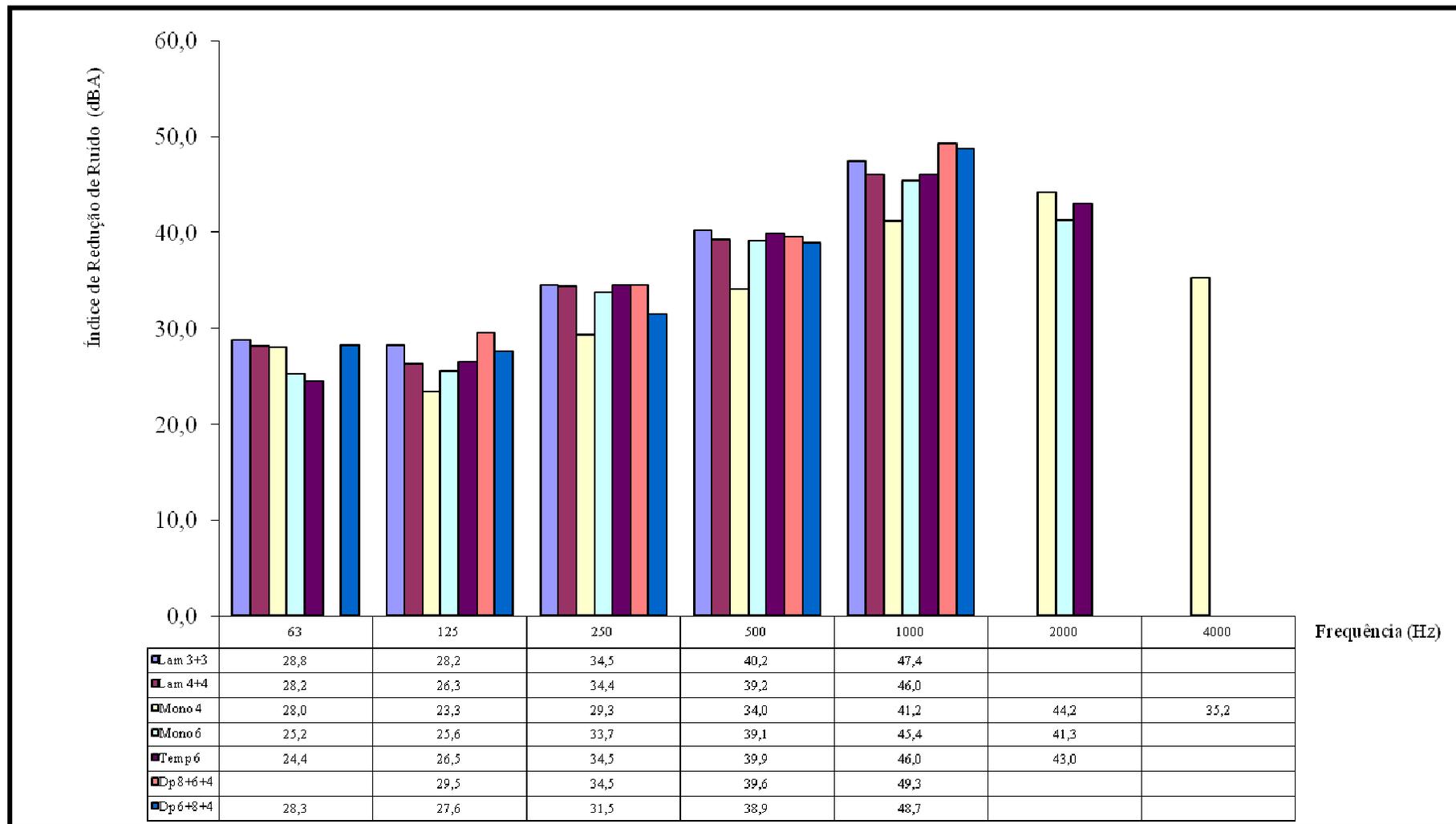


Figura 52 – Resultados Experimentais do Índice de Redução de Ruído de Cada Tipo e Combinações de Vidro com Emissão de Ruído a 75 dBA.
 Fonte: Da Autora.

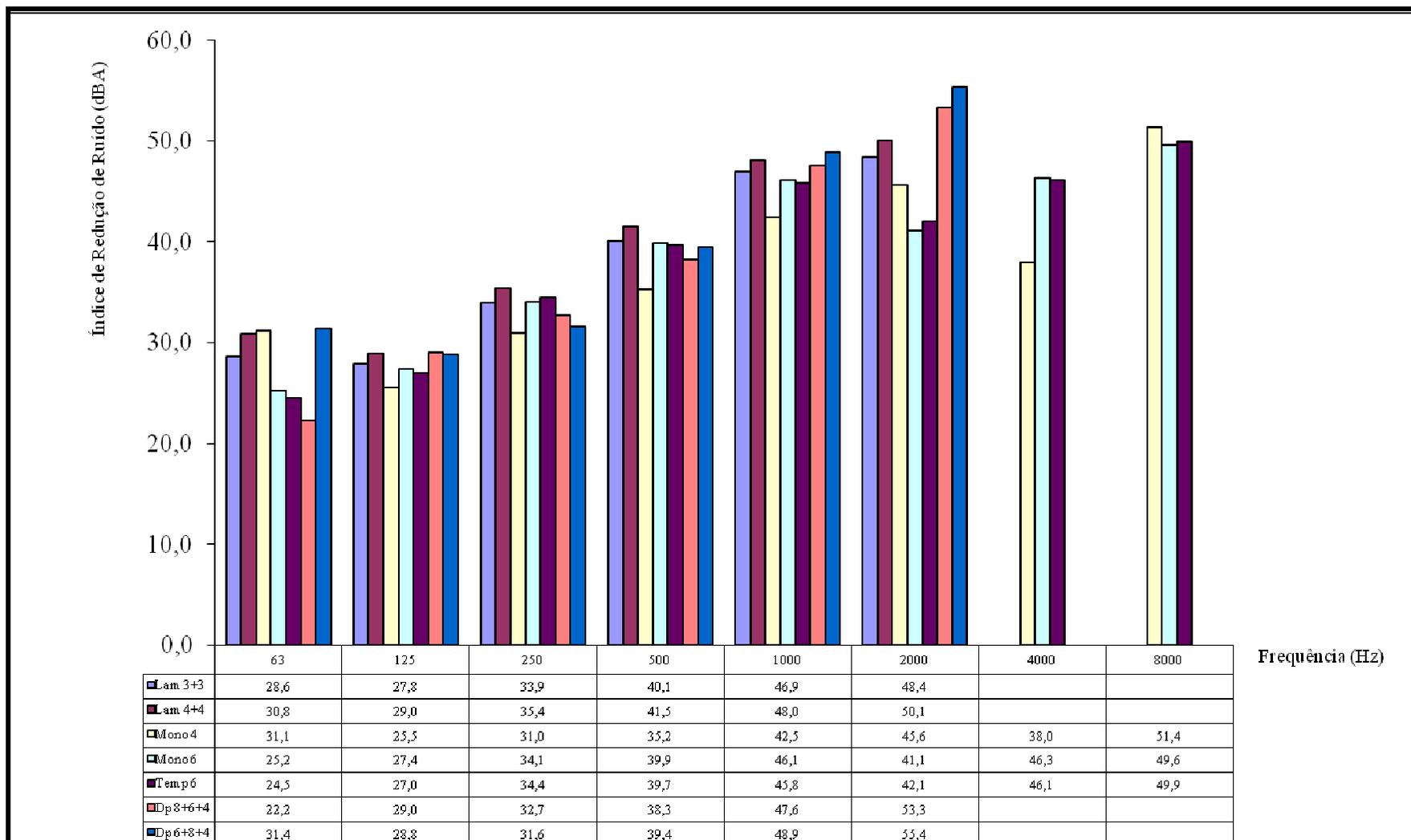


Figura 53 – Resultados Experimentais do Índice de Redução de Ruído de Cada Tipo e Combinações de Vidro com Emissão de Ruído a 90 dBA.
 Fonte: Da Autora.

Nos gráficos das figuras 52 e 53, os resultados foram consideravelmente semelhantes, principalmente comparando os vidros laminados e duplos, nas frequências de 125 Hz a 1.000 Hz, que envolve a faixa de interesse, devido ao ruído urbano.

Os vidros laminados, o monolítico de 6 mm e o temperado têm melhor desempenho acústico que o vidro duplo (Dp 6+8+4) e praticamente se equiparam aos resultados do vidro duplo (Dp 8+6+4). Portanto, para essas condições de ruído, caso o projetista especifique um vidro laminado ou monolítico, ao invés do duplo, será constatado melhor isolamento com o custo bastante reduzido. Ou seja, a câmara de ar, para essas condições, não contribui para o isolamento acústico.

Quando há aumento do NPS emitido, não foi detectada uma diferença significativa no desempenho acústico dos vidros, principalmente em baixas e médias frequências. Nas mais altas – a partir de 2 kHz – o desempenho acústico piora.

A principal conclusão que se tem, através dos gráficos comparativos dos vidros, é que o vidro duplo, diferente do que comumente é afirmado, não pode ser considerado termo-acústico, pois, comparando com vidros monolíticos, temperados e laminados, seu desempenho acústico é muito semelhante e, dependendo da frequência, chega a conter menos o ruído.

Capítulo 5 – CONCLUSÃO

Um aumento da população urbana vem ocorrendo nas últimas décadas diretamente proporcional a ele, a poluição sonora, devido ao aumento do tráfego de veículos automotores que é necessário para locomoção das pessoas. Para controlar o ruído, que transpõe a fachada na descontinuidade, composição janela e vidro, tem-se a necessidade de projetos que cumpram as exigências da NBR 10.152, com relação aos níveis de ruído para conforto. Para isso, o projetista deve ter a mão características acústicas de janelas e vidros assim como o espectro de frequência do ruído a qual está submetido o ambiente a ser isolado. Segundo estudos realizados em 15 pontos localizados nos eixos estruturais de Curitiba, as frequências que mais contribuem com o ruído urbano estão entre 250 e 2000 Hz.

Um dos intuits e conclusão desse trabalho, foi comprovar matematicamente que, mesmo fazendo os ensaios em um ambiente controlado, em que os volumes das salas de excitação e medição não atendem o recomendado pela norma ISO 140-3, pode-se, sim, chegar a resultados bastante satisfatórios. Para efeito de comparação das amostras, o ambiente utilizado para a prática desta dissertação avaliou *in situ* os resultados, pois se compara com recintos das novas construções dos grandes centros urbanos, onde mais se sofre com a poluição sonora.

Os vidros normalmente encontrados a disposição da construção civil são os monolíticos, temperados, laminados e também os duplos. As vantagens, desvantagens, segurança, custo, tempo de entrega etc. de cada um deles devem ser considerados no ato da escolha, mas deve-se ressaltar que o desempenho acústico também precisa ser analisado.

Nesta dissertação foram testados vidros monolíticos de 4 e 6 mm, temperado de 6 mm, laminados de 6 e 8 mm e duplos, um composto por vidro laminado de 6 mm, câmara de ar de 8 mm, temperado de 4 mm e outro, laminado de 8mm, câmara de ar de 6 mm e temperado de 4 mm.

Os resultados experimentais obtidos foram comparados com os valores analíticos concluindo que, para painéis simples, os modelos matemáticos existentes se aproximam do que ocorre na prática. As regiões explicadas por Bies e Hansen (2003) ficaram bastante evidentes nos resultados gráficos medidos no ambiente controlado.

Os modelos matemáticos para vidros duplos dificilmente expressam o que se mede na prática, como já visto por Tadeu e Mateus (2001) e Kim *et al* (2003). Entretanto, comparando os ensaios realizados com os vidros duplos com os gráficos dos autores

supracitados, pôde-se concluir que os valores aferidos no ambiente controlado foram muito próximos.

Apesar dos vidros duplos serem comumente denominados termo-acústicos, percebeu-se, nos resultados experimentais de Tadeu e Mateus (2001), que a câmara de ar só começa a fazer uma diferença significativa na isolamento se ela tiver uma espessura superior a 50 mm. E, em resultados experimentais desta dissertação, mostra que em algumas frequências, os vidros laminados têm um desempenho acústico tão bom quanto os duplos. Portanto, os termos ‘acústico’ e ‘térmico’ devem ser desvinculados e o critério do uso do vidro duplo como solução única para problemas com ruído deve ser revisto. Com base nisso, é possível hoje baixar os custos tão elevados de uma janela acústica com uma simples troca de vidro duplo para um laminado e sem perder a eficiência.

Outro ponto que merece atenção é a utilização de vidros de mesma espessura para compor os vidros duplos, pois se assim for empregado, os vidros entram em ressonância juntos e também possuem a mesma frequência de mergulho, fazendo com que o desempenho acústico, nessas frequências, seja muito afetado. Se as espessuras forem diferentes, quando ocorrer a frequência de ressonância ou a de mergulho em um deles, o outro poderá continuar isolando o ambiente.

Esse trabalho permite o desenvolvimento de novos ensaios correlatos à acústica, tais como:

- Desenvolvimento de modelos matemáticos e numéricos (Método dos Elementos Finitos) que expressem melhor a perda de transmissão sonora, principalmente para vidros duplos;
- Comparar o desempenho acústico de diferentes tipologias e materiais de janelas;
- Estudo sobre os diferentes tipos de vedação para janelas;
- Análise do desempenho acústico de outros materiais;
- Verificar como a relação área de parede versus área de janela afeta o desempenho acústico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas Visando o Conforto da Comunidade – Procedimento: NBR 10.151.** 1987. Rio de Janeiro, 11p.

____. **Níveis de Ruído para Conforto Acústico – Procedimento: NBR 10.152.** 1987. Rio de Janeiro, 4p.

____. **Caixilhos para Edificações - Janelas: NBR 10.821.** 1989. Rio de Janeiro.

____. **Texto Normativo 6: TE-6.** Rio de Janeiro, 1984.

____. **Acústica – Medição da Absorção Sonora em Câmara Reverberante – Método de Ensaio: Projeto de Norma 02:135.01-022.** 1999. 15p.

BARING, João Gualberto de A. **O Desempenho Acústico de Caixilhos e Fachada no Contexto do Controle da Poluição Sonora Urbana,** São Paulo, 1990, 209. Dissertação de Doutorado – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo.

BERANEK, Leo Leroy. **Noise Reduction.** Huntington, New York. Robert E. Krieger Publishing Company, 1980. 752p.

BIES, D. A.; HANSEN, C. H. **Engineering Noise Control: Theory and Practice,** 2003. 3 ed.: London and New York, 2003.

BLINDEX, Informe. **Vidros Duplos e o Conforto Ambiental.** Finestra, ano 5, nº 17, ProEditores Associados Ltda.: São Paulo, abr./jun. 1999.

BORTOLI, Paulo Sergio de; KRÜGER, Eduardo L. **Diagnóstico da Poluição Sonora Urbana na Região Central de Curitiba.** In: ENTAC, 2002.

BORTOLI, Paulo Sergio de; KRÜGER, Eduardo L. **Avaliação de Ruído Urbano na Região Central de Curitiba**. In: VII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2003, Curitiba. Anais. Curitiba: PUC-PR, 2003. v. 1, p. 770-778.

CONFORTO AMBIENTAL LTDA. Folder publicado em: Set. 2005.

FERNANDES, João Candido. **Acústica e Ruídos**. Bauru, 2002. Apostila para Aula – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista.

GERGES, Samir N. Y. **Ruído: Fundamentos e Controle**. 1ED. Florianópolis: Centro Brasileiro de Segurança e Saúde, 1992, 588p.

GLAZIN INNOVATIONS. Disponível em: < <http://glazinginnovations.org/default.aspx> >. Acesso em: 25 Mar. 2010.

HOFMAN, W. F. et al. **Cardiac Reactivity to Traffic Noise During Sleep in Man**. Journal of Sound and Vibration (1995) 179(4), 577-589.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Acoustique – Mensurage de Isolation Acoustique des immeubles et des éléments des construction: ISO 140**. 1978.

IPPUC – INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO URBANO DE CURITIBA (2004). “Curitiba em dados”. Curitiba: IPPUC.

JONES, R.E. **Field Sound Insulation of Load-bearing Sandwich Panels for Housing. Noise Control**. Engineering 1981;16:90–105.

KIM, Y. T. et al. **Dependence of Coincidence Frequency in Double-Glazed Window on Glass Thickness and Interpane Cavity, 2001**. Applied Acoustics 63 (2002) 927-933. Elsevier.

KRÜGER, Eduardo L.; ZANNIN, Paulo Henrique T. **Acoustical and Thermal Field Investigation of Low-cost Dwellings, a Case Study in Brazil.** Applied Acoustics 68 (2007) 1213-1223. Elsevier.

LARANJA, Rafael Antônio Comparsi. **Métodos e Modelos de Predição da Redução Sonora por Paredes e Atenuação por Barreiras.** Porto Alegre, 2000. 101p. Dissertação Mestrado.

LOTURCO, Bruno. **Esquadrias Anti-ruído.** Técnica, nº 86, São Paulo, maio 2004. Disponível em:
<http://www.piniweb.com/revistas/techne/index.asp?MATE6_COD=16752> Acesso em: 30 Ago. 2004.

MÉNDEZ, Antonio Miguel et al. **Acústica Arquitectónica.** Buenos Aires. Universidad del Museo Argentino, 1994. 238p.

PAIXÃO, Dinara Xavier; GERGES, Samir. **Perda de Transmissão Sonora em Paredes de Alvenaria de Tijolo Maciço Cerâmico.** Ambiente Construído, Porto Alegre, V. 4, n.2, p.95-110. Jul./Set. 2004.

PREFEITURA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE. Secretaria Municipal do Meio Ambiente. **Cadernos de Meio Ambiente – Poluição sonora.** Belo Horizonte, 1992.

QUIRT, J.D. **Sound Transmission Through the Windows I. Single and Double Glazing.** Journal of Acoustical Society of America (1982) 72, 834–844.

QUIRT, J.D. **Sound Transmission Through the Windows I. Double and Triple Glazing.** Journal of Acoustical Society of America (1983) 74, 534–542.

ROSSI, F. **Análise da Influência da Ocupação do Solo na Variação da Temperatura em Diferentes Localidades da Cidade de Curitiba,** 2004, Curitiba, 135f. Dissertação de Mestrado – Pós-graduação em Tecnologia, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

SHARP, B. H., **Prediction Methods for Sound Transmission Trough Building Elements**”, Noise Control Engineering, vol.11.

SILVA, Júlio Cesar da. **Estudo de Vibrações em Placas: Figuras de Chladni. Instrumentação para Ensaio**. Disponível em:

<http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2004/009027JulioC_IrisTorriani_F809_RF.pdf>. Acesso em: 20 Mai. 2010.

SOUZA, Renato Santos de. **Entendendo a Questão Ambiental**. 1. ed. São Paulo: Edunisc, 2000, 461p.

TADEU, António J. D. *et al.* **Sound Insulation Provided by Single and Double Panel Walls – a Comparison Analytical Solutions Versus Experimental Results**, 2003. Applied Acoustics 65 (2004) 15-29. Elsevier.

TADEU, António J. D; MATEUS, Diogo M. R. **Sound Transmission Through Single, Double and Triple Glazing. Experimental Evolution**, 2000. Applied Acoustics 62 (2001) 307-325. Elsevier.

TAVARES, Denise da Silva. **Estudo da Isolação em Paredes e Divisórias de Diversas Naturezas**, 2000, Santa Maria, 126p. Dissertação de Mestrado – Pós-graduação em engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria.

UNIVERSITY OF READING. Disponível em: < <http://www.reading.ac.uk/> >. Acesso em: 25 Mar. 2010.

VUE WINDOWS. Disponível em: < <http://www.vuewindows.com.au/> >. Acesso em: 25 Mar. 2010.

ZANNIN, Paulo Henrique T. *et al.* **Environmental Noise Pollution in the City of Curitiba, Brazil**, 2001. Applied Acoustics 63 (2002) 351-358. Elsevier.

ZDNET. Disponível: < <http://www.zdnet.com/?tag=nav;thm> >. Acesso em: 25 Mar. 2010.