

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**Dinara Xavier da Paixão**

**CARACTERIZAÇÃO DO ISOLAMENTO ACÚSTICO DE UMA  
PAREDE DE ALVENARIA, UTILIZANDO ANÁLISE  
ESTATÍSTICA DE ENERGIA (SEA)**

**Tese de Doutorado**

**Florianópolis**

**2002**

**Dinara Xavier da Paixão**

**CARACTERIZAÇÃO DO ISOLAMENTO ACÚSTICO DE UMA  
PAREDE DE ALVENARIA, UTILIZANDO ANÁLISE  
ESTATÍSTICA DE ENERGIA (SEA)**

Tese apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Produção da  
Universidade Federal de Santa Catarina,  
como requisito parcial para obtenção  
do grau de **Doutor em Engenharia de Produção**.

Orientador: Prof. Samir Nagi Yousri Gerges, PhD

Florianópolis

2002

Dinara Xavier da Paixão

**CARACTERIZAÇÃO DO ISOLAMENTO ACÚSTICO DE UMA  
PAREDE DE ALVENARIA, UTILIZANDO ANÁLISE  
ESTATÍSTICA DE ENERGIA (SEA)**

Esta Tese foi julgada e aprovada para a obtenção do grau de  
**Doutor em Engenharia de Produção**  
no **Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção**  
da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 07 de novembro de 2002

Prof. Edson Pacheco Paladini, Dr  
Coordenador do Programa

Prof. Samir Nagi Yousri Gerges, PhD  
Orientador - UFSC

**BANCA EXAMINADORA**

Profa. Stelamaris Rolla Bertoli, Dra  
Universidade Estadual de Campinas

Prof. José Luis Bento Coelho, PhD  
Universidade Técnica de Lisboa

Prof. Elias Bitencourt Teodoro, PhD  
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Neri dos Santos, Dr  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Jorge Luiz Pizzutti dos Santos, Dr  
Universidade Federal de Santa Maria

Profa. Ana Regina Aguiar Dutra, Dra  
Universidade do Sul de Santa Catarina

À minha mãe (em memória);  
Aos meus antigos e futuros alunos,  
principais incentivos na conclusão desse curso.

*O preparo científico do professor ou da professora  
deve coincidir com sua retidão ética.  
É uma lástima qualquer  
descompasso entre aquela e esta.  
Formação científica, correção ética, respeito aos outros,  
coerência, capacidade de viver e de aprender com o diferente,  
não permitir que o nosso mal-estar pessoal ou a nossa antipatia  
com relação ao outro nos façam acusá-lo do que não fez  
são obrigações a cujo cumprimento devemos  
humildemente mas perseverantemente  
nos dedicar. (FREIRE, 1996)*

## Agradecimentos

---

A Deus pela luz que sempre ilumina o meu caminho.

Ao meu pai Darcy e ao meu irmão Dilmar pela presença  
constante em todos os momentos.

Aos meus familiares e amigos pelo carinho, compreensão e incentivo.

Ao Prof. Jorge Pizzutti, responsável pelo meu ingresso na área de Acústica.

À UFSM, em especial à direção, professores e funcionários do DECC,  
pelo apoio durante a realização do curso.

À CAPES pela Bolsa concedida e à Pró-reitoria de Pós-graduação e Pesquisa  
da UFSM pela operacionalização da mesma.

À direção, professores, funcionários e alunos do LMCC pelo auxílio  
imprescindível à realização do trabalho.

Ao Prof. Samir pelo convite para o Doutorado e por todas as  
oportunidades geradas desde então.

À UFSC, em especial ao PPGEF e ao Curso de Engenharia Mecânica, cujos  
professores, alunos e funcionários colaboraram efetivamente  
para a realização desse trabalho.

Aos integrantes do LVA pelo aprendizado constante, fruto da construção do  
conhecimento aliada à amizade e ao companheirismo.

A todas as pessoas que se envolveram diretamente para auxiliar  
na realização do trabalho, em especial ao Prof. José Mário (UFSM),  
Prof. Paulo de Tarso (UFSC), Eng Paulo Obregon (LMCC/UFSM),  
Arq. Cristiano (UFSM), Eng Mário, Físico Alexander e  
engenheiros Evandro e Jesiel (UFSC).

Ao Prof. Elias Teodoro, cujo acompanhamento e sugestões foram  
fundamentais na fase final do trabalho.

Aos amigos e colegas de Santa Maria que me receberam em Florianópolis,  
em especial às engenheiras Cristina e Leila.

Aos amigos e colegas que se tornaram parte integrante da minha família,  
em especial Carminha, Helga, Vaneide, Cassandra, Luciana,  
Juliana, Lílian, Gisele, Sérgio, Mauricy, Eduardo e Gihad.

## RESUMO

---

PAIXÃO, Dinara Xavier da. **Caracterização do isolamento acústico de uma parede de alvenaria, utilizando Análise Estatística de Energia (SEA)**. 2002. 182 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis.

Nesse trabalho estudaram-se questões conceituais referentes ao isolamento acústico, buscando-se adaptá-las às especificidades das edificações. Constatou-se a inexistência de dados confiáveis sobre materiais e técnicas construtivas, por isso determinaram-se parâmetros físico-mecânicos e acústicos, para uma parede de alvenaria de tijolos maciços cerâmicos. Foi empregada a abordagem SEA (Statistical Energy Analysis - Análise Estatística de Energia), através da simulação numérica das Câmaras Reverberantes e da parede construída para as atividades experimentais. Verificou-se que o pacote computacional comercial utilizado nas simulações pode ser usado para edificações, embora apresente algumas restrições. Ele é capaz de caracterizar a frequência crítica desde que seja alimentado com dados corretos sobre os materiais. Não identifica, porém, as ressonâncias devido à espessura da parede, pois trabalha com a Teoria de Placas Finas. Os resultados experimentais, além de serem comparados com as simulações, foram comprovados por cálculos analíticos. Nesse trabalho é sugerido um novo gráfico relacionando frequência e nível de pressão sonora para o estudo do isolamento acústico de uma parede simples similar às utilizadas nas edificações. Outras sugestões para a melhoria do desempenho acústico das edificações são apresentadas, como por exemplo, um novo valor para a largura da base do Método do Patamar.

Palavras-chave: acústica - isolamento - SEA - edificações - alvenaria

## ABSTRACT

---

PAIXÃO, Dinara Xavier da. **Characterization of the acoustic isolation of a masonry wall using Statistical Energy Analysis (SEA)**. 2002. Philosophy Doctor Tesis in Production Engineering – Graduate Programme in Production Engineering, UFSC, Florianópolis.

This work studied conceptual issues concerning acoustic isolation in order to adapt them to the needs of edifications. The researcher noticed that there was no reliable data about constructive techniques and materials. Because of this, it was determined the physical-mechanic and the acoustics parameters to a brick wall. The approach used was SEA (Statistical Energy Analysis) through the numerical simulation of reverberating chambers and a wall built to experimental analysis. The numerical simulations were verified using computational software that can be applied to buildings. The software was able to characterize the critical frequency. However, this package showed some limitations. It could not identify the resonant frequency due to the wall thickness. The results showed good agreement among experimental, numerical simulations and analytical data. As a result, it is proposed a new picture to relating frequency and SPL in order to analyze simple walls similar to the ones used o buildings. A new value for the length of the plateau base was suggested for a better improvement of the acoustical performance in buildings.

Key-words: acoustic - isolation - SEA - edifications - masonry

## SUMÁRIO

---

<b>Lista de Figuras</b> .....	xi
<b>Lista de Tabelas</b> .....	xiv
<b>Lista de Símbolos</b> .....	xv
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 Considerações iniciais .....	1
1.2 Definição de termos .....	3
1.3 Hipóteses e objetivos da pesquisa .....	5
1.3.1 Objetivo geral .....	6
1.3.2 Objetivos específicos .....	6
1.4 Justificativa e contribuições da pesquisa .....	6
1.5 Procedimentos metodológicos .....	9
1.6 Delimitações da pesquisa.....	10
1.7 Organização da tese.....	10
<b>CAPÍTULO 2 – A TRANSMISSÃO SONORA NA ALVENARIA</b> .....	12
2.1 A alvenaria .....	12
2.1.1 A ortotropia da alvenaria .....	12
2.1.2 Parâmetros físico-mecânicos da alvenaria .....	14
2.1.2.1 O tijolo maciço cerâmico .....	15
2.1.2.2 A argamassa .....	18
2.1.2.3 Os prismas e as mini-paredes .....	20
2.1.2.4 A parede de alvenaria .....	22
2.2 A transmissão e o isolamento do som .....	23
2.2.1 O som, com incidência normal, transmitido através de três meios .....	24
2.2.2 O som, com incidência aleatória, transmitido através de três meios .....	28
2.2.3 As frequências de ressonância, coincidência e crítica .....	28
2.2.3.1 Frequência de ressonância mecânica .....	28
2.2.3.2 Frequência de coincidência .....	29
2.2.3.3 Frequência crítica .....	29
2.2.4 A transmissão do som, através de parede oscilante .....	31



2.2.5	A transmissão do som, através de parede vibrante .....	34
2.2.6	A transmissão do som, em paredes compostas, com aberturas ou com frestas .....	37
2.2.7	Transmissão ressonante e não-ressonante .....	38
2.2.8	Considerações gerais .....	39
<b>CAPÍTULO 3 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DE ENERGIA – SEA .....</b>		<b>41</b>
3.1	Considerações históricas e atualidades .....	41
3.2	Parâmetros utilizados em SEA .....	45
3.3	Síntese do método SEA .....	45
3.3.1	Hipóteses básicas de SEA .....	46
3.3.2	Os subsistemas .....	47
3.3.3	Balanço de energia .....	48
3.3.4	As perdas .....	49
3.4	Aspectos teóricos da aplicação de SEA às edificações .....	51
3.5	Utilização de programas computacionais .....	52
3.5.1	Verificação do programa AutoSEA .....	53
<b>CAPÍTULO 4 – O CONFORTO ACÚSTICO E A QUALIDADE DE VIDA .....</b>		<b>57</b>
4.1	A legislação .....	58
4.2	Requisitos e critérios de desempenho em edificações .....	60
4.3	Indicadores de conforto acústico .....	61
4.4	Isolamento acústico segundo a Norma ISO 140 .....	62
4.4.1	Síntese das informações constantes na ISO 140 – Parte 3 .....	64
<b>CAPÍTULO 5 – ATIVIDADES EXPERIMENTAIS .....</b>		<b>66</b>
5.1	Determinação experimental do Índice de Redução Sonora (R) .....	66
5.1.1	As câmaras de transmissão sonora da UFSM .....	67
5.1.2	Determinação de condições ambientais .....	68
5.1.3	A parede estudada .....	69
5.1.4	Medições em laboratório .....	70
5.1.4.1	Descrição dos experimentos .....	70
5.1.4.2	Os resultados obtidos .....	74
5.2	Determinação de parâmetros físico-mecânicos e acústicos da parede de alvenaria .....	80
5.2.1	Ensaio físico-mecânicos .....	81
5.2.1.1	Propriedades do tijolo maciço cerâmico .....	81
5.2.1.2	Propriedades da argamassa .....	82

5.2.1.3	Propriedades das mini-paredes .....	83
5.2.1.4	Análise dos resultados .....	86
5.2.2	Determinação do tempo de decaimento para parede sob excitação de impacto .....	87
5.2.2.1	Descrição dos experimentos .....	87
5.2.2.2	Resultados obtidos .....	91
5.2.2.3	Análise global dos resultados .....	100
5.2.3	Determinação da resposta em frequência para parede sob excitação acústica .....	106
5.2.3.1	Descrição dos experimentos .....	107
5.2.3.2	Resultados obtidos .....	108
5.2.3.3	Análise global dos resultados .....	112
 <b>CAPÍTULO 6 – SIMULAÇÕES E CÁLCULOS .....</b>		<b>115</b>
6.1	Determinação do Índice de Redução Sonora (R) através de simulações numéricas, utilizando SEA .....	115
6.1.1	O modelo de SEA e o programa computacional .....	115
6.1.2	Características dos subsistemas .....	117
6.1.3	Aplicabilidade de SEA ao modelo .....	122
6.1.4	As simulações realizadas .....	124
6.1.4.1	Alvenaria isotrópica .....	124
6.1.4.2	Alvenaria ortotrópica .....	129
6.1.5	Análise global dos resultados das simulações .....	133
6.1.6	Análise da correlação entre os dados estudados .....	135
6.2	Comparação de cálculos analíticos com os resultados experimentais e numéricos... ..	137
6.2.1	Coincidência .....	138
6.2.2	Ressonâncias .....	142
 <b>CAPÍTULO 7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES .....</b>		<b>145</b>
7.1	Síntese das conclusões .....	154
7.2	Recomendações para trabalhos futuros .....	155
 <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>156</b>
<b>APÊNDICES .....</b>		<b>163</b>

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1 : Comportamento das ondas sonoras através de três meios .....	25
Figura 2 : Relação entre ângulo de coincidência e razão de frequência .....	30
Figura 3 : Transmissão sonora através de parede oscilante .....	32
Figura 4 : Perda de transmissão em paredes simples .....	36
Figura 5 : Comparativo entre as Perdas de Transmissão para o alumínio 2mm .....	55
Figura 6 : Câmaras reverberantes para ensaios de transmissão sonora da UFSM .....	67
Figura 7 : Fotos das Câmaras da UFSM para ensaios de transmissão sonora .....	68
Figura 8 : Equipamentos usados nas medições das condições ambientais .....	68
Figura 9 : Fonte sonora ( <i>Sond Source Type 4224</i> da B&K).....	72
Figura 10 : Analisador ( <i>Building Acoustics Analyzer 4418</i> da B&K) .....	72
Figura 11 : Fonte geradora e microfone rotativo nos ensaios de Índice de Redução Sonora .....	73
Figura 12 : Índice de Redução Sonora para parede de tijolos maciços cerâmicos, com conexões elásticas – 14 e 28 dias .....	74
Figura 13: Desvio Padrão e Coeficiente de Variação das medições de “R” aos 14 e 28 dias .....	75
Figura 14 : Índice de Redução Sonora – Conexões elásticas – Valores médios .....	77
Figura 15 : Índice de Redução Sonora para parede com conexões rígidas – 14 e 28 dias .....	77
Figura 16 : Desvio Padrão e Coeficiente de Variação para paredes com conexões rígidas aos 14 e 28 dias .....	78
Figura 17 : Índice de Redução Sonora (R) médio para conexões elásticas (14d-CB; 28d-CB; 130d-CB) e rígidas (14d-SB, 28d-SB) .....	78
Figura 18 : Medição das Deformações Verticais das Mini-paredes .....	84
Figura 19 : Medição das Deformações Horizontais das Mini-paredes .....	85
Figura 20 : Acelerômetro 4378 da B&K .....	88
Figura 21 : Pontos de excitação e colocação do acelerômetro na parede construída .....	90
Figura 22 : TD na alvenaria com conexões elásticas (borracha e silicone) .....	91
Figura 23 : Desvio padrão e coeficiente de variação para medições das médias do TD na alvenaria com conexões elásticas (borracha e silicone) .....	92

Figura 24 : Fator de Perda Total da alvenaria - conexões elásticas (borracha/silicone) ....	93
Figura 25 : TD da parede com conexões rígidas – 14 dias .....	93
Figura 26 : Desvio padrão e coeficiente de variação para medições das médias do TD na alvenaria com conexões rígidas - 14 dias .....	94
Figura 27 : Fator de Perda Total na alvenaria com conexões rígidas – 14 dias .....	95
Figura 28 : TR na alvenaria com conexões rígidas – 28 dias .....	95
Figura 29 : Desvio Padrão e Coeficiente de Variação para as medições das médias de TD em alvenaria com conexões rígidas – 28 dias .....	96
Figura 30 : Fator de Perda Total na alvenaria com conexões rígidas – 28 dias .....	96
Figura 31 : Pontos de medição na parede de concreto da Câmara de Emissão .....	97
Figura 32 : Pontos de medição na parede de concreto da Câmara de Recepção .....	98
Figura 33 : TD no concreto – Câmaras Reverberantes de Emissão (C1) e Recepção (C2) para duas posições de acelerômetro .....	98
Figura 34 : Desvio Padrão e Coeficiente de Variação do TD para paredes de concreto ...	99
Figura 35 : Fator de Perda Total em paredes de concreto (Câmaras Reverberantes de Emissão e Recepção) .....	99
Figura 36 : TD para os dois lados da parede de alvenaria sob as três condições estudadas .....	101
Figura 37 : TD final para alvenaria nas três situações estudadas .....	102
Figura 38 : Fator de Perda Total da parede de alvenaria para as três situações em estudo (CB – com borracha; SB – sem borracha aos 14 e 28 dias) .....	103
Figura 39 : Fator de Perda Total experimental e bibliográfico para alvenaria .....	104
Figura 40 : Fator de Perda Total da alvenaria empregado no Capítulo 6 .....	105
Figura 41 : Fator de Perda Total em dB para a parede estudada .....	106
Figura 42 : Nível de Aceleração para alvenaria com conexões elásticas .....	108
Figura 43 : Desvio Padrão e Coeficiente de Variação das medições de Nível de Aceleração da parede com conexões elásticas .....	109
Figura 44 : Nível de Aceleração da alvenaria com conexões rígidas - 14 dias .....	109
Figura 45 : Desvio Padrão e Coeficiente de Variação das medições de Nível de Aceleração da parede com conexões rígidas - 14 dias .....	110
Figura 46 : Nível de Aceleração da alvenaria com conexões rígidas - 28 dias .....	111
Figura 47 : Desvio Padrão e Coeficiente de Variação das medições de Nível de Aceleração da parede com conexões rígidas - 28 dias .....	111
Figura 48 : Comparativo do Nível de Aceleração para a parede de tijolos maciços cerâmicos .....	113
Figura 49 : Desvio Padrão e Coeficiente de Variação do Nível de Aceleração, sob ruído aéreo para alvenaria de tijolos maciços cerâmicos .....	114

Figura 50 : Os três subsistemas do modelo SEA: cavidade acústica (01); parede (02) e cavidade acústica (03) .....	116
Figura 51 : Caracterização dos nós para construção do modelo .....	117
Figura 52 : Banco de Dados do AutoSEA versão 2.2.2 para materiais isotrópicos, com a inclusão da alvenaria de tijolos maciços cerâmicos .....	119
Figura 53 : Banco de Dados original do AutoSEA versão 2.2.2 para materiais ortotrópicos .....	119
Figura 54 : Orientação dos eixos para materiais ortotrópicos .....	120
Figura 55 : Número de modos por banda para salas e parede de alvenaria isotrópica .....	123
Figura 56 : Superposição modal para as salas e parede de alvenaria isotrópica .....	123
Figura 57 : Influência do amortecimento da parede no R - alvenaria isotrópica .....	125
Figura 58 : Influência do Módulo de Elasticidade no R - alvenaria isotrópica .....	127
Figura 59 : Influência do Coeficiente de Poisson no R - alvenaria isotrópica .....	128
Figura 60 : Influência da alteração de densidade no R - alvenaria isotrópica .....	129
Figura 61 : Variação de "R" com a alteração de $E_1$ - alvenaria ortotrópica.....	130
Figura 62 : Variação de "R" com o aumento de $E_2$ e $E_3$ - alvenaria ortotrópica.....	131
Figura 63 : "R" para alvenaria ortotrópica com diferentes Fatores de Perda Total .....	132
Figura 64 : Influência da densidade no "R" da alvenaria ortotrópica .....	133
Figura 65 : Banco de Dados do AutoSEA para materiais ortotrópicos, com a alvenaria de tijolos maciços cerâmicos .....	134
Figura 66 : Curvas para determinação do coeficiente de correlação linear de Pearson ....	135
Figura 67 : Método do Patamar aplicado para alvenaria de tijolos maciços cerâmicos .....	141
Figura 68 : Ábaco da frequência crítica em função da espessura .....	147
Figura 69 : Perda de Transmissão em paredes simples espessas – caso da alvenaria ....	148
Figura 70 : Comparação da alvenaria simulada como isotrópica e ortotrópica .....	153

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 1 : Densidade dos tijolos empregados .....	17
Tabela 2 : Propriedades dos materiais .....	17
Tabela 3 : Traço da argamassa utilizada por Prudêncio Jr (1986) .....	18
Tabela 4 : Algumas propriedades da argamassa, sua importância e medição .....	19
Tabela 5 : Módulos de deformação secante das pequenas paredes .....	21
Tabela 6 : Comparativo entre as Perdas de Transmissão (PT) para alumínio com 2mm de espessura .....	54
Tabela 7 : Modos e Freqüências de Ressonância .....	56
Tabela 8 : Condições ambientais durante os ensaios aos 14 e 28 dias na parede com conexões elásticas .....	75
Tabela 9 : Valores referentes ao “R” para 130 dias, com conexões elásticas .....	76
Tabela 10 : Características dos tijolos maciços cerâmicos .....	82
Tabela 11 : Resistência à compressão da argamassa .....	83
Tabela 12 : Módulos de Elasticidade da parede de tijolos maciços cerâmicos .....	85
Tabela 13 : Coordenadas dos pontos de excitação e colocação do acelerômetro na parede construída .....	90
Tabela 14 : Coordenadas dos pontos de excitação e colocação do acelerômetro na Câmara de Emissão .....	97
Tabela 15 : Coordenadas dos pontos de excitação e colocação do acelerômetro na Câmara de Recepção .....	98
Tabela 16 : Valores médios da temperatura e umidade relativa durante os ensaios .....	100
Tabela 17 : Fator de Perda Total da alvenaria empregado no Capítulo 6 .....	105
Tabela 18 : Valores médios da temperatura e umidade relativa durante os ensaios com excitação acústica .....	112
Tabela 19 : Correlação entre as curvas estudadas em toda a sua extensão .....	136
Tabela 20 : Correlação entre as curvas estudadas por faixas de freqüência .....	136
Tabela 21 : Características da parede estudada .....	138
Tabela 22 : Inclinação da reta na parte posterior do Método do Patamar .....	142
Tabela 23 : Primeiros modos da parede de alvenaria estudada .....	143

## LISTA DE SÍMBOLOS

---

- PT** - Perda de Transmissão Sonora  
**D** - Diferença de Nível de Pressão Sonora  
 $\tau$  - Coeficiente de Transmissão Sonora  
**NPS** - Níveis de Pressão Sonora  
 $Z$  - Impedância Característica  
 $\rho$  - Densidade  
 $e$  - Espessura da parede  
**k** - Número de onda do meio  
 $f$  - Freqüência em ciclos por segundo  
**P** - Pressão das partículas  
**U** - Velocidade das partículas  
**M** - Massa por unidade de área  
**B** - Rigidez à flexão da placa  
**c** - Velocidade do som no fluído  
 $c_l$  - Velocidade da onda longitudinal no sólido  
 $\theta$  - Ângulo de incidência  
 $\gamma$  - Amortecimento  
**K** - Coeficiente de rigidez por unidade de superfície  
**C** - Coeficiente de amortecimento por unidade de superfície  
**E** - Módulo de Young ou Módulo de Elasticidade Longitudinal  
**G** - Módulo de Elasticidade Transversal  
**A** - Amplitude das pressões acústicas  
**S** - Área do material  
**m** - Massa  
**v** - Velocidade RMS  
**E** - Energia  
**V** - Volume  
**p** - Pressão sonora em RMS  
 $\Phi$  - Fluxo de energia nos sistemas  
**N** - Número de modos  
 $\alpha_x$  - Coeficientes de perda por amortecimento  
 $\alpha_{xx}$  - Coeficiente de perda por acoplamento  
**d** - Densidade do tijolo  
 $\nu$  - Coeficiente de Poisson  
 $\epsilon_{\square}$  - Deformação lateral dentro do intervalo elástico  
 $\epsilon_a$  - Deformação axial dentro do intervalo elástico

## **1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

A humanidade é afetada, diariamente, por contaminantes que rompem o seu equilíbrio natural e ecológico. O ruído é um deles.

Apesar dos avanços tecnológicos, o homem continua como o principal agente na geração da contaminação ruidosa, seja pela necessidade de máquinas e equipamentos, ou simplesmente por aspectos culturais e desinformação.

As conseqüências negativas do ruído para o ser humano, sob o ponto de vista patológico ou psico-emocional estão comprovadas cientificamente. As doenças decorrentes da exposição a níveis sonoros inadequados constituem-se num campo crescente de pesquisa, que engloba desde aspectos genéticos, passando pela saúde física (como a perda auditiva e a resposta do corpo às baixas freqüências), chegando à saúde mental.

A diminuição na geração e transmissão desses incômodos ou, em último caso o desenvolvimento de proteção para as pessoas, são estudadas em Acústica e Vibrações. Setores, como as indústrias: automobilística, aeronáutica e de eletrodomésticos, têm alcançado significativos progressos no tratamento do ruído de seus produtos.

A indústria da construção civil, no entanto, continua a executar imóveis acusticamente inadequados. Não são disponibilizadas informações, referentes ao desempenho acústico das edificações e seus componentes. Os profissionais encontram-se, geralmente, despreparados nesse domínio científico e os clientes ainda não desenvolveram um padrão de exigência para conforto acústico.

O estudo acústico da edificação, ainda em fase de projeto, não é habitual, pois os métodos mais conhecidos são complexos e demorados. Além disso, as propriedades dos materiais e da técnica construtiva empregada não estão caracterizadas, dificultando a previsão do comportamento acústico do prédio.

O ser humano necessita de descanso, repouso e lazer. O ruído pode influenciá-lo, mesmo fora do ambiente laboral. Daí a necessidade de melhoria da qualidade acústica em todas as edificações: residenciais, comerciais, industriais, de lazer etc.



Os altos níveis sonoros presentes, tanto em indústrias, quanto no meio urbano, são a questão mais conhecida, por isso, a legislação de saúde e segurança no trabalho contempla os riscos inerentes à presença de máquinas e equipamentos ruidosos, visando resguardar a integridade do trabalhador.

Nas atividades de lazer, existe a desinformação e a diversidade cultural dos participantes, sejam eles trabalhadores ou clientes. As principais reclamações chegam de edificações vizinhas às casas de espetáculo, quase sempre inauguradas sem o isolamento acústico adequado.

Edifícios residenciais, escolas, hotéis e hospitais estão, geralmente, submetidos a condições ruidosas. Além disso, o conforto fica comprometido por passos, vozes, elevadores, vento, instalações hidro-sanitárias, dentre outros fatores. O ruído de trânsito é mais um desconforto na vida do cidadão, em especial nas grandes cidades. Não se está livre dele, mesmo fechando a janela da casa ou apartamento.

O sono – de importância capital para o bem-estar do ser humano – é prejudicado pela ausência de um isolamento sonoro adequado. A gravidade do problema aumenta no caso dos trabalhadores noturnos e em turnos alternados, pois existe a incompatibilidade com os horários habituais das demais pessoas. O ruído diurno é, em geral, maior que o noturno.

Os problemas não se resumem aos níveis de pressão sonora elevados. A falta de privacidade incomoda. Pode-se lembrar, por exemplo, os prédios onde médicos, psicólogos, advogados, entre outros, exercem suas atividades. É comum ouvir-se, na sala de espera, o que está sendo tratado entre o profissional e seu cliente.

Observa-se, assim, que a evolução tecnológica cria situações antagônicas, porque inventa máquinas e otimiza técnicas construtivas, visando melhorar a vida das pessoas. Gera, porém, um aumento de ruído (em casa, na rua, no trabalho e no lazer), que se torna parte integrante do dia-a-dia. Esses níveis sonoros são distintos, mas a sensibilidade humana também é, dependendo do ambiente e do momento vivenciado. Isso dificulta o estabelecimento de requisitos e critérios de conforto.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a partir do Comitê Brasileiro da Construção Civil e sua Comissão de Estudos de Conforto Ambiental e Energia em Edificações (CE-02:135.01), está empenhada na elaboração de uma Norma Técnica que contemple o Desempenho Acústico nas Edificações.

O trabalho da comissão tem sido dificultado, porque poucos dados sobre os materiais e técnicas construtivas utilizadas no Brasil estão disponíveis e não existem levantamentos que apontem requisitos identificados com a diversidade cultural da população brasileira.

Na edificação dos ambientes, considera-se que a ênfase não está em cada compartimento, mas no espaço físico como um todo. Além disso, o ser humano é o criador e usuário dos espaços construídos, tendo suas ações e reações influenciadas pelo ruído, porque “o espaço é um espelho no qual se faz a leitura de uma sociedade, seus valores, seu sistema social e político, seu desenvolvimento tecnológico”. (CEDATE, 1988, p.11)

A qualidade de vida depende, entre outras coisas, de níveis sonoros mais adequados à natureza física e psico-emocional das pessoas. Para a busca de soluções é necessária a conscientização de todos os cidadãos: pesquisadores, projetistas, construtores e usuários.

A presente Tese procura auxiliar na melhoria do isolamento acústico das edificações, disponibilizando o conhecimento e demonstrando sua aplicabilidade.

## 1.2 DEFINIÇÃO DE TERMOS

Tendo em vista o caráter interdisciplinar do estudo, opta-se por explicar nesse item, em ordem alfabética, somente os termos mais genéricos e imprescindíveis ao entendimento do trabalho. Outros conceitos importantes são definidos, dentro de suas respectivas áreas de conhecimento, ao longo do texto.

Acústica – É o estudo do som e das vibrações que o produzem, avaliados objetiva e subjetivamente. É uma ciência antiga. Apresentou um progresso lento, tendo tomado maior impulso no Século XX, a partir do desenvolvimento da eletrônica. Pode ser associada a outras áreas do conhecimento constituindo ênfases, por exemplo, na psicoacústica, na eletroacústica e na acústica arquitetônica, entre outras. A Enciclopédia BASE (vol.1, p. 105) define acústica como “o estudo das causas exteriores que têm por efeito produzir sons em seus diferentes modos”. Considera-a uma parte da física, com domínio próprio, capaz de combinar-se com outros estudos como a fisiologia, psicologia e música. Resumindo, diz que “a acústica é o estudo dos sons e das ondas sonoras”. (p. 106)

Alvenaria – É um conjunto coeso e rígido, conformado em obra, a partir de unidades de alvenaria (tijolos ou blocos) unidas entre si por argamassa. O tijolo tem dimensões máximas de 250x120x55 mm (comprimento x largura x altura) e o bloco excede em comprimento, largura ou altura as dimensões máximas do tijolo. (ABCI, 1990, p.17)

Argamassa – É um composto de materiais (como cimento, cal, areia e outros) cujas quantidades são expressas através do “traço”. Pode ser empregada para levantamento (unindo as unidades de alvenaria) ou para o revestimento de paredes e tetos. Definições específicas sobre os tipos de argamassas, materiais e instrumentos de aplicação podem ser encontrados na NBR 13529 – Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Terminologia, de 29/12/95.

Edificação – É suscetível a diversas conceituações. No presente estudo, refere-se ao produto da indústria da construção civil em geral – um edifício residencial (uni ou multifamiliar), comercial, industrial, de lazer, entre outros, cujo desempenho pode ser avaliado.

Ergonomia – É a adaptação do trabalho ao homem, em seu conceito mais simples. (Lida, 1990, p. 01). Segundo Montmollin (1990, p.12) pode-se caracterizar duas correntes, consideradas complementares e não contraditórias. A mais antiga, de origem americana, busca a melhoria das condições do trabalho humano, centrando sua atenção nas características do trabalhador, definindo, por exemplo, as dimensões ótimas para máquinas ou equipamentos. A outra, mais recente e europeia, estuda o trabalho humano com o objetivo de melhorá-lo, ou seja, apresenta uma visão mais ampla, que envolve a preocupação com as atividades executadas e com a qualidade de vida do trabalhador.

Frequência Sonora – É a taxa de ocorrência das flutuações de pressão das ondas sonoras, representada em ciclos por segundo ou Hertz (Hz). São audíveis, para o ser humano, apenas na faixa entre 20 Hz e 20000 Hz. As baixas frequências identificam os sons graves e as altas os sons agudos. As frequências possibilitam a determinação do espectro do ruído.

Isolamento Sonoro – Tem a finalidade de impedir a transmissão de sons de um ambiente para outro. Báring (1988, p. 429-430) diferencia isolamento sonora (que se refere a um elemento construtivo somente, ou seja, uma parede, uma porta, uma janela, etc.) e isolamento sonoro (reportando-se a um ambiente, por exemplo, uma sala).

Ruído – É definido, geralmente, como um som indesejável. Noceti Filho & Dalcastagné (2002) afirmam que: “os ruídos são quaisquer sinais que têm a capacidade de reduzir a inteligibilidade de uma informação de som, imagem ou dados”. Os mesmos autores destacam, no entanto, que os ruídos “têm o seu lado útil”, pois podem servir de “fonte para: síntese da fala, de sons da natureza e de sons de equipamentos musicais”. Além disso, são usados na “calibração de equipamentos eletrônicos, como sinais de teste, e nas medidas das características de sistemas de áudio eletroacústicos”.

Ruído Branco – É aquele que tem a sua potência distribuída uniformemente no espectro de frequências, ou seja, sua potência média é constante se as medidas são feitas com largura de banda constante. Segundo Noceti Filho & Dalcastagné (2002) essa denominação advém de uma analogia com o espectro eletromagnético na faixa de luz, pois a luz branca contém todas as frequências do espectro visível.

Ruído Rosa – É aquele cuja densidade espectral de potência é proporcional ao inverso da frequência. Possui potência média constante, quando as medidas são feitas em bandas que se relacionam por um fator constante (exemplo: 1/3 de oitava). Assim, observa-se que o seu nível é constante em escala logarítmica, mas decresce 3dB por oitava em escala linear. Noceti Filho & Dalcastagné (2002) destacam que essa

denominação está ligada a uma analogia com o espectro luminoso: “a luz vermelha possui a mais baixa frequência do espectro visível e o ruído rosa tem mais energia nas baixas frequências”.

Ruído de Fundo – É o “conjunto de sons e ruídos que ocorrem conjuntamente com o fato sonoro objeto de interesse ou consideração específica” (ABNT, 1981).

Som – É uma forma de energia transmitida através da colisão sucessiva das moléculas de um meio, podendo ser representado por uma série de compressões e rarefações durante a propagação. Assume uma velocidade (representada por “c”) diferente em cada meio, sendo maior nos sólidos do que nos líquidos e gases. Exemplificando, segundo Gerges (2000, p. 655-656) tem-se: para o alumínio  $c = 5200$  m/s, para o tijolo  $c = 3700$  m/s, para a água doce (20°C)  $c = 1481$  m/s, para a água doce (13°C)  $c = 1441$  m/s, para água do mar (13°C)  $c = 1500$  m/s e para o ar (20°C)  $c = 343$  m/s.

Traço – Identifica as quantidades dos materiais que constituem a argamassa, podendo ser apresentado em peso ou volume. Expressa-se, por exemplo: “o traço da argamassa, em volume, é 1:1:6 (cimento: cal: areia)”.

Vibrações – Uma vibração pode ser definida como o movimento oscilatório de uma partícula ou de um corpo, ao redor de uma posição de repouso. (Méndez & Werner, 1991, p.17)

### 1.3 HIPÓTESES E OBJETIVOS DA PESQUISA

Cientes da problemática que envolve a relação entre o homem e os espaços construídos, centrada na questão do ruído, buscando métodos para facilitar o estudo prévio do desempenho acústico das edificações, pode-se estabelecer a hipótese de pesquisa, que delineou o trabalho desenvolvido:

A aplicação da Análise Estatística de Energia (SEA) facilita a previsão do nível de ruído e possibilita aperfeiçoar o estudo do isolamento sonoro em edificações, mas necessita de uma criteriosa caracterização dos materiais e técnicas construtivas.

Nesse estudo, considera-se possível:

- ? estabelecer uma interface de entendimento fácil, prática e objetiva para profissionais de distintas formações, através de um conhecimento que correlacione os diferentes temas envolvidos na pesquisa;
- ? definir os parâmetros, relativos às técnicas construtivas e aos materiais nacionais, necessários para utilização da abordagem SEA;
- ? adequar a aplicação da metodologia SEA para a determinação do isolamento acústico da alvenaria de tijolo maciço cerâmico.

### 1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar a aplicação do método Análise Estatística de Energia (SEA) na caracterização acústica da alvenaria de tijolo maciço cerâmico, quantificando parâmetros específicos e propondo adaptações, teórico-práticas, que facilitem sua utilização na construção civil.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- ? Aglutinar a bibliografia sobre acústica, vibrações e edificações, correlacionando-a, a fim de construir um conhecimento e uma base de dados multidisciplinares.
- ? Re-estudar a interpretação dada a conceitos acústicos básicos, identificando equívocos, decorrentes de características próprias dos materiais empregados na construção civil.
- ? Determinar parâmetros físico-mecânicos, relativos às paredes de tijolos maciços cerâmicos.
- ? Facilitar o emprego da Análise Estatística de Energia (SEA) na área de edificações, caracterizando as atividades necessárias e adaptando-as devido às especificidades dos materiais e da alvenaria como técnica construtiva.
- ? Elaborar um modelo físico-computacional para isolamento sonora de uma parede, utilizando um programa comercial de aplicação da abordagem SEA, comparando os resultados obtidos com medições experimentais e cálculos analíticos.
- ? Contribuir na avaliação de desempenho do isolamento sonoro de edificações, executadas dentro de um sistema construtivo de uso corrente no Brasil, colaborando com subsídios para normas técnicas, através da disponibilização de dados e procedimentos metodológicos.

## 1.4 JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

A qualidade do projeto de uma edificação passa pela redução de ruído e vibrações. É um problema complexo, pois as fontes geradoras são múltiplas e o som transmite-se através do ar e das estruturas.

Identificar o caminho da transmissão, classificando as fontes de acordo com a sua contribuição, é importante para otimizar o projeto.

A variedade de detalhes construtivos, materiais e mobiliários dificulta a precisão dos dados, devido à necessidade de um grande número de aproximações. Torna-se, por isso, importante a utilização de uma ferramenta capaz de considerar tais aspectos, mesmo que de forma estatística.

O emprego da Análise Estatística de Energia (SEA), na construção civil, é enfatizado pela possibilidade de trabalhar-se, por exemplo, a performance média de um conjunto de paredes similares, com as mesmas propriedades gerais, e não uma solução determinística, exata, para um problema específico. Isso é importante, porque os tijolos cerâmicos, ainda que saiam do mesmo forno, podem apresentar propriedades diferentes, devido a uma queima desigual.

Ao salientarem os benefícios de SEA, frente às análises por elementos finitos, integração numérica, elementos de contorno, entre outros, os autores Lyon & DeJong (1995, p.14) destacam que os métodos exatos, por ignorarem a real variabilidade em sistemas construídos, tornam-se incompletos. Assim, tais métodos, são indicados para estruturas altamente controladas, o que não é o caso das edificações. Contudo, a abordagem SEA não substitui os métodos determinísticos, mas os complementa, porque possibilita um estudo estatístico. Definido o projeto, caso seja necessário, pode-se optar por um outro estudo mais detalhado, em especial em baixas frequências, onde a precisão de SEA é menor.

Segundo Crocker & Price (1969, p. 469), freqüentemente, as teorias negligenciam amortecimento e espessura da partição, o que não acontece com a abordagem SEA.

Em acústica de edificações, o aborrecimento causado aos usuários, pelo ruído em frequências audíveis, desperta maior interesse do que a vibração dos primeiros modos, que pode causar avarias físicas na construção. O estudo através de SEA é mais adequado que os métodos determinísticos, na solução conjunta dos dois tipos de problema (ruído e vibração), conforme esclarece Craik (1996, p. xvi).

A norma europeia EN 12354/2000 – *Building Acoustics – Estimation of acoustics performance of buildings from the performance of products - part 1 - airborne sound insulation between rooms*, permite trabalhar-se com abordagens onde “as trajetórias de transmissão descritas podem ser consideradas para ser independentes e os campos sonoro e vibracional comportam-se estatisticamente”. Esse fato reforça a tendência atual de ampliação do emprego de metodologias estatísticas em acústica arquitetônica.

A utilização de SEA permite identificar, ainda na fase de projeto, alterações capazes de minorar os problemas decorrentes do ruído e vibrações, de forma rápida, confiável e econômica. Acredita-se que, a partir do estabelecimento dos parâmetros relativos aos elementos e técnicas construtivas, isso se torne uma realidade, também, para a indústria da construção civil.

Há, por todas essas razões, necessidade de facilitar o conhecimento e tornar a abordagem SEA mais acessível, para uso em edificações.

O enfoque empreendido no presente estudo é diferente do habitualmente usado na área de acústica para edificações. A caracterização minuciosa de um elemento construtivo e a correlação de conhecimentos específicos das duas áreas, unificando-os com a finalidade de facilitar a utilização de SEA, é novidade, mesmo fora do Brasil. A determinação de parâmetros específicos da parede de tijolos maciços cerâmicos para implementação de SEA reforça o ineditismo desse trabalho.

Trata-se de uma proposta interdisciplinar, a qual aliou-se uma aplicação metodológica ímpar e uma escassez de estudos capazes de avaliar, sob esse enfoque, a relação mútua entre domínios científicos distintos, como a acústica e as edificações.

Busca-se estabelecer uma contribuição científica, a partir da reunião de referencial teórico de vários campos do conhecimento, com aplicações específicas nas áreas envolvidas, tornando-o acessível para profissionais de distintas formações. A caracterização da performance acústica da parede de tijolo maciço cerâmico serve de base para o futuro detalhamento de outros materiais e sistemas construtivos utilizados no Brasil.

Procura-se, ainda, contribuir na determinação de critérios de desempenho acústico para as edificações brasileiras, disponibilizando dados e introduzindo um novo conceito de avaliação acústica, através do emprego de uma metodologia estatística.

A abertura de um novo horizonte de pesquisa nesse setor é outro aspecto relevante, porque amplia a possibilidade de acesso ao conforto acústico para os usuários das edificações, beneficiando a população em geral.

A ergonomia contemporânea está centrada no homem, enquanto agente do processo criativo/executivo do trabalho. Wisner (1987, p. 127-135) aborda a reciprocidade entre os efeitos do trabalho na vida pessoal e, também, das condições de vida da pessoa sobre suas escolhas profissionais e comportamentos no trabalho. Enfatiza, ainda, que *“é a mesma pessoa que vive e procede as suas diversas atividades durante as 24 horas do dia”*.

Nesse ponto, reside a convergência com o presente estudo, que pretende colaborar na identificação de meios capazes de garantir condições de conforto acústico para o trabalhador, não apenas no seu posto de trabalho, mas em todos os ambientes do seu cotidiano. A questão do ruído pode, e deve, ser correlacionada ao aspecto integral de seu dia-a-dia, dentro e fora do trabalho, como agente, principal ou coadjuvante, de problemas patológicos ou psico-emocionais.

A preocupação com as condições acústicas, de todos os ambientes, reafirma a dimensão da análise realizada, que visa contribuir para a qualidade de vida do ser humano.

## 1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A presente Tese constitui-se de uma pesquisa teórico-experimental de natureza aplicada que, através de uma abordagem quantitativa, abrange atividades bibliográficas, analíticas, numéricas e experimentais.

Iniciou-se pelo estudo dos temas envolvidos, com ênfase para o isolamento acústico, a abordagem SEA (Análise Estatística de Energia) e a alvenaria. Com isso, buscou-se aprofundar e rever a interpretação usual dos conceitos tradicionais, bem como consubstanciar o assunto proposto. Além disso, foram identificados os parâmetros necessários para a aplicação de SEA, tais como: densidade  $\rho$ , módulos de elasticidade (E e G), coeficientes de Poisson ( $\nu$ ) e fatores de perda ( $\eta$ ) da parede, os quais foram determinados durante o trabalho.

Em seguida, estabeleceu-se uma seqüência de atividades a serem executadas na resolução do problema. O aprendizado, decorrente desse exercício, tornou-se essencial no entendimento do tema e no conhecimento das rotinas empregadas nos programas comerciais, que utilizam SEA. A seguir, optou-se pela utilização de um programa, escolhido através de testes relativos ao comportamento de materiais com performance conhecida, como é o caso do alumínio. O próximo passo foi uma definição do modelo objeto do estudo.

Os resultados de simulações computacionais, obtidos a partir desse modelo, foram compilados, comparados e avaliados, para posterior análise. Em continuação, cálculos analíticos foram realizados, utilizando fórmulas da acústica clássica.

A aquisição dos dados para análise foi complementada pela fase experimental que, além de utilizar instalações e equipamentos do Laboratório de Vibrações e Acústica da Universidade Federal de Santa Catarina (LVA/UFSC), compreendeu experimentos executados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Maria (LMCC/UFSM).

Uma análise comparativa contemplou os resultados de todas as etapas: simulação numérica, cálculos analíticos e ensaios experimentais.

Assim, caracterizou-se, acusticamente, o processo construtivo em estudo, ou seja, a parede de alvenaria de tijolo maciço cerâmico.

Complementando, analisaram-se todos os resultados, comparando-os, inclusive, com dados bibliográficos referentes a outros materiais, que apresentam algumas características similares à alvenaria de tijolo maciço cerâmico, como os blocos sílico-calcários e o concreto.

O estudo quantitativo, portanto, pode ser subdividido em cinco etapas. A primeira etapa foi a determinação dos parâmetros necessários; a segunda constituiu-se na elaboração de um modelo SEA, empregando um programa comercial; a terceira etapa foi a realização de



ensaios experimentais; a quarta, a execução de cálculos analíticos e a quinta etapa a compilação e análise de todos os resultados.

## 1.6 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

O tema proposto é extremamente amplo e complexo. Por isso, optou-se por eleger questões fundamentais e representativas, restringindo o estudo a pontos específicos em cada uma das áreas envolvidas.

Aplicou-se a abordagem SEA a um sistema essencial, seguindo a orientação de Craik (1996, p. 18), que recomenda: *“é melhor começar com um modelo relativamente simples e adicionar subsistemas extras mais tarde”*.

O presente trabalho limitou-se à análise de um único método construtivo, ou seja, a alvenaria executada com tijolos maciços cerâmicos. A opção por esse material prendeu-se a diversos fatores de ordem prática e conjuntural. Ao trabalhar com tijolo maciço, podem-se desconsiderar os efeitos dos “furos”, os quais apresentam influência diferenciada nas características e resistência do bloco, dependendo de suas formas e dimensões. O material é decorrente do setor de cerâmica vermelha, cujo potencial, principalmente nas regiões sul e nordeste do Brasil é muito significativo, devido à abundância e qualidade das jazidas, que tornam os produtos competitivos, justificando investimentos econômicos e científicos nessa área. O tijolo maciço cerâmico é o escolhido para a construção de casas onde o principal enfoque é a sustentabilidade – tão importante para o meio ambiente.

O presente trabalho não aborda a relação custo/benefício da prevenção e correção dos problemas acústicos nas edificações, embora aponte na direção de que prever níveis sonoros é importante e deve ser incentivado, conforme recomenda Amarilla (1992, p 221).

## 1.7 ORGANIZAÇÃO DA TESE

O presente documento está constituído de sete capítulos, assim distribuídos:

### ? Capítulo 1 – Introdução

Apresenta o tema, as atividades desenvolvidas e a estrutura de redação do documento final. Identifica as hipóteses e objetivos da pesquisa, justificando-a e caracterizando sua relevância e contribuições. Define os principais termos e delimitações da pesquisa.

### ? Capítulo 2 – A transmissão sonora na alvenaria

Encontra-se dividido em duas partes. A primeira fala sobre a alvenaria mostrando características e parâmetros de seus elementos constituintes. A segunda refere-se à transmissão e ao isolamento do som nas edificações.

### ? Capítulo 3 – Análise Estatística de Energia (SEA)

A partir de considerações históricas e atualidades, mostra uma síntese do método, seus parâmetros, hipóteses básicas e aspectos específicos para sua aplicação em edificações, finalizando com informações sobre o emprego de SEA em programas computacionais.

### ? Capítulo 4 – Conforto acústico e qualidade de vida

Informa sobre a legislação, os requisitos e critérios de desempenho em edificações, os indicadores de conforto acústico e, em especial, sobre a norma ISO 140 (específica para isolamento acústico de materiais e componentes de edificações).

### ? Capítulo 5 – Atividades Experimentais

Descreve a parede objeto de estudo, o local onde foi construída e as condições ambientais. Detalha os ensaios relativos ao Índice de Redução Sonora (R), caracteriza física e mecanicamente os componentes da alvenaria e determina a resposta da parede sob excitação de impacto e acústica.

### ? Capítulo 6 – Simulações e Cálculos

Apresenta as simulações relativas à determinação do Índice de Redução Sonora (R), utilizando Análise Estatística de Energia (SEA) e os cálculos analíticos dos principais pontos de resposta acústica da parede.

### ? Capítulo 7 – Conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

Mostra as conclusões da Tese, efetuando uma relação com as hipóteses e objetivos propostos. Estabelece sugestões e orientações para pesquisas a serem desenvolvidas em temas ou com metodologia similares a presente Tese.

As bibliografias citadas no texto e os apêndices encerram o presente documento.

## **CAPITULO 2 -**

# **A TRANSMISSÃO SONORA NA ALVENARIA**

---

### **2.1 A ALVENARIA**

A necessidade de abrigo é uma das exigências básicas do ser humano. A partir da utilização das cavernas, a humanidade começou a desenvolver a arte de construir ambientes. A alvenaria constitui-se numa das técnicas mais antigas e permanece sendo empregada até os dias atuais.

Os tijolos queimados ao sol, e posteriormente em fornos, já faziam parte dos usos e costumes dos povos da Antigüidade. Apesar disso, as construções continuaram empíricas, por muito tempo. Santos (2001, p. 01) cita que, na busca de estabelecer projetos mais racionais, testes em paredes e prismas começaram a ser realizados, em diversos países, no final do século XVIII e início do século XIX.

No Brasil, conforme lembram Prudêncio Jr (1986, p. 07) e Cavalheiro (1994, p. 146), as primeiras pesquisas sobre alvenaria datam da década de 30.

A alvenaria está subdividida em dois grandes grupos. O primeiro, é a alvenaria de pedras, as quais podem ser naturais ou artificiais (tijolo e blocos); o segundo, é a alvenaria adensada, que se constitui de maciços de argila ou concreto moldados em formas especiais.

O presente estudo refere-se à alvenaria de pedras artificiais (tijolos maciços cerâmicos), respeitando a conceituação da Associação Brasileira da Construção Industrializada (ABCI, 1990, p. 17).

#### **2.1.1 A ortotropia da alvenaria**

Antes de avaliar a questão específica da alvenaria, convém lembrar alguns conceitos sobre materiais (Popov, 1978, p. 92-94):

? Material homogêneo – apresenta as mesmas propriedades em qualquer ponto;

- ? Materiais anisotrópicos – possuem propriedades mecânicas diferentes em diferentes direções, com relação a seus planos cristalográficos. Em geral, nos materiais reais esse efeito é muito pequeno;
- ? Materiais ortotrópicos – as propriedades são diferentes nas direções longitudinal, radial e transversal, ou seja, nas três direções ortogonais, constituindo-se num caso especial de anisotropia. É o comportamento da madeira e de diversos materiais fabricados, como: plásticos de filamento reforçado, prensados para construção, metais laminados, entre outros.

Santos (2001, p. 30) destaca que, antigamente, a análise sobre a alvenaria era simples, considerando-a com um comportamento contínuo, elástico e isotrópico. Atualmente, com a evolução das técnicas numéricas, busca-se respeitar a não-linearidade do material. Em sua Tese, ensaiou prismas de blocos cerâmicos “*sob carregamento uniaxial, para determinar os módulos de elasticidade, resistência à compressão e coeficientes de Poisson nas direções paralela e perpendicular às juntas horizontais de argamassa*” e utilizou o estado biaxial de tensões para determinação do módulo de cisalhamento (G). Tendo em vista que os ensaios para módulo de cisalhamento não foram consistentes, Santos (2001, p. 55) optou pelo emprego da fórmula específica para materiais ortotrópicos, Equação 1, citada por Chen & Saleeb (1992).

$$\frac{1}{G_{xy}} = \frac{1}{E_x} + \frac{1 + \nu_{xy}^2}{E_y} \quad \text{Equação 1}$$

Lourenço (1996) focaliza a análise não-linear de alvenarias, destacando técnicas de homogeneização, nas quais o comportamento macro do elemento composto pode ser predito a partir das propriedades micro de seus constituintes. Esse mesmo autor (p. 43) salienta que os micro-modelos são, provavelmente, a melhor ferramenta disponível para o conhecimento do comportamento da alvenaria.

A ortotropia das paredes tem sido detectada por pesquisadores da área de acústica que trabalham com os diferentes tipos de alvenaria. O centro de pesquisas alemão PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt), por exemplo, implementou uma avaliação de TLF (Fator de Perda Total). O projeto foi subdividido em duas partes: a primeira buscou estabelecer procedimentos de medição e a segunda, reuniu doze institutos para verificar a variabilidade das medições. A amostra dessa segunda fase foi uma parede de tijolos maciços de cálcio-silicato, com reentrâncias para fixação em sua face maior e sistemas de ranhuras macho-fêmea nas laterais. Entre as conclusões obtidas destacam-se os efeitos de discrepâncias observadas nas medições de velocidade das ondas longitudinal e de flexão:

*During the measurements it was noticed, that the wall under test has an orthotropic behaviour. From the material data  $f_c$  calculates to 103 Hz, whereas the measurement of SRI has a pronounced dip at 200 Hz which could be determined as critical frequency. Schmitz & Meier (2000, p.124)<sup>1</sup>*

Craik (1996, p. 96) apresenta, graficamente, a eficiência de radiação de uma placa ortotrópica de 3 m x 4 m (não identifica o material constituinte, mas diz tratar-se de edificação), a qual possui frequência crítica de 250 Hz numa direção e 500 Hz em outra.

Assim, observa-se que esse comportamento diferenciado das paredes, em especial da alvenaria, precisa ser considerado na análise de seu desempenho acústico.

### **2.1.2 Parâmetros físico-mecânicos da alvenaria**

Somayaji (2001, p. 15) afirma que as propriedades físicas são úteis na avaliação do material em termos de aparência, peso, permeabilidade e retenção de água. Inclui nessa classificação estudos sobre: densidade, porosidade, conteúdo de vazios, conteúdo de mistura, peso específico, permeabilidade e micro ou macro estrutura. Considera sob essa classificação, também, as propriedades como: textura, cor e forma.

As propriedades mecânicas medem a resistência de um material para cargas ou forças aplicadas. Referem-se a tensão ou capacidade de deformação. Somayaji (2001, p. 22) salienta que um material que desenvolve maior deformação sob uma dada tensão é menos rígido do que outro que apresenta menor deformação sob a mesma tensão.

Somayaji (2001, p.16) enfatiza a importância do conhecimento da capacidade de deformação do material (sua rigidez), que é obtida através do módulo de elasticidade (razão entre a tensão e deformação abaixo do limite de proporcionalidade). O mesmo autor cita (p. 25) a existência de três módulos de elasticidade: tração, compressão e cisalhamento, destacando, no entanto, que ao ser omitida essa determinação indica-se, invariavelmente, tratar-se de tensão normal de tração e compressão, caracterizando o também chamado Módulo de Young.

Um outro índice necessário para a avaliação da performance acústica da alvenaria através do programa computacional, como será observado no Capítulo 6 da presente Tese, é o Coeficiente (ou razão) de Poisson. Essa grandeza é definida como a razão entre a deformação lateral (normal à direção axial) pela deformação axial (carregamento ao longo do eixo). Somayaji (2001, p. 21) diz que a Razão de Poisson para a maioria dos materiais de construção civil está entre 0,15 e 0,40. Na tabela mostrada não constam alvenaria, tijolo ou argamassa.

---

<sup>1</sup> Durante as medições foi notado que a parede sob teste tem um comportamento ortotrópico. A frequência crítica calculada dos dados do material foi 103 Hz, enquanto as medições do SRI (Índice de Redução Sonora) tiveram uma pronunciada depressão em 200 Hz, a qual pode ser determinada como a frequência crítica.

Os livros de acústica, como por exemplo: Kinsler & Frey (1967, p. 502), Parkin et al (1979), Kuttruff (1979), Turner & Pretlove (1991, p. 08), Recuero & Gil (1993), Méndez et al (1994) e Makrinenko (1994) ao caracterizarem os materiais, não mostram informações sobre a alvenaria. Em alguns casos, encontra-se citado apenas o tijolo ou bloco, como em: Gerges (2000, p. 655), Beranek (1988, p. 308), Bies & Hansen (1988, p. 358), Fahy (1985, p. 12) e Beranek (1980, p. 297). Os dados referentes à argamassa foram encontrados somente em Fahy (1985, p. 12).

Segundo Somayaji (2001, p. 271), as propriedades mais importantes da alvenaria são: densidade, resistência à compressão, resistência à flexão, módulo de elasticidade, durabilidade e condutividade térmica.

A alvenaria é um material composto, por isso suas propriedades dependem das características individuais dos elementos que a constituem. Para a pesquisa realizada, buscaram-se subsídios referentes aos materiais e às técnicas de determinação dessas propriedades em pesquisas específicas da área de edificações. Atenção especial foi conferida aos dados relativos aos materiais do sul do Brasil, tendo em vista que os ensaios experimentais utilizaram materiais dessa região.

### **2.1.2.1 O tijolo maciço cerâmico**

O tijolo maciço cerâmico é uma unidade de alvenaria, que se encontra citada em três documentos da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT): NBR 8041/83 (Tijolo maciço cerâmico para alvenaria – forma e dimensões); NBR 7170/83 (Tijolo maciço cerâmico para alvenaria); e NBR 6460/83 (Tijolo maciço cerâmico para alvenaria – verificação da resistência à compressão).

Roman & Nanni (1985, p. 04) ao observarem vinte olarias da Região da Grande Porto Alegre (aproximadamente 10% das existentes naquela época), constataram que a produção do tijolo maciço cerâmico acontecia de forma quase artesanal. Os testes realizados para os tijolos foram: determinação das dimensões, absorção de água, densidade e resistência à compressão. A determinação da densidade (p. 06) constituiu-se da medição, nos terços extremos de cada peça, de suas três dimensões (duas vezes cada uma). Após, obtiveram o volume do corpo de prova (em decímetros cúbicos) e pesaram o tijolo (em Kg). Calcularam a densidade através da Equação 2, onde  $d$  é a densidade ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ );  $m$ , a massa e  $V$  é o volume do corpo de prova ( $\text{dm}^3$ ).

$$d = \frac{m}{V}$$

Equação 2

A partir dos resultados de resistência à compressão e densidade de 257 tijolos, testaram a significância de uma relação de regressão linear, usando um programa computacional (REGSIMPLES). Concluíram que a relação linear não pode ser usada como modelo de previsão, embora seja significativa. Afirmam que *“uma pesquisa adicional, com medições bem controladas, é necessária para determinar o tipo de relação entre resistências e densidades”*. (Roman & Nanni, 1985, p. 24-25)

Prudêncio Jr (1986, p. xix), pesquisou *“apenas tijolos cerâmicos maciços produzidos na Região da Grande Porto Alegre”*. Para a caracterização desse material, executou a seleção das amostras, verificou as dimensões, efetuou testes de absorção de água e ensaios de resistência à compressão. Quantificou, também, a densidade.

O autor salienta que, em seu estudo, a densidade era apenas um índice para caracterizar o material, por isso adotou procedimentos simplificados, diante da inexistência de norma brasileira que regulamentasse esse tipo de ensaio para tijolos. Atualmente, essa situação continua idêntica, ou seja, a ABNT não possui norma específica nessa área.

Na presente Tese, a densidade é um dos parâmetros em estudo. Poucas são as referências. Assim, opta-se por descrever o método empregado por Prudêncio Jr (1986, p. 31) e utilizar os dados por ele obtidos para comparação com os resultados experimentais. Cinco tijolos de cada procedência tiveram as suas três dimensões medidas (duas vezes cada dimensão), com o uso de um paquímetro, tendo como pontos de medida os terços extremos das peças.

A seguir, houve a determinação do volume dos corpos-de-prova, secos ao ar, a partir das dimensões médias. Uma vez pesados os tijolos da amostra, a densidade foi obtida, através da relação apresentada na Equação 3, onde  $d$  é a densidade do tijolo;  $m$  representa a massa do tijolo seco ao ar (Kg);  $V$  é o volume do tijolo ( $m^3$ ) e  $d_{ag}$  significa a massa específica da água ( $kg/m^3$ ).

$$d = \frac{m}{V \cdot d_{ag}}$$

Equação 3

Os dados decorrentes dessa determinação constituem a Tabela 1 do presente texto.

Tabela 1 : Densidade dos tijolos empregados

Olaria n?	Densidade média	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
1	1,856	0,015	0,8
2	1,655	0,067	4,0
3	1,654	0,051	3,1
4	1,834	0,036	2,0
5	1,906	0,031	1,7

Fonte: PRUDÊNCIO JR (1986, p. 32)

Somayaji (2001, p. 229) apresenta valores representativos de uma unidade de tijolo de argila com dimensões: 6,3 cm x 9,5 cm x 20,6 cm. Destaca (p. 235) que as propriedades físicas são: cor, textura, dimensões e densidade; enquanto as propriedades mecânicas são: resistência à compressão, módulos de ruptura e elasticidade, resistência à tração, absorção, condutibilidade térmica e resistência ao fogo. Afirma (p. 236) que a argila queimada possui densidade superior a 1600 Kg/m<sup>3</sup>, com uma média de 2000 Kg/m<sup>3</sup>. Sobre o módulo de elasticidade do tijolo, diz situar-se entre 10,3 x 10<sup>9</sup> N/m<sup>2</sup> e 34,5 x 10<sup>9</sup> N/m<sup>2</sup>.

A Tabela 2 resume os dados sobre alvenaria indicados nos livros de acústica dos seguintes autores: Gerges (2000, p. 655), Beranek (1988, p. 308), Bies & Hansen (1988, p. 358) e Fahy (1985, p. 12).

Tabela 2 : Propriedades dos materiais

Autor	Material	Módulo de Young E (10 <sup>9</sup> N/m <sup>2</sup> )	Densidade ? (kg/m <sup>3</sup> )	Coefficiente de Poisson	Velocidade do som (m/s)	Fator de Perda ?	Produto da densidade superficial e frequência crítica (Hz-g/m <sup>2</sup> )	Perda de transmissão normal de incidência normal na freq. Crítica (dB)
Gerges	Tijolo	25	1800		3700			
Beranek	Tijolo		1900 -2300			0.01(*)	34700-58600	48.5– 53
Fahy	Tijolo	16	1900 -2200		2800			
Bies & Hansen	Tijolo	16.2	1800		3000	0.01		
Bies & Hansen	Bloco de alvenaria	4.8	900		2300	0.005–0.02		

(\*) Fator de amortecimento interno em 1000 Hz



### 2.1.2.2 A argamassa

A argamassa é o elo de união entre os tijolos, atuando na distribuição das tensões e acomodação das deformações.

Existem diversos tipos de argamassas. Entre as mais empregadas para levantamento em alvenaria encontram-se as chamadas mistas, que apresentam cimento + cal (como aglomerante) e areia (como agregado).

Prudêncio Jr (1986, p. 35) utilizou em sua pesquisa apenas uma argamassa padrão. Para mostrar o traço, organizou-se a Tabela 3. Esse traço é um dos mais empregados nos estudos envolvendo argamassa e/ou alvenaria, tendo sido utilizado, por exemplo, por McNary & Abramns (1985), Aly (1992), Prado (1995), Mohamad (1998), Mendes (1998) e Santos (2001).

Tabela 3 : Traço da argamassa utilizada por Prudêncio Jr (1986)

<b>Material constituinte</b>	<b>Traço em peso</b>	<b>Traço em volume</b>
Cimento	1	1
Cal hidratada	0,5	1
Areia	6,67	6
Água	1,38	1,38

As condições de exposição e solicitação da alvenaria são, segundo Prudêncio Jr (1986, p. 37), o fator determinante na escolha da argamassa, pois não existe uma ideal, capaz de otimizar, simultaneamente, todas as propriedades.

Sabbatini (1986, p. 07) recomenda nove trabalhos como referências sobre as alterações nas propriedades das argamassas mistas (como, por exemplo, a influência da proporção cimento/cal).

A Tabela 4 permite observar propriedades gerais da argamassa, cujo conhecimento é importante na busca de soluções para os problemas de isolamento acústico das edificações. Foi extraída do Manual Técnico de Alvenaria (ABCI, 1990, p.163).

Tabela 4 : Algumas propriedades da argamassa, sua importância e medição.

Estado	Propriedade	Importância	Métodos de Ensaio
Fresco	Fluidez	A argamassa deve deslizar na colher e permitir acertar a posição do bloco/tijolo na fiada.	Mesa de consistência NBR 7215 ou Abatimento do tronco de cone (slump) NBR 7223
	Coesão	A argamassa não deve se desintegrar ao se fazer o “cordão” na colher; ela deve suportar os blocos sem se deformar antes da pega.	
	Retenção	A argamassa não deve perder a fluidez enquanto está sendo trabalhada pelo pedreiro; não deve perder água por evaporação ou absorção excessivas para não trincar no estado fresco.	Retenção de água CE-2:3.4-017
Endurecido	Resistência à compressão	A resistência se associa à durabilidade, à impermeabilidade, sendo fácil medir. Tem influência na resistência mecânica da parede quando muito baixa ou muito alta; relacionando-se também com a deformabilidade, a resistência à tração e ao cisalhamento.	Resistência à compressão NBR 7215
	Módulo de deformação	Influi na deformabilidade da parede; influi no aparecimento ou não de trincas quando da acomodação da alvenaria à pequenas movimentações ou variações dimensionais.	Módulo de deformação NBR 8522
	Retração por secagem	Ligado à suscetibilidade de fissuração das juntas de argamassa devido ao próprio fenômeno de retração.	Retração por secagem de argamassas endurecidas CE-2:3.4-005

Fonte: TANGO (1990, p.163)

Quando a trabalhabilidade mantém-se a mesma, segundo Somayaji (2001, p. 274), o Módulo de Elasticidade melhora com a resistência do tijolo e da argamassa, decrescendo com o aumento da espessura da junta por unidade de comprimento (medida paralelamente a direção da força compressiva).

Santos (2001, p. 13) afirma que a argamassa tem suas propriedades afetadas pelos materiais que a constituem e, em geral, é menos resistente e mais deformável que os blocos, porém apresenta um Coeficiente de Poisson maior.

Mohamad (1998, p. 05-08) determinou a variação do Coeficiente de Poisson e o Módulo de Elasticidade em função das tensões de confinamento. Utilizou a conceituação do Módulo de Elasticidade (propriedade que define como acontece a transferência de tensões entre os

materiais: bloco, argamassa e graute) como a declividade da curva tensão versus deformação sob um carregamento uniaxial. Diferenciou os Módulos de Elasticidade Tangente e Secante. Considerou o Coeficiente de Poisson como a razão entre a deformação lateral e a deformação axial dentro do intervalo elástico, dado pela Equação 4.

$$\nu = \frac{\Delta l}{\Delta a} \quad \text{Equação 4}$$

Mendes (1998, p. 95) explica que obedeceu a NBR 8522 para a determinação do Módulo de Elasticidade da argamassa. Esclarece que calculou “o módulo de elasticidade secante obtido nos pontos 0,5 MPa e 30% da carga de ruptura.” A NBR 8522 refere-se ao concreto, mas é empregada para outros materiais (como alvenaria e argamassa), devido à inexistência de outra referência específica.

A NBR 8522/1984, denominada: Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação – Método de ensaio, tem por objetivo prescrever como devem ser determinados os módulos de deformação (longitudinal, tangente e secante) e diagramas tensão-deformação, decorrentes de carregamento estático, à compressão axial simples. É importante o cuidado na escolha do plano de carga, que é variável, conforme o índice que está sendo definido.

Assim, verifica-se a necessidade de observância do tipo de valor que está sendo referido nos trabalhos, que servem de subsídios no levantamento dos dados para a presente pesquisa.

Uma única citação sobre as propriedades de argamassa foi encontrada nos livros de acústica consultados. Fahy (1985, p. 12) apresenta os seguintes valores relativos ao reboco: módulo de elasticidade =  $7,0 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ ; densidade =  $1200 \text{ Kg/m}^3$  e velocidade do som = 2420 m/s.

### 2.1.2.3 Os prismas e as mini-paredes

Os prismas são representações simples e econômicas de uma parede de alvenaria, para a verificação de suas propriedades mecânicas. Podem ter diferentes formas, tamanhos e maneiras de assentamento. Na execução da junta a prumo a largura mínima do prisma é 1,0 bloco, enquanto na junta com amarração aumenta para 1,0 bloco e meio. (Mendes, 1998, p. 89)

Prudêncio Jr (1986, p. 43/99) empregou prismas de quatro, cinco e sete fiadas, com tempo de cura de vinte e oito dias, sob sacos de polietileno, em laboratório. Não refere se determinou a densidade, deixando como sugestão para trabalhos futuros o estudo do “módulo de elasticidade da alvenaria e sua correlação com a resistência à compressão de prismas”.

Cavalheiro (1994, p. 148 / 151) realizou pesquisa experimental em pequenas paredes, construídas com onze fiadas de tijolos de  $\frac{1}{2}$  vez com juntas de amarração de 10 mm. Utilizou “tijolo cerâmico maciço convencional de dimensões médias 10,5 x 5,3 x 23,4 cm, absorção 13%, IRA (Taxa de absorção inicial) 1,85 Kg/m<sup>2</sup> min e resistência à compressão média de 11,47 MPa.” O autor ensaiou trinta e duas pequenas paredes, com e sem reboco, executadas em quatro traços diferentes (três de argamassa mista e um com aditivo plastificante). Os resultados médios de cada série para os módulos de deformação secante a 40% e a 67% da tensão de ruptura estão transcritos na Tabela 5. Concluiu que as alvenarias de tijolos maciços possuem “razoável elasto-plasticidade” (p.154). Além disso, o revestimento elevou os módulos de deformação até tensões da ordem de 50% da ruptura, momento em que iniciava o descolamento parcial ou mesmo total.

Considerando que:

- 1 – Pequenas paredes sem revestimento;
- 2 – Pequenas paredes com revestimento (traço em volume do chapisco 1:3 e do emboço 1:2:9)
- A – Argamassa de assentamento (1:0,5:4,5 em vol.)
- B – Argamassa de assentamento (1:1:6 em vol.)
- C – Argamassa de assentamento (1:2:9 em vol.)
- D – Argamassa de assentamento com aditivo plastificante (1:0:6 em vol.)

Tabela 5 : Módulos de deformação secante das pequenas paredes.

Séries	Média dos módulos de Deformação (MPa)		Coeficiente de Variação		Número de Ensaios
	40%	2/3 da rupt.	40%	2/3 da rupt.	
1 A	3139	2680	3,31%	2,02%	3
1 B	2873	2470	12,04%	8,65%	4
1 C	3453	2842	6,21%	6,00%	4
1 D	2600	2269	7,37%	7,30%	4
2 A	6359	3530	2,31%	9,47%	2
2B	8233	4233	5,41%	11,10%	4
2C	7870	5224	15,64%	9,63%	4
2D	6824	4589	4,30%	8,26%	4

Fonte: CAVALHEIRO (1994, p. 153)

Mendes (1998, p. 101) ensaiou apenas prismas de blocos cerâmicos, por isso seus resultados não são transcritos aqui. Apesar disso, opta-se por descrever a caracterização do ensaio, executado segundo a NBR 8522.

O módulo de elasticidade calculado dos prismas é o módulo secante determinado na curva tensão x deformação entre os pontos 0,5 MPa e 30% da carga de ruptura. Este procedimento desconsidera as possíveis perturbações inerentes no início do carregamento dos prismas. Antes da efetivação do ensaio, foi realizado ciclo de carga e descarga até 2,5 MPa para acomodação das partículas, e assim minimizar os erros na leitura de deformações provenientes de acomodação física das partículas.

Sinha (1978) realizou experimentos em painéis ortotrópicos de tijolos em escala reduzida (1/3), sob carregamento lateral, para determinação de propriedades e constantes elásticas. Os resultados médios para os módulos de elasticidade e coeficiente de Poisson apontaram:

$$E_x = 11733 \text{ N/mm}^2 \text{ (paralelo às juntas de argamassa)}$$

$$E_y = 8483 \text{ N/mm}^2 \text{ (perpendicular às juntas de argamassa)}$$

$$\nu_x = 0,15$$

$$\nu_y = 0,11$$

#### 2.1.2.4 Parede de alvenaria

Considera-se que uma parede, junto aos requisitos de estética, durabilidade e economia, deve atender às funções de: resistir às cargas, aos impactos e ao fogo; contribuir para o conforto térmico; impedir a entrada de ar e chuva; e isolar acusticamente os ambientes. (ABCI, 1990, p. 21)

Os ensaios de paredes, devido ao custo e dificuldades de execução, são realizados em escala bem menor do que os de prismas e mini-paredes.

Prudêncio Jr (1986, p. 51) avaliou doze corpos de prova, com altura de 2,60 metros e largura entre 0,70m e 1,20 m, executados pelo mesmo pedreiro. A cura foi de vinte e oito dias, ao ar, em laboratório. Não cita, no entanto, a determinação de parâmetros como densidade e módulo de elasticidade.

Somayaji (2001, p. 271) cita 181 Kg/m<sup>2</sup> como densidade de área média para uma parede de alvenaria. Salienta, também (p. 274), que o módulo de elasticidade é afetado pelo desenho da parede, a resistência da unidade, a resistência da argamassa e o acabamento da parede. Para um mesmo revestimento, o módulo de elasticidade melhora com a resistência do tijolo e da argamassa e decresce com o aumento na espessura total de pontos de argamassa, por unidade de comprimento, medida paralelamente à direção da força compressiva.

Yokel & Fattal (p. 523, 1976) estimam o Coeficiente de Poisson na faixa entre 0,10 e 0,25, destacando que "*not much information is available on Poisson's ratio for clay masonry*"<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> não existem muitas informações disponíveis sobre a razão de Poisson para a alvenaria de argila.

Portanto, observa-se o quanto são limitadas as informações sobre as propriedades físico-mecânicas referentes às paredes de alvenaria de tijolos maciços cerâmicos.

## 2.2 A TRANSMISSÃO E O ISOLAMENTO DO SOM

A necessidade de atenuar ruídos – cada vez mais intensos - tem conduzido a um maior desenvolvimento dos estudos na área de isolamento. Procura-se diminuir a transmissão da energia sonora, que pode ocorrer por via aérea e/ou estrutural, conhecendo-se a natureza dos ruídos, sua forma de transmissão e a performance dos materiais a serem empregados.

Quando a propagação sonora ocorre no ar, as ondas são apenas do tipo longitudinal, indicando que a vibração das partículas acontece na mesma direção da propagação da onda. Ao trabalhar-se com a via estrutural, podem ser encontradas, também, ondas de cisalhamento, torção e de flexão.

Na prática, os dois caminhos (ar e estrutura) precisam ser observados e tratados.

O projeto de um bom isolamento para uma parede simples depende, entre outros fatores, do conhecimento do espectro do ruído, importante na escolha de um material adequado sob o ponto de vista dos mecanismos de controle (rigidez, ressonância, massa e coincidência), os quais caracterizam quatro regiões distintas, conforme será explicitado no decorrer do presente texto.

Gerges (2000, p. 187) enfatiza que é possível definir as características dos materiais ou dispositivos a serem utilizados num isolamento específico, a partir do conhecimento de grandezas, como a Perda de Transmissão (PT) e a Diferença de Nível (D). O autor distingue esses dois índices, definindo Perda de Transmissão (PT) como a relação logarítmica entre as energias transmitida e incidente; enquanto dá, ao resultado da subtração entre os Níveis de Pressão Sonora (antes e depois da colocação do dispositivo isolador), a denominação de Diferença de Nível de Pressão Sonora.

Quando os valores obtidos para PT são altos, significa a existência de uma baixa transmissão da energia acústica, resultando um alto isolamento. Alta transmissão resulta valores baixos de PT, indicando um baixo isolamento.

Matematicamente, a Perda de Transmissão, representada pela Equação 5, é determinada a partir da relação  $\tau = (\text{energia transmitida}) / (\text{energia incidente})$ , onde  $\tau$  é o Coeficiente de Transmissão Sonora.

$$PT = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad \text{Equação 5}$$

Fahy (1985, p. 147) e Recuero & Gil (1993, p. 294) esclarecem que a Perda de Transmissão (PT) pode ser, também, referida por Sound Reduction Index – R (Índice de

Redução Sonora), como nas normas ISO (International Standard Organization) e que, em alguns países (como nos Estados Unidos) a denominação mais empregada é Sound Transmission Loss – TL (Perda de Transmissão Sonora).

A Diferença de Nível de Pressão Sonora, ao contrário da Perda de Transmissão, não está baseada, somente, em características inerentes aos materiais, porque sofre a interferência dos locais onde são medidos os níveis de pressão, portanto depende de fatores relativos ao ambiente, como o volume e a absorção. Sua representação matemática é mostrada na Equação 6, onde  $NPS_1$  e  $NPS_2$  são, respectivamente, os Níveis de Pressão Sonora antes e depois da colocação do dispositivo isolador.

$$D = NPS_1 - NPS_2 \quad \text{Equação 6}$$

Reynolds (1981, p. 303) aponta a colocação de uma barreira sólida, como o método mais comum de controlar a transmissão sonora de uma área para outra. Destaca que a passagem do som, de um espaço a outro, nunca é bloqueada completamente, mas é possível atingir valores especificados para a diferença desses níveis sonoros.

Recuero & Gil (1993, p. 295) afirmam que, para a determinação do isolamento de uma parede, deve-se partir de situações e modelos simplificados (portanto ideais) para, na seqüência, aproximar-se – mediante casos cada vez mais complexos – do comportamento existente em situações reais.

Por isso, nesse item sobre transmissão e isolamento sonoro, opta-se por analisar, inicialmente, a transmissão do som através de três meios; em seguida, altera-se a condição de incidência sonora de normal para aleatória; relembra-se algumas diferenças conceituais; generaliza-se para paredes oscilantes e vibrantes; mais adiante, verificam-se as paredes compostas e a introdução de aberturas; na seqüência, incorporam-se os conceitos de transmissão ressonante e não-ressonante; e finaliza-se com as considerações gerais.

### **2.2.1 O som, com incidência normal, transmitido através de três meios**

O modelo mais genérico de representação da perda de transmissão de uma parede simples, colocada na separação de dois ambientes, é o estudo de uma onda plana longitudinal, com propagação unidirecional e incidência normal, atuando sobre três meios. O primeiro e o terceiro são o ar e o segundo é constituído de um material, cuja impedância característica ( $Z_c$ ) é bem maior que a do ar. Uma parcela da energia gerada no meio I passa ao II, enquanto outra parcela é refletida. O mesmo acontece entre os meios II e III. Nesse modelo ideal, ignora-se a absorção nos três meios. A propagação da onda ocorre no

sentido positivo do sistema, cuja origem ( $x = 0$ ) apresenta-se na fronteira entre os meios I e II, enquanto que a linha limítrofe entre os meios II e III identifica o valor de  $x = \square$ .

A Figura 1, elaborada a partir de Kinsler & Frey (1967, p. 136), Reynolds (1981, p. 303) e Gerges (2000, p. 198), esquematiza a onda incidente, bem como as transmitidas e refletidas, em cada um dos meios estudados.

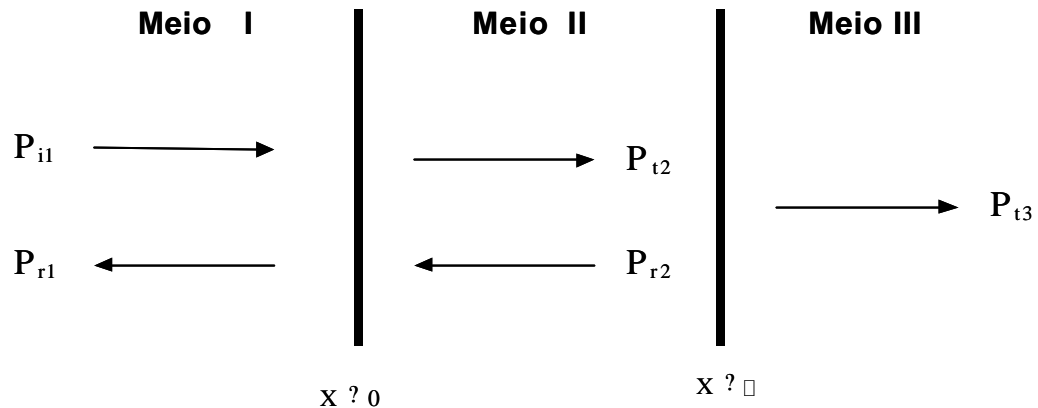


Figura 1 : Comportamento das ondas sonoras através de três meios

Fonte: Adaptada de Kinsler & Frey (1967), Reynolds (1981) e Gerges (2000)

As ondas: incidente, transmitidas e refletidas, visualizadas na Figura 1, são representadas pelas Equação 7 a Equação 11.

$$P_{i1} = A_1 e^{i(\omega t - k_1 x)} \quad \text{Equação 7}$$

$$P_{r1} = B_1 e^{i(\omega t + k_1 x)} \quad \text{Equação 8}$$

$$P_{t2} = A_2 e^{i(\omega t - k_2 x)} \quad \text{Equação 9}$$

$$P_{r2} = B_2 e^{i(\omega t + k_2 x)} \quad \text{Equação 10}$$

$$P_{t3} = A_3 e^{i[\omega t - k_3 (x - \square)]} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:  $A_1$  é uma constante real, enquanto  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $B_1$  e  $B_2$  são constantes complexas. Elas representam a amplitude de pressão das ondas.

Utilizam-se duas condições de contorno, ou seja, a continuidade das pressões ( $P$ ) e das velocidades ( $U$ ) das partículas. A pressão e a velocidade permanecem iguais em ambos os lados da superfície, que separa dois meios.



Para a primeira superfície, ou seja, em  $x=0$ , tem-se:

$$P_{i1} + P_{r1} = P_{t2} + P_{r2} \quad \text{Equação 12}$$

$$U_{i1} + U_{r1} = U_{t2} + U_{r2} \quad \text{Equação 13}$$

Para a segunda superfície, em  $x = l$ , obtém-se :

$$P_{t2} + P_{r2} = P_{t3} \quad \text{Equação 14}$$

$$U_{t2} + U_{r2} = U_{t3} \quad \text{Equação 15}$$

Trabalhando-se com esse conjunto de equações, pode-se definir o Coeficiente de Transmissão Sonora,  $\tau_t$ , para a onda que passa do meio I para o II e, posteriormente, para o meio III. Onde:  $\rho$  = densidade;  $l$  = espessura da parede;  $c$  = velocidade do som no meio;  $k = \rho/c =$  número de onda do meio.

$$\tau_t = \frac{4\rho_3 c_3 \rho_1 c_1}{\rho_3^2 c_3^2 \rho_1^2 c_1^2 \cos^2 k_2 l + 2\rho_2 c_2 \rho_3 c_3 \rho_1 c_1 \sin^2 k_2 l + \rho_2^2 c_2^2 \sin^2 k_2 l} \quad \text{Equação 16}$$

Para o caso que orienta a presente demonstração, assim como a maioria dos casos práticos, existe ar em ambos os lados da parede, por isso, tem-se a seguinte relação entre as impedâncias características ( $\rho c$ ):

$$Z_1 = Z_3 \text{ e } Z_2 \gg Z_1 \quad \text{Equação 17}$$

Quando as paredes possuem espessura menor do que o comprimento da onda incidente, é possível considerar:

$$k_2 l \ll 1 \quad \text{Equação 18}$$

e:

$$\frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} \sin k_2 l \approx 2 \cos k_2 l \quad \text{Equação 19}$$

ou:

$$\frac{c_2}{c_1} \sin k_2 x \quad \text{Equação 20}$$

Onde:  $k_2 = \frac{\omega}{c_2}$  é o número de onda do meio II.

A Equação 16, a partir do emprego das simplificações resultantes das Equação 17 a Equação 20, resume-se a Equação 21, onde  $M$  é a densidade de área do meio II.

$$T = \frac{c_1^2}{M^2 f^2} \quad \text{Equação 21}$$

A Perda de Transmissão, anteriormente definida pela Equação 5 é, agora identificada pela Equação 22.

$$PT = 20 \log \frac{c_1}{M f} = 20 \log M f \quad \text{Equação 22}$$

Ao considerar-se que os meios I e III são o ar, verifica-se que a equação anterior depende, apenas, da densidade de área do meio II e da freqüência da onda incidente. Substitui-se, então os valores de  $c_1 = 415$  rayls, atendendo ao especificado por Gerges (2000, p. 656) para o ar a 20°C, em condições normais. Com isso, chega-se a chamada Lei da Massa, identificada por:

$$PT = 42,4 + 20 \log M f \quad \text{Equação 23}$$

A análise da Lei da Massa permite verificar que a Perda de Transmissão (PT) aumenta 6 dB, cada vez que se duplica a massa por unidade de área (M) ou a freqüência (f). Assim, pode-se constatar que as altas freqüências são mais fáceis de serem isoladas e, ainda, que a alta densidade superficial do material é importante para caracterizá-lo como isolante.

É importante observar, no entanto, que a Lei da Massa resulta de simplificações, que não podem ser aplicadas, indiscriminadamente, quando se trabalha com materiais de construção civil. Considerando-se, por exemplo, uma parede com um mínimo de 15 cm de espessura as simplificações efetuadas, a partir da Equação 18, não são verdadeiras para o espectro necessário numa avaliação sonora. Precisa-se, portanto, aplicar a Equação 16, para calcular a Perda de Transmissão identificada na Equação 5.

### 2.2.2 O som, com incidência aleatória, transmitido através de três meios

O modelo idealizado, apresentado até agora, considerou uma onda plana de incidência normal, atuando sobre a parede (meio II) colocada entre os meios I (ar) e III (ar). Na situação corrente, segundo Fahy (1985, p. 157), a distribuição direcional da intensidade incidente raramente é conhecida. Assume-se, por isso, um campo sonoro difuso ideal, onde todos os ângulos de incidência são igualmente prováveis. Estima-se um coeficiente de transmissão médio, para todos os ângulos de incidência (de 0° a 90°), chegando-se à Perda de Transmissão para incidência aleatória.

O valor mais utilizado em medições realizadas em laboratórios, ou mesmo em situações reais, porém, é a chamada Perda de Transmissão de Campo, que considera somente os ângulos de incidência de 0° até 78°.

Reynolds (1981, p. 306) destaca que a perda de transmissão é máxima na incidência normal, aproximando-se de zero para ângulos próximos a 90°. Afirma, ainda, que a perda de transmissão, na prática, nunca é igual a zero, por isso a integração é apenas dos ângulos de incidência até 78°.

A representação matemática da Perda de Transmissão de Campo é dada pela Equação 24, a qual é resultante da diminuição de um valor cinco (5) na Equação 23. Esse valor (5) empregado para corrigir o modelo matemático, possibilitando a utilização da incidência de 0° até 78°, decorre de comprovação experimental.

$$PT_{\text{camp}} = 20 \log M.f \quad 47,4 \quad \text{Equação 24}$$

### 2.2.3 As freqüências de ressonância, coincidência e crítica

#### 2.2.3.1 Freqüência de ressonância mecânica

A freqüência de ressonância mecânica é uma freqüência natural do elemento. Quando a freqüência de excitação for igual ou próxima a ela, a resposta da amplitude de vibração do elemento é máxima. Essa freqüência depende da direção de deslocamento (ou da força de excitação), bem como da distribuição da massa e rigidez do sistema.

Um sistema mais simples, com um grau de liberdade, tem apenas uma freqüência natural e, na prática, apresenta alguma forma de amortecimento. Simplificadamente, ele pode ser representado pelo sistema massa-mola, com a freqüência de ressonância mostrada na Equação 25 onde M é a massa e K, a rigidez da mola.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad \text{Equação 25}$$

Sistemas mais complexos apresentam uma frequência natural fundamental e outras de ordem superior. É possível dizer-se que os sistemas reais possuem um sistema contínuo de distribuição de massas e molas e, portanto, apresentam grande número de modos que podem, inclusive, cobrir toda a banda de frequências.

Craik (1996, p. 68) lembra que modos ocorrem quando a trajetória de uma onda é tal que, depois de percorrer os subsistemas ao redor, ela retorna ao seu ponto de partida, viajando na mesma direção e em fase consigo mesma, ocasionando uma interferência construtiva, aumentando a amplitude.

### 2.2.3.2 Frequência de coincidência

A condição de coincidência ocorre quando o comprimento da onda acústica no meio, projetada na estrutura, é igual ao comprimento da onda de flexão livre dessa estrutura.

A frequência de coincidência, para uma placa homogênea, é dada pela Equação 26, considerando-se que  $M$  é a massa por unidade de área,  $B$  é a rigidez à flexão da placa e  $c$  é a velocidade do som no fluido que circunda o painel. Sabe-se que:

$$B = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (\text{onde: } h = \text{espessura da parede e } E = \text{módulo de Young do material})$$

$$f_{co} = \frac{c^2}{2\pi \sin^2\theta} \sqrt{\frac{M}{B}} \quad \text{Equação 26}$$

Os deslocamentos gerados nos sólidos, por ondas de flexão, são acoplados com os gerados no ar, por ondas acústicas longitudinais. Assim, a propagação ocorre na frequência de coincidência  $f_{co}$  e o isolamento acústico é controlado pelo amortecimento  $\eta$ , portanto tem-se baixo isolamento acústico nessa frequência.

### 2.2.3.3 Frequência crítica

Fahy (1985, p. 152) afirma que, para um dado ângulo de incidência  $\theta$ , há uma única frequência de coincidência e vice-versa. Destaca, entretanto, que desde que  $\sin\theta$  não exceda a unidade, há uma menor frequência limitante para o fenômeno da coincidência, conhecida como frequência crítica, que é dada pela Equação 27.

$$f_c = \frac{c^2}{2} \sqrt{\frac{M}{B}} \quad \text{ou} \quad f_c = \frac{c^2}{2} \sqrt{\frac{M}{B}} \quad \text{Equação 27}$$

Para placas planas, uniformes e homogêneas a frequência crítica é dada pela Equação 28, sendo  $h$  espessura da placa e  $c$  a velocidade da onda longitudinal no sólido.

$$f_c = \frac{c^2}{1,8 \cdot h \cdot c} \quad \text{Equação 28}$$

Méndez *et al* (1994, p. 112) designam a frequência crítica como a menor frequência na qual pode produzir-se o efeito de coincidência, correspondendo a um ângulo de incidência de 90°.

É a frequência a partir da qual a Lei da Massa deixa de ser válida, devido ao início da zona controlada pelo efeito de coincidência.

Em outras palavras, entende-se que uma onda sonora, em determinada frequência, pode incidir sobre a parede em diversos ângulos. Haverá, no entanto, um único ângulo onde a velocidade da onda incidente ( $c$ ) será igual a das ondas de flexão livres da parede ( $c_f$ ). Nesse ângulo, haverá transmissão máxima (logo, PT mínima). Quando este ângulo for 90°, ocorrerá a chamada frequência crítica. A frequência crítica é a primeira (a menor frequência), a partir da qual haverá o efeito de coincidência.

Logo, o efeito da coincidência pode ocorrer para qualquer frequência, maior do que a frequência crítica (para que a razão entre a frequência estudada e a frequência crítica seja maior do que a unidade). Isso pode ser observado na Figura 2, elaborada a partir de Fahy (1985, p. 152).

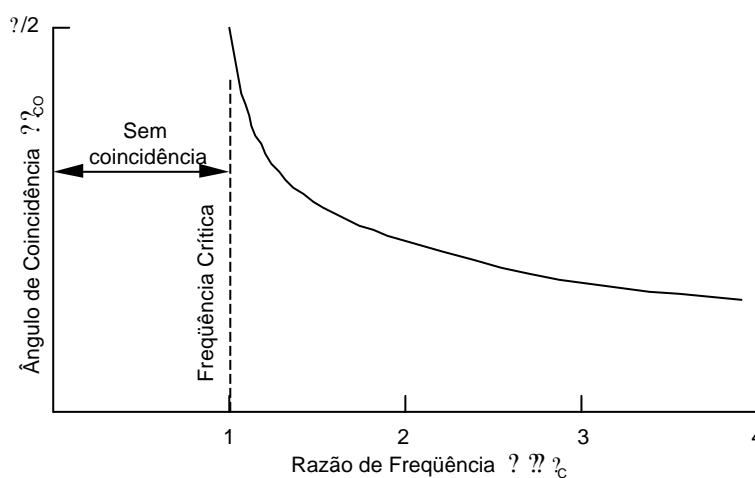


Figura 2 : Relação entre ângulo de coincidência e razão de frequência.

Fonte: Adaptada de Fahy (1985)

A relação entre a frequência crítica e a de coincidência, segundo Fahy (1985, p. 152), é dada pela Equação 29, onde se observa que, para o ângulo de 90°, devido ao valor do seno ser igual a unidade, ambas as frequências são idênticas.

$$f_c = \frac{c}{\sin^2 \theta}$$

Equação 29

Com isso, conclui-se que a frequência crítica é um caso particular da frequência de coincidência, onde o ângulo de incidência (= 90°) é igual ao de coincidência. Assim, só existe frequência crítica quando a incidência for 90°.

Quando o ângulo de incidência for 0°, a relação entre a frequência incidente e a crítica tende ao infinito. Logo o efeito de coincidência estaria muito, muito longe da frequência crítica. Com isso, a Transmissão é mínima e a Perda de Transmissão é máxima.

Quando o ângulo de incidência aproxima-se de 90°, a relação entre a frequência de incidência e a crítica aproxima-se da unidade, assim, o efeito de coincidência refere-se a uma frequência pouco maior do que a crítica.

E, quando a incidência ocorrer no ângulo de coincidência, o painel será praticamente transparente ao som. A frequência de coincidência é aquela onde a Perda de Transmissão é mínima.

#### 2.2.4 A transmissão do som, através de parede oscilante.

O modelo idealizado, demonstrado nas seções 2.2.1 e 2.2.2, refere-se a uma parede rígida, na qual desconsidera-se a parcela da onda sonora irradiada pela vibração da parede.

Para detalhar o estudo de uma parede oscilante, substitui-se o modelo idealizado nas sessões anteriores, por uma placa não-flexível, de massa por unidade de superfície (M), montada sobre uma suspensão elástica, que passa a ser representada por molas e amortecedores, cujos coeficientes de rigidez e de amortecimento por unidade de superfície são, respectivamente, K e C, conforme mostra a Figura 3, elaborada a partir de Fahy (1985, p. 144), Recuero & Gil (1993, p. 295) e Gerges (2000, p. 205).

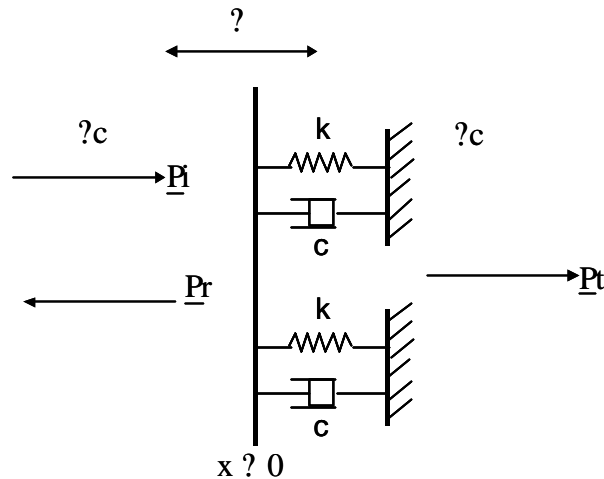


Figura 3 : Transmissão sonora através de parede oscilante

Fonte: Adaptada de Fahy (1985), Recuero & Gil (1993) e Gerges (2000)

O Coeficiente de Transmissão Sonora passa a ser calculado, então, pela Equação 30.

$$T_t = \frac{4\rho^2 c^2}{\rho^2 c^2 + M^2 \omega^2 + K/\omega^2} \quad \text{Equação 30}$$

A Equação 30 pode ser apresentada de forma diferenciada, a partir de considerações especiais, que caracterizam três casos:

Nas baixas frequências, onde  $T_t$  é controlado pela rigidez, sabe-se que  $\omega \ll \sqrt{K/M}$  e que  $K \gg 2\rho c \omega^2 \gg M \omega^4$ . Com isso, o Coeficiente de Transmissão Sonora passa a ser calculado pela Equação 31.

$$T_t = \frac{2\rho c \omega^2}{K} \quad \text{Equação 31}$$

A Perda de Transmissão (PT) pode ser redefinida, para esse caso, com o emprego da Equação 32.

$$PT = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{T_t} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{K}{f} \right) - 74,2 \quad \text{Equação 32}$$

Nas altas frequências, onde  $\omega$  é controlado pela massa, sabe-se que  $\omega \approx \sqrt{K/M}$  e que  $T \approx 2c/M$ .

Assim, passa a ser válida a chamada Lei da Massa, anteriormente identificada pela Equação 23, para o cálculo da Perda de Transmissão. Observa-se, com isso, que a transmissão através de três meios pode ser considerada um caso especial do estudo da parede oscilante.

O Coeficiente de Transmissão Sonora é obtido da Equação 33.

$$T_t = \frac{2c}{M} \quad \text{Equação 33}$$

Nas frequências de ressonância, onde  $\omega$  é controlado pelo amortecimento, a onda sonora passa pela parede como se ela não existisse.

Sabe-se que  $\omega \approx \omega_0 = \sqrt{K/M}$  e, ainda, que:

$$T_t = \frac{2c}{C} \quad \text{para } C \approx 2c \quad (\text{controlada pelo amortecimento})$$

$T_t \approx 1$  para  $C \approx 2c$  (transmissão completa de energia sonora)

Assim, o Coeficiente de Transmissão Sonora, para esse caso, é dado pela Equação 34.

$$T_t = \frac{1}{\frac{C}{2c}} \quad \text{Equação 34}$$

O cálculo das frequências de ressonância de uma parede simplesmente apoiada, segundo diversos autores como por exemplo: Szilard (1974, p. 415) e Beranek (1980, p. 286), é executado através da Equação 35 (ou suas variantes).

As dimensões da parede são **a**, **b** e **h** (largura, altura e espessura, respectivamente), enquanto **m** e **n** são números inteiros (0,1,2,...).

$$f_{m,n} = \frac{m}{2a} \frac{m^2}{b^2} * \sqrt{B} \quad \text{Equação 35}$$



Considera-se a rigidez da placa como:  $B = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ , onde  $E$ =Módulo de Elasticidade do material;  $\rho_m$  = densidade do material ( $\text{Kg/m}^3$ ) e  $\nu$  = Coeficiente de Poisson.

Para o caso de outros sistemas, as frequências de ressonância são obtidas com o emprego da Teoria de Vibrações Mecânicas, Elementos Finitos ou medidas em campo.

### 2.2.5 A transmissão do som, através de parede vibrante

A parede de separação de dois recintos, sob a ação de uma onda sonora, pode ser levada a um estado vibratório. Segundo Recuero & Gil (1993, p.295) tais vibrações, apesar de possuírem amplitudes muito pequenas, se transmitem ao recinto receptor, podendo ser facilmente ouvidas.

O isolamento acústico diminui devido à vibração da parede ocasionada pelo campo sonoro, principalmente quando existe uma similaridade (ou proximidade) dos valores das velocidades do som no ar e das ondas livres de flexão na parede. Uma queda brusca da Perda de Transmissão ocorre na chamada condição de coincidência.

Lembrando-se que a Perda de Transmissão pode ser definida a partir do Coeficiente de Transmissão Sonora, conforme mostrado na Equação 5, e sabendo-se que  $A_1$  e  $A_2$  são as amplitudes das pressões acústicas incidente e transmitida, respectivamente, pode-se chegar a Equação 36, a partir do conhecimento de que:  $\tau = \left| \frac{A_2}{A_1} \right|^2$ . Assim:

$$PT = 20 \log \left| \frac{A_1}{A_2} \right| \quad \text{Equação 36}$$

A condição de coincidência ocorre com a igualdade de dois termos da relação entre as amplitudes  $A_1$  e  $A_2$ , mostrada na Equação 37, ou seja:  $M = \frac{B}{\rho c^3} k^4 \sin^4 \theta$ .

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{2 \rho c \sec \theta}{\rho c^3 \sec \theta + \frac{B}{\rho} k^4 \sin^4 \theta + i \rho c^3 M \frac{B}{\rho} k^4 \sin^4 \theta} \quad \text{Equação 37}$$

Conhecendo-se a chamada condição de coincidência, é possível considerar-se três casos especiais:

- a) Quando a frequência em observação é maior do que a frequência de ressonância e muito menor do que a frequência de coincidência, a rigidez e os amortecimentos mecânico e acústico podem ser ignorados. Se:  $f_{res} \ll f \ll f_{coin}$

$$PT \approx 20 \log f M \cos \theta \approx 42,4$$

Equação 38

Observa-se que para  $\theta = 0^\circ$  (incidência normal) a Perda de Transmissão é máxima e a Equação 38 descreve a Lei da Massa, mostrada pela Equação 23.

- b) Quando a frequência em observação é igual a frequência crítica, ou seja, existe uma coincidência entre o comprimento da onda incidente ( $\theta = 90^\circ$ ) e o comprimento da onda de flexão livre da parede, o isolamento acústico é controlado pelo amortecimento  $\eta$ . Gerges (2000, p. 215) destaca que a Perda de Transmissão, na coincidência, é aproximadamente  $20 \log \eta$  menor do que a calculada pela Lei da Massa. Cita, ainda, que para valores de  $\eta$  da ordem de  $10^{-2}$  e  $10^{-3}$  a diferença pode ser de 40 a 60 dB.

A Equação 39 aponta a Perda de Transmissão na coincidência.

$$PT \approx 10 \log \left( \frac{M \eta}{2 \rho c \sec \theta} \right)^2$$

Equação 39

- c) Nas frequências maiores do que a frequência de coincidência, o isolamento sonoro é controlado pela rigidez, resultando um aumento da Perda de Transmissão (calculada pela Equação 40) da ordem de 10 a 18 dB por oitava (dependendo do tamanho do painel, seus contornos e seu amortecimento interno).

$$PT \approx 10 \log \left( \frac{B k^4 \sin^4 \theta \cos \theta}{2 \rho c} \right)^2$$

Equação 40

Ao buscar-se o isolamento de uma parede simples vibrante, deve-se ter especial atenção a banda de frequências de interesse. Gerges (2000, p. 216), destaca as cinco bandas de frequências, citadas a seguir.

Abaixo da frequência de ressonância mecânica da parede, a Perda de Transmissão aumenta 6 dB a cada duplicação da rigidez e diminui 6 dB a cada duplicação da frequência, sendo dada pela Equação 32.

Na frequência de ressonância mecânica da parede, a Perda de Transmissão depende da razão de amortecimento do sistema ( $C$ ), sendo dada pela Equação 41. Geralmente, a transmissão da energia sonora, de um lado para outro da parede, é total, pois  $C \ll 2c$ , fazendo com que  $PT \approx 0$ .

$$PT \approx 20 \log_{10} \left( \frac{C}{2c} \right) \quad \text{Equação 41}$$

Acima da frequência de ressonância mecânica e abaixo da frequência crítica,  $PT$  é controlada pela densidade de área, utilizando-se a Equação 24, isto é, a Perda de Transmissão de Campo.

Acima da frequência de coincidência a Perda de Transmissão é controlada pela rigidez e calculada pela Equação 40. O aumento de  $PT$  depende do tamanho do painel, dos seus contornos e do seu amortecimento interno, podendo chegar a 10 ou 18 dB por oitava.

Na frequência de coincidência, o modelamento matemático é dificultado pela complexidade do mecanismo de transmissão, empregando-se, por isso, o chamado Método do Patamar (Plateau Method) para a determinação da Perda de Transmissão, descrito por Reynolds (1981, p. 311), Beranek (1988, p. 305) e Gerges (2000, p. 217).

A Figura 4 mostra uma curva típica de Perda de Transmissão para paredes simples.

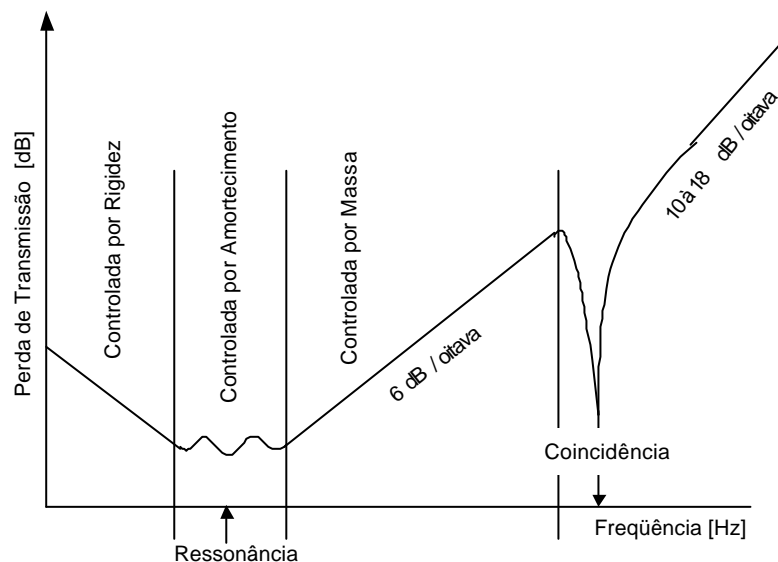


Figura 4 : Perda de Transmissão em paredes simples

Fonte: Adaptada de Méndez (1994) e Gerges (2000)

### 2.2.6 A transmissão do som, em paredes compostas, com aberturas ou com frestas

Uma parede composta é constituída de distintos materiais, os quais podem apresentar características, áreas e espessuras diferenciadas, resultando num índice de isolamento específico para o conjunto.

A Perda de Transmissão Total, obtida a partir da Equação 5, passa a ter a forma apresentada na Equação 42, onde  $\alpha$  e  $S$  são, respectivamente, o coeficiente de transmissão e a área de cada material constituinte da parede.

$$\overline{PT} = 10 \log \frac{1}{\alpha_t} = 10 \log \frac{\sum \alpha_i S_i}{\sum S_i} \quad \text{Equação 42}$$

A presença de aberturas (mesmo pequenas frestas) e /ou elementos de baixa perda de transmissão ocasionam um significativo decréscimo na capacidade de isolamento do conjunto. Quando o som passa, integralmente, para o outro lado (ex: janela aberta), emprega-se  $\alpha = 1$ .

Recuero & Gil (1993, p. 312) expõem o cálculo do Índice de Isolamento Sonoro, realizado em função da espessura da parede e do diâmetro da abertura, que originam as Curvas de Isolamento Sonoro, mostradas para as freqüências de 200 Hz, 1000 Hz e 4000 Hz. Resumem suas conclusões enfatizando que, para aberturas pequenas, o isolamento sonoro diminui à medida que aumenta o diâmetro da abertura e a freqüência da onda incidente. À medida que aumenta o tamanho da abertura, maiores devem ser os cuidados com a diminuição da freqüência. Logo, do ponto de vista do isolamento sonoro, os autores recomendam que é melhor ter várias aberturas pequenas do que uma grande, se ambas apresentam a mesma área.

Méndez et al (1994, p.122) ressaltam duas conclusões práticas:

- É inútil construir uma parede muito isolante se ela contém aberturas de isolamento reduzido;
- Em paredes compostas devem-se utilizar elementos que tenham isolamentos similares, sobretudo quando suas áreas superficiais sejam aproximadamente iguais.

### 2.2.7 Transmissão ressonante e não-ressonante

Em outra análise interessante, Craik (1996, p. 04) afirma que num modelo de duas salas separadas por uma parede existem dois mecanismos de transmissão sonora entre elas, ou seja, transmissão ressonante e não-ressonante. A flutuação da pressão na sala 1 causa a vibração da divisória, a qual origina uma pressão no outro lado da parede. Essa vibração da parede pode ocorrer de duas maneiras: por ondas de flexão livres e por ondas de flexão forçadas. As ondas de flexão livres interagem causando ressonâncias, cuja amplitude depende do amortecimento da parede. Dessa forma, a parede irradia som para a sala 2. Assim caracteriza-se a chamada transmissão ressonante, que é considerada o mecanismo dominante de transmissão, acima da frequência crítica de coincidência.

Craik (1996, p. 04) destaca, ainda, que a flutuação da pressão pode ocasionar o movimento da parede, de tal maneira que as ondas de flexão viajando livremente não são geradas e, conseqüentemente, não ocorrem ressonâncias, fazendo com que o nível de vibração da parede seja muito pequeno, podendo ser ignorado. A amplitude de vibração, nesse caso, não é determinada pelo amortecimento da parede. São as chamadas transmissões não-ressonantes ou forçadas, as quais adquirem importância apenas abaixo da coincidência, onde a irradiação da parede é pequena e a massa é a propriedade mais destacada, validando a conhecida Lei da Massa.

Fahy (1985, p.161) afirma que, na ressonância, não é adequado trabalhar-se com um modelo baseado na transmissão pelo mecanismo de excitação e radiação de modos. Além disso, cita que um aumento no amortecimento total da partição não altera significativamente os índices de redução sonora nas frequências abaixo da crítica, evidenciando a dominância de um mecanismo de transmissão não-ressonante. Por isso, verifica-se que uma forma de resposta e radiação, que não é sensível a ação dos mecanismos de amortecimento, é a responsável pela maior parte do processo de transmissão sonora nesses casos.

Duas formas qualitativas para explanação desse comportamento, onde existe a dominância de mecanismos de transmissão não-ressonante em frequências subcríticas, são apontadas por Fahy (1985, p.162). A primeira considera que a resposta de uma placa finita uniforme, a um campo de força aplicada, deve ser a soma da resposta desse campo (aplicado a uma placa infinita com as mesmas propriedades dinâmicas) somada com a resposta de uma placa infinita sob a ação de um campo na fronteira, ou seja, com ondas de reflexão na fronteira ou limite da placa finita. A segunda está baseada no fato de que a eficiência de radiação de um dado modo (que tem uma frequência natural de radiação subcrítica) aumenta com a frequência de vibração modal, demonstrando que a maior

contribuição de um modo para a transmissão de energia sonora ocorre nas frequências distantes e acima da sua frequência de ressonância, onde a sua resposta e a transmissão resultante são controladas pela massa.

Crocker & Price (1969, p. 469) salientam que os modos ressonantes de um painel podem ser divididos em duas classes: modos acusticamente rápidos (acoustically fast – AF) e acusticamente lentos (acoustically slow – AS). Os acusticamente rápidos (AF) apresentam frequência de ressonância acima da frequência crítica ou de coincidência, possuindo velocidades de flexão maiores que a velocidade do som no ar e uma alta eficiência de radiação. Nos acusticamente lentos (AS), que são os modos que estão abaixo da frequência crítica, a velocidade de flexão é menor que a velocidade do som no ar e a eficiência de radiação é baixa. Destacam, também, que os acusticamente lentos (AS) podem ser subdivididos em modos de “*borda /extremidade*” ou “*faixa*” (“*edge*” or “*strip*” modes) e modos de “*canto*” ou “*pistão*” (“corner” or “piston” modes), conforme a região responsável pela irradiação de energia.

Existe, ainda, o modo de “*superfície*”, que ocorre acima da frequência de coincidência, quando a irradiação acontece a partir de toda a placa.

### 2.2.8 Considerações Gerais

Méndez *et al.* (1994, p. 113) salientam alguns fatores influentes no isolamento sonoro de uma parede. O primeiro é a porosidade. Uma parede pode apresentar um baixo isolamento, devido a sua alta porosidade, embora possua bom desempenho em termos de massa e rigidez. Outra questão enfatizada é que os fenômenos da ressonância acontecem em frequências que dependem das dimensões da parede. Os autores complementam destacando alguns itens, que devem ser avaliados em cada situação particular, pois influem no nível sonoro percebido num compartimento, em decorrência de um ruído produzido numa sala vizinha. São eles: nível sonoro no local da emissão; distribuição espectral do ruído; índice de redução sonora (R) da parede divisória; superfície da parede divisória; absorção total do local receptor e, por último, a natureza das paredes adjacentes, devido às transmissões que ocorrem pelos flancos.

A frequência crítica é inversamente proporcional a espessura para uma parede homogênea, conforme enfatizam Mendéz *et al.* (1994, p. 112). Os autores expõem as frequências críticas (em Hertz) para paredes homogêneas, executadas com um centímetro de espessura, com materiais como concreto armado (1800 Hz), tijolos maciços (2500 a 5000 Hz), blocos de cimento (2700 Hz), madeira de pinho (6000 a 18000 Hz), vidro (1200 Hz) e

gesso (4000 Hz), entre outros. A partir desses valores, pode-se verificar que para situações usuais, como uma laje de concreto armado de 10 cm de espessura, a frequência crítica é 180 Hz. Observando-se uma parede de tijolo maciço de 10,6 cm de espessura, obtém-se uma faixa de frequências aproximada de 265 a 530 Hz. Aumentando-se a espessura da parede para 22 cm, a faixa altera-se para valores próximos dos 100 a 200Hz.

Recuero & Gil (1993, p. 314) também analisam a transmissão de ruído aéreo através de paredes porosas, exemplificando a alvenaria e, fundamentando, matematicamente, a importância de empregar revestimento.

O isolamento sonoro de uma parede, portanto, depende de diversos fatores inerentes ao material e ao processo construtivo. Essa complexidade expressa a relevância de estudos contextualizados e bem fundamentados.

### 3.1 CONSIDERAÇÕES HISTÓRICAS E ATUALIDADES

A abordagem SEA (Statistical Energy Analysis), conhecida no Brasil como Análise Estatística de Energia, é utilizada em acústica e vibrações para a solução de problemas que apresentem várias fontes e trajetórias de ruído, como transmissões por vias aéreas, estruturais e/ou aquáticas.

Lyon & DeJong (1995, p. 03) afirmam que a denominação SEA surgiu no início dos anos sessenta, designando um ramo de estudos de sistemas dinâmicos. Assinalam que essa terminologia pode ser explicada considerando-se cada palavra independentemente:

- ? *Statistical* é empregada para dar ênfase ao fato dos sistemas em estudo serem retirados, aleatoriamente, de populações com desenhos construtivos similares, cuja distribuição de parâmetros dinâmicos seja conhecida. Craik (1996, p. xvii), justifica essa denominação, salientando que esse tipo de análise não se preocupa com o conhecimento exato de um sistema específico, mas com uma população de estruturas nominalmente idênticas que, na prática, têm pequenas diferenças.
- ? *Energy* identifica a variável primária de avaliação, a partir da qual é possível encontrar-se outras variáveis dinâmicas (como deformação, pressão, etc.) e trabalhar-se com sistemas estruturais ou acústicos.
- ? *Analysis* significa que SEA é uma estrutura de estudo, mais do que uma técnica particular ou método específico de cálculo, a qual possibilita examinar, sob diversas óticas, um mesmo modelo do sistema.

Historicamente, segundo Gerges (2000, p. 447), SEA teve sua teoria fundamental estabelecida na década de sessenta, devido às necessidades advindas da predição da resposta vibro-acústica de grandes estruturas marítimas (navios e submarinos) e aeroespaciais (foguetes e mísseis).



Lyon & DeJong (1995, p. 06) salientam que os primeiros trabalhos no desenvolvimento de SEA são os cálculos realizados, em 1959, de forma independente, por P.W. Smith Jr e R.H. Lyon. Posteriormente, em 1960, os pesquisadores pioneiros, passaram a trabalhar conjuntamente. A primeira publicação sobre esse enfoque, embora não tenha usado a denominação SEA, aconteceu em 1962, sendo assinada por R. H. Lyon e G. Maidanik.

Gerges (2000, p. 447) ressalta que a compilação dos estudos, que propiciam as bases para SEA, é apresentada no livro "*Theory and Application of Statistical Energy Analysis*" de Lyon & DeJong (1995), considerada, atualmente, a principal referência teórica sobre o tema. Destaca, ainda, que nos anos setenta e oitenta as pesquisas acadêmicas identificaram um maior número de aplicações para SEA, enquanto que o crescimento no uso de computadores, nos anos noventa, facilitou a ampliação de seu emprego.

A importância do uso dessa metodologia, em edificações, é enfatizada porque ela pode ser empregada para diferentes espectros de médias e altas frequências, atendendo a maioria das aplicações em engenharia, que correspondem a faixa de 100 Hz a 8 KHz.

As possibilidades de análises decorrentes desse tipo de estudo, como as destacadas por Crocker & Price (1969, p. 469), comprovam a sua importância para a construção civil. Eles chamam a atenção de que os problemas de transmissão sonora arquitetural, em geral, têm sido abordados, teoricamente, com a chamada "*Lei da Massa*". Mostram que, freqüentemente, as teorias negligenciam elasticidade e rigidez na partição (a qual é assumida para ter extensão infinita e para responder como membrana flexível). Enfatizam que a abordagem através de SEA prediz a amplitude de vibração do painel e o decaimento na curva de perda de transmissão para a frequência de coincidência, incluindo painéis rígidos e elásticos e os efeitos do tamanho finito do painel.

Os modelos de SEA, conforme destaca Gerges (2000, p. 443), possibilitam "*predizer níveis de resposta médios, analisar a contribuição de trajetórias de transmissão de ruído e estudar o efeito de mudanças no projeto inicial a partir dos níveis de resposta médios*".

Arenas (1997, p. 97), afirma: "*El método SEA tiene una infinidad de aplicaciones y permite incluso estimar las pérdidas por transmisiones flanking y conexión de estructuras complejas con densidades modales definidas*".<sup>3</sup>

Lyon & DeJong (1995, p. 13) enfatizam que SEA não se constitui em uma alternativa a outras abordagens, mas num sistema de análise dinâmica integrada.

---

<sup>3</sup> O método SEA tem uma infinidade de aplicações e permite inclusive estimar as perdas de transmissão por flancos e conexões de estruturas complexas com densidades modais definidas.

Os trabalhos direcionados à aplicação de SEA, especificamente nas edificações, são ainda poucos. Por isso, são comentados, a seguir, alguns estudos voltados a temas que têm influência nessa área, embora façam referência a questões bem específicas e, algumas vezes, distantes da construção civil.

No final da década de sessenta, Crocker & Price publicaram artigos, enfocando a aplicação de SEA no estudo da transmissão sonora. No texto editado em 1969, sob o título Transmissão sonora usando Análise Estatística de Energia, os autores comparam a perda de transmissão de um painel obtida experimentalmente e calculada teoricamente. No experimento, determinam a resistência à radiação, a resistência total, o fator de acoplamento, a densidade modal, a perda de transmissão e a resposta de vibração de um painel de alumínio. Nos cálculos teóricos, fundamentam-se em outros pesquisadores, como Maidanik, onde buscam coeficientes a serem utilizados. A conclusão foi satisfatória para a previsão da amplitude de vibração da partição, demonstrando a previsível discrepância, entre a resposta experimental da partição e os cálculos efetuados pela Lei da Massa. Os dois autores, continuando seus estudos nessa área, publicaram no ano seguinte, um artigo trabalhando com paredes duplas.

Na década de oitenta, merece destaque o trabalho publicado por Maidanik (1981) sobre a Extensão e reformulação da Análise Estatística de Energia com o uso de conceitos de acústica de salas. Outros subsídios importantes são os artigos assinados por Craik, sob a denominação de Medidas das Propriedades dos Materiais de Estruturas de Edificações (1982a) e A Predição de Transmissão Sonora através de Edificações usando a Análise Estatística de Energia (1982b). Continuando sua linha de estudos, na década seguinte, esse autor publicou o livro que se constitui, atualmente, na principal referência sobre esse tema (Craik, 1996).

Em 1990, na Escócia, J. A. Steel defendeu Tese de Doutorado sobre a transmissão de vibração estrutural em edificações estruturadas, usando a Análise Estatística de Energia. Em 1994, publicou um artigo com os resultados de um estudo sobre a transmissão sonora em placas colocadas entre colunas (ou pilares), fazendo referência a uma situação de ocorrência comum em corredores e salas de prédios estruturados. Concluiu que a presença de colunas (ou pilares) aumenta a perda de transmissão em altas frequências.

A utilização de SEA para prever a transmissão sonora através da estrutura em edificações foi estudada por Craik & Thancanamootoo (1990). Os autores defendem que essa ferramenta de cálculo é a mais adequada para esse fim, pois inclusive possibilita a predição em salas distantes do local onde está colocada a fonte sonora.

Bremner (1994) afirma que a tendência é de crescimento no número de estruturas reais onde os métodos correntes podem ser aplicados com precisão, juntamente com as ferramentas de SEA.

A transmissão sonora através de uma parede dupla de alvenaria, em cuja cavidade existe a ligação através de fios metálicos (pontes acústicas), é abordada por Craik & Wilson (1995), demonstrando um modelo teórico SEA com resultados em concordância com valores medidos.

Os efeitos de mudanças de projeto na transmissão sonora através das edificações são destacados por Craik (1997). A partir de um modelo de SEA o autor avalia as respostas às mudanças de propriedades do material (densidade, Módulo de Young, Razão de Poisson e Fator de Perda Interna) e alterações de dimensões (tamanho da sala e espessura de paredes e pisos). Conclui que as mudanças na espessura e densidade das paredes e pisos têm um efeito maior na transmissão sonora do que as alterações no Módulo de Young e Razão de Poisson. E, ainda, que o amortecimento pode ter um efeito significativo na transmissão, particularmente, distante da fonte.

Cimerman, Bharj & Borello (1997) defendem a realização da análise analítica conjuntamente com outra, onde os parâmetros são resultantes de testes experimentais, constituindo-se num método híbrido de utilização de SEA. No texto, os autores discutem as diferenças encontradas e a validade desse tipo de estudo para a indústria automobilística. Anteriormente, Cimerman & Bharj (1996) já haviam comparado em detalhe os dois métodos e verificado a possibilidade de reuni-los.

Langley & Bremner (1999) utilizaram SEA num método híbrido para aplicação na análise de vibrações de sistemas acústico-estruturais complexos.

Kandaswamy & Ramachandraiah (2001, p. 2325) afirmam que existe uma boa concordância entre o comportamento teórico e o experimental de uma parede de alvenaria de blocos furados de concreto, ao empregar-se SEA, para avaliar o Índice de Redução Sonora. Complementam, ainda, dizendo que o amortecimento é notadamente melhorado pelo aumento de camadas de reboco.

Liingaard & Kirkegaard (2001, p. 2551) ressaltam a importância da utilização combinada de métodos de avaliação para a transmissão sonora em estruturas, quando se pretende obter uma resposta mais exata. Eles analisaram a importância da trajetória de transmissão de vibração no plano, aplicando modelamento pelo Método de Elementos Finitos (FEM) e por SEA.

Assim, verifica-se que os estudos sobre o emprego de SEA em edificações são, ainda, incipientes, apresentando uma tendência de desenvolvimento para os próximos anos. Em outras áreas (como aeroespacial, automobilística, aeronáutica etc.), no entanto, a aplicação de SEA já está consolidada.

### 3.2 PARÂMETROS UTILIZADOS EM SEA

SEA utiliza alguns parâmetros conhecidos da acústica clássica, mas apresenta outros completamente novos, por isso definidos a seguir, segundo Craik (1996, p. 17).

- ? *Sistema* – é a parte do sistema físico que está sendo modelada;
- ? *Subsistema* – é um grupo de modos com as mesmas propriedades e energia modal similar. Está, geralmente, relacionado a um elemento físico, como por exemplo: uma sala ou uma parede;
- ? *Energia* – é o parâmetro que descreve a resposta dinâmica e está relacionado às medidas mais comuns de pressão e velocidade. O fluxo de potência através do sistema é descrito pelo Fator de Perda;
- ? *Fator de Perda* – é a fração da energia perdida por ciclo radiano, sendo calculado pela Equação 43, que relaciona potência ( $P$ ), energia ( $E$ ) e frequência ( $f$ ). Pode assumir diversas denominações, sendo identificado pelo mecanismo de perda. Exemplificando: a energia perdida devido ao calor é um Fator de Perda Interna, representado por  $\eta_{id}$  para o subsistema  $i$ ; perdas devidas ao acoplamento de um subsistema ao outro constituem o Fator de Perda por Acoplamento, simbolizado por  $\eta_{ij}$  para acoplamento dos sistemas  $i$  e  $j$ ; e, finalmente, o Fator de Perda Total,  $\eta_i$ , é a soma de todas as perdas de um subsistema.

$$\eta = \frac{P}{E * f} \quad \text{Equação 43}$$

### 3.3 SÍNTESE DO MÉTODO SEA

Ao trabalhar-se com Análise Estatística de Energia, cria-se um sistema, dividindo-o em subsistemas, visando o estudo do balanço de energias. Cada subsistema permite caracterizar a energia modal local média, para esta parte de um sistema global mais complexo.

Avalia-se o fluxo de potência entre dois subsistemas e a potência dissipada em cada subsistema. O fluxo de potência é proporcional aos fatores de perda por acoplamento e à diferença de energia modal média. A potência dissipada é proporcional ao nível de energia de um subsistema e ao fator de perda por amortecimento.

Segundo Craik (1996, p. 05), o fluxo de potência entre os dois subsistemas depende da quantidade de energia presente em cada um deles e da parcela que é transmitida. Isso, por sua vez, depende de como os subsistemas estão conectados fisicamente.

Para julgar se a abordagem SEA é uma ferramenta vantajosa na descrição de uma transmissão sonora específica, Jagt & Martin (1999, p. 841) reafirmam que "(...) *the modal characteristics have been checked*".<sup>4</sup>

A potência de entrada pode ser decorrente de fontes sonoras e estruturais, ou da excitação por fronteiras turbulentas, entre outros fatores. O nível de energia é a variável a ser determinada.

Gerges (2000, p. 444) destaca que a obtenção de todas as definições e formulações de energia, densidade modal e formas diferentes de fluxos de potência (como entrada, dissipação e transmissão) é feita a partir de valores médios no espaço e na frequência. Complementa, afirmando que se utiliza a média dos valores no espaço e na frequência para definir-se parâmetros como: espessura, rigidez à flexão e fatores de perda por amortecimento.

Craik (1996, p.17) enfatiza que SEA não dá a solução exata para um problema particular, mas a média para um conjunto de sistemas similares, pois sua resposta é uma média de uma população estatística.

### 3.3.1 Hipóteses Básicas de SEA

Para a perfeita utilização do método, algumas considerações são necessárias. Segundo Gerges (2000, p. 448) as hipóteses básicas de SEA podem ser, resumidamente, descritas como:

- ? os subsistemas são fracamente acoplados, com acoplamento linear e conservativo;
- ? os modos ressonantes contidos na banda de frequência de análise retêm a mesma quantidade de energia;
- ? a energia modal média é a divisão da energia total na banda pelo número de modos;
- ? o fator de perda por amortecimento médio na banda é igual para todos os modos dentro de um subsistema para uma dada banda de frequência;
- ? o fluxo de potência entre subsistemas é devido, principalmente, aos modos ressonantes na banda de frequência e proporcional aos níveis de energia;
- ? as fontes de excitação são forças ou pressões aleatórias de banda larga descorrelacionadas;

---

<sup>4</sup> (...) as características modais têm que ser checadas.

- ? a reciprocidade vibro-acústica entre subsistemas é considerada válida;
- ? o número de modos em uma banda de frequência é estatisticamente alto, de forma que à medida que o número de modos decresce, a variância da resposta média aumenta.

A exigência de fraco acoplamento entre os subsistemas é considerada uma das fragilidades de SEA, pois seu desempenho não é apropriado sob forte acoplamento. Smith (1979, p. 697) conceitua forte acoplamento como a situação onde  $\eta_{21} \gg \eta_{2d}$ , ou seja, o Fator de Perda por Acoplamento é maior do que o Fator de Perda Interna. Felizmente, segundo Craik (1996, p. 24), raramente existe forte acoplamento nas estruturas de edificações (e na maioria de outras estruturas também). Em geral, uma parede (ou piso) está ligada a 10 outras paredes (ou pisos) resultando um Fator de Perda Total 10 vezes maior do que o Fator de Perda por Acoplamento e, conseqüentemente, um fraco acoplamento.

A validade das suposições de que, para a maioria dos casos práticos, existe igualdade de energia dos modos de vibração (em especial quando o campo é difuso) e que as ondas nos dois sistemas não estão correlacionadas, é reforçada por outros autores. Arenas (1997, p. 90), por exemplo, afirma:

*(...) si el sistema 1 entrega energía al sistema 2, parte de la energía se devuelve al sistema 1. Sí existiese correlación, el efecto de la energía devuelta al sistema 1, podría afectar el campo incidente. Ya que siempre trabajamos con ondas aleatorias, se asume que no existirá correlación alguna*<sup>5</sup>

### 3.3.2 Os subsistemas

Cada subsistema representa um grupo de modos similares de um elemento estrutural ou cavidade acústica, sendo identificado pela sua densidade modal e nível de energia.

Define-se a energia de um subsistema, através da média quadrada espacial da velocidade ou pressão média quadrática, integradas na banda de frequência.

A energia para subsistemas estruturais é dada pela Equação 44, onde  $m$  é a massa e  $v$  é a velocidade RMS.

$$E = m \langle v^2 \rangle \quad \text{Equação 44}$$

<sup>5</sup> Se o sistema 1 entrega energia ao sistema 2, parte da energia retorna ao sistema 1. Se existisse correlação, o efeito da energia devolvida ao sistema 1 poderia afetar o campo incidente. Já que sempre trabalhamos com ondas aleatórias, se assume que não existirá correlação alguma.

Para os subsistemas acústicos, determina-se a energia, empregando-se a Equação 45, onde  $V$  é o volume e  $p$  é a pressão sonora em RMS.

$$E = \frac{V}{c^2} \langle p^2 \rangle \quad \text{Equação 45}$$

Quando a energia é determinada experimentalmente, obtém-se uma amostragem espacial da resposta média quadrática, podendo-se utilizar poucos pontos (>3) selecionados no elemento estrutural ou na cavidade acústica.

Cada componente físico (parede ou viga) pode ser modelado como um subsistema único, porque, usualmente, para modelos SEA relativamente pequenos, é suficiente considerar somente ondas de flexão. Craik (1996, p. 21) enfatiza que na maioria das estruturas de edificações as ondas de flexão são as mais importantes. Elas têm movimento normal à superfície e, em consequência, se acoplam ao som carregado pelo ar. Assim, outros tipos de ondas precisariam ser considerados somente no caso de trajetórias maiores.

### 3.3.3 Balanço de Energia

O equilíbrio energético, necessário à utilização de SEA, baseia-se no fato de que toda a energia que entra em um subsistema deve ser igual a que sai, seja por dissipação e/ou transmissão. Exemplificando, ao trabalhar-se com apenas dois subsistemas, segundo Crocker & Price (1969, p. 471), o balanço energético é dado por:

$$I_{in_1} = I_{diss_1} + I_{12} \quad \text{Equação 46}$$

$$I_{in_1} = E_1 N_1 \left( \frac{E_1}{N_1} + \frac{E_2}{N_2} \right) \quad \text{Equação 47}$$

$$I_{in_2} = I_{diss_2} + I_{12} \quad \text{Equação 48}$$

$$I_{in_2} = E_2 N_2 \left( \frac{E_1}{N_1} + \frac{E_2}{N_2} \right) \quad \text{Equação 49}$$

Considera-se que:  $I_{in_1}$  e  $I_{in_2}$  são o fluxo de energia incidente nos sistemas 1 e 2, enquanto  $I_{diss_1}$  e  $I_{diss_2}$  representam o fluxo de energia dissipado nos sistemas. A

energia total dos sistemas 1 e 2 é, respectivamente,  $E_1$  e  $E_2$ . O número de modos é  $N_1$  e  $N_2$ . Os coeficientes de perda por amortecimento são  $\eta_1$  e  $\eta_2$ , enquanto  $\eta_{12}$  é o coeficiente de perda por acoplamento.

Define-se energia modal, como a energia total no sistema em determinada banda de frequência dividida pela densidade modal. Exemplificando para dois subsistemas, se a energia é igual e a densidade modal diferente, acontecerá um fluxo de energia maior do subsistema que possui menor densidade modal para o outro. O fluxo líquido pode ser calculado pela Equação 50.

$$\eta_{12} \cdot \eta_2 \cdot \eta_{12} \cdot N_1(\omega) [E_{m1} - E_{m2}] \quad \text{Equação 50}$$

Beranek (1988, p. 299), salienta que essa equação é positiva se o primeiro termo do colchete for maior do que o segundo. Em continuação, estabelece o chamado “Princípio de SEA” onde destaca que, para dois subsistemas acoplados, o fluxo de potência líquido é proporcional a diferença entre as energias modais dos dois sistemas na mesma frequência, para uma banda estreita centrada numa frequência  $\omega$ . Complementa, afirmando que o fluxo acontece do subsistema com maior energia modal para o que apresenta menor energia modal.

Aplicando-se, repetidamente, esse raciocínio do balanço energético para todos os subsistemas, resolve-se um sistema complexo geral, através de um sistema linear de equações colocadas em forma matricial.

### 3.3.4 As perdas

O amortecimento estrutural, a absorção acústica, a fricção das juntas, entre outras formas de amortecimento, são responsáveis pela dissipação da potência de entrada de um subsistema, a qual é definida pela Equação 51, onde  $\eta_1$  é o fator de perda por amortecimento (ou interna) e  $\eta_1 E_1$  representa a potência média armazenada no subsistema.

$$\eta_1 \cdot \eta_1 \cdot \eta_1 \cdot E_1 \quad \text{Equação 51}$$

A fração de energia perdida pelo subsistema como calor ou a parcela transmitida para outras partes da estrutura, que não estão incluídas no modelo, são apontadas por Craik (1996, p. 07) como constituintes do Fator de Perda Interna.



Através da técnica da banda de meia potência, do tempo de reverberação T60 ou de métodos de potência injetada, pode-se medir o fator de perda por amortecimento, segundo Gerges (2000, p. 449).

Outro dado importante a ser considerado é o Fator de Perda por Acoplamento – CLF - ( $\alpha_{12}$  ou  $\alpha_{21}$ ), definido como a razão entre a potência transmitida e a potência armazenada no subsistema de maior energia. Craik (1996, p. 06) destaca que a energia transmitida depende da fração que se desloca de um subsistema para outro em um ciclo radiano, salientando que se observa o mesmo princípio do fator de perda usado em sistemas mecânicos.

$$\alpha_{12} = \frac{P_{12}}{E_1} \quad \text{Equação 52}$$

$$\alpha_{21} = \frac{P_{21}}{E_2} \quad \text{Equação 53}$$

A condição de reciprocidade, entre os fatores de perda por acoplamento do subsistema 1 para o 2 (e vice-versa), é de grande utilidade. Identificar um dos fatores de perda por acoplamento e, também, os números de modos são desafios em SEA

$$\alpha_{12} N_1 = \alpha_{21} N_2 \quad \text{Equação 54}$$

A densidade modal (número de modos  $N$ , contido dentro de uma banda de frequência dada, de largura  $\Delta f$ ) em subsistemas 1-D, 2-D e 3-D é obtida através de fórmulas gerais simplificadas, conforme designa Gerges (2000, p. 453-454):

Para sistemas acústicos 1-D, considerando que  $L$  é o comprimento e  $c_0$  é a velocidade do som no ar, tem-se:

$$n(f) = \frac{L}{\Delta f \cdot c_0} \quad \text{Equação 55}$$

Para uma barra, sabendo que  $c_b$  é a velocidade da onda longitudinal, tem-se:

$$n(f) = \frac{L}{\Delta f \cdot c_b} \quad \text{Equação 56}$$

Para um painel isotrópico de área  $A_p$ , espessura  $h$ , densidade de massa  $\rho$ , coeficiente de Poisson  $\nu$  e Módulo de Elasticidade  $E$ , tem-se:

$$n(\nu) = \frac{A_p}{4\rho} \sqrt{\frac{\rho \cdot h}{B}} \quad \text{Equação 57}$$

Onde a rigidez da placa é dada por:

$$B = \frac{E \cdot h^3}{12(1 - \nu^2)}$$

Para os sistemas 3-D, a densidade modal é dada, de forma geral, pela Equação 58, onde  $V$ ,  $A$  e  $P$  são volume, área e perímetro, respectivamente, enquanto  $G_i$  são os coeficientes dependentes das condições de contorno do volume. As velocidades de fase e de grupo estão representadas por:  $C_p$  e  $C_g$ .

$$n(\nu) = \frac{V \cdot \rho^2}{2\rho^2 \cdot C_p^2 \cdot C_g} \cdot G_1 \cdot \frac{A \cdot \rho}{C_g} \cdot G_2 \cdot P \quad \text{Equação 58}$$

Craik (1996, p. 07) conceitua, também, Fator de Perda Total (TLF) como a medida da energia total perdida em cada ciclo radiano devido a todos os mecanismos de transmissão.

### 3.4 ASPECTOS TEÓRICOS DA APLICAÇÃO DE SEA ÀS EDIFICAÇÕES

A adoção de um sistema constituído apenas por subsistemas essenciais, para posterior acréscimo dos demais, é uma recomendação corrente na bibliografia. Craik (1996, p. 18), por exemplo, cita que para calcular a transmissão sonora entre duas salas adjacentes, deve-se iniciar por um modelo constituído pelas duas salas e a parede de separação.

Para uma definição mais precisa do amortecimento, as paredes e pisos circundantes precisam ser considerados. A absorção sonora devida a eles, no entanto, pode ser computada sem a necessidade de adicionar esses subsistemas, conforme afirma Craik (1996, p. 18). Esse mesmo autor destaca, ainda, que paredes e pisos que estão distantes das salas de interesse não precisam ser incluídos, exceto se afetarem a transmissão.

Assim, geralmente, incluem-se apenas os componentes diretamente envolvidos na transmissão sonora. Às vezes é difícil saber antecipadamente quais as parte da estrutura

que podem ser ignoradas, fazendo com que a seleção inicial seja difícil, por isso é importante iniciar-se somente pelo sistema essencial.

Nas discussões sobre a validade de SEA, o número mínimo de modos para a precisão da média estatística é sempre enfatizado. Não existe consenso. Faixas mínimas de dois a trinta modos por banda de freqüência já foram sugeridas.

É importante lembrar, porém, que a simples consideração do número de modos por banda não é suficiente para determinar a aplicabilidade de SEA. Craik (1996, p. 40), por exemplo, recomenda o emprego de um outro parâmetro – o fator de superposição modal (**M**), definido como a razão entre a largura de banda modal (largura de banda de meia-potência ou a largura de banda efetiva na qual  $\frac{1}{2}$  vezes mais alto) pelo espaçamento da freqüência média entre modos.

$$M = \frac{B_{\text{modal}}}{\Delta f}$$

Equação 59

Se a superposição modal é menor do que 1, parte do espectro de freqüência não terá amortecimento controlado, que é uma das exigências de SEA. Craik (1996, p. 42) afirma que para uma parede de alvenaria típica: *“Two modes/band is sufficient to give a modal overlap of 1”*.<sup>6</sup>

### 3.5 UTILIZAÇÃO DE PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

Para maior agilidade e rapidez, utilizam-se modelos computacionais, que facilitam a aplicação da abordagem SEA na predição de ruído e vibrações. Trabalha-se, geralmente, com matrizes pequenas, por isso, segundo Gerges (2000, p. 445), o tempo de processamento computacional é reduzido (menor que um minuto para a maioria dos problemas).

Na presente Tese utilizou-se o programa comercial denominado “AutoSEA versão 2.2.2”, da Vibro-Acoustic Sciences, onde são criados pontos (ou nós) em um espaço de três dimensões, os quais definem a geometria dos elementos (ou subsistemas), que constituem o modelo (ou sistema). Existe a possibilidade de importar esses pontos de outros modelos ou programas. Os subsistemas podem ser estruturais e acústicos (vigas, anéis, placas retas e curvas, cilindros, abóbodas, fluido semi-infinito, cavidades acústicas e dutos acústicos).

Os dados do material a ser usado são inicializados ou selecionados no “Banco de Dados” existente no AutoSEA. Especificam-se as propriedades físicas do subsistema, caracterizando o material, a espessura e o tipo de elemento, por exemplo: vigas e placas (uniformes, sanduíches, compostas e reforçadas). Em continuação, definem-se as

<sup>6</sup> Dois modos/banda é suficiente para dar uma superposição modal de 1.

propriedades do espectro de amortecimento estrutural ou acústico nas seções “Damping” e “Absorption Coefficient”. Seleciona-se, então, o tipo de subsistema, criando-o. São estabelecidas as conexões, adicionadas fontes de potência e, em seguida, resolvido o sistema, plotando-se os resultados. O modelo pode ser gravado (.va2) ou exportado (.ntf). É permitida a análise gráfica e das planilhas, determinando, para cada subsistema, informações como: a potência de entrada, a perda de potência, a energia modal, a densidade modal, o fator de perda por amortecimento, o número de onda, os modos em banda, a energia, a velocidade, a aceleração e a pressão sonora.

O processo de modelagem é o principal responsável pela qualidade ou validade dos resultados obtidos, por isso merece grande atenção.

### 3.5.1 Verificação do programa AutoSEA

Visando conhecer o funcionamento, as funções disponíveis e a forma de utilização dos dados no programa AutoSEA, construiu-se um modelo constituído de duas cavidades acústicas idênticas e uma placa de alumínio. A opção por este material, deveu-se ao fato de apresentar um desempenho conhecido, com um gráfico bem definido para perda de transmissão e, também, frequências de ressonância e de coincidência bem identificadas.

O modelo estudado – e publicado: Paixão & Gerges (2000, p. 177-182) - apresentava as características detalhadas a seguir.

Duas cavidades idênticas:

Dimensões - 4m x 5m x 6m (eixos: x, y, z)

Área – 148 m<sup>2</sup>

Volume – 120 m<sup>3</sup>

Placa de alumínio:

Área – 20 m<sup>2</sup>

Perímetro – 18 m

Espessura – 2 mm

Massa - 108 Kg

Sem tratamento acústico

Fonte colocada na cavidade 1 – 1,0 Pascal (N/m<sup>2</sup>)

Elaborou-se uma análise comparativa entre a Perda de Transmissão obtida pela Lei da Massa e a resultante de cálculos executados com dados oriundos da resolução do modelo no AutoSEA-versão 2.0.9.

O cálculo pela Lei da Massa foi decorrente da aplicação da Equação 60.

$$PT_1 = 20 \log(\rho \cdot h \cdot f) + 47,4$$

Equação 60

Onde:  $\rho$  é a densidade,  $h$  a espessura da chapa de alumínio e  $f$  é a frequência.

Para o cálculo utilizando valores decorrentes do AutoSEA, empregou-se a Equação 61, apresentada por Crocker & Price (1969), ajustando-se a denominação dos termos.

$$PT_2 = NPS_1 - NPS_2 + 10 \log \left\{ \frac{A \cdot c \cdot (2,2 / (f \cdot \rho_2))}{24 \cdot V \cdot \ln(10)} \right\}$$

Equação 61

Onde:  $NPS_1$  e  $NPS_2$  são os níveis de pressão sonora obtidos no programa;

$A$  é a área da chapa de alumínio (20 m<sup>2</sup>);

$c$  é a velocidade do som (343 m/s);

$f$  é a frequência (em Hz);

$\rho_2$  é o fator de perda por amortecimento da cavidade 2;

$V$  é o volume da cavidade acústica 2.

O fator de perda por amortecimento ( $\rho_2$ ) é obtido a partir do programa AutoSEA, onde um dos dados de entrada corresponde ao amortecimento médio do ar, nesse caso considerado igual a 1%.

A Tabela 6 e a Figura 5 apresentam os resultados obtidos no cálculo dos valores de Perda de Transmissão pela Lei da Massa (PT1) e utilizando os dados do AutoSEA (PT2). Observa-se a concordância dos dois casos entre as frequências de 500 Hz a 4000 Hz.

Verifica-se, também, nos pontos marcados para PT 2 (?) a presença da região de coincidência.

Cálculos analíticos das regiões de ressonâncias mecânicas e coincidência são apresentados a seguir.

Tabela 6 : Comparativo entre as Perdas de Transmissão (PT) para alumínio com 2 mm de espessura.

Freq. (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
PT 1	9.19	15.21	21.23	27.25	33.27	39.29	45.31
PT 2	15.31	17.92	22.09	27.51	33.27	39.06	27.23

Fonte: Paixão & Gerges (2000)

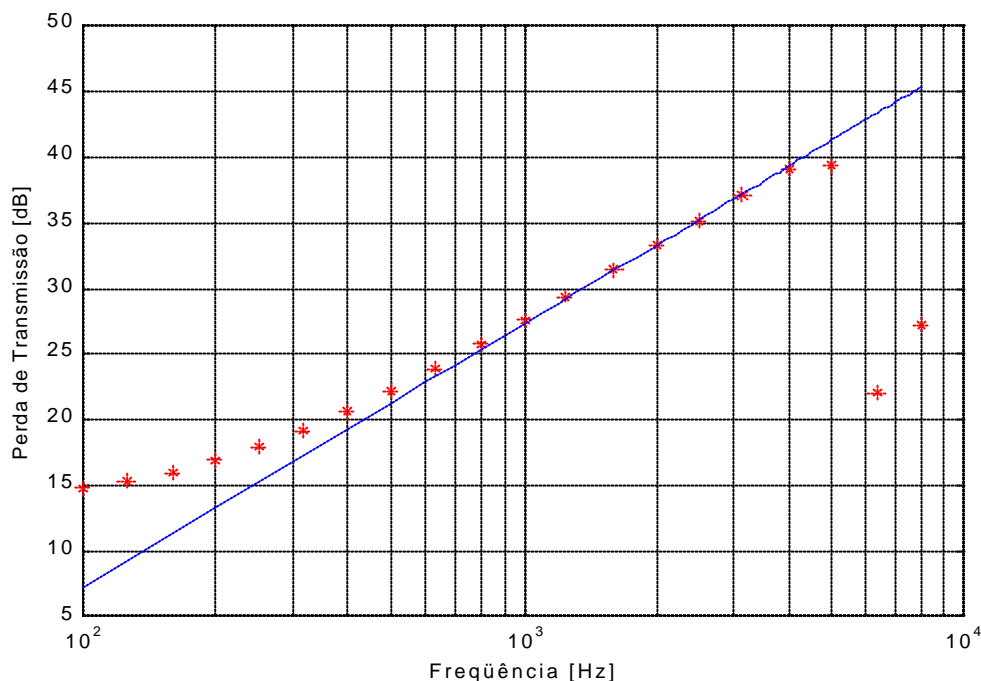


Figura 5 : Comparativo entre as Perdas de Transmissão para o alumínio 2 mm

? Ressonâncias mecânicas da placa:

Foram calculadas empregando-se a Equação 62 e suas variantes, apresentadas por Broch (1980, p.64), quando estabelece os seis primeiros modos de vibração de placas quadradas engastadas.

$$f_x = \frac{y}{2a} \sqrt{\frac{B}{\rho h a^4}}$$

Equação 62

Onde:

**f** = freqüência

**$\rho$**  = densidade de massa do alumínio, nesse caso, 2700 Kg/m<sup>3</sup>

**h** = espessura (0,002 m)

**a** = aresta lateral (4,48 m)

**y** = valores fixados para o cálculo de cada modo (1º modo = 35,99; 2º modo = 73,41; 3º modo = 108,27; 4º modo = 131,64; 5º modo = 132,25; 6º modo = 165,15 Hz)

**B** = rigidez, dada pela Equação 63, onde: **E** é o Módulo de Elasticidade Longitudinal do alumínio (7,1 x 10<sup>10</sup> N/m<sup>2</sup>) e  **$\nu$**  é o Coeficiente de Poisson (0,33).

$$B = \sqrt{\frac{E \cdot h^3}{12(1 - \nu^2)}}$$

Equação 63

Os resultados obtidos para as frequências de ressonâncias estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 : Modos e Frequências de ressonância

Modo	10	20	30	40	50	60
Frequência [Hz]	61,61	125,67	185,35	225,35	226,40	282,70

? Coincidência na placa metálica:

Na região da coincidência, calculou-se a frequência crítica, segundo a Equação 64, citada por Gerges (2000, p. 213).

$$f_c = \frac{c^2}{18 \cdot c_p \cdot h}$$

Equação 64

Onde:

$c_p$  = velocidade da onda longitudinal no sólido.

$c$  = velocidade do som no ar

$h$  = espessura da placa

A frequência crítica obtida para a placa de alumínio foi de 6345,7 Hz.

## CAPITULO 4 -

## O CONFORTO ACÚSTICO E A QUALIDADE DE VIDA

---

O ruído é um sério contaminante, devido ao amplo conjunto de efeitos ocasionados às pessoas. Beristáin (1998, p.136) assinala que sua sutileza prende-se ao fato de não possuir forma, tamanho, cor, sabor ou cheiro e, por conseqüência, não deixar “*rastro no ambiente*”, quando a fonte geradora é desligada.

Apesar disso, falta conscientização em todas as escalas: do operário aos dirigentes da indústria; dos fabricantes de máquinas ou equipamentos aos usuários; dos projetistas e construtores das edificações aos ocupantes; dos geradores de música em altos níveis sonoros aos apreciadores; dos legisladores à população em geral.

Decisões políticas não concedem prioridade à poluição sonora, mesmo onde existe uma maior consciência do problema. A União Européia, por exemplo, reconhecendo esse fato, “*pretende, através de um quadro estratégico mais agressivo, objetivo e contundente, avançar de forma coordenada e eficaz com uma política de proteção sonora no espaço europeu*”. (Bento Coelho, 1998, p.18)

Centrando a análise nas edificações – objeto principal do presente estudo – não se pode desvincular ambiente ruidoso e cidadania. À apatia, algumas vezes conseqüência do próprio ruído, soma-se uma falta de perspectivas e o medo de lutar por melhores condições de trabalho. A pessoa acostuma-se física e psico-emocionalmente às condições ruidosas em que vive.

O espaço físico, vivenciado cotidianamente, “*é presença constante e inevitável, que passamos a incorporar na feitura de nossos gestos diários, sem que dele tomemos consciência, mas que nos condiciona*” (CEDATE, 1988, p. 11).

A Ergonomia, procurando adaptar o trabalho ao ser humano, empenha-se na desalienação, buscando atividades que melhor atendam física e psiquicamente as necessidades das pessoas. Nesse eixo de entendimento, fica clara a influência da percepção sonora, dentro e fora do ambiente de trabalho.



Associar conforto e bem-estar à idéia de luxo, ou supérfluo, identifica pobreza e desinformação. Ignora-se que, junto às exigências humanas absolutas (ar, alimentação, etc.), existem necessidades (como o conforto ambiental) ligadas à saúde, à cultura e à cidadania das pessoas.

Báring (1988, p. 420) alerta: *“cabe-nos achar uma solução brasileira, em termos de postura técnica, para que a questão não se elitize necessariamente”*.

## 4.1 A LEGISLAÇÃO

A legislação nacional e internacional contempla o conforto e a segurança, através de normas que, segundo Beristáin (1998, p. 141), estabelecem níveis de ruído aceitáveis e apresentam, desde a definição dos diversos tipos de ruído, passando pelo ruído veicular ou em aeronaves, características de equipamentos e procedimentos de medição, ruído nas comunidades residenciais ou industriais, ruído ambiental, até o ruído em ambientes de trabalho e seus métodos de proteção. A maioria dessas normas é de caráter obrigatório, embora sejam empregadas esporadicamente. Salienta-se, no entanto, que a observância das normas sendo obrigatória, o seu desconhecimento não exime os infratores da responsabilidade.

No Brasil, destacam-se as Resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), relacionadas à questão do ruído.

A Resolução / CONAMA / Nº 001, de 08 de março de 1990, publicada no Diário Oficial da União (DOU) de 02 de abril de 1990, se refere à emissão de ruídos de quaisquer atividades e sua relação com a saúde e sossego público. Remete aos critérios e diretrizes das Normas da ABNT – NBR 10151 e NBR 10152.

As Normas Técnicas da ABNT contemplam diferentes aspectos relativos ao ruído. As NBRs 10151 e 10152 são as mais empregadas, no caso de edificações.

A NBR 10151, vigorando em nova versão desde agosto de 2000, sob o título: *Acústica – Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – Procedimento*, tem a finalidade de fixar *“as condições exigíveis para avaliação da aceitabilidade do ruído em comunidades”*. Ela especifica um método de medição de ruído, as correções necessárias e um critério para a comparação dos níveis encontrados e estabelecidos.

A NBR 10152 tem a finalidade de estabelecer níveis ideais para os compartimentos das edificações. Encontra-se em fase de redação da nova versão. A NBR 10152/87, atualmente em vigor, denomina-se *Níveis de ruído para conforto acústico*.

A Resolução / CONAMA / Nº 002, de 08 de março de 1990, publicada no Diário Oficial da União (DOU) de 02 de abril de 1990, institui o Programa Nacional de Educação e Controle da Poluição Sonora – o Programa “Silêncio”, com os objetivos de:

- a) Promover cursos técnicos para capacitar pessoal e controlar os problemas de poluição sonora nos órgãos de meio ambiente estaduais e municipais em todo o país;
- b) Divulgar junto à população, através dos meios de comunicação disponíveis, matéria educativa e conscientizadora dos efeitos prejudiciais causados pelo excesso de ruído;
- c) Introduzir o tema "poluição sonora" nos cursos secundários da rede oficial e privada de ensino, através de um Programa de Educação Nacional;
- d) Incentivar a fabricação e uso de máquinas, motores, equipamentos e dispositivos com menor intensidade de ruído quando de sua utilização na indústria, veículos em geral, construção civil, utilidades domésticas, etc;
- e) Incentivar a capacitação de recursos humanos e apoio técnico e logístico dentro da política civil e militar para receber denúncias e tomar providências de combate à poluição sonora urbana em todo o Território Nacional;
- f) Estabelecer convênios, contratos e atividades afins com órgãos e entidades que, direta ou indiretamente, possa contribuir para o desenvolvimento do Programa SILÊNCIO.

Essa iniciativa, no entanto, não obteve sucesso nas ações direcionadas à educação e à imprensa. Não conseguiu mobilizar os governantes e legisladores estaduais e municipais, responsáveis pelo estabelecimento e implantação dos programas estaduais de educação e controle da poluição sonora. No caso da imprensa, programas infantis continuam a realizar concurso de quem grita mais alto, incentivando a cultura do ruído e projetando uma futura sociedade ainda menos preocupada com a poluição sonora.

Quanto à produção de equipamentos menos ruidosos, houve a aprovação da Resolução / CONAMA / Nº 20, de 07 de dezembro de 1994, que instituiu o “selo ruído”, fornecidos por laboratórios credenciados pelo INMETRO, como forma de indicação do nível de potência sonora, medido em decibel - dB(A), de uso obrigatório para aparelhos eletrodomésticos, que venham a ser produzidos, importados e que gerem ruído no seu funcionamento. Normas da ABNT, como a NBR 13910 (partes 1,2 e 3), estão relacionadas às medições do Selo Ruído, o mesmo acontecendo com Instruções Normativas específicas do INMETRO.

O CONAMA regulamentou, ainda, emissões sonoras de veículos automotivos, que não serão aqui comentadas, por não serem objeto desse trabalho.

A legislação brasileira que trata da influência do ruído sobre o trabalhador, apresenta, também, Normas Regulamentadoras do Ministério do Trabalho, como a NR 7 (Programa de Controle de Saúde Ocupacional), NR 9 (Programa de Prevenção de Riscos Ambientais) e NR 17 (Ergonomia).

Acredita-se, no entanto, que a questão maior continua sendo a educação e a informação, que aliadas a disponibilização de ambientes residenciais, de lazer e trabalho confortáveis acusticamente, são imprescindíveis na conscientização de que o ser humano necessita qualidade de vida para, realmente, viver.

## 4.2 REQUISITOS E CRITÉRIOS DE DESEMPENHO EM EDIFICAÇÕES

A análise do desempenho (ou comportamento em utilização) das edificações e o atendimento às exigências dos usuários são uma preocupação crescente entre os pesquisadores. Esses temas vêm sendo destaque, há algum tempo, sendo difícil precisar quando e onde inicia o seu estudo. Mitidieri Filho (1998, p. 11) cita publicações da década de vinte, mas enfatiza que a sistematização dos estudos data dos anos sessenta e setenta. Afirma (p.38) que *“o conceito de desempenho aplicado à construção, como conhecemos hoje, data do final da década de 60”*.

O desempenho da edificação é verificado a partir dos requisitos e critérios dos usuários e avaliado por métodos como: ensaios e medidas (em laboratório ou in situ), simulação por modelos matemáticos, julgamento técnico (de especialistas ou experiência acumulada) e inspeções em protótipos ou unidades construídas e habitadas.

*Os requisitos e critérios de desempenho expressam, respectivamente, as condições qualitativas e quantitativas às quais o edifício deve atender para satisfazer as exigências do usuário, quando submetido a determinadas condições de exposição.*  
(Mitidieri Filho, 1998, p. 37)

Quanto à definição dos requisitos dos usuários é necessária a observância dos requerimentos estabelecidos pela norma ISO 6242-3 – (Building construction – Expression of user's requirements – Part 3: Acoustical requirements), ou seja: liberdade de aborrecimentos devido a ruídos intrusos, originários de dentro ou de fora da edificação; privacidade para a palavra; e qualidade acústica dentro dos espaços construídos.

Organizações internacionais, como RILEM (Reunión Internationale de Laboratoires d'Essais et de recherches sur les Matériaux et Constructions), ASTM (American Society for Testing and Materials), CIB (Conseil International du Batiment) e ISO (International Organization for Standardization), possuem comitês especialmente dedicados à questão do desempenho de edificações.

No Brasil, o Relatório nº 16.277 - Formulação de critérios para avaliação de desempenho de habitações – é publicado pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A.), em 1981, constituindo-se no primeiro documento a contemplar as exigências de conforto acústico, junto a outros fatores como: segurança estrutural e ao fogo,

estanqueidade, conforto higrotérmico e durabilidade. O texto faz referência apenas às edificações térreas. Outros poucos trabalhos, em geral oriundos do IPT, constituem a pequena bibliografia brasileira sobre o tema, na qual persiste a carência de informações e detalhes técnicos.

Atualmente, é crescente a preocupação com esse assunto. O COBRACON (Comitê Brasileiro da Construção) está coordenando um esforço conjunto de técnicos de diversas áreas, visando editar subsídios para a criação de parâmetros mínimos de desempenho. A proposta final é a elaboração de Normas da ABNT específicas para desempenho de edificações em diversas áreas, dentre as quais, a acústica.

Assim, busca-se assegurar o conforto acústico, decorrente de um bom desempenho da edificação, tendo em vista o aumento descontrolado dos índices de ruído no dia-a-dia das pessoas.

*A Acústica das Edificações tem que se preocupar seriamente com o ruído que ocorre externamente aos locais onde moramos ou trabalhamos. É o que convencionamos chamar de situação compulsória de ruído, pois envolve questões que admitem pequena ou nenhuma margem de intervenção.*  
(Báring, 1988, p. 417)

### 4.3 INDICADORES DE CONFORTO ACÚSTICO

O desenvolvimento de instrumentos capazes de repetir medidas sonoras é apontado por Tocci (2000, p. 133) como o primeiro passo na evolução dos indicadores de ruído em espaços edificados. Além disso, a possibilidade de discriminação em bandas de oitava foi o caminho para um maior conhecimento da influência do ruído na comunicação e na audição.

A determinação de números únicos indicadores de níveis aceitáveis de ruído para os espaços construídos constitui-se numa preocupação constante dos pesquisadores.

Atualmente, os métodos mais utilizados nesse tipo de análise empregam conjuntos de curvas conhecidas como: NC (Noise Criteria), NCB (Balanced Noise Criteria) e RC (Room Criteria). A norma brasileira NBR10152 e a ISO 1996/71 trabalham com as curvas de avaliação NR (Noise Rating).

Tocci (2000, p. 134) cita, também, RC Mark II (curvas semelhantes à RC, mas com um método diferente na atribuição da qualidade do espectro) e RCN (tratam a variação cíclica de baixas frequências produzidas, por exemplo, em grandes sistemas de ventilação de ar).

Beranek (1988, p.574) faz, ainda, uma distinção entre NC (Noise Criterion) e PNC (Preferred Noise Criterion), destacando que o primeiro grupo de curvas deve ser usado para medições em espaços ocupados, enquanto o segundo destina-se a espaços vazios, mas em ambos os casos todos os sistemas (exemplo: ar condicionado) devem estar funcionando.

Apesar desses critérios serem utilizados há muito tempo, permanece uma grande discussão, tendo em vista a dificuldade na definição de um número capaz de identificar condições de conforto acústico para um ambiente, pois muitas são as variáveis envolvidas.

Beranek (1988, p.585) assinala bem essa preocupação:

*The consultant or architect must use his judgment in selecting a noise criterion curve for a particular specification because unusual circumstances, such as people's attitudes toward noise, local expectations, or the need for extreme economy, are important underlying factors. In all cases, careful analysis of each design problem is required to ensure that the proper specifications for allowable noise levels are achieved*<sup>7</sup>

O mesmo Beranek (1988, p.582) enfatiza que nenhum número único é completamente aceitável, porque eles não conseguem dar informações suficientes para a correção do problema. Ao comentar (p. 587) as tabelas derivadas do emprego das curvas de critério de ruído, salienta que elas não consideram possíveis diferenças entre pessoas de diferentes nações.

Tocci (2000, p. 134) afirma: “(...) a single, simple, universal method for evaluating sound in buildings may remain elusive”<sup>8</sup>

Acredita-se, por isso, que a melhor caracterização e quantificação do isolamento do ruído deve ser realizada por faixas de frequências. Dos métodos disponíveis, o mais empregado é o Índice de Redução Sonora (R), apresentado no conjunto de Normas ISO 140.

#### 4.4 ISOLAMENTO ACÚSTICO SEGUNDO A NORMA ISO-140

A ISO 140 é um conjunto de doze normas técnicas sobre isolamento acústico das edificações e seus componentes. No Brasil, o Comitê Brasileiro de Construção Civil (CB-02) da ABNT, através da Comissão de Estudos CE-02:135.01 – Desempenho acústico nas edificações, está trabalhando na tradução e adaptação de algumas dessas normas. Os trabalhos relativos ao Projeto 02:135.01-001, denominado Acústica – Medição de isolamento sonoro em construções e elementos construtivos – Medição em laboratório de isolamento sonoro aéreo de elementos de construção, estão momentaneamente suspensos, aguardando a definição de possíveis alterações na ISO 140-3, decorrentes das discussões que estão ocorrendo no referido comitê da ISO.

<sup>7</sup> O consultor ou arquiteto deve usar o seu julgamento na seleção de uma curva critério de ruído para uma especificação particular, porque circunstâncias incomuns, como a atitude das pessoas por causa do ruído, expectativas locais ou a necessidade de extrema economia, são importantes fatores. Em todos os casos, cuidadosa análise para cada problema é requerida, para assegurar que as próprias especificações para níveis de ruído admissíveis estejam atingidas.

<sup>8</sup> um único, simples e universal método para avaliação do som em edificações deve permanecer indefinível.

O conjunto de normas ISO 140 (Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements) está assim constituído:

- ? ISO 140 – 1 : 1997 - Identifica as condições que devem satisfazer os laboratórios para medições de isolamento acústica de elementos construtivos, a fim de que não apresentem trajetórias de transmissão por flancos. (*Part 1: Requirements for laboratory test facilities with suppressed flanking transmission*).
- ? ISO 140 – 2 : 1991/ Cor 1: 1993 – Trata da precisão dos dados obtidos. (*Part 2: Determination, verification and application of precision data*).
- ? ISO 140 – 3 : 1995 – Estabelece como devem ser realizadas as medições de isolamento a ruído aéreo de elementos de edificações. (*Part 3: Laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements*)
- ? ISO 140 – 4 : 1998 – Caracteriza as medições em campo relativas ao ruído aéreo entre salas. (*Part 4: Field measurements of airborne sound insulation between rooms*).
- ? ISO 140 – 5 : 1998 – Refere-se às medições em campo para determinação da isolamento de ruído aéreo de fachadas ou elementos de fachadas. (*Part 5: Field measurements of airborne sound insulation of façade elements and façades*).
- ? ISO 140 – 6 : 1998 – Trata de medições em laboratório para ruídos de impacto. (*Part 6: Laboratory measurements of impact sound insulation of floors*).
- ? ISO 140 – 7 : 1998 – Fala das medições em campo para ruídos de impacto. (*Part 7: Field measurements of impact sound insulation of floors*).
- ? ISO 140 – 8 : 1997 – Identifica um piso padrão para medições em laboratório da redução do ruído de impacto em pisos. (*Part 8 Laboratory measurements of the reduction of transmitted impact noise by floor coverings on a heavyweight standard floor*).
- ? ISO 140 – 9 : 1985 - Refere-se a medições em laboratório para isolamento de ruído aéreo em tetos. (*Part 9: Laboratory measurement of room-to-room airborne sound insulation of a suspended ceiling with a plenum above it*).
- ? ISO 140 – 10 : 1991 – Caracteriza as medições em laboratório para isolamento a ruído aéreo em pequenos elementos de edificações. (*Part 10: Laboratory measurement of airborne sound insulation of small building elements*)
- ? ISO 140 - 11 : Retirada do grupo de normas,
- ? ISO 140 - 12 : 2000 – Medições de isolamento em laboratório para pisos, entre salas, submetidos a ruído aéreo e de impacto. (*Part 12: Laboratory measurement of room-to-room airborne and impact sound insulation of an access floor*).
- ? ISO/TR 140 – 13 : 1997 – Apresenta as diretrizes gerais. (*Part 13: Guidelines (available in English only)*).

A seguir, apresenta-se a ISO 140-3 de forma mais detalhada, devido sua utilização no presente trabalho.

#### 4.4.1 Síntese das informações constantes na ISO 140- Parte 3

A Norma ISO 140-3/95 está constituída de nove itens e sete anexos. As principais recomendações mostradas em cada item são citadas a seguir.

Item 1 – Descreve a norma, seus objetivos e utilização. Destaca que ela destina-se a medições em laboratório e, portanto, os resultados não devem ser usados para medições em campo, sem a aplicação de correções.

Item 2 – Apresenta as outras normas usadas como referências.

Item 3 – Estabelece as definições. O Índice de Redução Sonora (**R**), que foi empregado no presente trabalho, é definido como: dez vezes o logaritmo da razão entre a potência sonora incidente na partição de teste (**W**<sub>1</sub>) pela potência sonora transmitida através dessa partição (**W**<sub>2</sub>) e expresso em decibéis. É representado pela Equação 65.

$$R = 10 \log \frac{W_1}{W_2} \quad \text{Equação 65}$$

Nessa Parte 3 da ISO 140, o Índice de Redução Sonora (**R**) é avaliado utilizando-se a Equação 66, onde:

**L**<sub>1</sub> = nível de pressão sonora médio na sala de emissão, em decibéis;

**L**<sub>2</sub> = nível de pressão sonora médio na sala de recepção, em decibéis;

**S** = área da partição ou da abertura de teste em metros quadrados;

**A** = área de absorção sonora equivalente na sala de recepção em metros quadrados.

$$R = L_1 - L_2 = 10 \log \frac{S}{A} \quad (\text{dB}) \quad \text{Equação 66}$$

Notas: 1- A derivação da Equação 66 a partir da Equação 65, assume que os campos sonoros são perfeitamente difusos e que a radiação sonora dentro da sala de recepção é somente a transmitida através da partição.

2 – A expressão “sound transmission loss” (TL) é também usada em países de língua inglesa. É equivalente ao Índice de Redução Sonora.

Item 4 – Fala sobre equipamentos.

Item 5 – Trata das condições requeridas das salas e da instalação da partição ou dos elementos (portas ou janelas) em teste.

Item 6 – Descreve os procedimentos de teste e avaliação, destacando a geração do campo sonoro na sala de emissão, a medição do nível de pressão sonora média, a faixa de freqüências de medição, a determinação do tempo de reverberação e da área de absorção média e, finalmente, a correção para o ruído de fundo.

Item 7 – Refere-se à precisão requerida nas medições.

Item 8 – Estabelece como devem ser expressos os resultados.

Item 9 – Mostra os itens que devem constar na apresentação dos dados.

Os anexos A, B, C, D, E, F e G tratam, respectivamente, de: montagem na abertura de teste, medições do R para parede que vai receber o elemento a ser medido, qualificação e posicionamento da fonte sonora, medição de transmissão por flanco, medição do fator de perda total, medições em bandas de baixas freqüências e forma de expressar os resultados.



O presente capítulo contempla todas as atividades experimentais desenvolvidas ao longo do trabalho. Trata, inicialmente, da determinação experimental do Índice de Redução Sonora (R). Apresenta, a seguir, os ensaios físico-mecânicos e vibro-acústicos da parede de alvenaria e seus constituintes, realizados com a finalidade de possibilitarem as simulações numéricas e os cálculos mostrados no Capítulo 6.

### **5.1 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO ÍNDICE DE REDUÇÃO SONORA (R)**

O Índice de Redução Sonora (R) é considerado um dos principais parâmetros na caracterização acústica de uma parede, sendo também conhecido como Perda de Transmissão (PT) ou *Transmission Loss* (TL), conforme detalhado no item 2.2 do Capítulo 2.

Optou-se por empregar a denominação Índice de Redução Sonora, tendo em vista sua adoção pela norma ISO 140-3<sup>9</sup> (*Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 3: Laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements*), a qual serve de referência aos laboratórios brasileiros, que realizam ensaios de isolamento de materiais e componentes da construção civil.

O estudo foi desenvolvido sob três ênfases, que serão apresentadas separadamente e, ao final, analisadas conjuntamente. A primeira, mostrada nesse item, se refere às medições realizadas em laboratório. A segunda contempla as simulações computacionais e a terceira relata a execução de cálculos analíticos. As duas últimas análises constituem o capítulo 6.

O presente item inicia com a descrição das instalações físicas utilizadas, pertencentes ao Setor de Termo-Acústica do Laboratório de Materiais e Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Na seqüência, detalha a construção da parede em estudo e a determinação das condições ambientais existentes durante os ensaios. A descrição dos equipamentos e procedimentos empregados, bem como os resultados obtidos, completam esse item.

---

<sup>9</sup> Descrita no item 4.4.1 do capítulo 4 da presente tese.

### 5.1.1 As Câmaras de Transmissão Sonora da UFSM

As Câmaras Reverberantes para ensaios de Transmissão Sonora do Setor de Termo-Acústica do LMCC/UFSM são um conjunto de duas salas especiais (60 e 67 m<sup>3</sup> de volume), separadas por um pórtilco de 55 cm, cujas paredes, teto e piso estão constituídos de 30 centímetros de concreto armado. Cada sala possui uma porta dupla de 1,50 m de largura por 2,5 m de altura, executadas em chapa de aço de 12,7 mm de espessura, vedadas com borracha em todo o contorno e fechadas sob pressão, garantindo perfeita estanqueidade. Não há paralelismo entre as superfícies da Câmara (paredes e teto/piso) para a existência de campo difuso. A estrutura não está apoiada diretamente no solo. As cargas são descarregadas em isoladores (neoprene), passando aos pilares e, deles, às fundações.

As instalações das Câmaras, mostradas na Figura 6 e na Fig 7, bem como os procedimentos de ensaio estão qualificados segundo a Norma ISO 140 partes 1 e 2, conforme foi demonstrado por Santos & Mutti (1991, p.01-04).

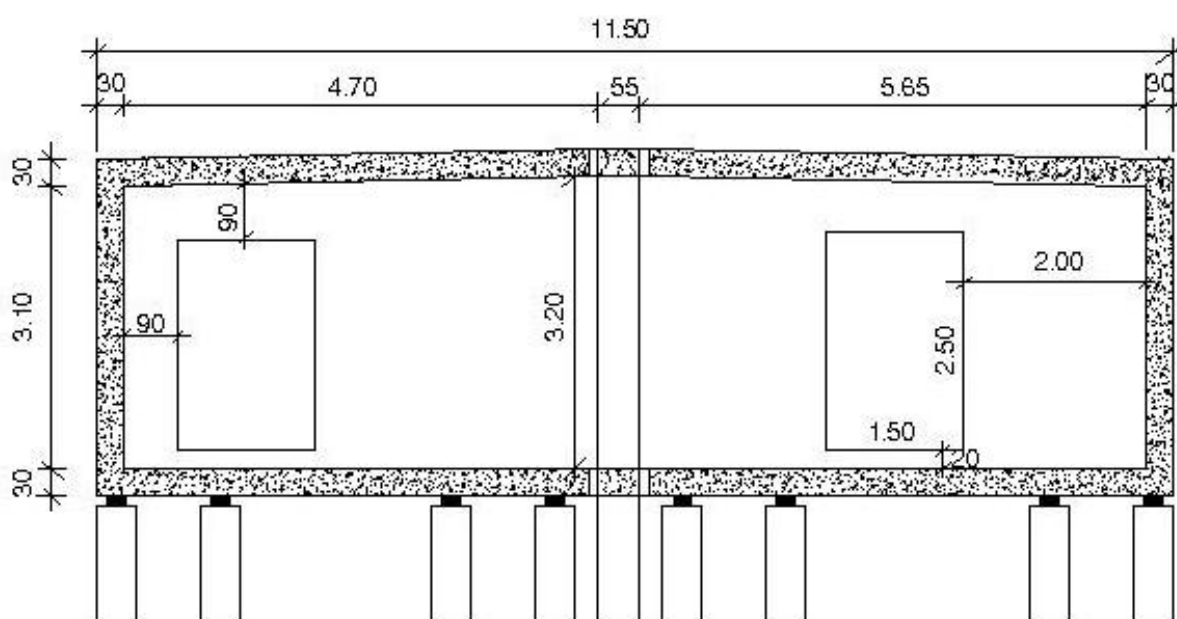


Figura 6 : Câmaras reverberantes para transmissão sonora da UFSM



Figura 7 : Fotos das câmaras da UFSM para ensaios de transmissão sonora.

### 5.1.2 Determinação de Condições Ambientais

As condições de temperatura e umidade relativa do ar foram determinadas durante todos os ensaios executados nas Câmaras. Empregou-se o Analisador Climático (*Indoor Climate Analyzer – 1213 – serial n° 1464641*) com os Transdutores de temperatura do ar (*Air Temperature Transducer - MM0034*) e de umidade (*Humidity Transducer - MM0037*), os quais são fabricados pela empresa Brüel & Kjaer (B&K) e estão mostrados na Figura 8.



Figura 8 : Equipamentos usados nas medições das condições ambientais.

### 5.1.3 A Parede Estudada

Uma parede de tijolos maciços cerâmicos, com 4,10 metros de largura por 3,20 metros de altura, perfazendo uma área de 13,12 metros quadrados, foi construída na separação das duas Câmaras de Transmissão, para a realização dos ensaios vibro-acústicos.

As seguintes etapas foram realizadas para a execução da parede:

- ? Limpeza da superfície das câmaras (com lixa – Carborundum nº198), para retirada de restos de outros materiais testados anteriormente e regularização da superfície.
- ? Uma borracha de 7,5 centímetros de largura e 5,0 milímetros de espessura foi colocada nas bordas laterais e superior da parede para minimizar o vazamento da energia sonora da parede de tijolos para as superfícies de concreto das Câmaras. A borracha foi levemente colada com o auxílio de uma guia de madeira. Na borda inferior permaneceu a argamassa de assentamento, com traço 1:1:6 (cimento:cal:areia), a fim de garantir a estabilidade da parede.
- ? Levantamento da parede até o teto, com juntas de 1,0 cm de espessura, sem encunhamento.
- ? Realização de acabamento nas bordas laterais para fechamento das aberturas deixadas por pregos utilizados na amarração da linha de nivelamento.
- ? Colocação de silicone para preencher a diferença de largura da borracha (7,5 cm) e do tijolo (10,6 cm), a fim de obter-se uma melhor vedação. A borracha ficou centralizada em relação à espessura da parede.

O Apêndice 1 apresenta fotografias para melhor identificação dos procedimentos construtivos na execução da parede.

Realizou-se um primeiro grupo de ensaios vibro-acústicos com essas conexões elásticas (borracha e silicone), executados em três períodos distintos: 14, 28 e 130 dias após a construção da parede. Os dois primeiros períodos de tempo são padronizados nos ensaios de construção civil e devem-se, basicamente, à secagem da argamassa e à estabilização da estrutura. Os 130 dias foram resultado da demora no início do segundo grupo de ensaios.

Esse segundo grupo de ensaios ocorreu após a substituição das conexões elásticas (borracha e silicone) por conexões rígidas (argamassa). O preenchimento da borda foi, então, executado com argamassa no mesmo traço do levantamento (1:1:6), caracterizando uma situação mais próxima da existente nas edificações, onde acontece um vazamento de energia sonora através do acoplamento das paredes e estruturas.

Os novos ensaios respeitaram o tempo de secagem da argamassa, sendo realizados aos 14 e 28 dias. A inspeção visual não identificou fissuras decorrentes dessa secagem capazes de influenciar os testes. Apenas poucas micro-fissuras superficiais foram detectadas, após os 28 dias.

#### 5.1.4 Medições em Laboratório

Os ensaios para a determinação experimental de “R” estão explicados na ISO 140 –3. Foram realizados nas Câmaras de Transmissão do LMCC/UFSM, descritas no item 5.1.1. Utilizou-se, também, a parede de tijolo maciço cerâmico mencionada no item 5.1.3.

##### 5.1.4.1 Descrição dos Experimentos

Inicia-se esse sub-item com uma descrição sucinta das atividades experimentais. Após, procede-se o detalhamento dos equipamentos e dos procedimentos.

Resumidamente, pode-se dizer que o ensaio subdivide-se em cinco atividades básicas:

- ? Aferir o sistema de medição com o emprego do calibrador (4230) e do analisador (4418);
- ? Gerar o ruído e medir o Nível de Pressão Sonora (NPS1) na Câmara de Emissão;
- ? Medir o Nível de Pressão Sonora (NPS2) na Câmara de Recepção, a partir do ruído gerado na Câmara de Emissão;
- ? Medir o Tempo de Reverberação (TR) na Câmara de Recepção. É necessário digitar no analisador (4418) o volume da Câmara de Recepção ( $V=71 \text{ m}^3$ ) e a área da parede de alvenaria ( $S=13,1 \text{ m}^2$ );
- ? Medir o Ruído de Fundo (RF) na Câmara de Recepção.

Todos os valores são registrados na memória do analisador (4418), podendo ser impressos pelo registrador gráfico e/ou ser empregados nos cálculos. Nos ensaios realizados, optou-se pelo registro dos valores medidos (NPS1, NPS2, TR e RF) e dos calculados com o emprego da Equação 67 até a Equação 69 (definidas no Capítulo 2), onde:

**TR** = tempo de reverberação na Câmara de Recepção;

**S** = área da parede de teste ( $13,14 \text{ m}^2$ );

**V** = volume da Câmara de Recepção ( $71 \text{ m}^3$ ).

**D** = Diferença de Nível

$$D = NPS_1 - NPS_2 \quad \text{Equação 67}$$

**D<sub>nT</sub>** = Diferença de Nível Padrão (pela ISO 140-parte 3)

$$D_{nT} = D + 10 \log \frac{TR}{0,5} \quad \text{Equação 68}$$

**R** = Diferença de Nível Normalizada ou Índice de Redução Sonora (ISO 140 – parte 3)

$$R = D + 10 \log \frac{6,15 \cdot S \cdot TR}{V} \quad \text{Equação 69}$$

#### a) OS EQUIPAMENTOS

Os equipamentos empregados, todos da empresa Brüel & Kjaer, foram:

- ? Fonte Sonora (*Sound Source – 4224 – serial n° 1491240*)
- ? Microfone Rotativo (*Rotating Microphone Boom – 3923 – serial n° 1419777*)
- ? Pré-amplificador (*Preamplifier – 2619 – serial n° 1475114*)
- ? Microfone de ½" (*Condenser Microphone - 4166 – serial n° 1485447*)
- ? Calibrador (*Sound Level Calibrator – 4230 – serial n° 1351791*)
- ? Analisador (*Building Acoustics Analyzer – 4418 – serial n° 879492*)

#### b) OS PROCEDIMENTOS

A fonte geradora (*Sound Source - type 4224*) operou ligada ao analisador (*Building Acoustics Analyzer-type 4418*). Com isso, trabalhou-se com ruído rosa, filtrado em terços de oitava. Foi utilizado difusor e inclinação de 30°.

Essa forma combinada dos dois equipamentos é recomendada para medições acústicas em edificações pela empresa Brüel&Kjær (1982, p. 35), no manual do referido analisador. Assim, a fonte 4224 atua como um amplificador de potência e alto-falante com o sinal do ruído vindo do analisador 4418.

O analisador 4418 trabalha na faixa de 20 dB a 120 dB emitindo ruído rosa que passa através de uma série de 20 filtros em bandas de terços de oitava, cobrindo uma faixa de freqüências de 100 Hz a 8000 Hz. Esse equipamento pode ser usado para medições e cálculos de acordo com a ISO 140, ISO R 717, ISO R 354 e ISO 3382. Mede tempo de reverberação; isolamento de paredes, pisos e fachadas para ruído aéreo e de impacto; executa análise de ruído e determinação da potência sonora de acordo com a ISO 3741 e ISO 3742.

A Figura 9 mostra a fonte sonora e a Figura 10 apresenta o analisador.



Figura 9 : Fonte sonora (*Sond Source Type 4224* da B&K).



Figura 10 : Analisador (*Building Acoustics Analyzer 4418* da B&K).

A fonte, utilizada com difusor, ficou posicionada no encontro de duas paredes de concreto da Câmara (de Emissão para medições de NPS e de Recepção para TR), voltada para o canto, a fim de excitar o maior número de modos da sala. A distância foi de 1,0 metro entre a fonte e cada uma dessas paredes.

Atendendo às determinações do item 6.2 da Norma ISO 140-3 (1995, p.06), o raio de varredura do microfone rotativo (tipo 3923) foi ajustado para 1,0 metro, com trajetória inclinada e tempo de média de 16 segundos. Observou-se o afastamento de 1,0 metro entre o microfone e todas as superfícies (paredes adjacentes, de teste e fonte geradora).

A temperatura e umidade relativa do ar foram verificadas, para todos os ensaios, com o analisador climático descrito no item 5.1.2.

Quantificou-se o ruído de fundo a fim de assegurar que as medições realizadas na Câmara de Recepção não estivessem afetadas por ruídos estranhos, como os oriundos de outras salas ou dos sistemas elétricos. Segundo o item 6.5 da Norma ISO 140-3 (1995, p. 07) o nível de ruído de fundo deve ser no mínimo 6,0 dB (e preferencialmente mais que 15,0 dB) abaixo do nível resultante da combinação do NPS com o ruído de fundo.

O tempo de média empregado no microfone foi 16 segundos, conforme indicação do fabricante do equipamento (B&K,1982, p.25), que recomenda para ambientes altamente reverberantes menor média temporal. Nas medições de TR foram utilizadas três amostras, ou seja, uma diferença de 120? entre cada amostra. Optou-se pelo nível de 30 dB. Assim, o tempo total foi multiplicado por 60 (da definição de TR) e dividido pela faixa (30 dB) para chegar ao resultado em segundos. A medição inicia após o caimento dos primeiros 5,0 dB.

A Figura 11 mostra a fonte geradora (4224) e o microfone rotativo (3923) com pré-amplificador (2619) e microfone (4166). Salienta-se que a fotografia é apenas ilustrativa, pois os equipamentos estão fora de sua localização de ensaio.



Figura 11 : Fonte geradora e microfone rotativo nos ensaios de Índice de Redução Sonora.



### 5.1.4.2 Os resultados obtidos

Nesse experimento, empregaram-se as duas situações detalhadas no item 5.1.3, ou seja, conexões elásticas (com borracha e silicone) e conexões rígidas (com argamassa em substituição à borracha e silicone). Em ambos os casos, os ensaios para determinação do Índice de Redução Sonora – R - foram realizados aos 14 e 28 dias após a execução da parede ou a alteração no tipo de conexão.

#### a) PAREDES COM CONEXÕES ELÁSTICAS

A colocação da borracha (com acabamento em silicone) minimizou o vazamento da energia sonora, da parede de alvenaria em estudo, para as paredes de concreto das Câmaras. Buscou-se, assim, obter uma resposta da parede de tijolo maciço cerâmico isoladamente, em especial quanto ao seu amortecimento (cuja determinação está demonstrada no item 5.2.2) e ao seu Índice de Redução Sonora.

A Figura 12 mostra os resultados obtidos em oito desses ensaios (quatro aos 14 dias e os demais aos 28 dias). Observa-se uma grande concordância dos valores medidos, independente da data dos testes.

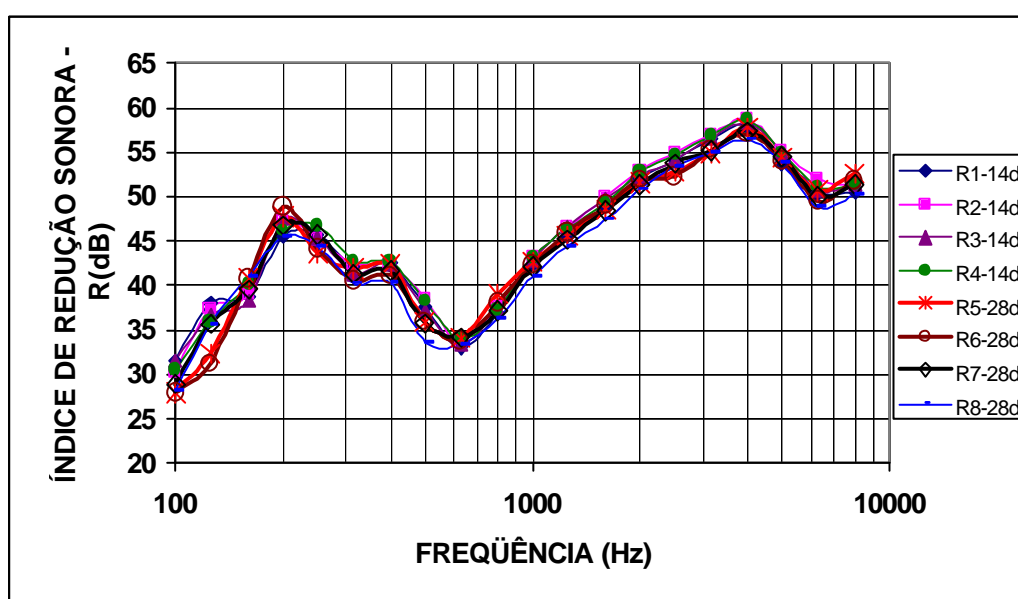


Figura 12 : Índice de Redução Sonora para parede de tijolo maciço cerâmico, com conexões elásticas - 14 e 28 dias.

Na frequência de 125 Hz houve uma maior divergência nos valores medidos em 28 dias, sendo que dois deles (R7 e R8) acompanharam a tendência dos valores obtidos aos 14 dias. Isso pode ser comprovado na Figura 13, que apresenta o Desvio Padrão e o Coeficiente de Variação dessas medições. O Desvio Padrão máximo é 2,22 dB, enquanto a variação máxima só ultrapassa 3% para três frequências: 100 Hz, 125 Hz e 500 Hz.

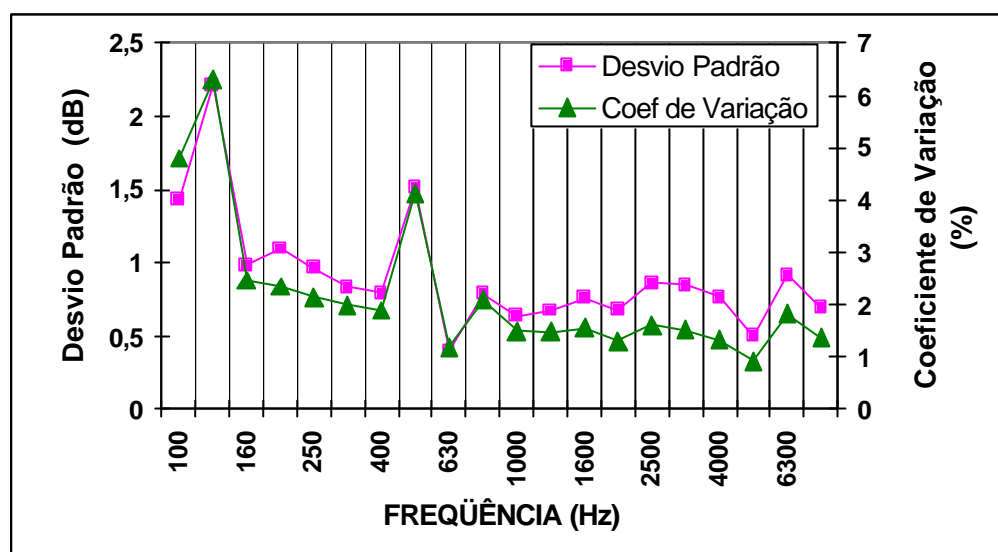


Figura 13 : Desvio Padrão e Coeficiente de Variação das medições de “R” aos 14 e 28 dias em parede com conexões elásticas.

As condições de temperatura e umidade relativa do ar foram medidas nas duas Câmaras (Emissão e Recepção) para todos os ensaios. Os valores médios, referentes aos testes com conexão elástica (borracha e silicone) aos 14 e 28 dias, estão apresentados na Tabela 8, juntamente com o Desvio Padrão e o Coeficiente de Variação dessas medições. Observa-se que a diferença de temperatura e umidade relativa foi muito pequena nos três períodos de tempo. Lembra-se que o equipamento empregado está descrito no item 5.1.2.

Tabela 8 : Condições ambientais durante os ensaios aos 14 e 28 dias na parede com conexões elásticas.

CÂMARA	TEMPERATURA (°C)			UMIDADE RELATIVA (%)		
	Média (°C)	Desvio Padrão (°C)	Coeficiente de Variação(%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Coeficiente de Variação (%)
Emissão 14 dias	21,95	0,47	2,1	75	3,9	5,21
Recepção 14 dias	21,88	0,71	3,2	72	6,6	9,21
Emissão 28 dias	23,71	0,54	2,3	81	2,4	2,95
Recepção 28 dias	23,50	0,71	3,0	77	3,0	3,95

Após a conclusão desse grupo de ensaios, as conexões elásticas (com borracha e silicone) foram substituídas por conexões rígidas (argamassa com o mesmo traço do levantamento, ou seja, 1:1:6). O objetivo dessa alteração foi tornar o ensaio representativo de condições próximas da realidade encontrada nas edificações, conforme recomenda a norma ISO 140-3 (1995, p. 03).

Tendo em vista o grande período de tempo (? 130 dias) decorrido, entre as medições de 28 dias com borracha e a colocação da argamassa, procederam-se três novas medições para o Índice de Redução Sonora, antes da substituição das conexões. Os valores médios de “R”, o Desvio Padrão e o Coeficiente de Variação desses novos ensaios são mostrados na Tabela 9.

Na Tabela 9 verifica-se a boa repetibilidade das medições confirmada por um Coeficiente de Variação superior a 2% apenas em duas frequências (125 Hz e 200 Hz).

Comparando-se os valores médios do Índice de Redução Sonora (R) para a parede com conexões elásticas, nos três períodos (14 – 28 - 130 dias), observa-se que a secagem da parede, em geral, reduz um pouco sua eficiência ao isolamento sonoro, como ilustra a Figura 14. Existe uma pequena divergência, apenas nas frequências de 100 e 125 Hz.

Tabela 9 : Valores referentes ao “R” para 130 dias, com conexões elásticas.

<b>Frequência (Hz)</b>	<b>R (médio em dB)</b>	<b>Desvio Padrão (dB)</b>	<b>Coef. de Variação(%)</b>
<b>100</b>	31,8	0,28	0,9
<b>125</b>	35,9	1,83	5,1
<b>160</b>	38,7	0,57	1,5
<b>200</b>	44,1	2,10	4,8
<b>250</b>	42,0	0,79	1,9
<b>315</b>	40,0	0,50	1,2
<b>400</b>	37,4	0,65	1,7
<b>500</b>	34,4	0,33	1,0
<b>630</b>	31,5	0,31	1,0
<b>800</b>	36,2	0,38	1,0
<b>1000</b>	41,0	0,43	1,1
<b>1250</b>	43,7	0,33	0,8
<b>1600</b>	47,2	0,29	0,6
<b>2000</b>	49,9	0,34	0,7
<b>2500</b>	51,6	0,53	1,0
<b>3150</b>	53,4	0,12	0,2
<b>4000</b>	55,2	0,22	0,4
<b>5000</b>	53,7	0,37	0,7
<b>6300</b>	48,9	0,37	0,8
<b>8000</b>	49,7	0,57	1,1

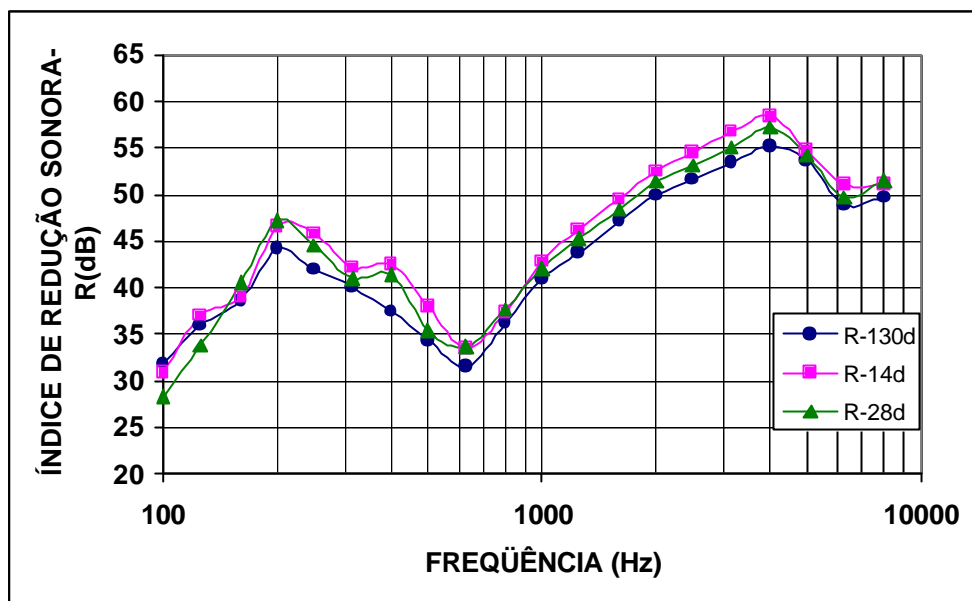


Figura 14 : Índice de Redução Sonora – Conexões elásticas – Valores médios.

#### b) PAREDE COM CONEXÕES RÍGIDAS

Após a substituição das conexões elásticas por conexões rígidas (argamassa no lugar de borracha e silicone) foram executados ensaios aos 14 e 28 dias. Os resultados estão na Figura 15.

Observa-se que há uma boa homogeneidade entre as curvas, exceto nas freqüências abaixo de 200 Hz. Essa freqüência, em especial, deixa caracterizado o comportamento diferenciado das curvas de 14 e 28 dias. Abaixo dos 200 Hz, existe uma maior variabilidade entre os dados referentes aos 14 dias do que naqueles representativos dos 28 dias, embora essa diferença entre os dois grupos de curvas seja pouco maior do que 5,0 dB.

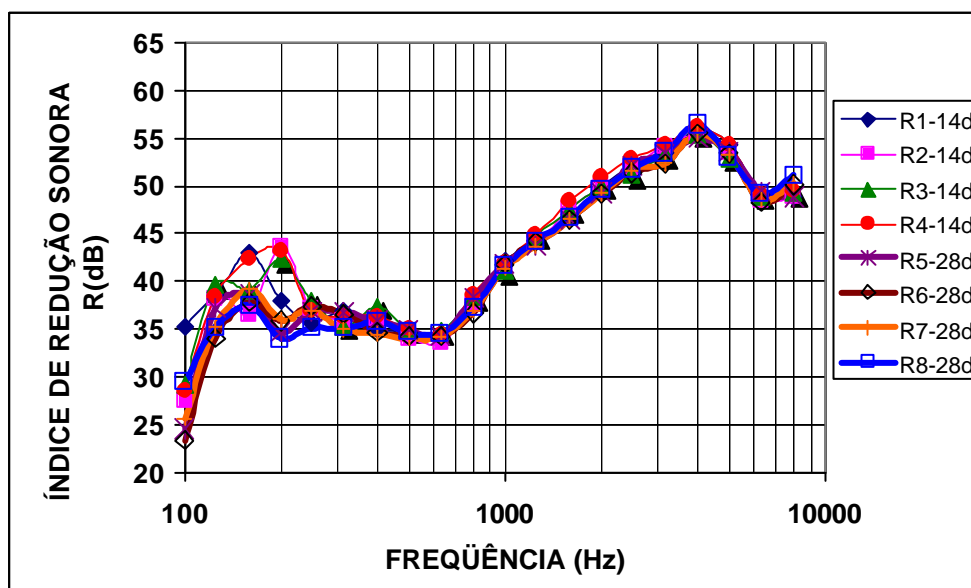


Figura 15 : Índice de Redução Sonora para parede com conexões rígidas – 14 e 28 dias

O Desvio Padrão e o Coeficiente de Variação dos dois grupos de medições estão mostrados na Figura 16, onde se pode visualizar que as maiores disparidades entre os valores localizam-se nas freqüências inferiores a 250 Hz.

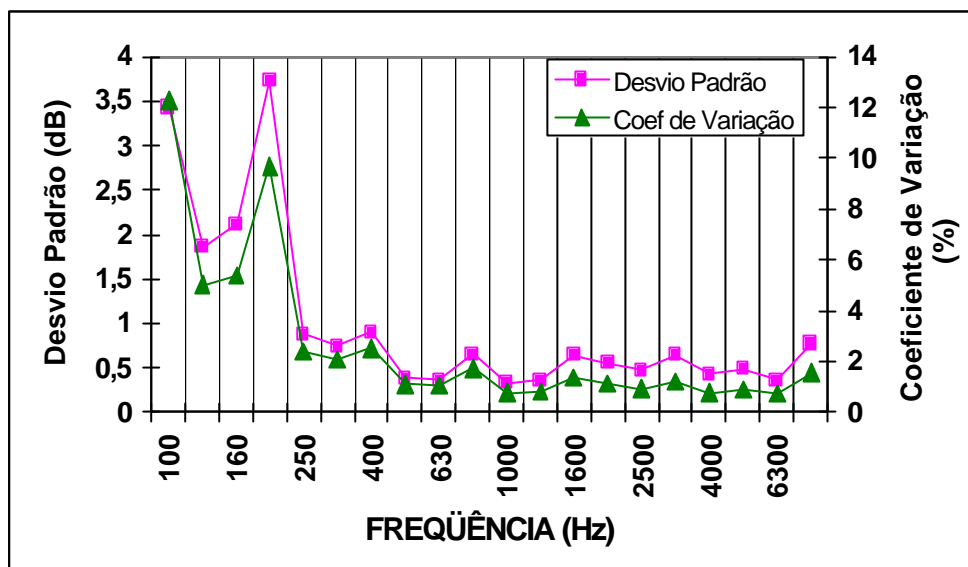


Figura 16 : Desvio Padrão e Coeficiente de Variação para paredes com conexões rígidas aos 14 e 28 dias.

#### c) ANÁLISE COMPARATIVA DOS DOIS CASOS (CONEXÕES ELÁSTICAS E RÍGIDAS)

A Figura 17 apresenta o Índice de Redução Sonora (R) médio resultante dos ensaios realizados com conexões elásticas aos 14, 28 e 130 dias e com conexões rígidas aos 14 e 28 dias. Utilizou-se para diferenciação no gráfico, as abreviaturas CB (Com Borracha) e SB (Sem Borracha).

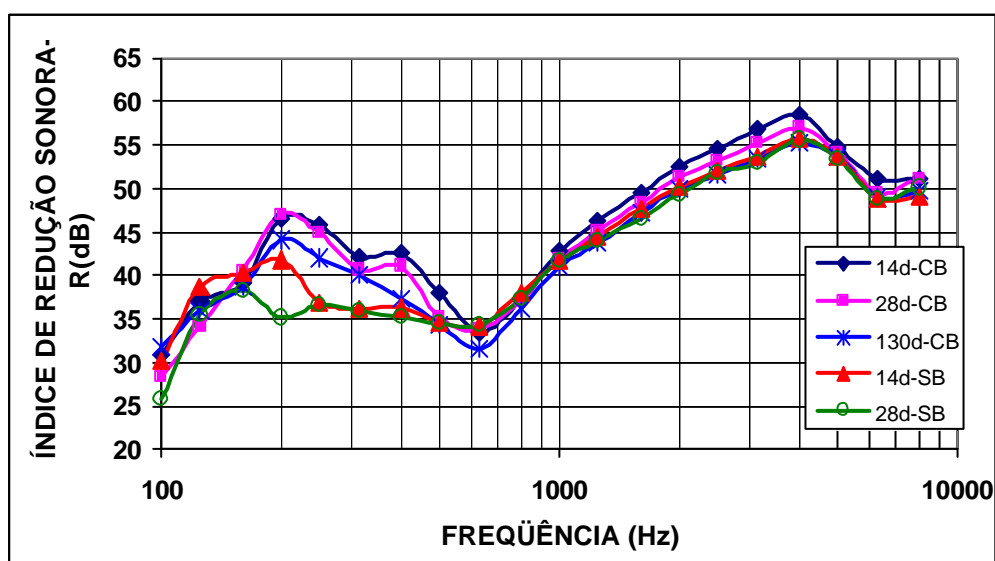


Figura 17 : Índice de Redução Sonora (R) médio para conexões elásticas (14d-CB, 28d-CB, 130d-CB) e rígidas (14d-SB, 28d- SB).

Observa-se que na faixa de freqüências de 160 a 500Hz há uma grande variação de resultados, especialmente ao comparar-se as curvas decorrentes de conexões rígidas com as oriundas de conexões elásticas. A substituição do conjunto borracha/silicone por argamassa ocasionou uma diminuição no Índice de Redução Sonora, a qual é mais significativa nessa faixa de freqüências.

Esse comportamento é coerente com os resultados obtidos no estudo interlaboratórios realizado entre onze institutos de pesquisa europeus para determinação das variações em medições de Índice de Redução Sonora, referidos por Schmitz & Méier (2000, p.124).

Gibbs & Gilford (1976, p. 273) enfatizam que: *“The influence of the edge fixings is important only below the critical frequency. Above this frequency all plates behave similarly to a plate which is simply supported.”*<sup>10</sup>

Outro fato que merece atenção é a divergência de comportamento das curvas relativas às conexões rígidas na freqüência de 200 Hz. Salienta-se que, conforme foi mostrado no item anterior, os maiores desvios padrão e coeficientes de variação estão nas freqüências de 100, 160 e 200 Hz, na curva referente às medições executadas aos 14 dias.

Osipov, Mees & Vermeir (1997, p. 287) enfatizam que a influência da geometria do sistema sala-parede-sala precisa ser considerada na avaliação da transmissão sonora em baixas freqüências. O mesmo pensamento é defendido por Schmitz & Méier (2000, p.124): *“The increased spread below 200Hz is caused in general by room and test wall dimensions. Additionally, the low modal density will lead to higher uncertainties in low frequencies.”*<sup>11</sup>

A divergência nas medições em freqüências inferiores a 200 Hz pode ser explicada, também, pela chamada “freqüência de corte” das Câmaras, que pode ser calculada pela Equação 70, conforme afirmam Vorländer (1998, p. 44) e Schroeder & Kuttruff (1962, p, 76), onde V é o volume da sala (m<sup>3</sup>) e T<sub>60</sub> é o Tempo de Reverberação (s).

$$f_s \approx 2000 * \sqrt{\frac{T_{60}}{V}} \quad \text{Equação 70}$$

Essa também chamada “freqüência de Schroeder” indica que, a partir dela, as dimensões da sala são grandes se comparadas ao comprimento de onda. Além disso, acima dessa freqüência os parâmetros estatísticos das curvas de resposta em freqüência, para todas as salas, são idênticos e dependem em sua maioria do Tempo de Reverberação. Para o caso em questão, resultou 244 Hz para a Câmara de Emissão e 237 Hz para a

<sup>10</sup> A influência da fixação das extremidades é importante somente abaixo da freqüência crítica. Acima dessa freqüência todas as placas comportam-se similarmente a uma placa simplesmente apoiada.

<sup>11</sup> O aumento da dispersão abaixo de 200 Hz é causado, em geral, pelas dimensões da sala e parede de teste. Adicionalmente, a baixa densidade modal levará a maiores incertezas em baixas freqüências.

Câmara de Recepção. Assim, os valores obtidos para frequências menores que 250 Hz sofreram essa influência.

Os ensaios realizados com a parede sob conexões elásticas possibilitam identificar com maior precisão a frequência crítica em 630 Hz. O emprego de conexões rígidas dificulta essa identificação, como salienta Craik (1996, p. 55): *“At  $f_c$  the sound reduction index will be less than at other frequencies giving a dip. Unfortunately, for masonry-type walls this dip is not always well pronounced and can be very difficult to identify.”*<sup>12</sup>

A partir da frequência de 4000 Hz, aparece um vale na Figura 17. Ele é previsto por Ljunggren (1990, p. 2341), o qual afirma que nas baixas e médias frequências os resultados para Perda de Transmissão não diferem muito dos obtidos pelo cálculo de placas finas. Nas altas frequências, no entanto, essa diferença torna-se importante, pela presença de pronunciados vales, devido às ressonâncias de espessura das chamadas ondas “p”. Ljunggren (1990, p. 2342) enfatiza que as outras ondas de ressonância da espessura (ondas “s”) não ocasionam vales, pois se deslocam na direção normal à parede.

O fato das medições, realizadas no Setor de Acústica/UFSM, terem sido executadas até 8000 Hz proporcionou a observação do primeiro vale decorrente das ressonâncias de espessura da parede, muito raramente demonstradas experimentalmente, tendo em vista que a faixa de frequências prevista na norma ISO 140-3 (1995, p.07) é de 100 a 5000 Hz. Autores, como Schmitz & Méier (2000, p. 111-132), ao pesquisarem até 5000 Hz, identificaram a tendência de queda da curva, sem localizar o ponto em que a mesma voltava a subir, o qual está mostrado na Figura 17.

Esse comportamento da curva em frequências maiores do que a frequência crítica é importante, devido à tendência do deslocamento desses pequenos vales na direção de frequências mais baixas (para uma região de maior sensibilidade da audição humana) quando a espessura da parede é aumentada.

## **5.2 DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS FÍSICO-MECÂNICOS E ACÚSTICOS DA PAREDE DE ALVENARIA**

O presente item apresenta a descrição de experimentos realizados com a finalidade de caracterizar uma parede de alvenaria de tijolos maciços cerâmicos. São mostrados os resultados obtidos e a análise dos mesmos.

Trabalhou-se visando determinar dois tipos de propriedades:

---

<sup>12</sup> Na  $f_c$  o Índice de Redução Sonora será menor que em outras frequências dando uma queda. Infelizmente, para paredes tipo alvenaria essa queda não é sempre bem pronunciada e pode ser muito difícil identificá-la.

- ? físico-mecânicas dos materiais (esses ensaios avaliaram os tijolos, a argamassa e as mini-paredes construídas especialmente para esse fim).
- ? vibro-acústicas da parede de alvenaria descrita no item 5.1.3 e, para um estudo comparativo, avaliou-se as paredes de concreto das Câmaras Reverberantes mostradas no item 5.1.1).

As atividades relativas a esse capítulo foram realizadas no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), na cidade de Santa Maria, no Rio Grande do Sul. Os ensaios físico-mecânicos aconteceram nos Setores de Alvenaria e Concreto, enquanto os demais foram executados no Setor de Termo-Acústica (LaTA). Para realização dos ensaios de vibração, utilizaram-se, também, equipamentos do Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

## **5.2.1 ENSAIOS FÍSICO-MECÂNICOS**

Os ensaios físico-mecânicos referem-se às propriedades dos elementos (tijolo e argamassa) e do conjunto (alvenaria). Os experimentos relativos à alvenaria foram realizados com o emprego de mini-paredes (60 cm de largura x 63 cm de altura), construídas com o mesmo traço de argamassa empregado na execução da parede e com a trabalhabilidade ajustada pelo mesmo pedreiro.

### **5.2.1.1 Propriedades do tijolo maciço cerâmico**

Analisando os resultados disponibilizados por Ferreira (2002 - antes da Defesa de sua Dissertação), foi possível conhecer os produtos das olarias da região de Santa Maria, em especial os tijolos maciços cerâmicos, o que orientou a escolha do tijolo a ser empregado.

Buscou-se utilizar aquele que apresentava dimensões compatíveis com a NBR 8041 (Tijolo maciço cerâmico para alvenaria – Forma e dimensões – Padronização), possuindo, ainda, maior resistência à compressão e menor variabilidade de resultados. O material foi adquirido e, uma vez entregue no laboratório, verificou-se a sua péssima qualidade, com muitas trincas e queima desigual, completamente diferente do produto encaminhado para os ensaios realizados por Ferreira (2002), que serviram de base para a análise inicial. Optou-se, então, pela rejeição desse lote, atendendo as prescrições da NBR 7170 (Tijolo maciço cerâmico para alvenaria – Especificação). Adquiriu-se, então, material de outro fabricante, após detalhada inspeção “*in loco*”.



Retiraram-se do lote, aleatoriamente, cinco tijolos para realizar os ensaios de caracterização físico-mecânica. Iniciou-se pela medição das três dimensões (comprimento, largura e altura), que precisa ser realizada duas vezes e nos terços extremos de cada tijolo, com o emprego de um paquímetro. Cada exemplar foi pesado seco (após três dias dentro das instalações do laboratório) para cálculo de sua densidade e úmido (imerso em água por 24 horas, quatro dias após sua chegada no laboratório) para determinação da absorção d'água, cuja média foi 8,5%.

Com a finalidade de atender a NBR 6460/83 (Tijolo maciço cerâmico para alvenaria – Verificação da resistência à compressão – Método de ensaio), cada tijolo foi cortado ao meio e suas metades unidas com argamassa. Executou-se o capeamento em ambas as faces com traço 1:1 (cimento e areia). Deixou-se secar ao ar por sete dias e, após a imersão em água por 24 horas, houve o rompimento dos corpos de prova para determinação da resistência à compressão dos tijolos.

Os resultados obtidos constituem a Tabela 10 e fotografias relativas aos ensaios são apresentadas no Apêndice 2.

Tabela 10 : Características dos tijolos maciços cerâmicos.

<b>Característica</b>	<b>Valor Médio</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Coefficiente de Variação [%]</b>
<b>Densidade [kg / m<sup>3</sup>]</b>	1846,64	63,41	3,4
<b>Comprimento [cm]</b>	22,61	1,31	0,6
<b>Largura [cm]</b>	10,59	1,45	1,4
<b>Altura [cm]</b>	5,13	1,35	2,6
<b>Absorção d'água [%]</b>	8,5	7,62	89,6
<b>Resistência à compressão [MPa]</b>	10,33	17,71	17,15

### 5.2.1.2 Propriedades da Argamassa

Utilizou-se argamassa com traço 1:1:6 (cimento: cal: areia) na construção da parede e das doze mini-paredes. Esse traço é um dos mais empregados nos estudos envolvendo argamassa e/ou alvenaria, conforme foi referido no Capítulo 02 da presente Tese.

O ensaio de abatimento resultou 22,95 cm. Foram moldados 18 corpos de prova cilíndricos (5,0 cm de diâmetro por 10 cm de altura), cujo rompimento, em grupos de seis, ocorreu aos sete, quatorze e vinte e oito dias, após a cura em câmara úmida. Empregou-se a norma NBR 7215. A resistência à compressão média está apresentada na Tabela 11 e o Apêndice 3 mostra fotografias dos ensaios.

Tabela 11 : Resistência à compressão da argamassa

<b>Idade (dias)</b>	<b>Resistência Média (MPa)</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Coefficiente de Variação [ % ]</b>
<b>07</b>	1,1065	0,0045	0,40
<b>14</b>	1,3455	0,0017	0,12
<b>28</b>	1,6428	0,0142	0,83

Procurou-se empregar uma argamassa com características similares a encontrada comumente em obras, por isso optou-se por não peneirar a areia e não controlar o fator água/cimento, deixando que a trabalhabilidade fosse ajustada pelo pedreiro.

### 5.2.1.3 Propriedades das Mini-paredes

Construíram-se, inicialmente, oito mini-paredes de dois tijolos e meio de largura, por nove fiadas de altura, com juntas de um centímetro de espessura, perfazendo dimensões médias de sessenta centímetros de largura por sessenta e três de altura. Essas dimensões foram definidas segundo orientação de Roman (2001).

As construções foram executadas sobre lona plástica colocada diretamente no piso do laboratório, que apresenta bom nivelamento. Tijolos soltos foram depositados sobre as mini-paredes para garantir um pequeno carregamento nas fiadas superiores, durante a secagem da argamassa.

Após vinte e oito dias, quatro mini-paredes foram ensaiadas à compressão com carregamento perpendicular às juntas de argamassa. As demais foram revestidas com chapisco (traço 1:3) e emboço alisado (traço 1:2:9). Essas mini-paredes revestidas foram ensaiadas mais tarde, mas seus resultados não foram utilizados no presente trabalho.

Precedendo a execução dos ensaios de resistência à compressão, houve o capeamento das mini-paredes na face superior e inferior com cimento e areia, em traço 1:1, a fim de garantir uma melhor distribuição de tensões.

Alguns dias após os primeiros ensaios, o mesmo procedimento foi adotado, na construção de outras quatro mini-paredes, executadas com a finalidade de permitir medições de tensão e deformação para carregamento paralelo às juntas de argamassa.

Fotografias das mini-paredes construídas no LMCC/UFSM e os respectivos ensaios estão no Apêndice 4.

As atividades realizadas em cada grupo de quatro mini-paredes ensaiadas podem ser assim divididas:

- ? Rompimento de uma mini-parede para determinação da provável carga resistida, tendo em vista a necessidade de retirada dos equipamentos de medição de deformações (base magnética e relógio comparador) antes da ruptura da parede;
- ? Aplicação de um ciclo de carga e descarga até 2,5 MPa para acomodação física das partículas na mini-parede.
- ? Quantificação simultânea das deformações horizontais e verticais, com os dispositivos de medição colocados nos dois lados da mini-parede.

Nas medições foram empregados relógios comparadores (popularmente conhecidos como extensômetros) digitais e analógicos presos magneticamente através de placas metálicas coladas nas mini-paredes, conforme mostram a Figura 18 e Figura 19.



Figura 18 : Medição das Deformações Verticais das Mini-paredes



Figura 19 : Medição das Deformações Horizontais das Mini-paredes

Através de ensaios de compressão axial, determinou-se a relação tensão-deformação. As mini-paredes receberam carregamento uniaxial contínuo para a determinação do módulo de elasticidade, resistência à compressão e coeficientes de Poisson nas direções perpendicular e paralela às juntas horizontais de argamassa. Curvas de tensão-deformação foram definidas utilizando-se regressão linear com o método dos mínimos quadrados (Soares, Farias & César, 1991, p.266). Os módulos de elasticidade tangentes são dados como a inclinação da reta tangente a cada uma das curvas, passando pela origem do sistema de eixos coordenados.

Os resultados dos módulos de elasticidade para tijolos sem revestimento constituem a Tabela 12, onde  $E_y$  e  $E_x$  são obtidos, respectivamente, com carregamento perpendicular e paralelo às juntas de argamassa.

Tabela 12 : Módulos de elasticidade da parede de tijolo maciço cerâmico.

Tipo de carregamento	Módulo de Elasticidade	Coefficiente de Variação
Perpendicular às juntas de argamassa	$E_y = 2,95 \times 10^9 \text{ N/m}^2$	17,35%
Paralelo às juntas de argamassa	$E_x = 1,89 \times 10^9 \text{ N/m}^2$	23,80%

Para fins de comparação de resultados, buscou-se efetuar medições através da utilização de ultrassom, baseando-se na disponibilidade de equipamento no LMCC/UFSC e em estudos realizados por Nesvijski & Cavalheiro (1999) e Lorenzi (2000). Aprofundando o estudo sobre o emprego do ultrassom em medições para a alvenaria e consultando pesquisadores da área (Prof<sup>o</sup> Dr Ivo Padaratz /UFSC, Prof<sup>o</sup> Dr Humberto Roman /UFSC e Prof<sup>o</sup> MSc Odilon Cavalheiro /UFSC) verificou-se que existe pouca credibilidade dos resultados, tendo em vista a heterogeneidade das paredes de alvenaria, devido aos seus diversos materiais constituintes. Abandonou-se, por isso, essa metodologia.

#### **5.2.1.4 Análise dos resultados**

Os resultados, obtidos nos ensaios físico-mecânicos realizados, visaram estabelecer uma ordem de grandeza real para a caracterização da parede em estudo, tendo em vista a necessidade de tais valores para a modelagem da mesma.

Optou-se, por isso, pelo emprego de procedimentos popularmente adotados nas obras em lugar dos tradicionalmente executados em laboratório. Isso influenciou os resultados.

A areia, por exemplo, não foi peneirada e o fator água/cimento não foi quantificado. Em decorrência disso, a resistência da argamassa apresentou um valor baixo, se comparado a outras executadas em laboratório, com o mesmo traço. Além disso, um corpo de prova de argamassa foi desconsiderado devido à presença de um pedaço de terra endurecida.

Observa-se, ainda, que a argamassa é a principal responsável pelas alterações no módulo de elasticidade da parede, pois ela é mais flexível que o tijolo e está confinada e submetida a um estado tri-axial de tensões, conforme detalhou Mohamad (1998).

Em relação ao tijolo, a simples análise visual identifica a diferença de constituição e queima habitualmente encontrada nesse tipo de material. Os resultados dos ensaios, no entanto, atenderam as expectativas. A densidade, por exemplo, alcançou valores médios e de variação situados na faixa obtida por Prudêncio Jr (1986, p.32) e citados no item 2.1.2.1 do Capítulo 02 da presente Tese.

A dificuldade na execução dos ensaios, para determinação dos módulos de elasticidade e coeficientes de Poisson, está ligada à falta de equipamentos e informações bibliográficas quanto aos procedimentos experimentais necessários.

Conforme demonstrado no Capítulo 02, não existem normas técnicas e são poucos os trabalhos que contemplam esse tipo de material. Um exemplo dos problemas, que podem ter influenciado os resultados, é a forma de fixação da chapa metálica sob a qual era colocado o suporte magnético que recebia o relógio comparador. A utilização de cola em

toda a superfície não permitia precisar o ponto a partir do qual deveria ser medido o comprimento "l", a ser empregado no cálculo da deformação. Utilizou-se como referência, por isso, o eixo do suporte magnético, que permanecia centralizado na chapa metálica.

É importante lembrar o que os valores dos Módulos de Elasticidade são influenciados pelo desenho da parede, pela resistência da unidade, pela resistência da argamassa e a trabalhabilidade, conforme enfatiza Somayaji (2001, p. 274).

Além dos valores para utilização no Capítulo 06 da presente Tese, calculou-se, também, o módulo de elasticidade longitudinal das mini-paredes a 40% da carga de ruptura, tendo em vista que a única bibliografia passível de comparação era o artigo de Cavalheiro (1994, p. 153), o qual refere somente os percentuais de 40% e 67%, mostrados no Capítulo 02. O resultado obtido foi 3044 MPa, localizando-se dentro do desvio padrão do citado trabalho, o qual menciona 2873 MPa, com 12,04% de coeficiente de variação.

As dificuldades na caracterização das propriedades da alvenaria são evidentes. Lourenço (1996, p. 11) ressalta a necessidade de que a alvenaria em análise possua tamanho suficiente para estar submetida a estados homogêneos de tensão e deformação. O mesmo autor (p.26) frisa, ainda, que a utilização de um modelo preciso só é possível com uma completa descrição dos materiais constituintes.

Por tudo isso, considera-se que os resultados experimentais obtidos atendem às necessidades da presente pesquisa. Recomenda-se, no entanto, que o emprego deles para outros fins, seja acompanhado de cuidadosa análise dos objetivos, procedimentos e resultados esperados, verificando-se a sua adaptabilidade, ou não, a outras utilizações.

## **5.2.2 DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE DECAIMENTO PARA PAREDE SOB EXCITAÇÃO DE IMPACTO**

As medições do tempo de decaimento da energia sonora na parede (também conhecido como Tempo de Reverberação da Parede -TR) foram realizadas para quantificar o amortecimento da mesma, sob excitação de uma batida com um martelo.

### **5.2.2.1 Descrição dos experimentos**

A realização das medições obedeceu às prescrições do Anexo E da Norma ISO 140-3 (*Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 3: Laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements*). Utilizaram-se, também, recomendações bibliográficas que estão citadas no decorrer desse item.

Inicialmente, estabeleceram-se os procedimentos e os equipamentos necessários. Os ensaios foram empreendidos na parede construída nas Câmaras de Transmissão do LaTA/UFSM, na cidade de Santa Maria/RS, com equipamentos pertencentes ao LVA/UFSC, localizado em Florianópolis/SC. Essa distância geográfica acentuou a necessidade de ensaios preliminares para ajuste dos equipamentos e procedimentos. Tais ensaios utilizaram uma parede de tijolo maciço cerâmico, semelhante ao objeto de estudo, pertencente ao prédio de um engenho de açúcar, construído pelo Setor de Cultura Popular do Museu Universitário, dentro da UFSC.

Nesse tipo de ensaio, excita-se a parede com um martelo e mede-se a aceleração em outro ponto, com o uso de um acelerômetro. O sinal é recebido num analisador, gravado e transportado ao computador para ser visualizado como o TR da parede, com o emprego de um programa computacional. A análise aconteceu em bandas de terços de oitava.

#### a) OS EQUIPAMENTOS

Nos ensaios realizados empregou-se:

- ? Martelo
- ? Acelerômetro (4378 da B&K)
- ? Analisador (*Dual Channel Real-Time Frequency Analyzer* - 2144 da B&K)
- ? Programa (*Building Acoustics Program* - 5305 da B&K)

O Anexo E da Norma ISO 140-3 recomenda que a massa do martelo deve ser aproximadamente igual a 100 cm<sup>2</sup> da parede excitada. Atendendo essa orientação, optou-se por adquirir um martelo com 1,5 Kg e revestir uma das faces de sua cabeça com borracha, conforme solicitação da mesma Norma. Não foram encontradas informações detalhadas sobre esse equipamento. Pesquisadores como Schimitz & Meier (2000, p. 113), por exemplo, utilizaram um martelo industrializado de 280g (Impact Hammer Type 8202, da B&K) para excitar uma parede com 440 Kg/m<sup>2</sup>. Craik & Barry (1992, p.142) afirmam, simplesmente, ter empregado um martelo com cabeça plástica.

O anexo E da ISO 140-3 e as demais bibliografias consultadas não identificam o acelerômetro empregado, por isso utilizou-se o tipo 4378 da B&K, mostrado na Figura 20.



Figura 20 : Acelerômetro 4378 da B&K

As dimensões (30mm de diâmetro por 38mm de altura) e o peso (175g) desse acelerômetro levaram a diversos testes para sua fixação numa parede de tijolos maciços cerâmicos. Depois de avaliar a colocação sobre uma placa metálica colada ou parafusada na parede, observou-se que o método de fixação habitual dos acelerômetros, com cera de abelha, seria suficiente, desde que a superfície do tijolo fosse levemente lixada e limpa.

O analisador empregado foi o *Dual Channel Real-time Frequency Analyzer* - tipo 2144 da B&K, Ele possui filtro digital, é portátil, sendo indicado para medições de acústica, eletroacústica e vibrações, com uma precisão semelhante a dos instrumentos de laboratório. Nele foram gravados os resultados (em disquetes) e, posteriormente, repassados a um programa num microcomputador.

O programa utilizado para a determinação do TR da parede foi o *Building Acoustics Program* tipo 5305 da B&K, que é recomendado para medições em campo e em laboratório. Ele calcula a isolamento a som aéreo e de impacto, tempo de reverberação e nível de ruído.

#### b) OS PROCEDIMENTOS

O Anexo E da Norma ISO 140-3 sugere que o TR deve ser calculado de uma curva de decaimento entre 5 dB e 20 dB abaixo do nível máximo. Destaca, ainda, que para uma parede típica (10 a 20 m<sup>2</sup>) é necessário o emprego da média de doze curvas (dois pontos de medição x três pontos de excitação x dois pontos por decaimento).

A fim de atender as determinações da referida norma, foram marcados, na parede construída no LaTA, sete pontos, dos quais dois destinavam-se a colocação do acelerômetro e os outros cinco eram pontos de excitação. Na marcação dos pontos evitou-se simetria (1/2, 1/3 e 1/4), a fim de que não fossem perdidas famílias inteiras de modos.

O Anexo E da Norma ISO 140-3 não menciona qualquer observação referente à distância entre o ponto de excitação e as posições do acelerômetro. Schmitz & Meier (2000, p.114) recomendam uma distância mínima de um metro, baseando-se em cálculos teóricos, em medições realizadas no PTB (*Physikalisch-Technische Bundesanstalt*) da Alemanha e em dados obtidos no texto "*Nordtest Method NT ACOU 090 (1994)*".

Optou-se, assim, por respeitar a distância mínima de um metro entre o acelerômetro e os pontos de batida do martelo.

A Figura 21 identifica os sete pontos marcados na parede, com destaque para o 5(A) e o 6(A), que receberam o acelerômetro, durante as medições. A fim de respeitar a distância mínima adotada, quando o acelerômetro estava em 5, os demais pontos eram utilizados para o impacto, exceto o 4. Para o acelerômetro em 6, não excitava-se o ponto 7.



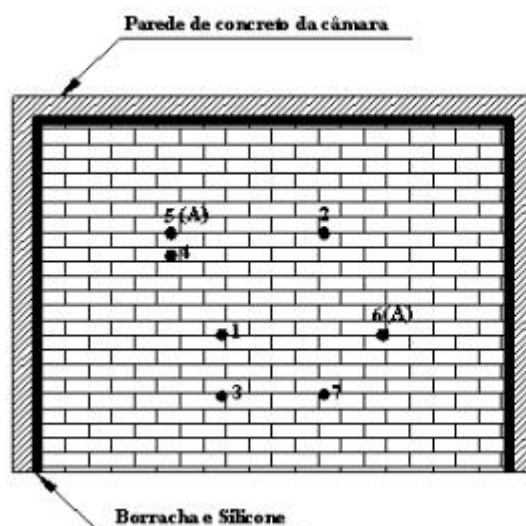


Figura 21 : Pontos de excitação e colocação do acelerômetro na parede construída.

A Tabela 13 apresenta as coordenadas dos pontos mostrados na Figura 21, segundo um sistema de eixos (X, Y) com origem no canto inferior esquerdo da parede.

Tabela 13 : Coordenadas dos pontos de excitação e colocação do acelerômetro.

Ponto	X	Y
1	1,60	1,27
2	2,50	2,20
3	1,60	0,70
4	1,14	2,00
5	1,14	2,20
6	3,02	1,27
7	2,50	0,72

Os ensaios foram realizados em três épocas distintas. A primeira quando a parede encontrava-se com borracha e silicone nas bordas. A segunda, quatorze dias após a substituição da borracha e silicone pela argamassa. A terceira, vinte e oito dias depois que as bordas estavam argamassadas.

Efetou-se o registro da temperatura e a umidade relativa do ar, durante os ensaios, nas duas Câmaras.

As medições para determinação do decaimento (TR) foram executadas nos dois lados da parede. A face voltada para a Câmara de Emissão recebeu a denominação de lado 1, enquanto a voltada para a Câmara de Recepção ficou sendo o lado 2.

Para obtenção de dados sobre as condições do laboratório e, ao mesmo tempo, avaliar a resposta dos procedimentos de medição para um material mais homogêneo (30 cm de

concreto armado), testaram-se duas paredes com dimensões bem distintas, visando observar se as alterações nos resultados seriam significativas. A primeira parede (na Câmara de Emissão) apresenta as seguintes dimensões: 3,67m de largura x 3,10m de altura. A segunda (na Câmara de Recepção), tem 5,55 m de largura e possui altura diferente: 3,20m (próximo à parede de alvenaria) e 3,10m na extremidade oposta.

### 5.2.2.2 Resultados obtidos

As medições foram realizadas nos dois lados da parede. O acelerômetro foi colocado, alternadamente, em dois pontos de cada lado, para medir a resposta. A excitação ocorreu em cinco pontos, que eram excitados duas vezes cada um (em cada lado da parede). Com isso, obteve-se um total de quarenta curvas. Optou-se por analisar doze curvas em cada lado (como recomenda a Norma), desconsiderando-se aquelas que estavam fora da tendência do grupo. A Figura 13 mostra a localização dos pontos.

Apresenta-se a seguir, para as três diferentes fases de ensaios (com borracha, sem borracha aos 14 dias e sem borracha aos 28 dias), os resultados médios individualizados para os quatro pontos de acelerômetro, bem como os gráficos referentes ao amortecimento, aos desvios padrões e aos coeficientes de variação das medições. Valores obtidos nos ensaios com paredes de concreto armado são apresentados em sub-item específico.

#### a) PAREDE COM CONEXÕES ELÁSTICAS (BORRACHA E SILICONE)

A Figura 22 mostra o tempo de decaimento médio da energia sonora na parede (TD), nos dois lados (L1 e L2), nas duas posições de acelerômetro (A5 e A6).

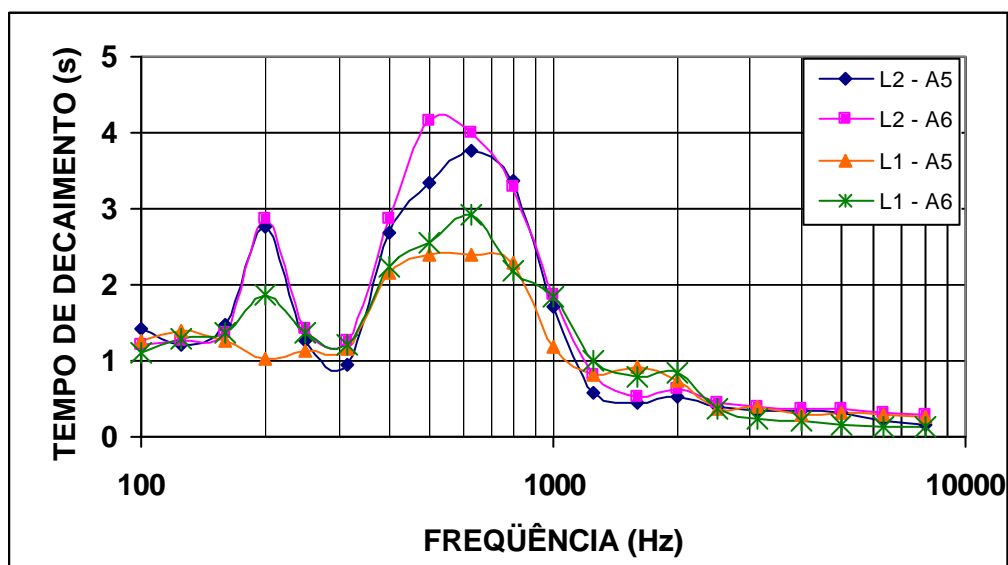


Figura 22 : TD na Alvenaria com conexões elásticas (borracha e silicone).

Observa-se uma boa concordância das duas curvas relativas a cada um dos lados (L1 ou L2), exceto em quatro frequências: 500 Hz para o lado 2 (voltado para a Câmara de Recepção) e 200 Hz, 630 Hz e 1000 Hz para o lado 1 (Câmara de Emissão). Em todas as situações, a diferença é menor do que 1,0 segundo. Analisando os mesmos pontos de acelerômetro, em lados opostos da parede, a diferença acentua-se, em especial na faixa de 400 a 800 Hz.

O desvio padrão dessas medições é mostrado na Figura 23, com destaque para frequências 200Hz e 500Hz, onde estão os maiores valores. A mesma Figura 23, apresenta o coeficiente de variação dessas medições, demonstrando que a razão entre o seu desvio padrão e sua média é sempre inferior a 40%.

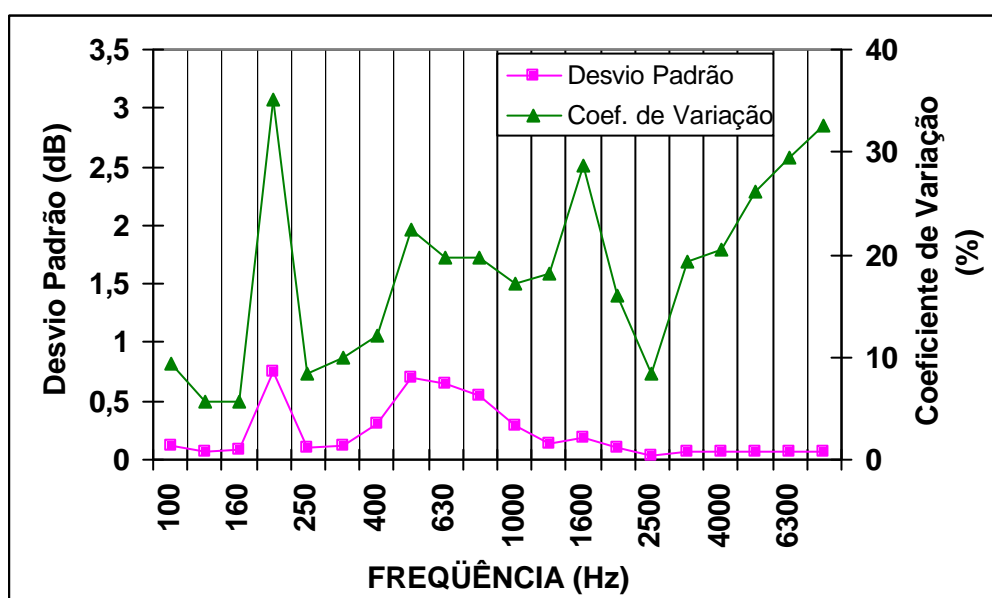


Figura 23 : Desvio Padrão e Coeficiente de Variação para medições das médias do TD na alvenaria com conexões elásticas (borracha e silicone).

O Fator de Perda Total (?), calculado pela Equação 71, a partir da média das medições de Tempo de Decaimento (TD), também conhecido como o TR (tempo de reverberação da parede) para os dois lados da parede, está apresentado na Figura 24. Observa-se a boa concordância das curvas e o crescimento acentuado dos valores em baixas frequências.

$$? ? \frac{2,2}{TR * f}$$

Equação 71

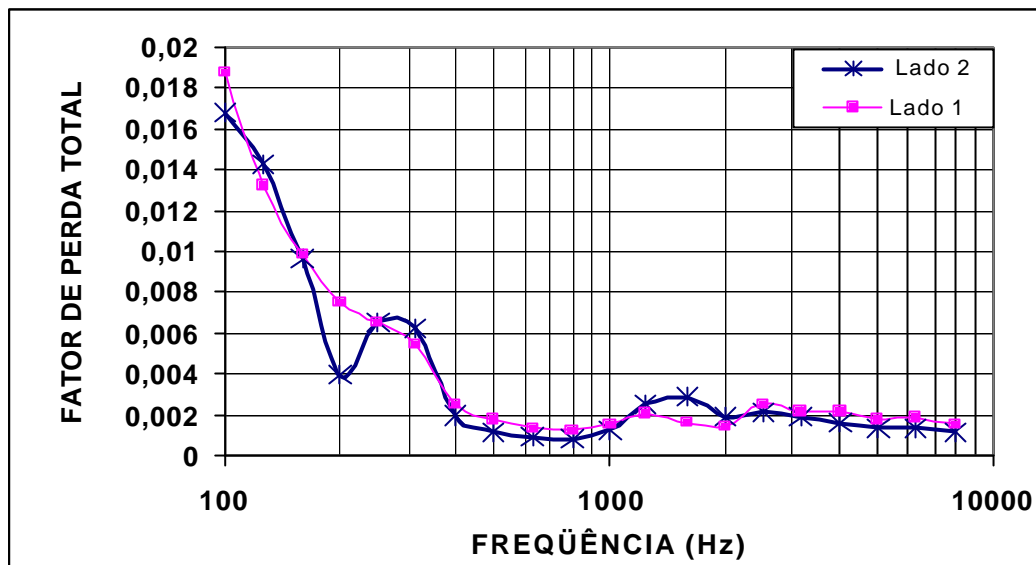


Figura 24 : Fator de Perda Total da alvenaria - conexões elásticas (borracha/silicone).

b) PAREDE COM CONEXÕES RÍGIDAS - 14 dias

A Figura 25 mostra os resultados médios para o Tempo de Decaimento da parede, nos dois lados (L1 e L2), nas duas posições de acelerômetro (A5 e A6).

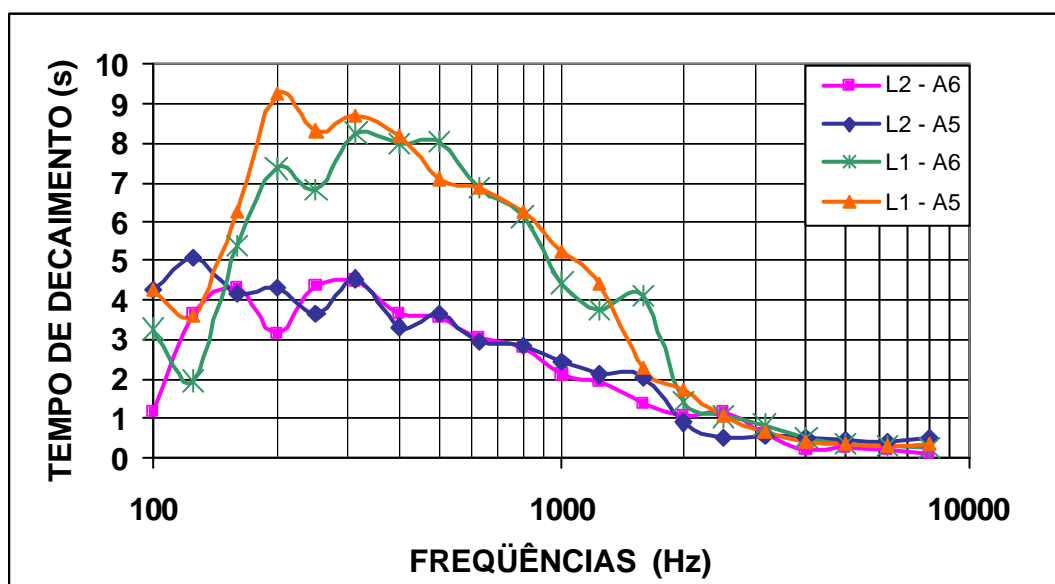


Figura 25 : TD da parede com conexões rígidas – 14 dias.

Observa-se uma concordância entre as medições executadas no mesmo lado da parede, nos dois pontos diferentes de acelerômetro. Está claro, no entanto, o comportamento distinto do TD medido para cada um dos lados da parede.

O desvio padrão dessas medições é mostrado na Figura 26, com destaque para as frequências de 200 Hz e 400 Hz, onde estão as maiores variações. Verifica-se, ainda, que os valores mais altos ocorrem na faixa de 200 a 1000 Hz. A partir de 2000 Hz os valores são bem inferiores e praticamente constantes.

O coeficiente de variação dessas medições também está na Figura 26, demonstrando que a razão entre o seu desvio padrão e sua média apresenta os maiores valores em 1600Hz e 8000Hz, permanecendo abaixo de 40% nas demais frequências.

O Fator de Perda Total, calculado pela Equação 71, a partir da média das medições de Tempo de Decaimento para os dois lados da parede, está apresentado na Figura 27. Observa-se a boa concordância das curvas referentes aos dois lados da parede e a permanência dos valores abaixo de 0,002 na maioria das frequências, superando-o somente em frequências inferiores a 200 Hz.

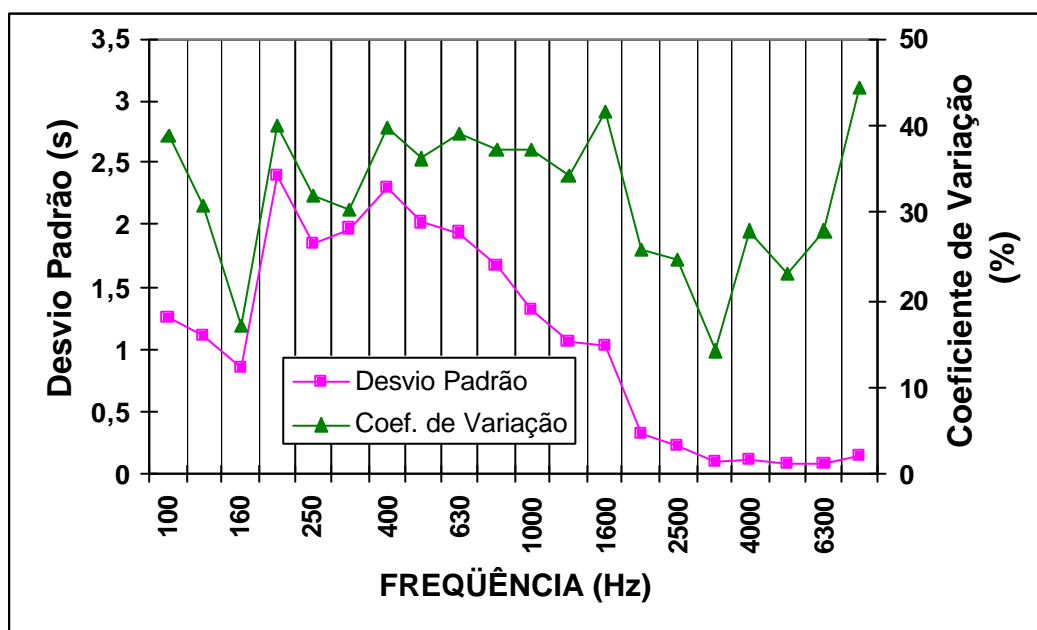


Figura 26 : Desvio Padrão e Coeficiente de Variação para as medições das médias de TD em alvenaria com conexões rígidas - 14 dias.

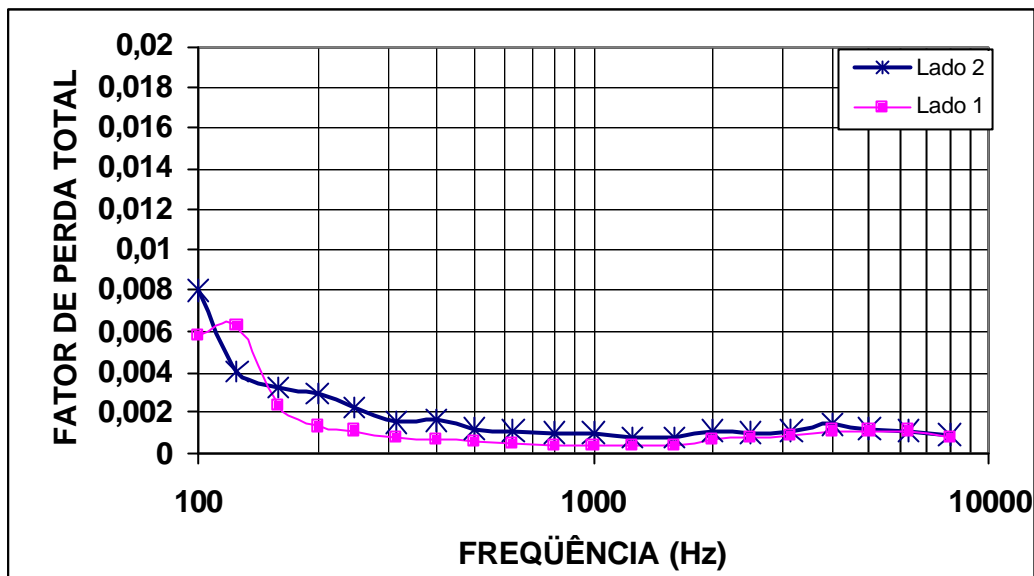


Figura 27 : Fator de Perda Total na alvenaria com conexões rígidas –14 dias

### c) PAREDE COM CONEXÕES RÍGIDAS - 28 dias

A Figura 28 mostra os resultados médios para o Tempo de Decaimento da parede, nos dois lados (L1 e L2), nas duas posições de acelerômetro (A5 e A6). Observa-se que a concordância entre os dados obtidos nos dois pontos de acelerômetro no Lado 2 (voltado para sala de recepção) foi muito boa, o mesmo não acontecendo no outro lado da parede, onde a diferença entre a resposta dos dois acelerômetros é mais acentuada nas frequências de 250 Hz e 400 Hz, chegando a 3,76 s e 3,20 s, respectivamente.

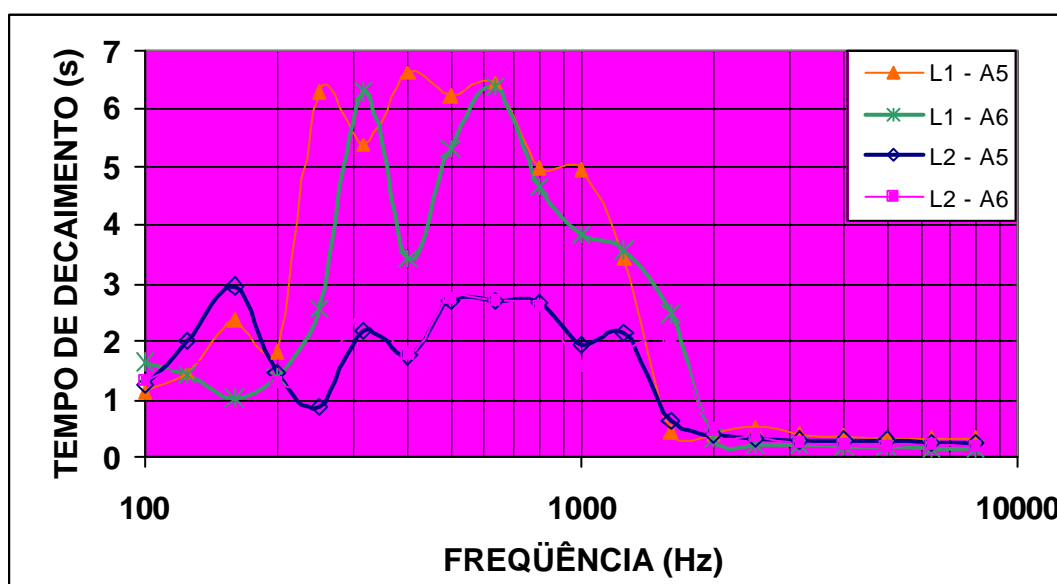


Figura 28 :TR na alvenaria com conexões rígidas – 28 dias

O desvio padrão dessas medições está na Figura 29, observando-se que em 200 Hz verifica-se uma depressão, ao contrário do que ocorreu nos gráficos com borracha e com argamassa aos 14 dias. A faixa de 250 a 1000 Hz continua sendo a mais elevada. A partir de 2000 Hz, novamente, os valores são bem pequenos e relativamente constantes.

Na mesma Figura 29 está o coeficiente de variação dessas medições, cujo valor maior está acima de 80% e se refere à frequência de 250Hz.

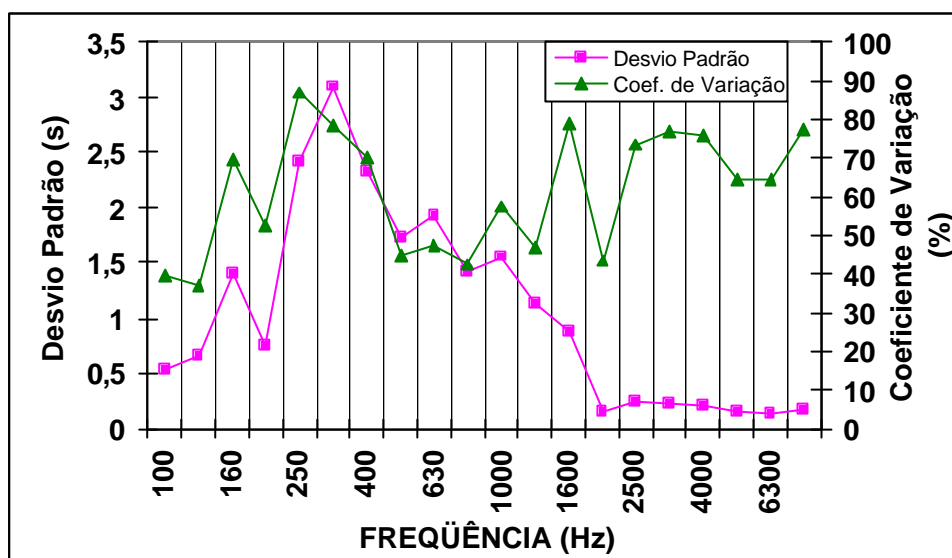


Figura 29 : Desvio Padrão e Coeficiente de Variação para as medições das médias de TD em alvenaria com conexões rígidas — 28 dias.

O Fator de Perda Total, calculado pela Equação 71 a partir da média das medições de TD para os dois lados da parede, constitui a Figura 30. Pode ser observada uma boa concordância das curvas referentes aos dois lados da parede. Os valores, exceto em freqüências inferiores a 250 Hz, localizam-se abaixo de 0,004.

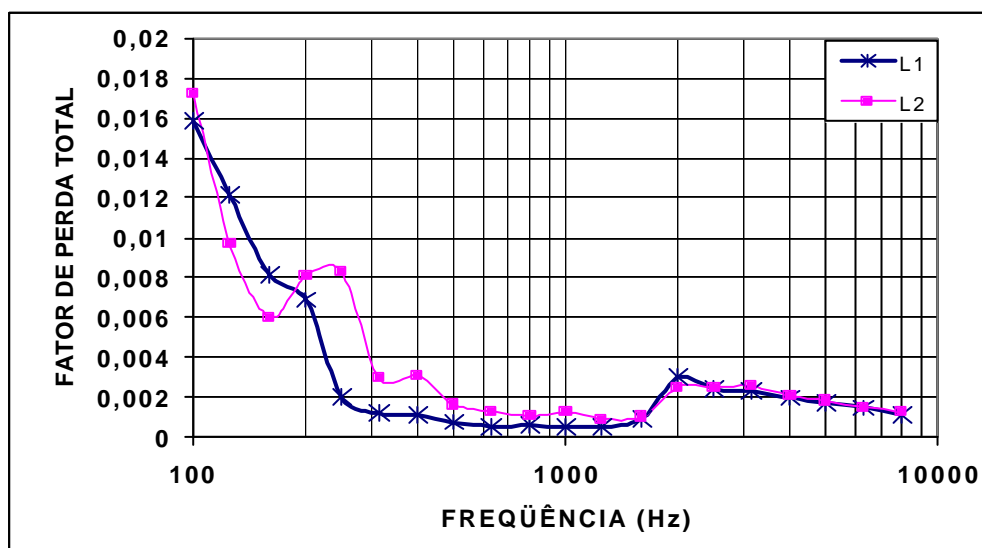


Figura 30 : Fator de Perda Total na alvenaria com conexões rígidas – 28 dias.

#### d) PAREDES DE CONCRETO

Na parede de concreto da Câmara de Emissão, que apresenta menores dimensões, totalizando  $11,38 \text{ m}^2$ , foram marcados seis pontos de medição. Definiram-se os pontos 02(A) e 06(A) para a colocação do acelerômetro. A Figura 31 apresenta a localização desses pontos e a Tabela 14 mostra as suas respectivas coordenadas, segundo um sistema de eixos (X, Y) com origem no canto inferior esquerdo da parede.

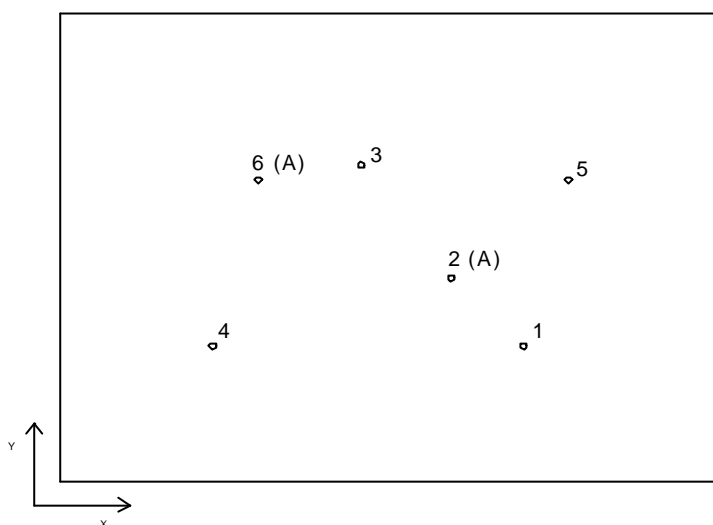


Figura 31 : Pontos de medição na parede de concreto da Câmara de Emissão.

Tabela 14 : Coordenadas dos pontos de excitação e colocação do acelerômetro.

Ponto	X	Y
1	2,57	0,90
2	2,17	1,35
3	1,67	2,10
4	0,85	0,90
5	2,82	2,00
6	1,10	2,00

Na parede da Câmara de Recepção com maiores dimensões (área de  $17,48 \text{ m}^2$ ), os pontos definidos para receberem o acelerômetro foram os de número 01(A) e 05(A). A localização dos pontos está na Figura 32, cujas coordenadas, referidas a um sistema de eixos (X, Y) com origem no canto inferior esquerdo da parede, constituem a Tabela 15.



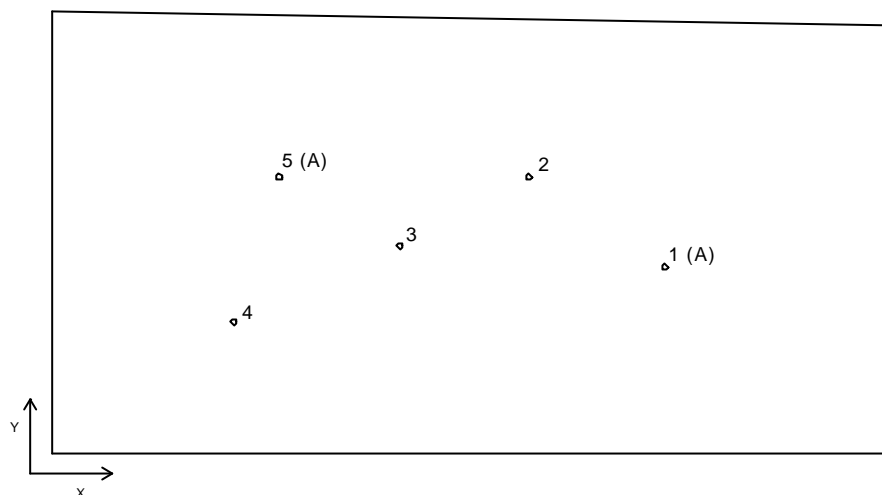


Figura 32 : Pontos de medição na parede de concreto da Câmara de Recepção.

Tabela 15 : Coordenadas dos pontos de excitação e colocação do acelerômetro.

Ponto	X	Y
1	2,57	0,90
2	2,17	1,35
3	1,67	2,10
4	0,85	0,90
5	2,82	2,00
6	1,10	2,00

Na Figura 33 estão curvas representativas do Tempo de Decaimento (TD) medido nas duas posições de acelerômetro em cada uma das diferentes Câmaras Reverberantes. Verifica-se uma boa concordância, em especial para frequências maiores do que 400 Hz. As dimensões das paredes causam uma influência mais significativa em baixas frequências.

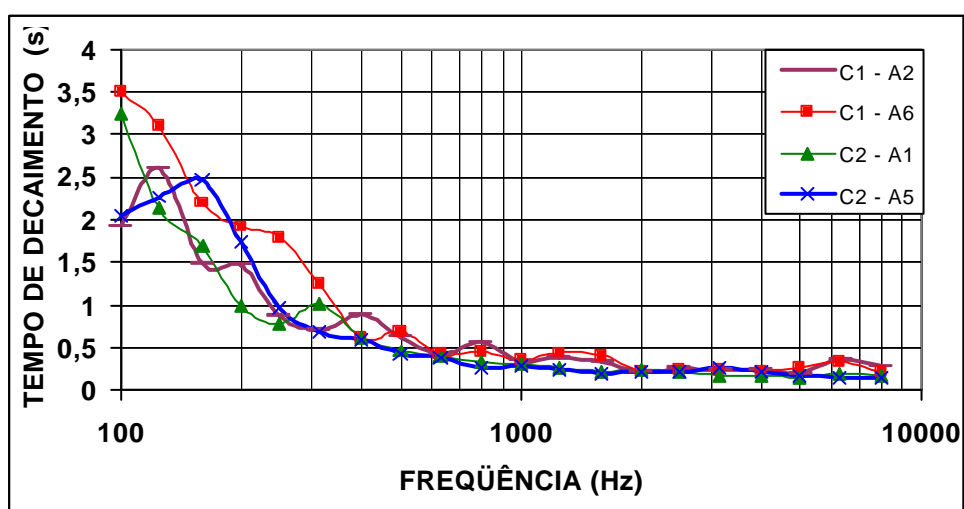


Figura 33 : TD no concreto - Câmaras Reverberantes de Emissão (C1) e Recepção (C2) para duas posições de acelerômetro.

Pode ser observado na Figura 34 que, exceto para as frequências abaixo de 315 Hz, o desvio padrão das medições das médias de TD, para os dois pontos de acelerômetro, nas duas paredes de concreto, resultou valores inferiores a 0,2. A mesma figura contém o Coeficiente de Variação dessas medições, o qual situa-se num patamar inferior a 35%, com exceção da frequência de 250 Hz, que resultou 37%.

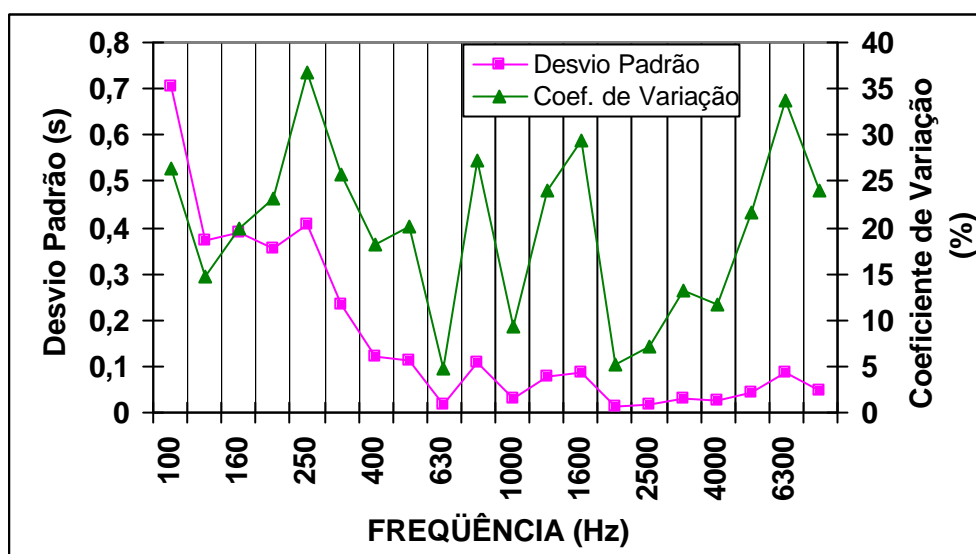


Figura 34 : Desvio Padrão e Coeficiente de Variação do TD para paredes de concreto.

O Fator de Perda Total, calculado pela Equação 71 a partir da média das medições de TD para as duas paredes de concreto, está mostrado na Figura 35.

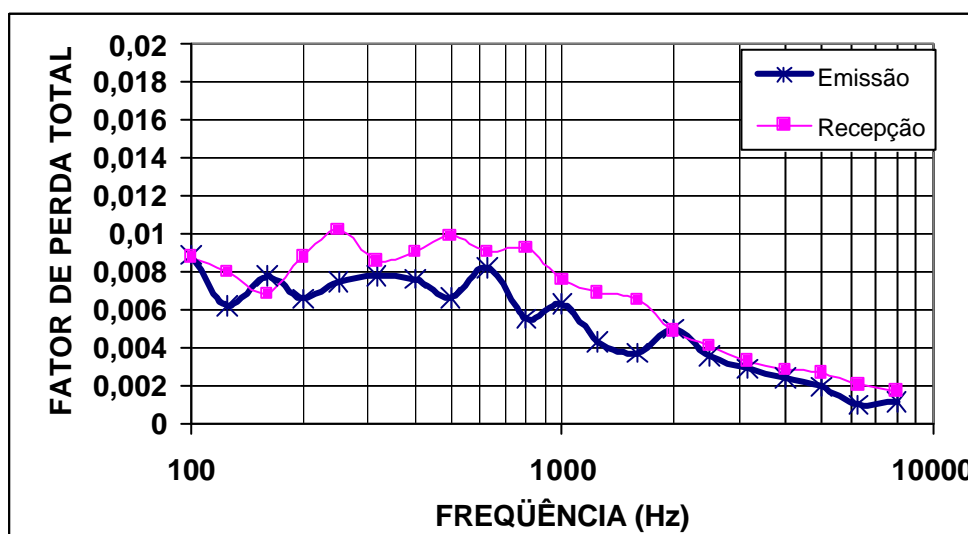


Figura 35 : Fator de Perda Total em paredes de concreto (Câmaras Reverberantes de Emissão e Recepção).

Observa-se que o Fator de Perda Total nas duas paredes de concreto, apesar da acentuada variação de dimensões entre elas, é muito semelhante e inferior a 0,01 em praticamente todas as frequências.

### 5.2.2.3 Análise Global dos Resultados

A análise global dos resultados compreende a avaliação comparativa da resposta da parede de tijolo maciço cerâmico nas duas condições estudadas: com junções elásticas (borracha e silicone) e com junções rígidas (argamassa aos 14 dias e aos 28 dias).

Essas comparações se referem às próprias medições executadas para a alvenaria e o concreto, bem como às referências bibliográficas encontradas.

Os ensaios foram realizados no período de novembro a maio. As condições de temperatura e umidade relativa do ar foram verificadas para todas as medições. Os valores médios são apresentados na Tabela 16. Salienta-se que as medições nas paredes de concreto das Câmaras Reverberantes de Emissão e Recepção ocorreram nos meses de março e maio, respectivamente.

Tabela 16 : Valores médios da temperatura e umidade relativa durante os ensaios.

Parede	Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)
Alvenaria com Borracha e silicone	27,3	76,5
Alvenaria: Argamassa – 14 dias	23,4	83
Alvenaria: Argamassa – 28 dias	20,1	85
Concreto: Câmara de Emissão	26,7	77
Concreto: Câmara de Recepção	20,1	85

Constatou-se uma variação pequena nos valores da temperatura e umidade relativa do ar, durante todo o período de medições, com um acréscimo máximo de 7,2 °C e de 8,5%.

O objetivo dessa medição foi determinar o Tempo de Decaimento (TD) da energia sonora da parede, também conhecido como Tempo de Reverberação (TR), a partir do qual pode-se calcular o Fator de Perda Total da mesma.

Duas questões precisam ser analisadas cuidadosamente. A primeira é a excitação com martelo em diversos pontos nos dois lados da parede. A segunda refere-se ao acelerômetro empregado nas medições.

O ensaio foi executado nas duas faces da parede, porque a alvenaria é um material composto, ortotrópico e de espessura razoável (10,6 cm). Observou-se a existência real de um comportamento diferenciado nos dois lados da parede, independente do tipo de junção (elástica ou rígida). Essa diferença, no entanto, acentua-se com o emprego da argamassa em substituição à borracha, em especial aos 14 dias, conforme pode ser visto na Figura 36. Essa figura apresenta o TD médio final em cada uma das três fases de medição (CB – com borracha; SB - sem borracha para 14 e 28 dias).

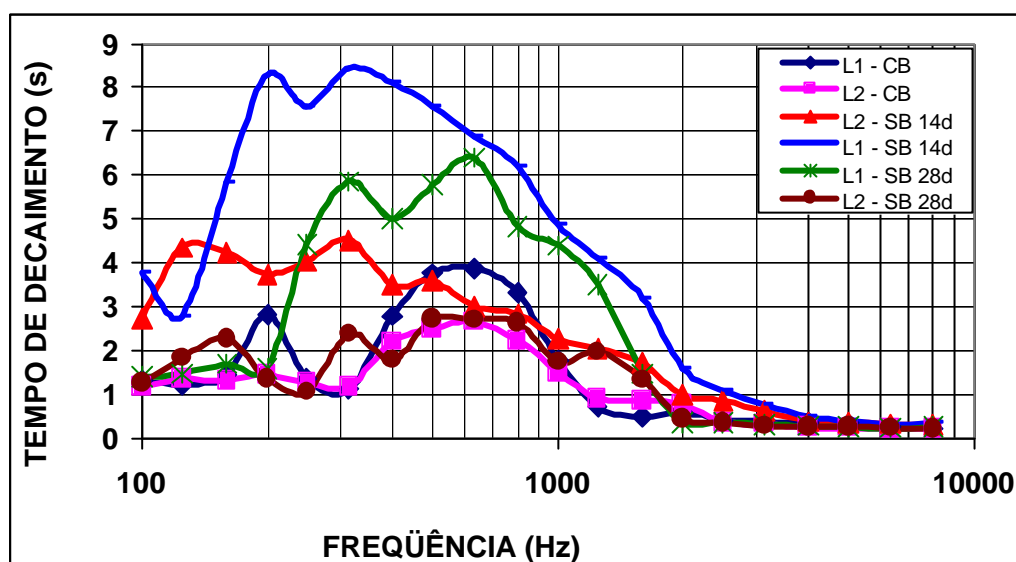


Figura 36 : TD para os dois lados da parede de alvenaria sob as três condições estudadas.

Considera-se que a diferença dos valores medidos, nos dois lados da parede, resulta de fatores como a impossibilidade de controle da energia de vibração introduzida pelo martelo na parede.

Destaca-se a ausência de detalhes técnicos referentes a esse tipo de ensaio, quer em Normas Técnicas ou em bibliografia. A especificação, por exemplo, do tipo de acelerômetro a ser empregado para ensaios em paredes de alvenaria ou concreto, bem como a possibilidade de construção de artefatos que auxiliem na determinação da energia a ser aplicada na batida, ajudariam a minorar tais problemas. A simples colocação de uma célula de força necessita ser cuidadosa, devido ao peso do martelo empregado.

A Figura 37 resume o comportamento obtido para cada uma das condições de fixação das extremidades estudadas, a partir da consideração de um valor médio entre a resposta do lado da Emissão e da Recepção. Isso permite uma avaliação individual e comparativa.

Conforme foi destacado no item 5.2.2.2, para a curva representativa da junção com borracha, existe uma faixa de freqüências (entre 400 Hz e 800 Hz) onde a resposta da parede apresentou um valor de TD bem maior que as demais. Outro fator de destaque é a freqüência de 200 Hz, onde também se detecta um pico. Observa-se na Figura 37 que a curva representativa da parede com argamassa aos 28 dias apresenta comportamento semelhante ao daquela com borracha, traduzindo-se numa resposta deslocada, como se houvesse uma ampliação dessa faixa, passando a ser de 250 Hz a 1250 Hz. O pico, que existia em 200 Hz na curva referente às bordas com borracha, aparece em 160 Hz, para a SB 28 dias. No caso da parede com argamassa aos 14 dias, os valores medidos mostram um TD bem mais alto, com destaque para a freqüência de 315 Hz. Nas altas freqüências, a partir de 2000 Hz, é acentuada a concordância dos valores nas três situações estudadas.

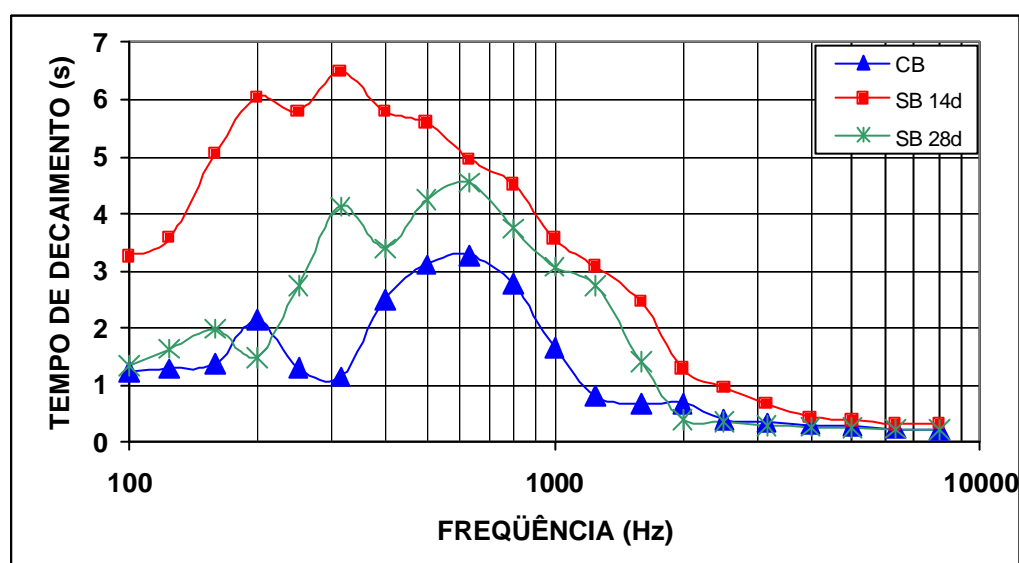


Figura 37 : TD final para alvenaria nas três situações estudadas.

Acredita-se que o comportamento da parede aos 14 dias, com um TD alto em baixas freqüências, deve-se ao fato da parede apresentar-se mais livre devido à argamassa estar apenas iniciando o processo de secagem. Com o passar do tempo (28 dias) a curva aproximou-se do desempenho da parede com a borracha. É interessante lembrar que a borracha possuía apenas 5 milímetros de espessura, por isso atendia ao objetivo de impedir o acoplamento da parede em estudo com as laterais, mas para solicitações no sentido da espessura (como foram as batidas com o martelo) ela não representava influência. Portanto, a parede manteve-se fixada de forma mais firme às laterais quando estava com borracha e silicone (130 dias), do que com 14 dias de argamassa. A resposta da argamassa já se mostrou mais efetiva aos 28 dias.

Não foram encontradas referências bibliográficas com resultados sobre TD (ou TR) de paredes semelhantes para um estudo comparativo.

O Fator de Perda Total da parede em estudo é, portanto, a resultante de 24 curvas (doze para cada lado). Observou-se, nos itens anteriores, a perfeita concordância entre os resultados obtidos nos dois lados de cada parede, independentemente do tipo de junção e do tempo de secagem da argamassa. Apresenta-se, por isso, na Figura 38, um gráfico único com o amortecimento da parede para as três situações analisadas.

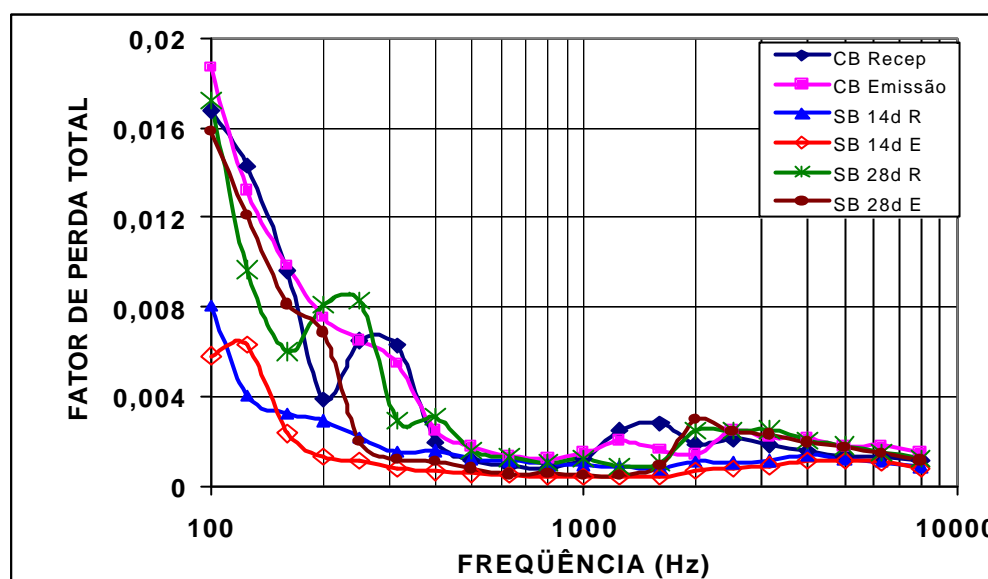


Figura 38 : Fator de Perda Total da parede de alvenaria para as três situações em estudo (CB – com borracha; SB – sem borracha aos 14 e 28 dias)

A análise da Figura 38 comprova uma grande concordância de resultados, enfatizando que, acima de 400 Hz, o Fator de Perda Total da parede de tijolo maciço cerâmico é inferior a 0,004 para todas as condições estudadas. Esse Fator de Perda Total situa-se acima de 0,01 apenas para as frequências de 100 Hz e 125 Hz, somente para quatro das seis curvas visualizadas.

Conforme foi citado anteriormente, devido à sensibilidade do acelerômetro, acredita-se que a partir de 2000 Hz os valores obtidos para o Fator de Perda Total da parede em estudo não são confiáveis, pois mediram ruídos espúrios.

Além disso, essa resposta encontrada experimentalmente é significativamente inferior aos valores citados em bibliografias. Craik (1996, p.09) recomenda o emprego da Equação 72, enquanto Schmitz & Meier (2000, p. 119) apontam a Equação 73.

$$\alpha_2 = \frac{1}{\sqrt{f}} = 0,015$$

Equação 72

$$\alpha_{ref} = 0,01 = \frac{0,3}{\sqrt{f}}$$

Equação 73

A Figura 39 mostra os valores experimentais (com e sem borracha) e os originados das duas equações acima citadas. Craik (1996, p.09) exemplifica, em 500 Hz, o valor de  $5,97 \times 10^{-2}$  para o Fator de Perda Total em estruturas tipo alvenaria. As medições apontaram, nessa frequência, índices inferiores a  $1,01 \times 10^{-3}$ , ou seja, praticamente 60 vezes menores que os indicados. Essa acentuada diferença é verificada mesmo nas medições executadas em paredes de concreto (30 cm de espessura e áreas de 11,3 m<sup>2</sup> e 17,48 m<sup>2</sup>), cujos valores estão na Figura 35, no item 5.2.2.2, onde o máximo para 500 Hz é  $9,9 \times 10^{-3}$ .

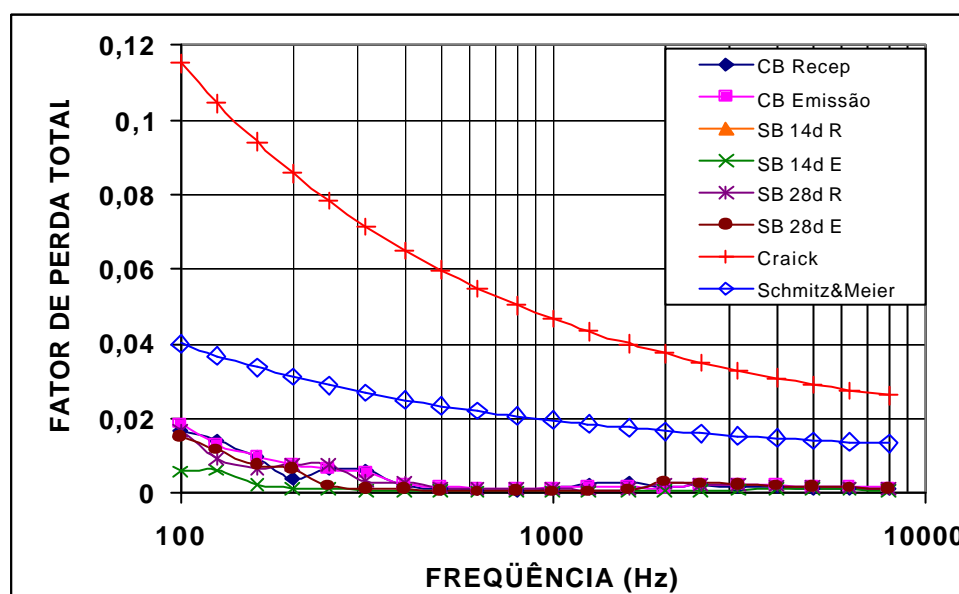


Figura 39 : Fator de Perda Total experimental e bibliográfico para alvenaria.

A Tabela 17 e a Figura 40 mostram os valores empregados no Capítulo 6 do presente trabalho, que avalia o Índice de Redução Sonora (R) da parede de alvenaria de tijolo maciço cerâmico. São apresentados valores médios para alvenaria com bordas com borracha (CB) e sem borracha (SB).

Tabela 17 : Fator de Perda Total da alvenaria empregado no Capítulo 6.

Frequência(Hz)	Com Borracha	Sem Borracha
100	0,017738	0,011744
125	0,01375	0,008032
160	0,00974	0,004939
200	0,005714	0,004812
250	0,006512	0,003412
315	0,005883	0,001625
400	0,002228	0,001612
500	0,001477	0,001048
630	0,001116	0,000877
800	0,001028	0,000756
1000	0,001374	0,000797
1250	0,002284	0,00067
1600	0,002224	0,000802
2000	0,001667	0,001827
2500	0,002304	0,001696
3150	0,002023	0,001729
4000	0,001864	0,001645
5000	0,001551	0,001472
6300	0,001573	0,001293
8000	0,00136	0,001031

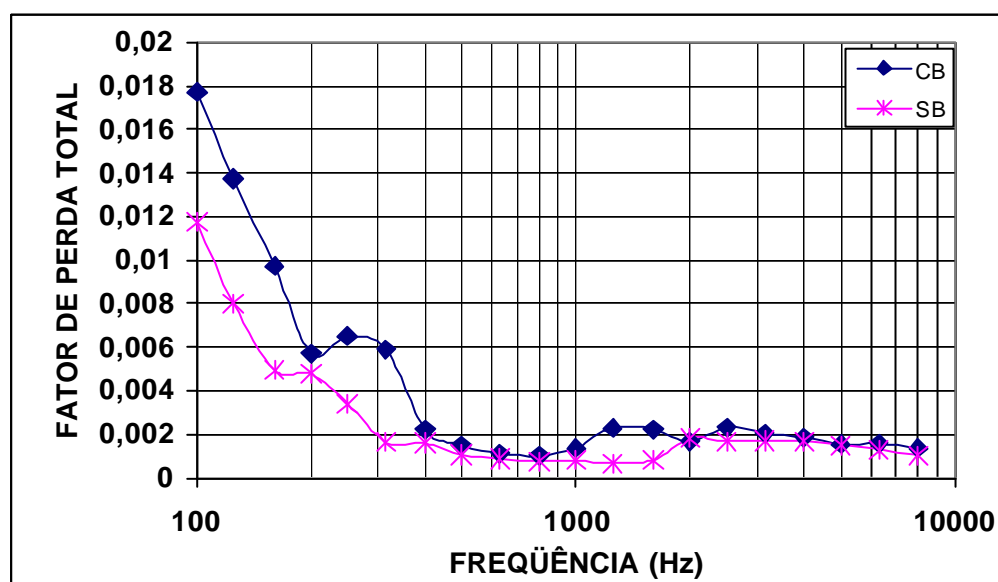


Figura 40 : Fator de Perda Total da alvenaria empregado no Capítulo 6.

Craik (1996, p.09) recomenda a utilização da escala em dB para descrever os fatores de perda. A referência recomendada é  $10^{-12}$ . Utilizando-se a Equação 74, construiu-se a Figura 41, onde o Fator de Perda Total da parede de alvenaria de tijolo maciço cerâmico é mostrado em escala decibel.



$$L_p(\text{dB}) = 10 \log \frac{P}{10^{-12}}$$

Equação 74

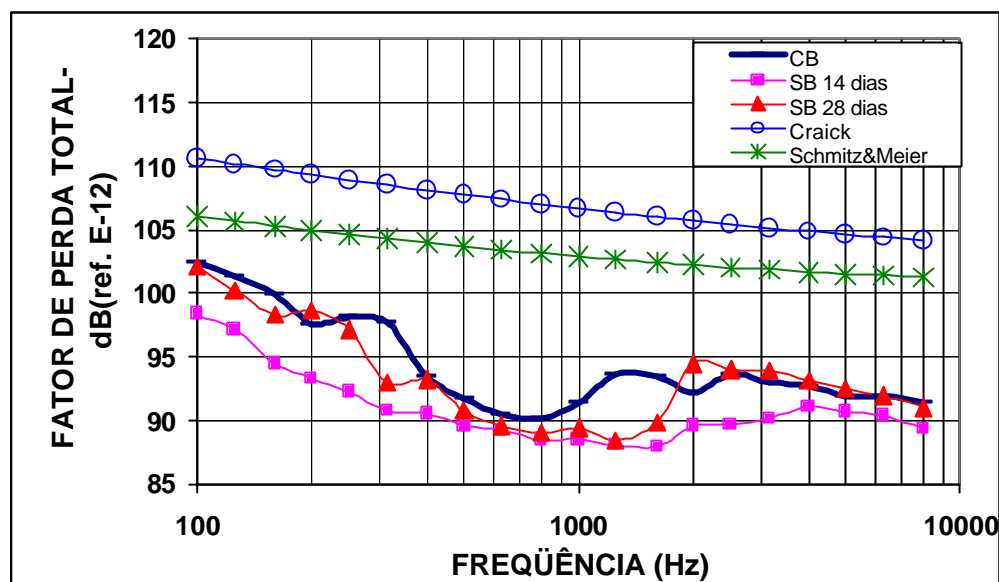


Figura 41 : Fator de Perda Total em dB para a parede estudada.

Com a apresentação dos valores em escala dB observa-se, mais claramente, que a performance da parede com borracha é a mais próxima das curvas teóricas. Visualiza-se, também, a existência de um comportamento diferenciado na região onde se situa a frequência crítica de coincidência da parede (630 Hz).

O Apêndice 5 apresenta fotos dos ensaios analisados no presente item, realizados nas Câmaras de Transmissão Sonora do LMCC/CT/UFSM.

### 5.2.3 Determinação da resposta em frequência para parede sob excitação acústica

O comportamento vibracional da parede, decorrente de uma excitação com ruído aéreo, foi avaliado com a finalidade de localizar as frequências que possuem maior amplitude na resposta. Isso ocorre quando a frequência de excitação coincide com a frequência natural da parede.

Empregou-se a mesma fonte geradora (B&K tipo 4224) utilizada nos ensaios para determinação do Índice de Redução Sonora (R), que é o objeto de estudo no Capítulo 5. Trabalhou-se com ruído rosa (definido no Capítulo 1) gerado em faixas de terços de oitava.

### 5.2.3.1 Descrição dos experimentos

Com o acelerômetro localizado nos pontos 5(A) e 6(A) descritos no item 5.2.2.1, mediu-se a aceleração, a partir da qual obteve-se o Nível de Aceleração em dB (ref.  $10^{-7}$  m/s<sup>2</sup>).

Utilizou-se dois pontos de medição no lado 1 (parede voltada para a Câmara de Emissão) e mais dois no outro lado da parede (lado 2, voltado para a Câmara de Recepção).

A fonte geradora permaneceu na mesma posição para as medições realizadas em ambos os lados. Ela estava voltada para o canto oposto à parede de tijolos maciços cerâmicos – objeto de estudo, a fim de excitar o maior número de modos da sala. Ficou localizada a um metro de um canto, formado por paredes de concreto da Câmara de Emissão.

Esses ensaios ocorreram em três épocas distintas, como os descritos no item 5.1.3. A primeira, com a parede apresentando borracha e silicone nas bordas. A segunda e a terceira, respectivamente, após 14 e 28 dias da colocação da argamassa nas bordas laterais e superior da parede.

Efetuuou-se o registro da temperatura e da umidade relativa do ar, durante os ensaios, nas duas Câmaras.

#### a) OS EQUIPAMENTOS

Para esses ensaios empregaram-se alguns dos equipamentos descritos no item 5.1.4.1, quais sejam:

- ? Acelerômetro (*type 4378* da B&K)
- ? Analisador (*Dual Channel Real-Time Frequency Analyzer -type 2144* da B&K)
- ? Programa (*Building Acoustics Program tipo 5305* da B&K)
- ? Fonte geradora (*Sound Source - type 4224* da B&K)
- ? Analisador (*Building Acoustics Analyzer-type 4418* da B&K)

#### b) OS PROCEDIMENTOS

O ruído aéreo foi gerado na Câmara de Emissão pelo conjunto 4418/4224. A aceleração da vibração na parede foi captada pelo acelerômetro e transmitida ao analisador 4224 para gravação do sinal em mídia magnética (disquete). A seguir, os dados foram transferidos para o computador onde, através do programa 5305, obteve-se o Nível de Aceleração da parede em dB.

O intervalo de tempo entre as faixas de 1/3 de oitava geradas, com a utilização do conjunto 4418/4224, foi de 16 segundos, ou seja, o mesmo intervalo de tempo empregado nas medições de Índice de Redução Sonora (R). Cada faixa era gravada separadamente, por isso o set-up do analisador de dois canais tipo 2144 esteve ajustado para um espectro com 10 segundos de tempo de média.

### 5.2.3.2 Resultados obtidos

Apresenta-se a seguir, para os três diferentes grupos de ensaios, os resultados médios individualizados para os quatro pontos de acelerômetro (dois em cada lado da parede). São mostrados os gráficos de Nível de Aceleração, Desvio Padrão e Coeficiente de Variação das medições.

#### a) PAREDE COM CONEXÕES ELÁSTICAS (BORRACHA E SILICONE)

A Figura 42 mostra as respostas obtidas para os níveis de aceleração nos dois pontos de acelerômetro e em ambos os lados da parede com bordas apresentando borracha e silicone. Observa-se uma excelente concordância das curvas, em especial, as que se referem ao mesmo lado da parede. Destaca-se o pico máximo de vibração que ocorre em frequências distintas (embora próximas) para os dois lados da parede, ou seja, 1600 Hz para o lado 1 e 2000 Hz para o lado 2. É importante considerar, também, o fato de existir um pico em 630 Hz, o que evidencia uma resposta dessa parede, na referida frequência, para essa condição de junção.

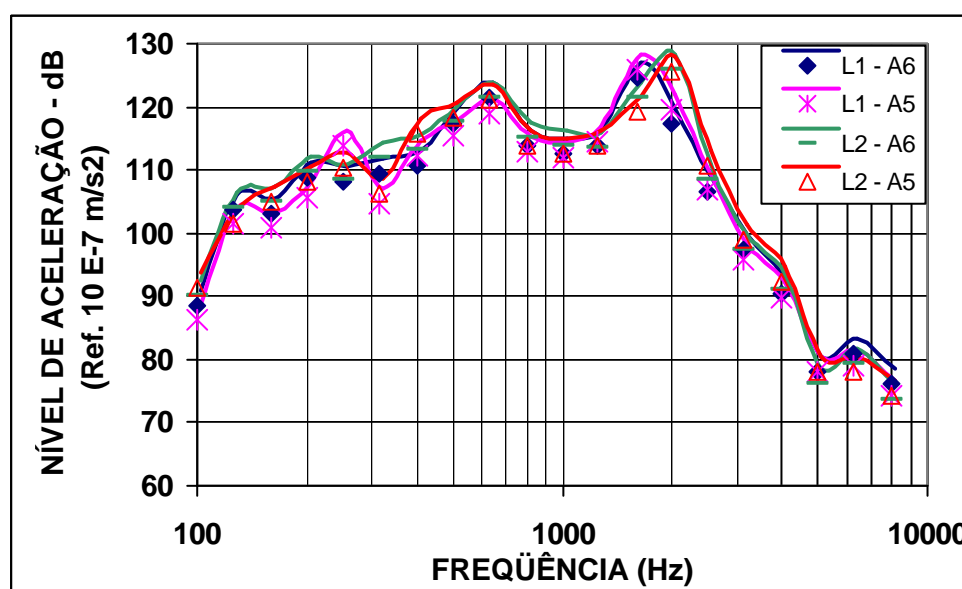


Figura 42 : Nível de aceleração para alvenaria com conexões elásticas.

O Desvio Padrão dessas medições, apresentado na Figura 43, é inferior a 4 dB para toda a faixa de frequências. Ele permaneceu acima de 2 dB somente em quatro frequências: 250 Hz, 315 Hz, 1600 Hz e 2000 Hz. A mesma Figura 43 mostra o Coeficiente de Variação

das medições, o qual é menor do que 3,5% para toda a faixa de freqüências. Destacam-se os picos em 1600 Hz e 2000 Hz, concordando com a Figura 42.

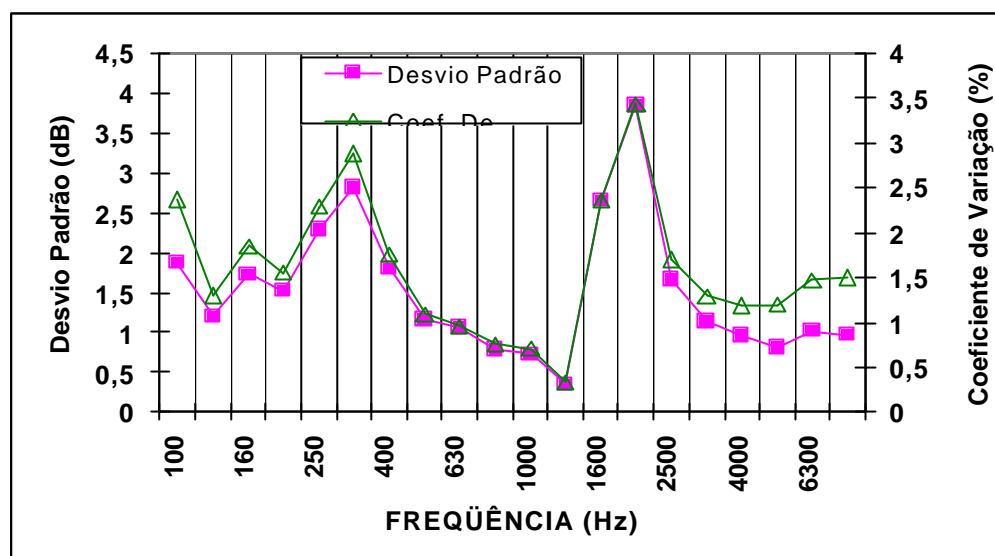


Figura 43 : Desvio Padrão e Coeficiente de Variação das medições de Nível de aceleração da parede com conexões elásticas.

#### b) PAREDE COM CONEXÕES RÍGIDAS - 14 dias

A Figura 44 apresenta os resultados obtidos para essa condição de fixação das bordas da parede. Observa-se uma boa concordância entre as curvas de medição, exceto na localização do maior pico, o qual aparece disperso entre 1250 Hz e 2000 Hz. Para a posição de acelerômetro A5 (em ambos os lados da parede), o maior Nível de Aceleração está bem caracterizado na freqüência de 1600 Hz.

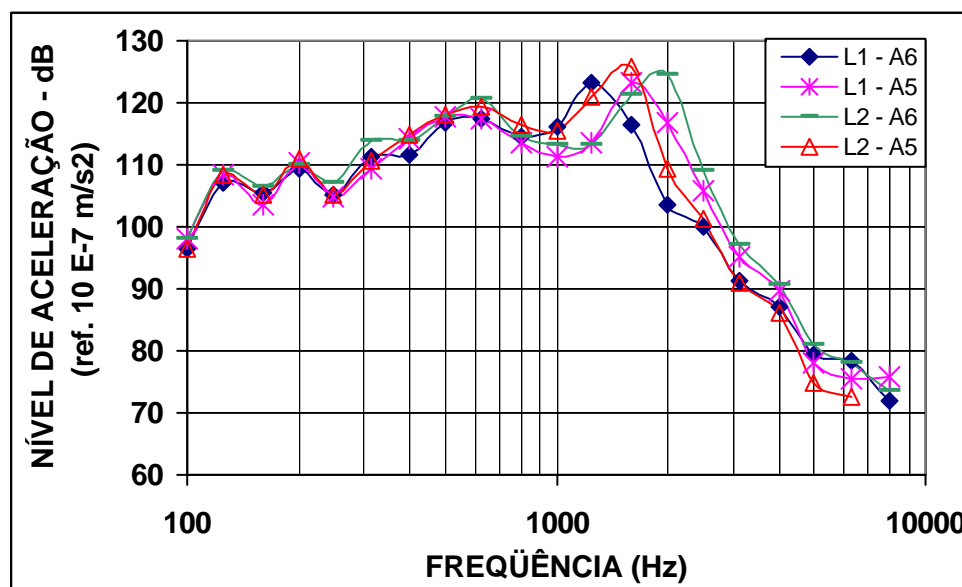


Figura 44 : Nível de Aceleração da alvenaria com conexões rígidas – 14 dias.

O Desvio Padrão das medições está representado na Figura 45, sendo inferior a 5 dB para a maioria das frequências. A principal exceção é 2000 Hz, porque nessa frequência o desvio chega a praticamente o dobro desse valor. O Coeficiente de Variação dessas medições também aparece na Figura 45, sendo quase todo inferior a 4%, exceto em 2000 Hz, onde ele atinge o valor de 7,6%.

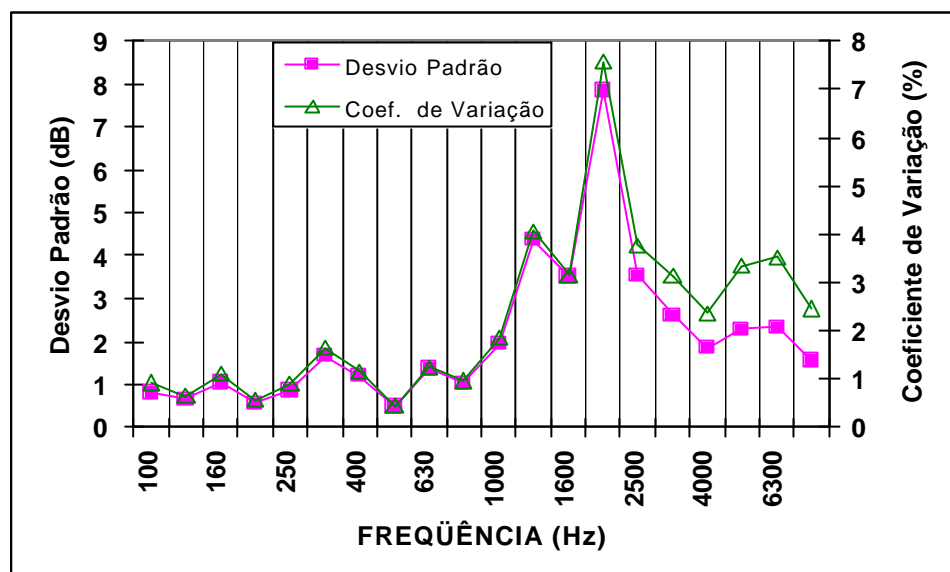


Figura 45 : Desvio Padrão e Coeficiente de Variação do Nível de Aceleração na alvenaria conexões rígidas – 14 dias.

#### c) PAREDE COM CONEXÕES RÍGIDAS - 28 dias

Os resultados obtidos nas medições de nível de aceleração para a parede com bordas argamassadas, aos 28 dias, estão na Figura 46, onde se destaca um pequeno pico de vibração em 630 Hz. O maior pico, no entanto, ocorre em diferentes frequências para cada uma das curvas estudadas, mas mantém-se na faixa de 1250 Hz a 2000 Hz.

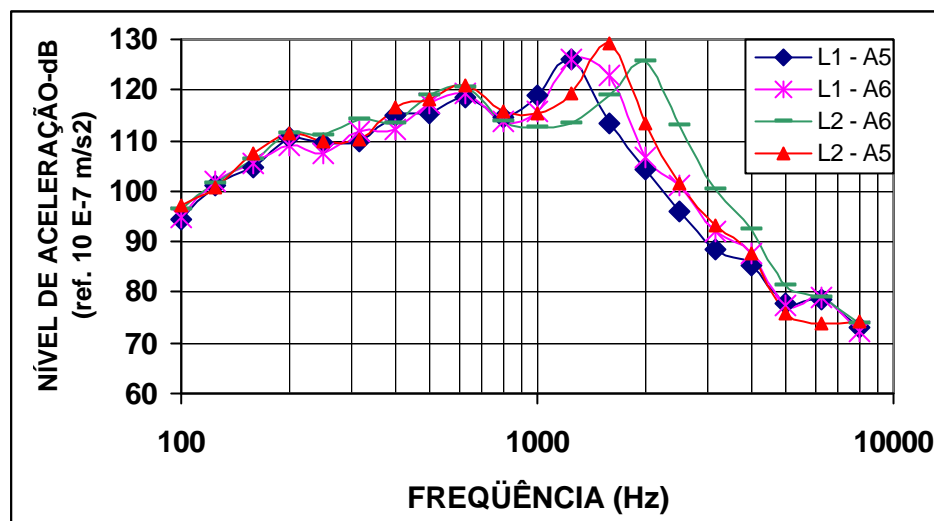


Figura 46 : Nível de aceleração da alvenaria com conexões rígidas – 28 dias.

A Figura 47 mostra o Desvio Padrão e o Coeficiente de Variação das medições de vibrações para a alvenaria com bordas argamassadas aos 28 dias, os quais apresentam um destacado pico na frequência de 2000 Hz. Para a maioria dos valores, o Desvio Padrão é inferior a 2 dB, mas é importante frisar que esse valor aumenta na faixa de 1250 Hz a 3150 Hz. Na análise do Coeficiente de Variação observa-se um comportamento semelhante ao Desvio Padrão, com uma variação menor do que 4% para a maioria das frequências.

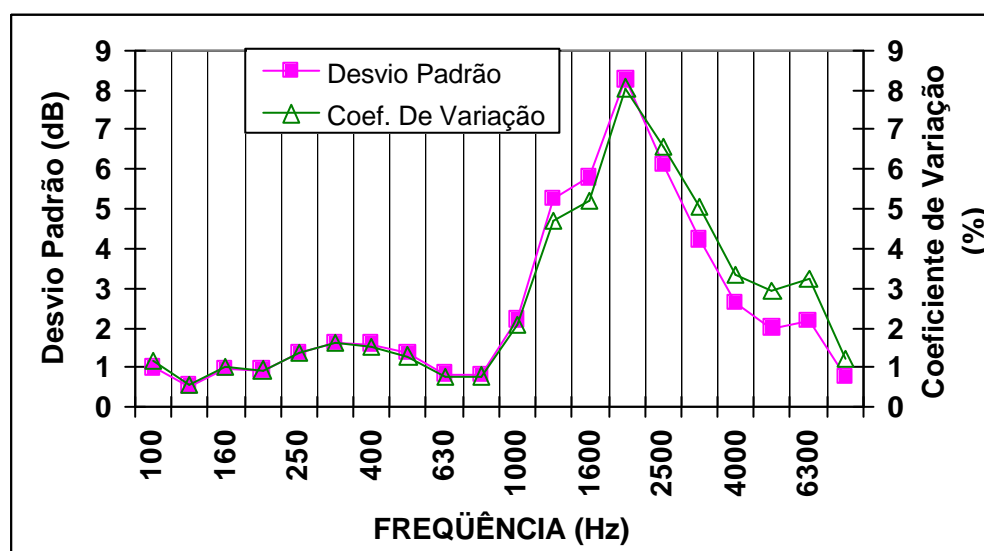


Figura 47 : Desvio Padrão e Coeficiente de Variação das medições do nível de aceleração para a alvenaria com conexões rígidas – 28 dias.

### 5.2.3.3 Análise global dos resultados

A Norma ISO 140-3 não menciona esse tipo de experimento e não foram encontradas referências bibliográficas sobre resultados oriundos de estudos semelhantes para materiais de construção civil. Acredita-se que isso decorre da dificuldade de execução, aliada ao fato de que esse ensaio não visa determinar nenhum parâmetro específico, mas apenas orientar para a análise de uma tendência do comportamento vibracional da parede.

Os valores médios, medidos durante os ensaios, para as condições de temperatura e umidade relativa do ar estão na Tabela 18, onde L1 é o lado voltado para a Câmara de Emissão, enquanto L2 se refere à face da parede dirigida à Câmara de Recepção. As medições ocorreram no mesmo período de tempo citado no item 5.2.2.3.

Tabela 18 : Valores médios da temperatura e umidade relativa durante os ensaios com excitação acústica.

Parede	Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)
Alvenaria com Borracha e silicone – L1	26,7	77
Alvenaria com Borracha e silicone – L2	26,9	77
Alvenaria: Argamassa – 14 dias – L1	21,8	76
Alvenaria: Argamassa – 14 dias – L2	21,7	75
Alvenaria: Argamassa – 28 dias – L1	20,2	85
Alvenaria: Argamassa – 28 dias – L2	20,1	85

Constatou-se uma variação pequena nos valores da temperatura e umidade relativa do ar, durante todo o período de medições, com um acréscimo máximo de 6,8 °C e de 10%.

A Figura 48 reúne os resultados das três fases de ensaios: com borracha (CB) e sem borracha (SB) aos 14 e 28 dias. Estão apresentados, separadamente, os níveis de vibração obtidos nas duas posições de acelerômetro (A5 e A6) e nos dois lados da parede: L1 e L2.

Observa-se uma grande concordância das curvas, independentemente do tipo de junção ser elástica ou rígida.

O gráfico aponta um pico bem definido para todas as curvas em 630 Hz. O maior pico, no entanto, não se apresenta numa única frequência, mas para três diferentes valores: 1250Hz, 1600Hz e 2000Hz, variando segundo as distintas condições de junção entre a parede em estudo e o tipo de Câmara Reverberante.

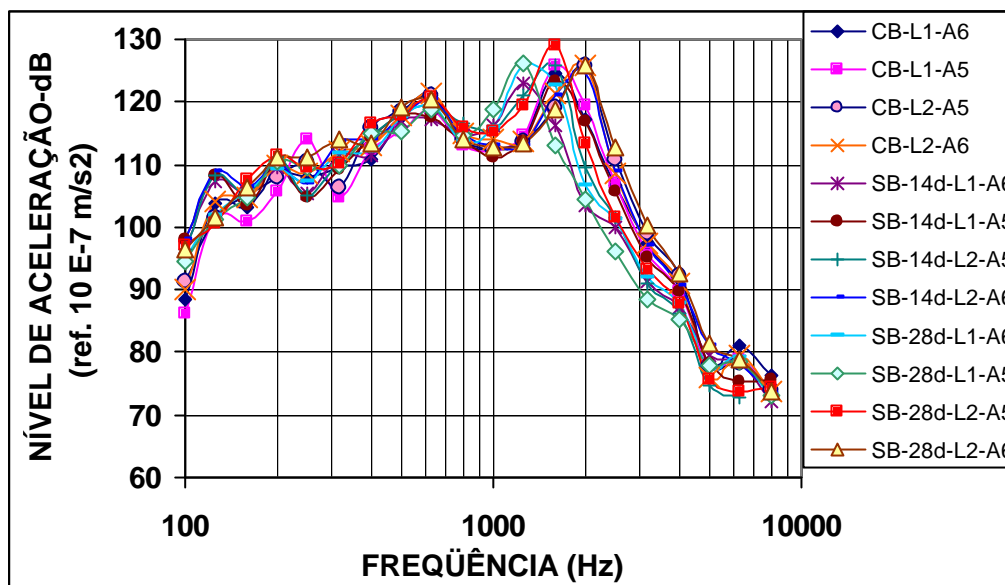


Figura 48 : Comparativo do Nível de Aceleração para a parede de tijolos maciços cerâmicos.

Num comparativo com os resultados dos ensaios apresentados no item 5.2.2, observa-se que 630 Hz está dentro da faixa de freqüências na qual existe a principal resposta da parede, ou seja, onde se localizam os maiores valores de TD.

O gráfico mostrado na Figura 47 destaca a faixa de freqüências entre 1250 e 2000 Hz como as principais respostas da parede à excitação por ruído aéreo. Observando, no entanto, os resultados das medições de TD (item 5.2.2), verifica-se o decaimento das curvas nessas freqüências, salvo poucas exceções onde um pequeno pico é detectado. Acima de 2000 Hz, não há qualquer elevação no nível de aceleração da parede em nenhuma das situações estudadas.

O Desvio Padrão das medições do nível de aceleração da parede submetida a ruído aéreo é apresentado na Figura 48. O maior desvio ocorre em 2000 Hz, onde alcança 8 dB.

O Coeficiente de Variação, também mostrado na Figura 49, é bem pequeno para a maioria das freqüências (inferior a 5%). A exceção está em 2000 Hz onde há um aumento para aproximadamente 8%.



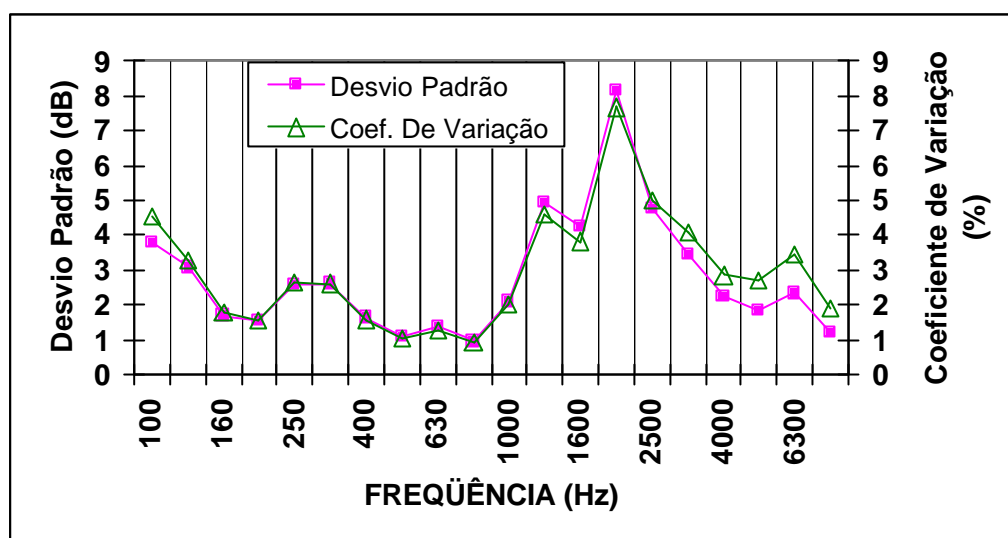


Figura 49 : Desvio Padrão e Coeficiente de Variação das medições de nível de aceleração, sob ruído aéreo, para alvenaria de tijolo maciço cerâmico.

## **CAPITULO 6 - SIMULAÇÕES E CÁLCULOS**

---

O presente capítulo está constituído de três partes. A primeira trata das simulações numéricas, enquanto a segunda mostra os principais cálculos analíticos relativos ao isolamento da parede em estudo. Finalizando, comparam-se os resultados dos cálculos analíticos com os obtidos experimentalmente e nas simulações numéricas.

### **6.1 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE REDUÇÃO SONORA (R) ATRAVÉS DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS, UTILIZANDO SEA<sup>13</sup>**

Esse item apresenta o modelo e o programa computacional utilizados, os parâmetros escolhidos para aplicação nas simulações, a análise dos resultados obtidos e o tratamento estatístico desses dados.

#### **6.1.1 O modelo de SEA e o programa computacional**

O modelo estudado constitui-se de duas cavidades acústicas e uma parede de alvenaria de tijolo maciço cerâmico.

Em linguagem de SEA, diz-se que é um sistema constituído de três subsistemas, ou seja, cavidade 01 / parede / cavidade 02. A opção, por esse modelo simplificado, atende a duas razões. A primeira é a dificuldade na determinação dos parâmetros referentes aos materiais de edificações como, por exemplo, a alvenaria. A segunda é seguir as recomendações dos pesquisadores que trabalham com SEA, os quais enfatizam que o modelo inicial dever ser simples e, posteriormente, agregar outros subsistemas.

Craik (1996, p. 18) destaca, por exemplo, que são acrescentados mais de dez fatores de perda por acoplamento para cada subsistema típico adicionado, tornando o sistema, rapidamente, grande e, por consequência, de difícil execução.

---

<sup>13</sup> A abordagem SEA (Análise Estatística de Energia) foi detalhada no Capítulo 3.

O modelo, mostrado na Figura 50, reproduz as dimensões das Câmaras Reverberantes do Setor de Acústica da UFSM, onde foram realizados os ensaios, as quais foram descritas no Capítulo 5. Salienta-se que o modelo visualizado é decorrente do emprego de uma das funções do programa utilizado nas simulações, a qual permite a redução de tamanho das cavidades e da placa, permanecendo em sua posição original, apenas os números que identificam os nós.

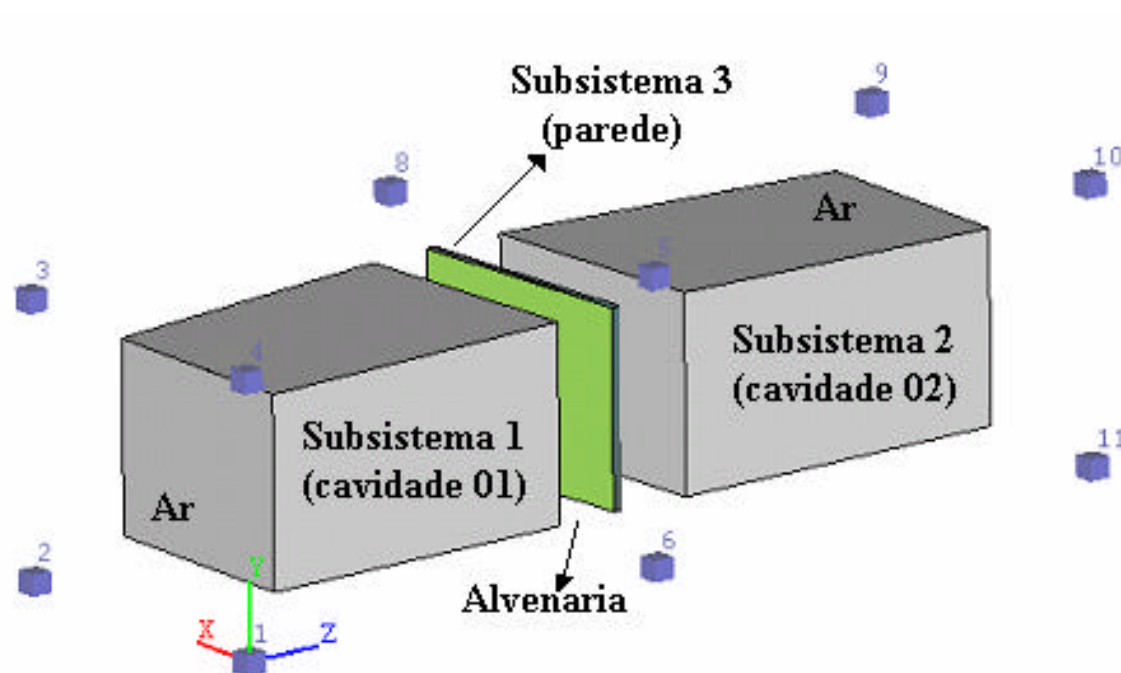


Figura 50 : Os três subsistemas do modelo SEA: cavidade acústica (01); parede (02); e cavidade acústica (03).

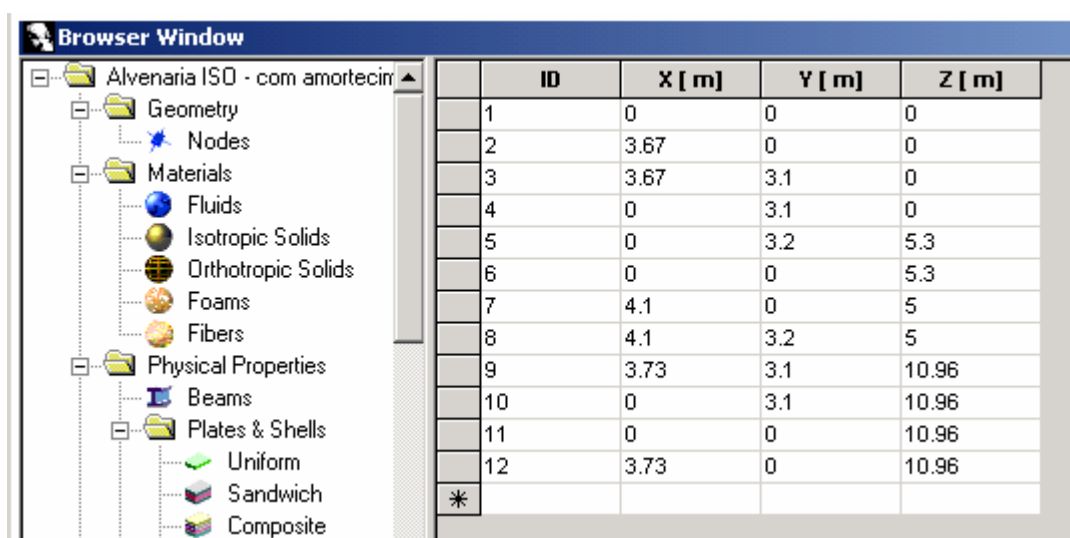
O programa computacional empregado é o AutoSEA versão 2.2.2, da Vibro-Acoustic Sciences, descrito no Capítulo 3, onde está apresentada a sua verificação através da construção de um modelo, constituído de duas cavidades acústicas e uma placa de alumínio colocada entre elas.

As atividades para a utilização do AutoSEA iniciam com a construção do modelo, executada a partir da definição de três grupos de caracteres básicos:

- ? os materiais a serem usados e suas propriedades (no Banco de Dados do programa não existe alvenaria, por isso os parâmetros precisaram ser determinados e acrescentados);

- ? os pontos que constituem os nós, os tipos de subsistemas e suas conexões (as cavidades e a parede são definidas, a partir de pontos identificados por três coordenadas de um sistema de eixos, que para o modelo em questão estão mostrados na Figura 50 e Figura 51;
- ? espectro do ruído (definido a partir do tipo de excitação e da faixa de frequências de análise).

Uma vez definidos todos os dados do programa, aplica-se a excitação, resolve-se o modelo e visualizam-se os resultados. Modificações podem ser realizadas, se necessário, retornando-se ao início do processo.



	ID	X [ m ]	Y [ m ]	Z [ m ]
	1	0	0	0
	2	3.67	0	0
	3	3.67	3.1	0
	4	0	3.1	0
	5	0	3.2	5.3
	6	0	0	5.3
	7	4.1	0	5
	8	4.1	3.2	5
	9	3.73	3.1	10.96
	10	0	3.1	10.96
	11	0	0	10.96
	12	3.73	0	10.96
	*			

Figura 51 : Caracterização dos nós para construção do modelo.

### 6.1.2 Características dos subsistemas

Considerou-se, como subsistema 01, a cavidade acústica que recebeu a excitação sonora. Seu desenho e suas dimensões coincidem com a Câmara de Emissão do Setor de Acústica da UFSM, perfazendo um volume de  $63 \text{ m}^3$ .

As características geométricas: o número de faces, o volume, o perímetro, a área das superfícies foram calculadas pelo programa. Como dados de entrada, definiu-se o ar como o fluido acústico, a inexistência de tratamento para controle de ruído nas superfícies e que a excitação era a mesma utilizada nos ensaios experimentais.

Fez-se o subsistema 03, a outra cavidade, similar a Câmara de Recepção do Setor de Acústica da UFSM, apresentando  $71 \text{ m}^3$  de volume. Assim, a diferença volumétrica de 10%,

especificada na ISO 140-3, foi respeitada. As demais características do subsistema 03 mantiveram-se iguais ao subsistema 01.<sup>14</sup>

Para o subsistema 02 - a parede de alvenaria de tijolo maciço cerâmico - houve a necessidade de determinação de todos os parâmetros, tendo em vista a inexistência de qualquer material de edificações no Banco de Dados do programa referente a materiais ortotrópicos. Entre os isotrópicos, somente é mostrado um concreto, sem qualquer caracterização mais detalhada (traço, componentes, resistência, etc).

Na quantificação das características físico-mecânicas da parede de alvenaria (tijolos maciços cerâmicos), empregaram-se dados bibliográficos e ensaios laboratoriais, executados especialmente para esse fim no LMCC/UFSM e descritos no Capítulo 5.

As simulações computacionais são apresentadas divididas em dois grupos, segundo a consideração da parede como um material isotrópico ou ortotrópico.

Em geral, os trabalhos sobre transmissão sonora em edificações referem-se à alvenaria somente como isotrópica, devido à dificuldade na aquisição de dados que permitam o seu tratamento como ortotrópica, conforme foi detalhado no Capítulo 2.

Apresentam-se, na seqüência, as características relativas aos dois casos:

#### a) ALVENARIA ISOTRÓPICA

O Banco de Dados do AutoSEA referente a materiais isotrópicos, necessita os seguintes valores: densidade ( $\rho$ ), Módulo de Elasticidade (E), Módulo de Cisalhamento (G) e Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).

A Figura 52 mostra o Banco de Dados do AutoSEA versão 2.2.2, após a utilização da ferramenta disponível no programa para a inclusão de novos materiais, conforme foi referido no Capítulo 3. Junto a outros materiais, como alumínio, aço e vidro, incluíram-se os seguintes valores para a alvenaria de tijolo maciço cerâmico:

$$\rho \text{ (densidade)} = 1839 \text{ Kg/m}^3$$

$$E \text{ (Módulo de Elasticidade)} = 2,02 \text{ E09 N/m}^2$$

$$G \text{ (Módulo de Cisalhamento)} = 8,417 \text{ E08 N/m}^2$$

$$\nu \text{ (Coeficiente de Poisson)} = 0,2$$

A opção por esses valores decorre da análise comparativa das simulações, que serão detalhadas no item 6.1.4. Eles foram obtidos, experimentalmente, no LMCC/UFSM (detalhes

<sup>14</sup> No Capítulo 5 o volume das Câmaras Reverberantes foi citado como 60 e 67 m<sup>3</sup>. Salienta-se que entre elas existe o pórtilo para fixação da amostra, com 55 cm de espessura. Como a parede em estudo possui uma espessura menor (10,6 cm), o volume das duas Câmaras fica aumentado.

no Capítulo 5), exceto o Módulo de Cisalhamento (G), que é automaticamente calculado pelo programa.

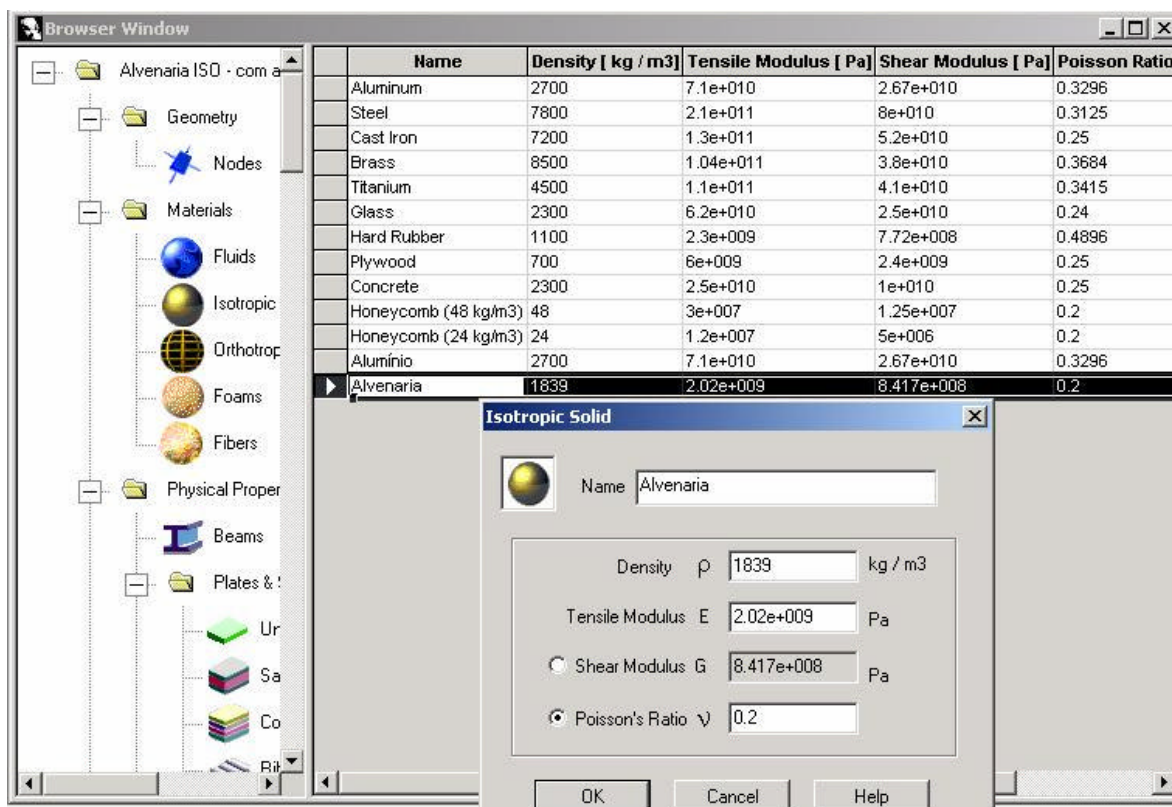


Figura 52 : Banco de Dados do AutoSEA 2.2.2 para materiais isotrópicos, com a inclusão da alvenaria de tijolos maciços cerâmicos.

## b) ALVENARIA ORTOTRÓPICA

O Banco de Dados do AutoSEA, referente a materiais ortotrópicos, necessita os seguintes valores: densidade ( $\rho$ ), Módulos de Elasticidade ( $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ ), Módulos de Cisalhamento ( $G_{12}$ ,  $G_{23}$ ,  $G_{31}$ ) e Coeficientes de Poisson ( $\nu_{12}$ ,  $\nu_{23}$ ,  $\nu_{31}$ ). A Figura 53 apresenta o Banco de Dados original do AutoSEA versão 2.2.2 constituído de apenas quatro materiais ortotrópicos.

Name	Density [ kg / m3]	E1 [ Pa]	E2 [ Pa]	E3 [ Pa]	NU12	NU23	NU31	G12 [ Pa]	G23 [ Pa]	G31 [ Pa]	Notes
Graphite/Epoxy	1600	1.25e+011	1e+010	1e+010	0.4	0.2	0.2	5.9e+009	5.9e+009	3e+009	
Carbon	1600	3.24e+011	5.86e+009	5.86e+009	0.33	0.13	0.13	1.1e+009	1.1e+009	1.1e+009	
Fiberglass/Epoxy	1900	5.6e+010	1.3e+010	1.3e+010	0.26	0.06	0.06	4.2e+009	4.2e+009	4.2e+009	
Aramid/Epoxy	1500	7.6e+010	5.5e+009	5.5e+009	0.34	0.025	0.025	2.3e+009	2.1e+009	2.1e+009	

Figura 53 : Banco de Dados original do AutoSEA versão 2.2.2 para materiais ortotrópicos.

No presente estudo avaliaram-se valores experimentais, bibliográficos e calculados, a fim de incluí-los no Banco de Dados do AutoSEA versão 2.2.2, relativos à alvenaria de tijolo maciço cerâmico, após as simulações descritas no item 6.1.4.

Para a determinação dos módulos de elasticidade, cisalhamento e coeficientes de Poisson é necessário, inicialmente, definir a orientação do sistema de eixos. A recomendação expressa no programa é apresentada na Figura 54.

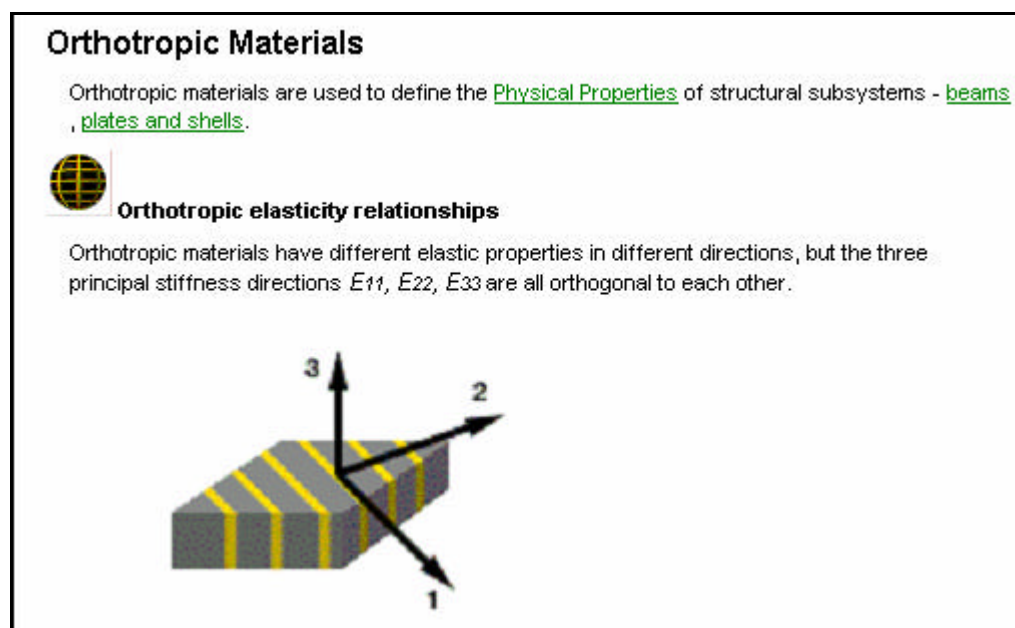


Figura 54 : Orientação dos eixos para materiais ortotrópicos.

Pereira (2002, p. 29) escreve sobre a identificação das propriedades mecânicas de materiais compostos, com a utilização de um sistema de eixos ortogonais. Afirma que o eixo denominado 1 é colocado longitudinalmente às fibras, enquanto o 2 é posicionado transversalmente às fibras e o 3 situa-se de forma ortogonal aos dois anteriores.

Relacionou-se, portanto, o sistema de eixos mostrado na Figura 50 (X, Y, Z) com as definições sobre as orientações 1, 2 e 3. Obteve-se, assim, a seguinte relação:

- ? Eixo X = Eixo 1
- ? Eixo Y = Eixo 2
- ? Eixo Z = Eixo 3

Para os Módulos de Elasticidade, da alvenaria de tijolos maciços cerâmicos, constatou-se a existência de um número muito reduzido de valores e uma grande disparidade entre eles. Alguns são exemplificados a seguir.

? Módulo de Elasticidade na direção “X”:

$E_{1a} = 1,89 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$  ? determinado, experimentalmente, através dos ensaios descritos no Capítulo 5;

$E_{1b} = 11,4 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$  ? citado por Craik (1982, p. 281);

$E_{1c} = 5,78 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$  ? calculado a partir da velocidade da onda longitudinal referida por Craik & Barry (1992, p. 143) para uma parede de tijolo maciço cerâmico;

$E_{1d} = 2,01 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$  ? resultante da Lei de Comportamento de Material Composto, citada por Pereira (2002, p. 29), da qual origina-se a Equação 75.

$$\frac{?_{21}}{E_2} \text{ ? } \frac{?_{12}}{E_1} \quad \text{Equação 75}$$

? Módulo de Elasticidade na direção “Y”:

$E_{2a} = 2,95 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$  ? determinado experimentalmente, através dos ensaios descritos no Capítulo 5;

$E_{2b} = 7,7 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$  ? citado por Craik (1982, p. 281);

$E_{2c} = 2,11 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$  ? calculado a partir da velocidade da onda longitudinal referida por Craik & Barry (1992, p. 143) para uma parede de tijolo maciço cerâmico.

? Módulo de Elasticidade Longitudinal na direção “Z” – os únicos valores encontrados na bibliografia, relativos ao módulo de elasticidade no sentido da espessura da parede de alvenaria de tijolo maciço cerâmico, foram obtidos experimentalmente por Sinha (1978, p. 82), conforme foi descrito no Capítulo 2. O referido autor cita dois valores: **E3a** =  $11,73 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$  (para carregamento paralelo às juntas de argamassa) ou **E3b** =  $8,48 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$  (para carregamento perpendicular às juntas de argamassa). A análise dos ensaios executados por Sinha (1978) deixa claro, no entanto, tratar-se de Módulos de Elasticidade à Flexão, portanto diferentes do valor requerido no presente trabalho. Por isso, tais valores foram desconsiderados. Na ausência de outra opção, o módulo de elasticidade nessa direção foi adotado igual ao **E2**, seguindo o comportamento normalmente indicado nos estudos de materiais compostos, como esclarece Pereira (2002, p. 31) referindo-se aos chamados materiais isotrópicos transversos.



Não foram localizados, na bibliografia, valores para os Módulos de Cisalhamento (**G12**, **G23**, **G31**), por isso o **G12** foi calculado empregando-se a Equação 1, a qual está inserida no Capítulo 2. Após a adaptação dos índices, obtém-se a Equação 76.

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{1}{E_1} + \frac{1 + \nu_2}{E_2} \quad \text{Equação 76}$$

Para determinação do **G31** aplicou-se a Equação 77, recomendada por Pereira (2002, p. 31). Para o **G23** adotou-se o mesmo valor de G31.

$$\frac{1}{G_{31}} = \frac{2(1 + \nu_3)}{E_3} \quad \text{Equação 77}$$

Quanto aos Coeficientes de Poisson, optou-se pela utilização do valor obtido experimentalmente nos ensaios realizados no LMCC/UFSM e descrito no Capítulo 5, ou seja:  $\nu_{12} = 0,22$ . A bibliografia consultada refere apenas um Coeficiente de Poisson, geralmente fixado em 0,2, o qual foi adotado para caracterizar numericamente  $\nu_{31}$ . Uma extensa faixa de valores, que varia de 0,11 até 0,4, pode ser encontrada em textos de autores como: Craik (1998, p. 170), Sinha (1978, p. 82) e Yokel & Fattal (p. 523, 1976), conforme foi mostrado no Capítulo 2.

### 6.1.3 Aplicabilidade de SEA ao modelo

Para identificar a aplicabilidade de SEA, verificou-se o número de modos e a superposição modal dos subsistemas, conforme foi referido no Capítulo 3, para todos os casos, tendo em vista que tais características são sensíveis às alterações das características da parede.

A Figura 55, gerada a partir do AutoSEA para a alvenaria isotrópica, mostra como foi avaliada a existência de modos suficientes para aplicação da Análise Estatística de Energia, na faixa de 100 Hz a 8000 Hz. Observou-se a presença de mais de três modos por banda para as cavidades e para a parede.

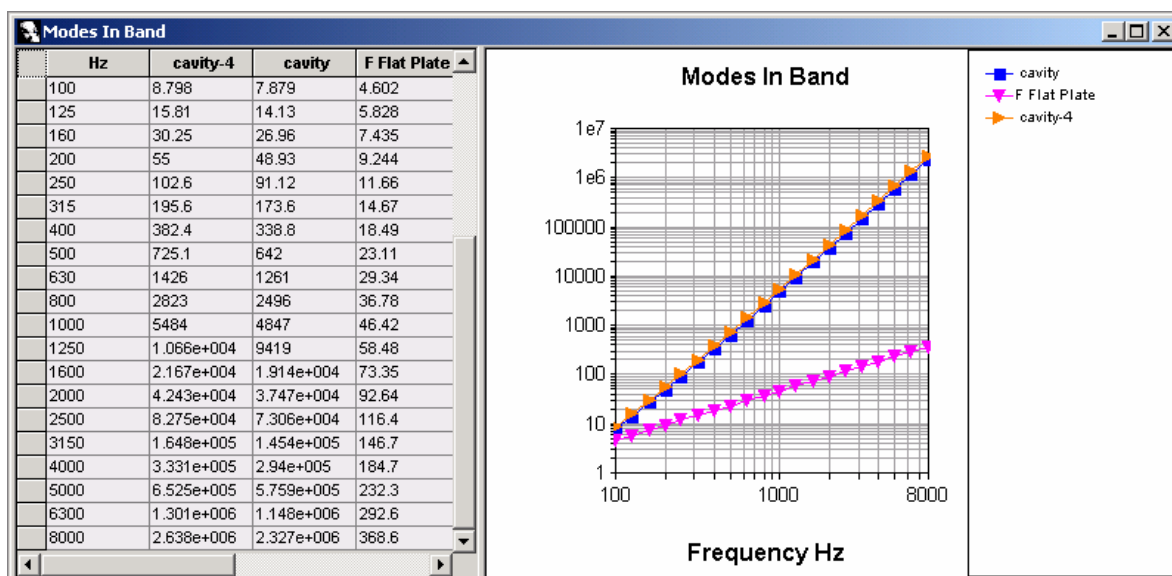


Figura 55 : Número de modos por banda para salas e parede de alvenaria isotrópica.

Conforme foi referido no Capítulo 3, a superposição modal precisa ser superior a unidade para que haja amortecimento controlado. A Figura 56, gerada a partir do AutoSEA para a alvenaria isotrópica, apresenta os valores obtidos para as salas e para a parede. Verifica-se que, segundo essa avaliação, a validade dos resultados das simulações está restrita a valores superiores a 400 Hz.

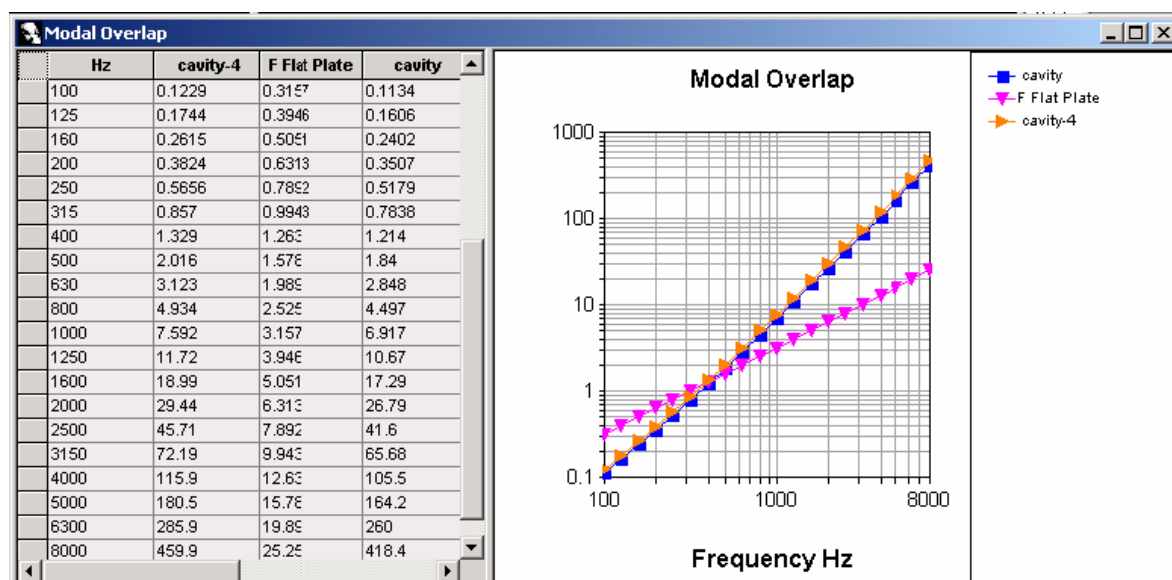


Figura 56 : Superposição modal para as salas e parede de alvenaria isotrópica.

Portanto, houve a conferência da faixa de aplicabilidade de SEA para todos os casos estudados.

### 6.1.4 As simulações realizadas

Com o objetivo de analisar, isoladamente, a influência de cada um dos parâmetros físico-mecânicos envolvidos na transmissão sonora, empreenderam-se diversas combinações dos valores citados no item 6.1.2.

Para facilitar o entendimento dos resultados, as simulações serão apresentadas subdivididas em dois grupos. No primeiro, considera-se a alvenaria como material isotrópico e no segundo, como ortotrópico.

#### 6.1.4.1 Alvenaria Isotrópica

A alvenaria examinada como um material isotrópico é a abordagem mais comum na maioria dos estudos acústicos.

Com o emprego dos valores citados no item 6.1.2, executou-se o modelo para determinar o Índice de Redução Sonora (R) e compará-lo aos valores experimentais obtidos, nas Câmaras Reverberantes. Na comparação, foram utilizados os resultados experimentais nas duas circunstâncias descritas no Capítulo 5, ou seja, quando a parede estava com borracha e silicone nas bordas (28dias-CB) e, mais tarde, quando houve a substituição dessas conexões elásticas pelas rígidas (com argamassa) representadas nos gráficos sob a denominação 28 dias – SB (sem borracha).

Diversas combinações de valores foram realizadas para o estudo dos diferentes fatores independentemente. A seguir, estão detalhadas, resumidamente, as principais simulações.

#### ? Amortecimento das salas

Para analisar a influência do amortecimento das salas (subsistemas 01 e 03), fixou-se para a parede (subsistema 02) os seguintes valores:  $\rho$  (densidade)= 1839 Kg/m<sup>3</sup>, E (Módulo de Elasticidade)= 2,02 E09 N/m<sup>2</sup>, G (Módulo de Cisalhamento)= 8,417 E08 N/m<sup>2</sup> e  $\nu$  (Coeficiente de Poisson)= 0,2. Empregou-se o Nível de Pressão Sonora, obtido experimentalmente na Câmara Reverberante de Emissão.

Três situações de amortecimento para as salas foram simuladas. As duas primeiras constam entre os dados intrínsecos ao programa e são: absorção média de 1% e default non-flexural damping spectrum (0,003). A outra situação estudada foi a utilização da absorção média, em cada uma das salas, calculada, através da Fórmula de Sabine, com o emprego dos valores medidos para o Tempo de Reverberação nas Câmaras.

Observou-se que, apesar da grande diferença entre os valores referentes ao amortecimento das duas salas, o resultado não causa influência perceptível no gráfico do Índice de Redução Sonora (R) da parede de alvenaria. Adotou-se, por isso, 1% como valor de absorção média para as salas em todas as simulações.

? Amortecimento da parede

A influência do amortecimento da parede pode ser observada na Figura 57, onde as curvas simuladas estão plotadas, juntamente com os valores do Índice de Redução Sonora (R) medidos nas Câmaras Reverberantes no LMCC/UFSM e já descritos no Capítulo 5.

Durante a análise, foram mantidos constantes os parâmetros físico-mecânicos:  $\rho$  (densidade) = 1839 Kg/m<sup>3</sup>, E (Módulo de Elasticidade) = 2,02 E09 N/m<sup>2</sup>, G (Módulo de Cisalhamento) = 8,417 E08 N/m<sup>2</sup> e  $\nu$  (Coeficiente de Poisson) = 0,2. Empregou-se o Nível de Pressão Sonora, obtido experimentalmente na Câmara Reverberante de Emissão.

Nas simulações empregaram-se as seguintes opções de amortecimento para a parede de tijolo maciço cerâmico:

- o valor recomendado por Beranek (1988, p. 308) e Bies & Hansen (1988, p. 358) para fator de perda total, conforme foi explicitado no Capítulo 2, ou seja, 1%;
- valores dependentes da frequência, oriundos da Equação 73 mostrada no Capítulo 5 como indicação de Schmitz & Méier (2000, p. 119);
- valores obtidos a partir das medições do decaimento da energia sonora na parede, realizadas no LMCC/UFSM e demonstradas no Capítulo 5;

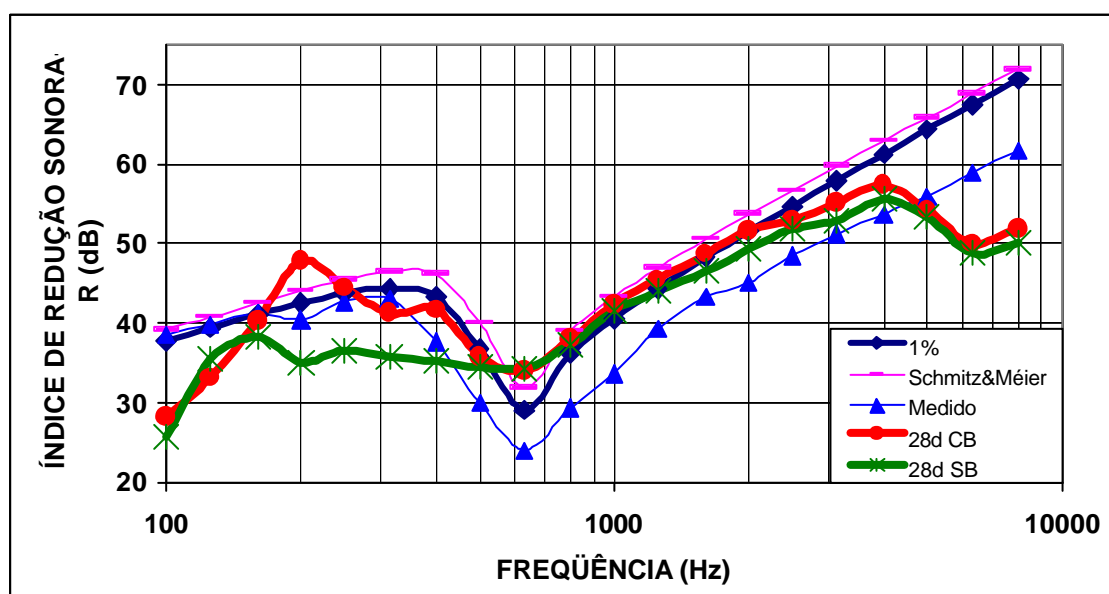


Figura 57 : Influência do amortecimento da parede no R – alvenaria isotrópica

Observa-se que em todas as simulações a frequência crítica está em 630 Hz, acompanhando as duas curvas experimentais.

A curva decorrente do emprego de 1% para o amortecimento da parede possui a melhor concordância em relação à experimental de 28 dias com borracha, na faixa de 800 Hz até 2000 Hz. A curva obtida com os valores recomendados por Schmitz & Méier (2000, p. 119) localiza-se acima da experimental (28d CB) aproximadamente 01dB a 02dB, enquanto a originária das medições de decaimento da energia da parede (LMCC/UFSM) situa-se entre 05 dB e 09 dB abaixo dessa curva experimental, nessa mesma faixa de frequências.

Abaixo dessa frequência crítica, todas as curvas simuladas apresentam um comportamento próximo ao “R” experimental de 28 dias com borracha e bem distante da 28 dias sem borracha.

Acima de 2000 Hz, verifica-se que nenhuma das simulações reconhece o vale mostrado na curva experimental, que é decorrente das ressonâncias devidas à espessura da parede.

#### ? Módulo de Elasticidade

Com a manutenção dos demais fatores, como: absorção das salas de 1%, coeficiente de Poisson de 0,2, amortecimento na parede de 1%, densidade de 1839 Kg/m<sup>3</sup> e NPS de entrada experimental, efetuou-se a variação do Módulo de Elasticidade (**E**) e, conseqüentemente, do Módulo de Cisalhamento (**G**).

Nas simulações foram usados três valores: o obtido experimentalmente **E<sub>y</sub>**=2,95 E09 N/m<sup>2</sup>, o calculado a partir desse experimental para a direção “X” **E<sub>x</sub>**= 2,02 E09 N/m<sup>2</sup>, o dobro e a metade do valor calculado, ou seja, **E<sub>x</sub>**= 4,04 E9 N/m<sup>2</sup> e **E<sub>x</sub>**= 1,01 E9 N/m<sup>2</sup>. Assim, houve a conseqüente alteração no valor de **G**=1,229 E09 N/m<sup>2</sup>, que tornou-se, respectivamente: **G**=8,417 E08 N/m<sup>2</sup>, **G**=1,683 E09 N/m<sup>2</sup> e **G**=4,208 E08 N/m<sup>2</sup>.

O **E<sub>y</sub>**=2,95 E09 N/m<sup>2</sup> é o Módulo de Elasticidade decorrente do ensaio efetuado com carregamento perpendicular às juntas de argamassa, sendo o usual nas atividades da construção civil.

O **E<sub>x</sub>**= 2,02 E09 N/m<sup>2</sup> foi calculado a partir do **E<sub>y</sub>** e dos coeficientes de Poisson experimentais, como foi demonstrado no Capítulo 2 . A variação para o dobro e a metade desse valor permite avaliar o comportamento da curva em função do aumento ou da diminuição do Módulo de Elasticidade.

Na Figura 58 podem-se visualizar os resultados obtidos. Observa-se que a curva que demonstra melhor concordância com as experimentais (em especial a 28d CB), na faixa de 630 Hz a 2000 Hz, é a de **E<sub>y</sub>**=2,95 E09 N/m<sup>2</sup>. Salienta-se, no entanto, que as curvas decorrentes de **E<sub>x</sub>**= 2,02 E09 N/m<sup>2</sup> e **E<sub>x</sub>**= 4,04 E09 N/m<sup>2</sup> também se apresentam muito próximas das experimentais, em especial entre 800 Hz e 2000 Hz.

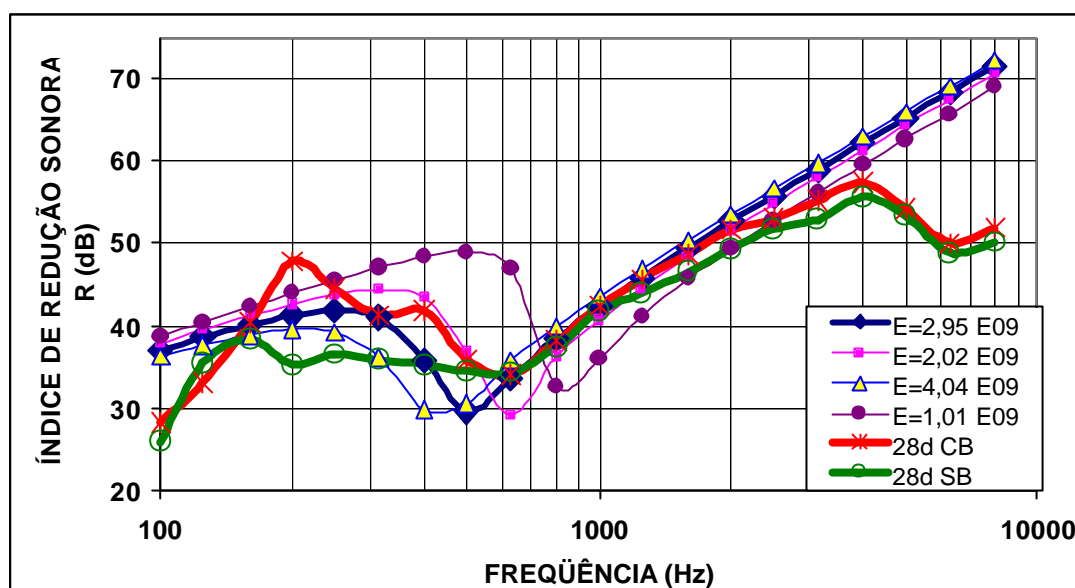


Figura 58 : Influência do Módulo de Elasticidade no R – alvenaria isotrópica.

O fator preponderante a destacar é a mudança no comportamento das curvas ocasionado pela alteração do Módulo de Elasticidade, cujo aumento gera uma diminuição na frequência identificada como crítica em cada curva. Obteve-se, experimentalmente, a frequência crítica em 630 Hz. Esse valor só foi identificado na curva decorrente de  $E_x = 2,02 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$ . Nas simulações, os valores decresceram para 500 Hz e 400 Hz, com o aumento do módulo. Ao diminuir o Módulo, aumentou-se a frequência crítica para 800 Hz.

Observa-se, também, que mesmo identificando a frequência crítica no mesmo ponto obtido experimentalmente, o emprego de  $E_x = 2,02 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$  conduz a um Índice de Redução Sonora inferior (aproximadamente 05 dB), o que não acontece com o  $E_y = 2,95 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$ , que identifica o valor numérico, mas não como frequência crítica.

Nas frequências superiores à crítica experimental (630 Hz), nota-se um aumento no Índice de Redução Sonora para valores maiores de Módulo de Elasticidade.

#### ? Coeficiente de Poisson

Nas simulações com diferentes coeficientes de Poisson empregaram-se, além do valor medido no LMCC/UFSM (0,22), os dois extremos da faixa de valores recomendados na bibliografia: 0,11 e 0,40, conforme foi mostrado no Capítulo 2. Todos os dados de entrada foram fixados, como nas simulações descritas anteriormente, inclusive o Módulo de Elasticidade, nesse caso considerado  $E = 2,02 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$ . A Figura 59 mostra os resultados obtidos.

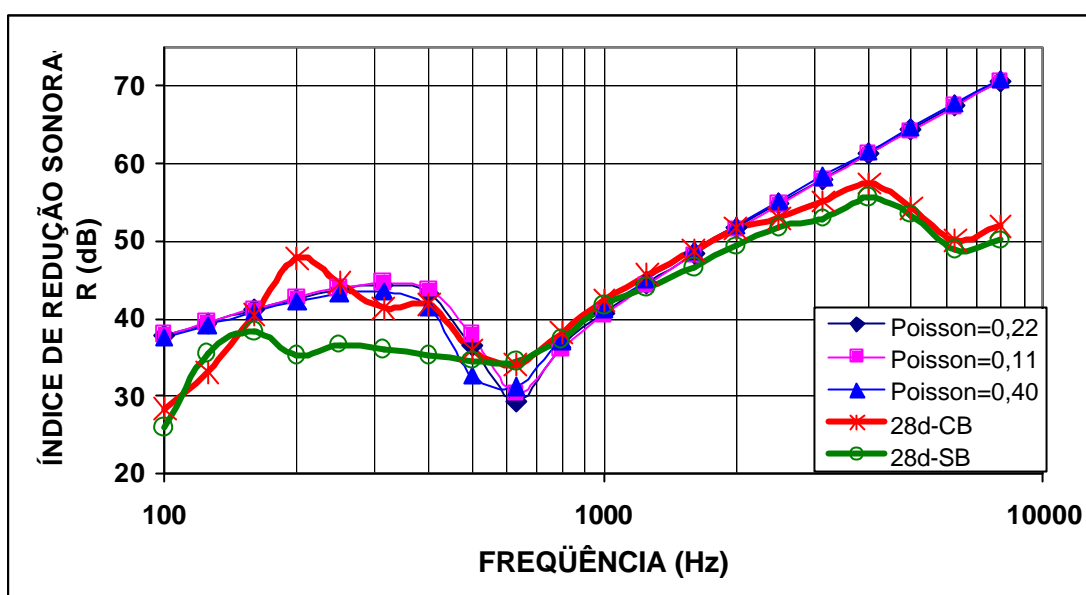


Figura 59 : Influência do Coeficiente de Poisson no R – alvenaria isotrópica.

Em decorrência das alterações no Coeficiente de Poisson (de 0,11 a 0,40 ) os Módulos de Cisalhamento empregados foram:  $G=9,099 \text{ E}08 \text{ N/m}^2$  e  $G=7,214 \text{ E}08 \text{ N/m}^2$ , respectivamente.

Observa-se que, mesmo executando mudanças significativas no Coeficiente de Poisson ( ? o dobro e a metade), a frequência crítica identificada pelo modelo não se altera.

O aumento do Coeficiente de Poisson de 0,11 para 0,40 não representa alteração na faixa de valores acima da frequência crítica. Abaixo dessa frequência, no entanto, constata-se uma pequena diminuição no Índice de Redução Sonora, com o aumento do Coeficiente de Poisson.

#### ? Densidade

A alteração no valor da densidade ocasiona significativas mudanças nas curvas de Índice de Redução Sonora para alvenaria isotrópica, conforme pode ser observado na Figura 60. O aumento da densidade desloca a frequência crítica no sentido positivo do eixo "X", ao mesmo tempo em que aumenta os valores do Índice de Redução Sonora tanto nas faixas superiores quanto nas inferiores à frequência crítica. A diminuição da densidade leva a um comportamento oposto.

Craik (1998, p. 145) afirma que:

*Changes to the thickness and density of the walls and floors have the greatest effect on sound transmission whilst changes to Young's modulus and Poisson's ratio have a much smaller effect. Damping can also have a significant effect on transmission particularly far from the source.<sup>15</sup>*

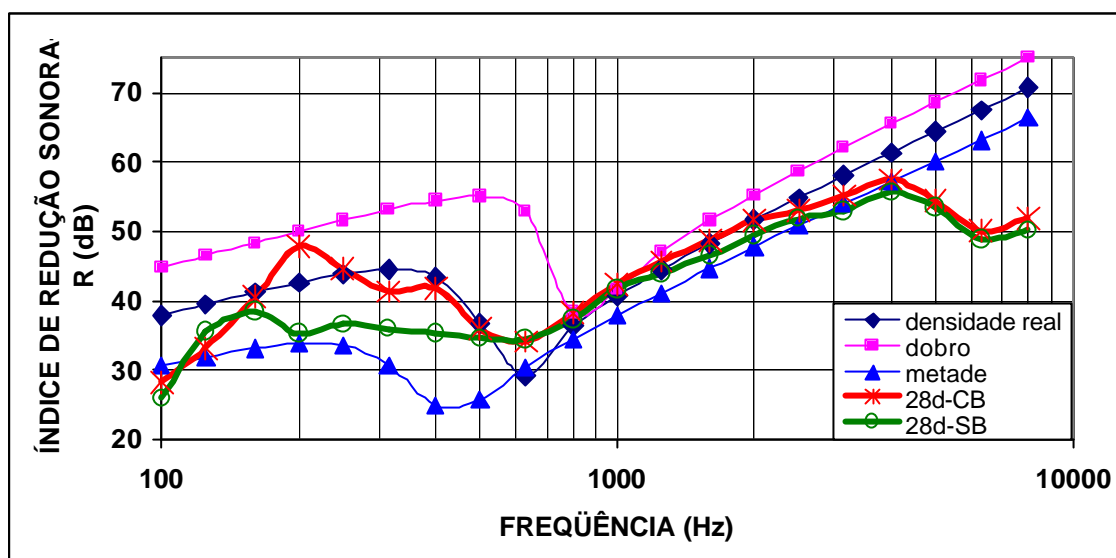


Figura 60 : Influência da alteração de densidade no R – alvenaria isotrópica.

#### 6.1.4.2 Alvenaria Ortotrópica

As simulações relativas à alvenaria, como um material ortotrópico, avaliam os seguintes itens:

- ? Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento
- ? Amortecimento da parede
- ? Densidade

Em todos os casos mostrados a seguir, houve a manutenção do amortecimento da sala e da parede em 1% e do NPS na Câmara de Emissão como o valor obtido experimentalmente.

Na análise da parede como ortotrópica, constata-se que a influência na mudança do Coeficiente de Poisson é mínima, conforme foi comprovado, igualmente, para a situação de isotropia. Optou-se, por isso, pela supressão desses gráficos. Nas simulações, considerou-se:  $\nu_{12} = 0,22$  e  $\nu_{23} = \nu_{31} = 0,2$ .

<sup>15</sup> Alterações na espessura e densidade das paredes e pisos têm um efeito maior na transmissão sonora, enquanto alterações no Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson têm um efeito muito menor. O amortecimento pode também ter um efeito significativo na transmissão, particularmente longe da fonte sonora.



### ? Módulo de Elasticidade

Para análise do comportamento desse tipo de alvenaria, frente às mudanças nos módulos de elasticidade ( $E_x$ ,  $E_y$  e  $E_z$ ), utilizaram-se informações e valores detalhados no item 6.1.2.

A alteração dos módulos de elasticidade ( $E$ ) implica na alteração dos módulos de cisalhamento ( $G$ ).

Na Figura 61,  $E_2=E_3$  foram igualados ao valor medido  $2,95 E_09 N/m^2$ , variando-se  $E_1$ .

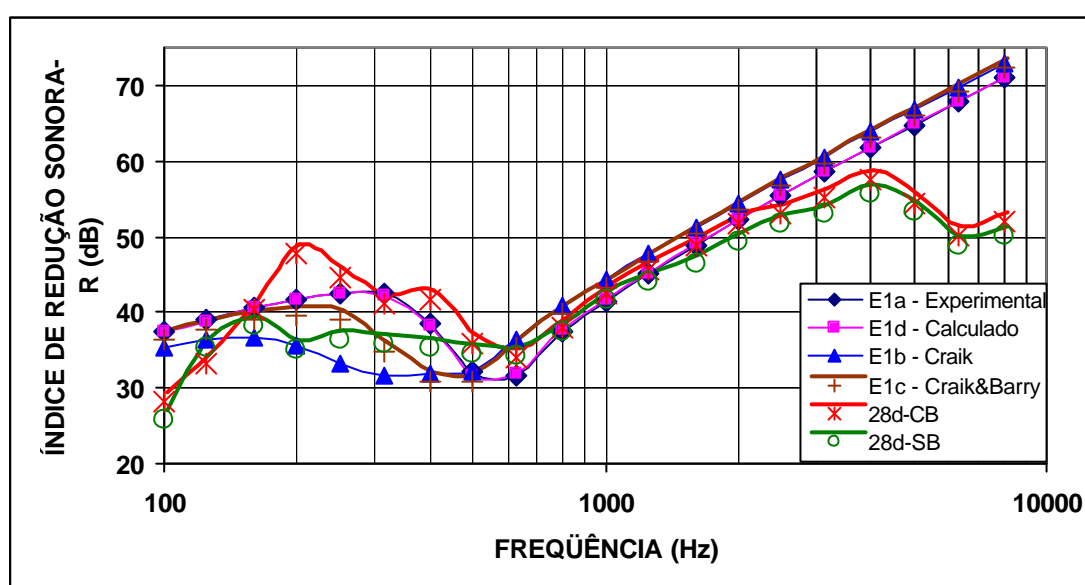


Figura 61 : Variação de “R” com a alteração de  $E_1$  – alvenaria ortotrópica.

Observa-se que as curvas decorrentes do  $E_1$  resultante do ensaio específico ( $E_{1a} = 1,89 E_09 N/m^2$ ) e do valor calculado a partir do ensaio para obtenção do  $E_2$  ( $E_{1d} = 2,01 E_09 N/m^2$ ) apresentam uma boa concordância com as curvas experimentais na faixa de 630 Hz a 2000 Hz. Essas duas curvas apresentam bem marcada a frequência crítica de 630 Hz, que é a mesma identificada nas medições realizadas nas Câmaras Reverberantes.

Os valores citados por Craik (1982, p. 281)  $E_{1b} = 11,4 E_09 N/m^2$  e o calculado a partir da velocidade referida por Craik & Barry (1992, p. 143)  $E_{1c} = 5,78 E_09 N/m^2$  originam curvas onde se constata que o aumento do Módulo leva a uma redução na frequência crítica. Assim, nesses dois casos a frequência crítica está deslocada do valor experimental.

Nas frequências inferiores a 630 Hz, observa-se que as curvas originárias de valores ensaiados ( $E1a = 1,89 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$  e  $E1d = 2,01 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$ ) apresentam uma tendência mais próxima da experimental 28 dias com borracha.

Aumentando-se o valor dos módulos para  $E2=E3=7,7 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$ , tem-se a Figura 62 como resultante da variação dos valores de  $E1$ .

Comparando a Figura 62 com a Figura 62, observa-se que a frequência crítica de 630 Hz, nessa última, não aparece marcada como nas curvas onde o  $E2=E3$  estavam fixados com o valor obtido nos ensaios realizados no LMCC/UFSM, ou seja,  $2,95 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$ .

Mesmo na faixa de 630 a 2000 Hz houve um maior afastamento das curvas em relação às experimentais, aumentando o Índice de Redução Sonora.

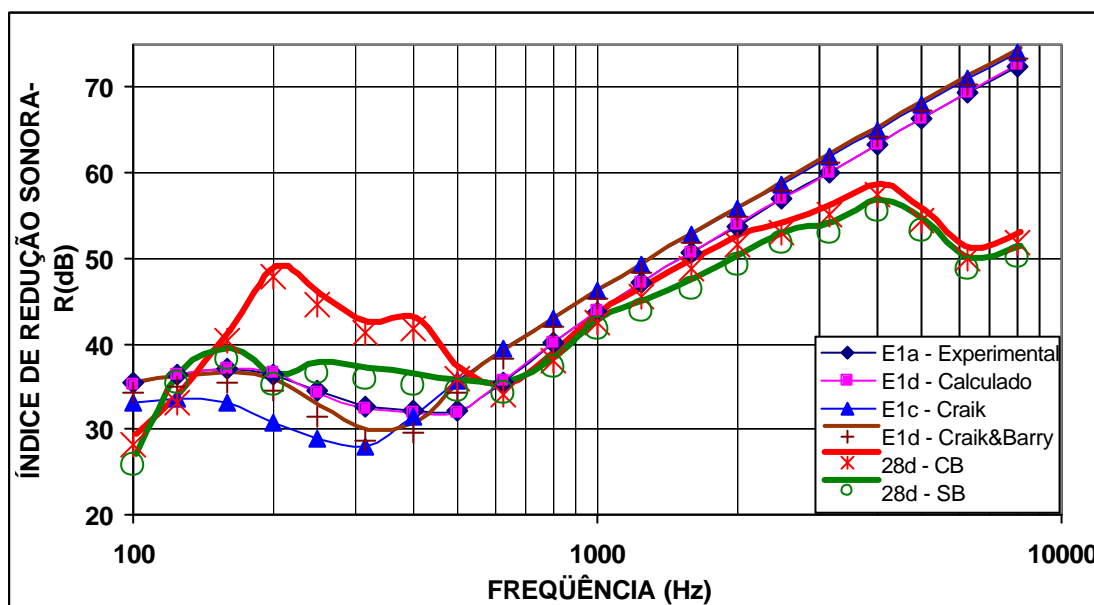


Figura 62 : Variação do “R” com o aumento de  $E2$  e  $E3$  – alvenaria ortotrópica.

? Amortecimento da parede

Simulações relativas a diferentes amortecimentos para a parede de alvenaria ortotrópica, decorrentes de distintos Fatores de Perda Total, estão mostradas na Figura 63.

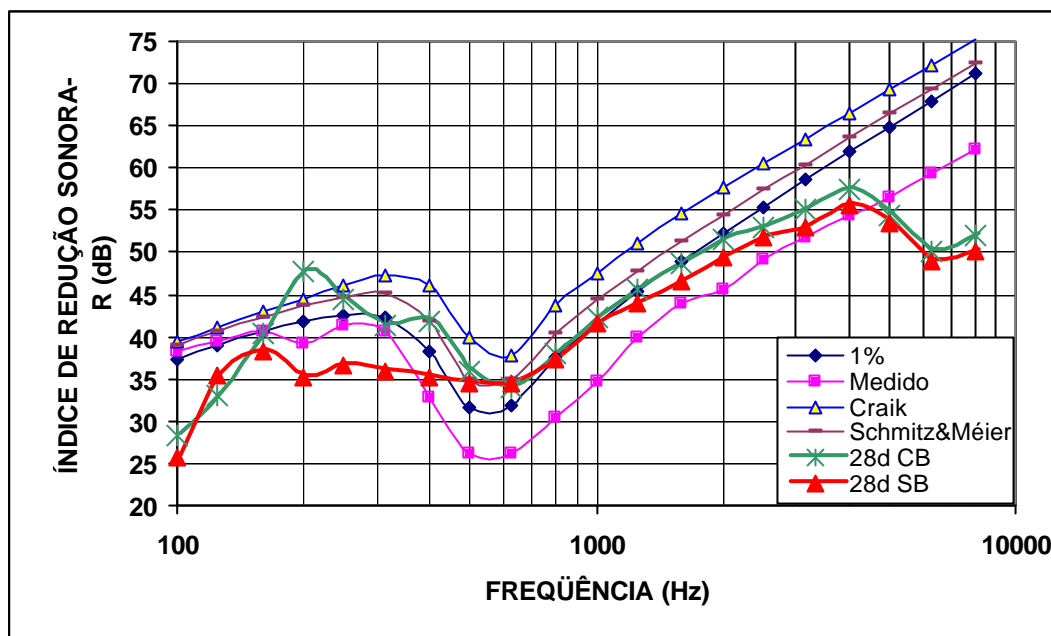


Figura 63 : “R” para alvenaria ortotrópica com diferentes Fatores de Perda Total.

Observa-se que o Fator de Perda Total de 1%, usual nas bibliografias em acústica, resultou em maior concordância com as duas curvas experimentais, em especial na faixa acima da frequência crítica. Fatores de Perda menores (como o medido conforme experimento detalhado no Capítulo 5) resultam menores Índices de Redução Sonora. Os amortecimentos relativos às teorias de Craik (Equação 72) e Schmitz & Méier (Equação 73), descritas no Capítulo 5, apresentam valores superiores aos das curvas experimentais.

#### ? Densidade

Para a densidade, foi escolhido o valor determinado experimentalmente no LMCC/UFSM e descrito no Capítulo 5, ou seja,  $\rho = 1839 \text{ Kg/m}^3$ , por encontrar-se dentro da faixa especificada na bibliografia. As referências bibliográficas, nesse caso, são abundantes e confiáveis, como foi demonstrado no Capítulo 2, pois a densidade do material tem larga aplicação nas pesquisas da área de edificações.

Para fins de conhecimento da sensibilidade da resposta do sistema às mudanças na densidade da parede, optou-se por dobrá-la e reduzi-la à metade. A Figura 64 mostra os resultados obtidos, os quais são semelhantes aos encontrados na análise da alvenaria isotrópica, ou seja, o Índice de redução Sonora cresce com o aumento da densidade, enquanto a localização da frequência crítica altera-se em direção às baixas frequências.

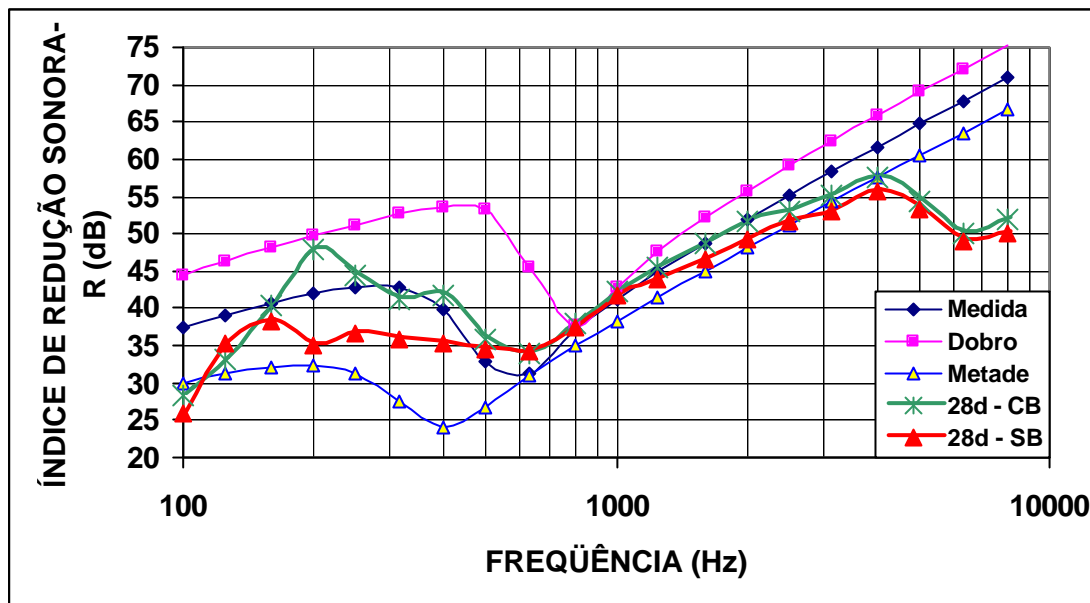


Figura 64 : Influência da densidade no “R” da alvenaria ortotrópica.

### 6.1.5 Análise global dos resultados das simulações

Nas simulações realizadas, detectaram-se uma influência significativa do Módulo de Elasticidade na direção  $E_1$ , para ambos os casos: alvenaria isotrópica e ortotrópica.

Observa-se que a diminuição da frequência crítica com o aumento do Módulo de Elasticidade pode ser explicada pelo fato de que a velocidade de onda longitudinal ( $C_{\square}$ ) é diretamente proporcional a  $\sqrt{E}$ , enquanto a  $f_c$  é inversamente proporcional à  $C_{\square}$ , conforme pode ser visualizado nas equações mostradas a seguir (referidas no Capítulo 2).

$$C_{\square} \propto \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad ; \quad C_{\square} \propto \sqrt{\frac{2 * E}{\rho}} \quad ; \quad f_c \propto \frac{C^2}{1,8 * h * C_{\square}}$$

O Fator de Perda Total tem importância nas frequências ressonantes, mudando o comportamento do gráfico quando são colocados os valores medidos experimentalmente. Utilizando os valores bibliográficos, constata-se que para Schimtz os valores ficaram mais longe da curva experimental. Para Craik, o afastamento foi ainda maior.

Ao considerar a parede com um engastamento nas laterais, a alteração é apenas em frequências menores do que a crítica.

A Figura 65 mostra o Banco de Dados do AutoSEA 2.2.2, com a inclusão dos valores que apresentaram uma resposta mais próxima das curvas experimentais, para a alvenaria ortotrópica de tijolos maciços cerâmicos, que são os seguintes:

- ?  $\rho$  (densidade) = 2839 Kg/m<sup>3</sup>
- ? E1 (Módulo de Elasticidade paralelo às juntas de argamassa)= 2,01 E09 N/m<sup>2</sup>
- ? E2 (Módulo de Elasticidade perpendicular às juntas de argamassa)= 2,95 E09 N/m<sup>2</sup>
- ? E3 (Módulo de Elasticidade na direção da espessura da parede)= 2,95 E09 N/m<sup>2</sup>
- ? G12 (Módulo de Elasticidade Transversal entre 1 e 2) = 1,02 E09 N/m<sup>2</sup>
- ? G23 (Módulo de Elasticidade Transversal entre 2 e 3) = 1,22 E09 N/m<sup>2</sup>
- ? G31 (Módulo de Elasticidade Transversal entre 3 e 1) = 1,22 E09 N/m<sup>2</sup>
- ?  $\nu_{12}$ (Coeficiente de Poisson entre 1 e 2) = 0,22
- ?  $\nu_{23}$ (Coeficiente de Poisson entre 2 e 3) = 0,20
- ?  $\nu_{31}$ (Coeficiente de Poisson entre 3 e 1) = 0,20

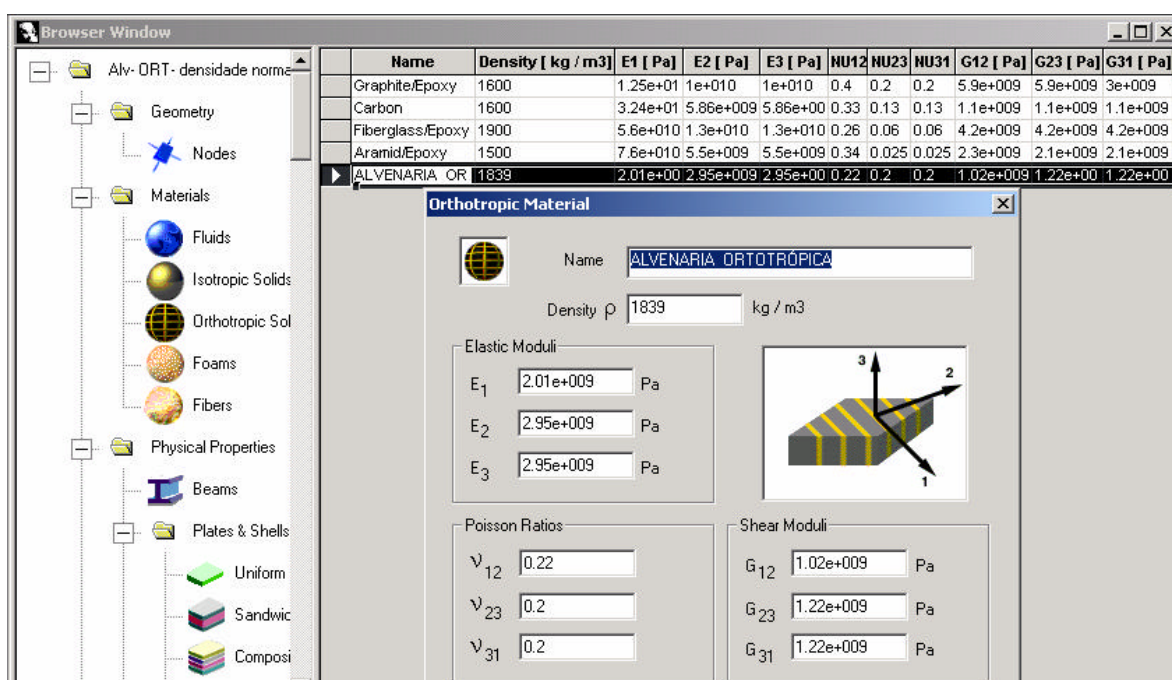


Figura 65 : Banco de Dados do AutoSEA para materiais ortotrópicos, com a alvenaria de tijolos maciços cerâmicos.

Observou-se, ainda, uma boa concordância entre as curvas numérica e experimental, em especial na região que vai da frequência crítica até o patamar onde se localizam as frequências de ressonância devida à espessura da parede. Acredita-se que o fato do AutoSEA não identificar esse vale em 6300 Hz pode ocorrer em razão do programa trabalhar com a Teoria Clássica de Placas Finas.

### 6.1.6 Análise da correlação entre os dados estudados

Nos estudos estatísticos, a correlação identifica a associação de variáveis quantitativas (Barbetta, 1994, p. 244) ou a tendência de variação conjunta (Costa Neto, 2002, p. 177).

É importante lembrar que “para descrever a correlação linear dos dados de duas variáveis quantitativas” é apropriado utilizar-se o coeficiente de correlação (linear) de Pearson. Barbetta (1994, p. 251) salienta:

Para qualquer conjunto de dados, o valor do coeficiente de correlação de Pearson,  $r$ , estará no intervalo de  $-1$  a  $1$ . Será positivo quando os dados apresentarem correlação linear positiva; será negativo quando os dados apresentarem correlação linear negativa.

O valor de  $r$  será tão mais próximo de  $1$  (ou  $-1$ ) quanto mais forte for a correlação nos dados observados.

Para avaliar a correlação entre os dados obtidos experimentalmente e os resultantes das simulações numéricas com o AutoSEA, optou-se por empregar as curvas indicadas na Figura 66, ou seja, uma experimental (com borracha e silicone) e duas simuladas (referentes a uma alvenaria considerada como isotrópica e a outra como ortotrópica).

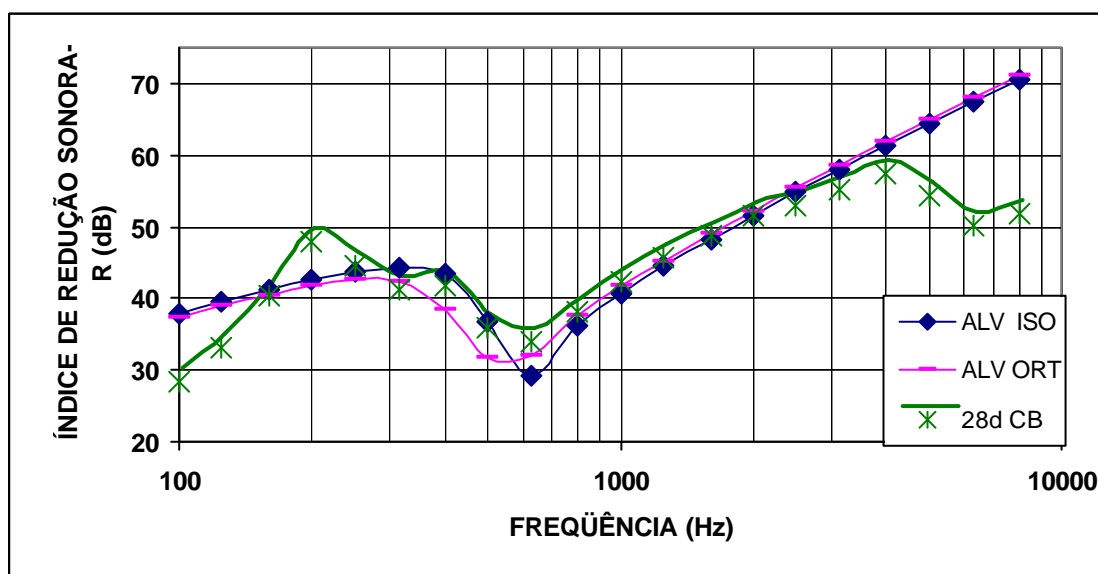


Figura 66 : Curvas para determinação do coeficiente de correlação linear de Pearson.

Duas situações foram analisadas. As Tabelas 19 e 20 mostram a correlação obtida para os casos estudados.

Na primeira, que pode ser visualizada na Tabela 19, avaliou-se a correlação entre as curvas em toda a sua extensão (100 a 8000 Hz), enquanto na outra, apresentada na Tabela 20, houve a subdivisão da curva em três partes (de 100 a 630 Hz; de 630 a 2000 Hz; e de 2000 a 8000 Hz).

Tabela 19 : Correlação entre as curvas estudadas em toda a sua extensão

Curvas correlacionadas	Coefficiente de correlação de Pearson ( r )
Simulação para alvenaria isotrópica / Simulação para alvenaria ortotrópica	0,987402
Simulação para alvenaria isotrópica / Experimental – 28dias – com borracha	0,831885
Simulação para alvenaria ortotrópica / Experimental – 28dias – com borracha	0,837231

Tabela 20 : Correlação entre as curvas estudadas por faixas de freqüências

Curvas correlacionadas	100 a 630 Hz	630 a 2000 Hz	2000 a 8000 <small>μ-16</small>
Simulação para alvenaria isotrópica / Simulação para alvenaria ortotrópica	0,865288	0,998992	0,999998
Simulação para alvenaria isotrópica / Experimental – 28dias – com borracha	0,784136	0,996519	-0,16771
Simulação para alvenaria ortotrópica / Experimental – 28dias – com borracha	0,61422	0,998844	-0,16934

Nos três casos apresentados na Tabela 19 constata-se uma forte correlação. Ela é maior entre as duas curvas simuladas (alvenaria isotrópica e alvenaria ortotrópica), quando o r atinge 0,987. Ao correlacionar-se cada uma dessas curvas simuladas com a curva experimental (obtida aos 28 dias com conexões elásticas, ou seja, com borracha e silicone – CB) observa-se uma diferença muito pequena nos dois casos ( $r = 0,832$  e  $r = 0,837$ ).

É possível comprovar, portanto, que a diferença entre utilizar-se a simulação considerando a alvenaria isotrópica é mínima em relação ao emprego do programa computacional com o Banco de Dados da alvenaria ortotrópica.

Analisando-se os dados constantes na Tabela 20 constata-se que existe uma considerável diferença nas três faixas de freqüências observadas e citadas a seguir.

? 100 Hz a 630 Hz (9 valores localizados na região de baixas freqüências até a freqüência crítica)

Nessa faixa de freqüências o valor r varia de 0,614 a 0,865, resultando uma correlação média. As duas curvas simuladas (alvenaria considerada iso e ortotrópica) apresentam-se melhor correlacionadas entre si do que ao serem comparadas com a curva experimental.

<sup>16</sup> O AutoSEA não considera esta faixa de freqüências.

? 630 Hz a 2000 Hz (6 valores localizados da frequência crítica até a máxima frequência onde é válida a Teoria de Placas Finas)

É a faixa de frequência onde a correlação resultou mais forte, ou seja, o  $r$  varia de 0,996 a 0,999. É a principal responsável pela boa correlação apresentada entre as curvas simuladas e a experimental mostradas na Tabela 19.

? 2000 Hz a 8000 Hz (7 valores colocados desde a máxima frequência onde é válida a Teoria de Placas Finas até a frequência mais alta estudada)

É a faixa onde existe a maior divergência. O coeficiente de correlação de Pearson é praticamente igual a unidade, significando uma forte correlação entre as duas curvas simuladas. No estudo comparativo das curvas simuladas com a experimental, no entanto, a correlação é muito fraca e negativa indicando a divergência observada na Figura 66.

Observa-se, assim, que na faixa das baixas frequências até a frequência crítica está comprovada a influência de fatores como a densidade modal (no caso das simulações) e a frequência de corte das Câmaras Reverberantes (no caso experimental). Percebe-se, também, que a faixa compreendida entre a frequência crítica e a máxima frequência onde é válida a Teoria de Placas Finas ocorre a melhor correlação, corroborando com os valores calculados através do Método do Patamar. Na terceira faixa de frequências, a correlação muito baixa e negativa reafirma que o programa computacional foi desenvolvido para aplicações relativas a Teoria de Placas Finas, não reconhecendo as ressonâncias devidas à espessura da parede.

## **6.2 COMPARAÇÃO DE CÁLCULOS ANALÍTICOS COM OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS**

Na análise do isolamento acústico de uma parede é importante a determinação de duas regiões onde as perdas de transmissão são mínimas, ocasionando a transferência de uma significativa parcela da energia sonora. São elas: a coincidência e as ressonâncias mecânicas.

Apresenta-se, na seqüência, a determinação analítica dessas duas regiões.



### 6.2.1 Coincidência

Na região da coincidência, calcula-se a frequência crítica, segundo a Equação 78. Considera-se:  $c_s$  = velocidade da onda longitudinal no sólido;  $c$  = velocidade do som no ar;  $h$  = espessura da parede

$$f_c = \frac{c^2}{1,8 \cdot c_s \cdot h} \quad \text{Equação 78}$$

A velocidade da onda longitudinal no sólido, conforme foi mostrado no Capítulo 2, independe da frequência, sendo calculada, para placas, pela Equação 79.

$$c_s = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}^{1/2} \quad \text{Equação 79}$$

Tendo em vista que as características da alvenaria são diferentes nas direções horizontal e vertical, obtiveram-se os valores mostrados na Tabela 21. A densidade foi mantida constante e igual a 1839 Kg/m<sup>3</sup>.

Tabela 21 : Características da parede estudada

Direção	E [10E9 [N/m <sup>2</sup> ]	$\nu$	$c_s$ [m/s]	$f_c$ [Hz]
Horizontal (X)	2,02	0,20	1070	576
Vertical (Y)	2,95	0,22	1298	475

Observa-se que há uma divergência muito pequena entre os valores calculados (576 - 475 Hz) e o valor experimental (630 Hz), ou seja, um erro percentual de 8,6% e 24,6%, respectivamente.

Uma diferença entre a resposta experimental e a analítica era esperada, devido às características da alvenaria, em especial sua ortotropia.

Schmitz & Méier (2000, p.124), avaliando uma parede de tijolos sílico-calcáreos, também identificaram essa disparidade: "From the material data  $f_c$  calculates to 103 Hz, whereas the measurement of SRI has a pronounced dip at 200 Hz which could be determined as critical

frequency".<sup>17</sup> Mediram, por isso, as velocidades de onda de flexão e longitudinal. Detectaram a divergência entre as velocidades longitudinais: horizontal, vertical e diagonal. Salienta-se, no entanto, que as diferenças por eles encontradas foram mais significativas, devido ao não preenchimento das juntas (de argamassa) verticais da parede.

No presente estudo, a divergência entre os valores calculados e o experimental é pequena. Os dois encontram-se na mesma banda de frequências, quando a avaliação é feita em oitavas (banda de 500 Hz). Verifica-se que a discrepância detectada por Schmitz & Méier (2000) é maior, pois os valores: calculado (103 Hz) e experimental (200 Hz) pertencem a duas bandas de oitavas distintas, ou seja, 125 Hz e 250 Hz, respectivamente.

Beranek (1980, p. 293) afirma que a Equação 78 é válida somente para casos onde o comprimento de onda de flexão é maior do que aproximadamente seis vezes a espessura do painel ( $\lambda_f \geq 6h$ ).

O cálculo da velocidade da onda de flexão, conforme foi referido no Capítulo 2, é realizado através da Equação 80. Essa mesma velocidade de flexão da parede pode ser calculada, também, através da Equação 78, pois se sabe que, na coincidência, ela é igual a velocidade do som no ar.

$$C_B = \frac{4f^2 B}{s}^{1/4} \quad \text{Equação 80}$$

A rigidez à flexão da parede (**B**) é calculada pela Equação 81.

$$B = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad \text{Equação 81}$$

Assim, obtém-se:  $C_B = 360$  m/s

Para determinar o comprimento de onda das ondas de flexão, tem-se a Equação 82.

$$\lambda_f = \frac{C_B}{f_c} \quad \text{Equação 82}$$

<sup>17</sup> Dos dados do material calcula-se a  $f_c$  para 103 Hz, enquanto que as medições de Índice de Redução Sonora (SRI) têm uma pronunciada queda em 200 Hz, a qual pode ser determinada como frequência crítica.

Tendo em vista que a espessura da parede é 10,6 cm, verifica-se que a condição ( $f \leq 6h$ ) expressa por Beranek (1980, p. 293), acima referida, alcança no máximo a igualdade, ou seja:

$$f \leq \frac{C_B}{f_c} = 0,57 \cdot 0,6 \text{ m}$$

Ljungren (1991, p.2338) enfatiza, porém, que essa faixa de aplicação da Teoria Clássica de Placas Finas (Cremer et al, 1973) pode ser expandida, tendo como limite três vezes a espessura da parede. Considera-se, portanto:

$$f \leq \frac{C_B}{f_c} = 0,57 > 3 \cdot 0,106 = 0,318 \text{ m}$$

A partir dessa opção, pode-se calcular a máxima frequência de aplicação da Teoria Clássica de Placas Finas, empregando  $f \leq 0,318$  e deixando  $C_B$  em função de  $f$ . Obtém-se, então,  $f = 2033$  Hz.

Esse valor encontrado reforça os resultados obtidos, onde se observa, na comparação das curvas experimentais e numéricas, uma ótima concordância na faixa de frequências entre a crítica e 2000 Hz. A partir daí, surge uma divergência maior entre as essas curvas.

É importante lembrar que a frequência crítica está localizada na região de coincidência, a qual é definida através do “Método do Patamar” (Plateau Method), descrito por muitos autores, dentre os quais: por Beranek (1980, p. 300), Reynolds (1981, p. 311), Beranek (1988, p. 305) e Gerges (2000, p. 217), conforme foi referido no Capítulo 2.

Verificou-se, inicialmente, a aplicabilidade desse método, através da avaliação da razão entre a menor dimensão (altura) dividida pela espessura, cujo resultado deve ser maior do que 20. Obteve-se o valor 30,19 para a parede em estudo. Assim, pode-se aplicar o Método do Patamar, utilizando-se a seqüência descrita a seguir e citada por Gerges (2000, p. 217).

- a) Determinar a Perda de Transmissão do sistema em 500 Hz, através da Lei da Massa (Equação 23 citada no Capítulo 2). Traçar uma linha com 6,0 dB de aumento por oitava.<sup>18</sup>
- b) Consultar o valor tabelado referente à altura do patamar. Traçar uma linha em cuja interseção, com a definida no item anterior, dará origem a frequência inferior de coincidência.

---

<sup>18</sup>  $PT = 20 \log M \cdot f - 47,4$

- c) Multiplicar essa frequência obtida no item “b” pelo valor da largura do patamar, que também é tabelado, definindo a frequência superior de coincidência.
- d) Acima da frequência superior de coincidência, a Perda de Transmissão mostra aumentos entre 10 a 18 dB/oitava. Autores como Bies & Hansen (1988, p. 189) citam 09 dB/oitava.

Os valores tabelados, para o tijolo, referidos nos itens “b” e “c”, são os mesmos em todas as referências acima citadas, ou seja:

? Altura do patamar = 37

? Largura do patamar = 4,5

A Figura 67 mostra o método do patamar aplicado sobre as curvas experimentais de 28 dias CB e SB.

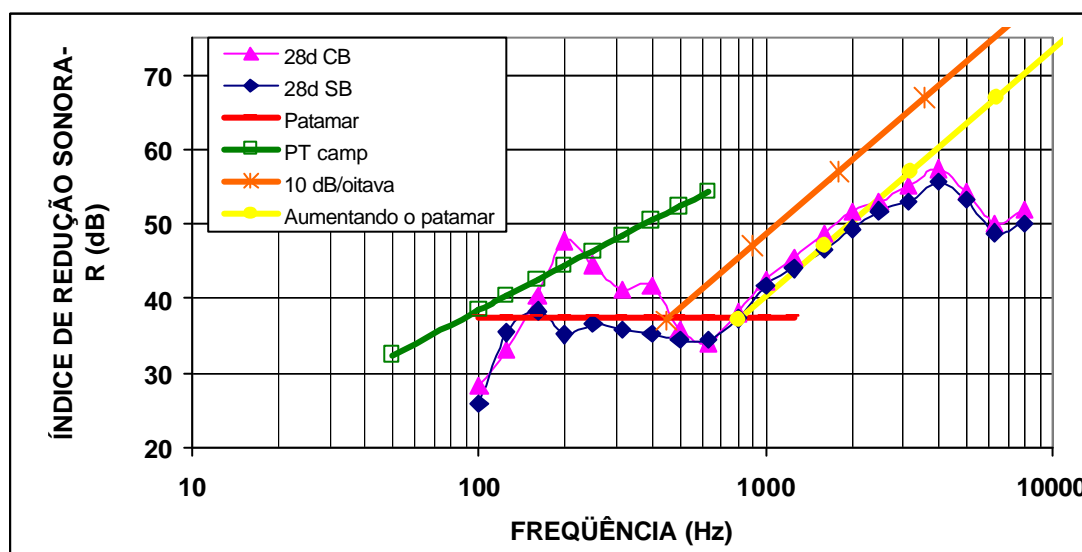


Figura 67 : Método do Patamar aplicado para alvenaria de tijolos cerâmicos maciços.

Observa-se que, na aplicação do Método do Patamar sobre as curvas experimentais, a concordância fica prejudicada porque o valor referido para a determinação da largura é muito pequeno, resultando um gráfico deslocado.

Salienta-se, no entanto, que as referências bibliográficas, como: Beranek (1980, p. 300), Reynolds (1981, p. 311), Beranek (1988, p. 305) e Gerges (2000, p. 217) citam 4,5 como fator de multiplicação para o estabelecimento da largura do patamar, referindo-se simplesmente ao tijolo.

Verifica-se que o simples aumento desse fator, para um valor em torno de 8,0, levaria a uma melhor concordância com as curvas experimentais. É importante lembrar, novamente, a necessidade de considerar as diferenças entre as respostas relativas ao tijolo isoladamente e a alvenaria, como um material composto.

A análise dos valores obtidos nas curvas experimentais, na região posterior a frequência crítica, apresentou os resultados referidos na Tabela 22, ou seja, tem-se 9,09 dB/oitava para a parede com conexões elásticas e 8,44 dB/oitava para a parede com conexões rígidas.

Tabela 22 : Inclinação da reta na parte posterior do Método do Patamar.

Curva	Equação	dB/oitava
28d – CB	$30,2163 \log (x) - 48,6352$	9,09
28d – SB	$28,0383 \log (x) - 43,2267$	8,44

Observa-se que os valores mostrados na Tabela 22 aproximam-se do limite inferior teórico referido na bibliografia sobre perda de transmissão em paredes simples (Figura 4, capítulo 2).

### 6.2.2 Ressonâncias

No Capítulo 2, a Figura 4 mostrou o gráfico usualmente utilizado para identificar a “curva típica de PT para parede simples”, conforme afirmam, por exemplo: Gerges (2000, p.209), Beranek (1980, p. 287), Mendéz (1992, p. 110), Bies & Hansen (1988, p. 189) e Parkin & Humphreys (1979, p. 138).

Segundo essa curva, existe uma região controlada pelas ressonâncias mecânicas da parede de alvenaria, onde o Índice de Redução Sonora (R) é muito pequeno.

O cálculo das frequências de ressonâncias, no caso em estudo, refere-se a uma parede simplesmente apoiada. Essa condição é geralmente aceita, exceto nos casos onde há amarração executada através de ferros argamassados. Beranek (1980, p. 287) detalha: “By a ‘supported plate’ we mean that at the boundaries, no transverse motion is possible but the slope of the plate is not constrained”.<sup>19</sup>

<sup>19</sup> Por uma “placa suportada” nós entendemos que nas bordas os movimentos transversais não são possíveis, mas a flexão da placa não é impedida.

Autores como: Szilard (1974, p. 415), Beranek (1980, p. 286) e Méndez (1994, p. 110) como foi citado no Capítulo 2, recomendam a Equação 83 (ou suas variantes) para o cálculo das freqüências de ressonâncias. Considera-se que  $m$  e  $n$  são números inteiros (0,1,2,...) e, também, que  $a$ ,  $b$  e  $h$  correspondem às dimensões da parede (largura, altura e espessura, respectivamente).

$$f_{m,n} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}} \cdot \sqrt{\frac{B}{\rho \cdot h}}$$

Equação 83

Para a parede de alvenaria estudada, a rigidez  $B$  (dada pela Equação 81) é função de:  $E$ = Módulo de Elasticidade ( $2,01 \times 10^9$  N/m<sup>2</sup>) e  $\nu$  = Coeficiente de Poisson (0,2). A densidade empregada foi 1839 Kg/m<sup>3</sup>.

Os resultados obtidos para as primeiras freqüências de ressonância estão mostrados na Tabela 23.

Tabela 23 : Primeiros modos da parede de alvenaria estudada

n \ m	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0		3,1	12,2	27,5	49,0	76,5	110,1	149,9	195,8	247,8	305,9
1	5,0	8,1	17,3	32,6	54,0	81,5	115,2	154,9	200,8	252,8	311,0
2	20,1	23,1	32,3	47,6	69,0	96,6	130,2	170,0	215,9	267,9	326,0
3	45,2	48,3	57,4	72,7	94,2	121,7	155,3	195,1	241,0	293,0	351,2
4	80,4	83,4	92,6	107,9	129,3	156,8	190,5	230,3	276,2	328,2	386,3
5	125,6	128,6	137,8	153,1	174,5	202,0	235,7	275,5	321,4	373,4	431,5
6	180,8	183,9	193,0	208,3	229,8	257,3	291,0	330,7	376,6	428,6	486,8
7	246,1	249,2	258,3	273,6	295,1	322,6	356,2	396,0	441,9	493,9	552,0
8	321,4	324,5	333,7	349,0	370,4	397,9	431,6	471,4	517,2	569,3	627,4
9	406,8	409,9	419,1	434,4	455,8	483,3	517,0	556,7	602,6	654,6	712,8
10	502,2	505,3	514,5	529,8	551,2	578,7	612,4	652,2	698,1	750,1	808,2

Verifica-se que os primeiros modos localizam-se em freqüências bem abaixo da faixa de excitação (100 Hz a 8000 Hz), portanto os modos cujas freqüências estão assinalados em cinza não participam da análise. Somente a partir dos modos (0,6), (5,0) e (4,3) encontram-se os modos excitados durante a análise da parede.

Beranek (1980, p. 287) relaciona, ainda, os resultados obtidos para diferentes condições de fixação da parede, isto é, simplesmente apoiada ou engastada.

*If the panel were rigidly clamped at the boundaries, thereby restricting both the motion and slope to zero, the lowest resonance frequency would be twice as high and all others would be somewhat higher than for the 'supported' case<sup>20</sup>*

Assim, observa-se que a freqüência de ressonância fundamental, bem como suas primeiras harmônicas, para a parede de alvenaria de tijolos maciços cerâmicos, pertencem a uma faixa de freqüências muito abaixo da estudada em acústica arquitetônica, ou seja, de 100Hz a 5000 Hz, conforme recomenda a norma ISO 140.

---

<sup>20</sup> Se o painel foi rigidamente engastado nas extremidades, assim restringindo ambos os movimentos e tendendo para zero, a menor freqüência de ressonância seria duas vezes maior e todas as outras seriam um pouco maior que para o caso das apoiadas.

A reunião de conhecimentos das áreas de acústica, vibrações e edificações, buscando correlacioná-los numa base de dados multidisciplinares, foi um dos objetivos do presente trabalho.

Ao longo da pesquisa, observou-se uma dissociação que se reflete em fatores que vão desde a terminologia até a aplicação equivocada de conceitos. As três áreas envolvidas apresentam termos técnicos específicos muitas vezes desconhecidos nas demais.

Fatores importantes numa área são desconsiderados nas outras. Exemplificando: o traço da argamassa e o fator água/cimento influenciam a resistência, a trabalhabilidade, a porosidade e a rigidez da parede. Tais fatores podem alterar a resposta acústica da alvenaria. Birlik (2001, p. 237) cita que a simples modificação no traço e a substituição de componentes na argamassa de revestimento podem assegurar um ganho de até 19 decibéis no isolamento de uma parede de alvenaria.

O conhecimento de uma alvenaria depende, portanto, da correta caracterização do tipo de tijolo (ou bloco) e da argamassa com todos os seus componentes. Os textos de acústica, mesmo os específicos da área arquitetônica, ignoram essas diferenças, generalizando simplesmente: tijolo, bloco, argamassa e concreto.

As características físico-mecânicas dos materiais utilizados nas edificações, ao serem mencionadas nas bibliografias de acústica, apresentam um elevado coeficiente de variação, como foi mostrado no Capítulo 2.

Pode-se afirmar que, ao citar propriedades acústicas, é fundamental a identificação clara do tipo de material a que elas se referem. Mesmo com a descrição precisa dos materiais constituintes, quando se executa a análise da isolação de uma parede é necessário lembrar que a alvenaria é um material composto e ortotrópico.



As dimensões e a forma de fixação da parede nas superfícies circundantes são fatores que precisam ser considerados e que podem mudar, substancialmente, de um caso para outro.

O tipo de ruído gerado nos ensaios é outro exemplo da variação que ocorre mesmo entre as duas áreas mais similares. Em acústica arquitetônica trabalha-se com ruído rosa, enquanto em vibrações emprega-se ruído branco.

Buscou-se, por isso, em especial nos Capítulos 1 e 2, identificar os principais pontos duvidosos, definindo-os de forma simples, a fim de que fossem compreendidos por profissionais das diferentes áreas.

Outro objetivo do presente trabalho foi estabelecer um re-estudo da conceituação básica de acústica aplicada à construção civil. Concluiu-se que existe uma necessidade premente de agregarem-se informações às interpretações de uso corrente, aprofundando as questões teóricas que originam as práticas comumente empregadas.

Ábacos largamente utilizados, como Beranek (1988, p. 323) permitem identificar a frequência crítica de uma parede, a partir somente de sua espessura, conforme está mostrado na Figura 68. Observa-se, porém, que concreto, madeira e tijolo estão na mesma reta, como se apresentassem comportamentos idênticos.

É interessante lembrar, que pesquisadores como Beranek buscaram metodologias para facilitar o entendimento e aplicação de conceitos acústicos. Grande parte do material disponível, embora re-editado em épocas mais recentes, é originário do início do século passado, quando não havia equipamentos e técnicas que disponibilizassem informações mais precisas sobre os materiais e seu comportamento. É notável, porém, a sinceridade do autor ao enfatizar as restrições impostas ao seu trabalho, embora ao utilizar tais informações, infelizmente, grande parte dos outros pesquisadores ignore essas enfáticas afirmações. Ao citar valores para amortecimento de tijolos, por exemplo, Beranek (1980, p.295) salienta: *"These values for  $\eta$  are approximate and in most cases based on very limited data"*.<sup>21</sup>

O presente estudo comprovou a pouca confiabilidade desse método para a alvenaria. A frequência crítica demonstrada de forma experimental e numérica (630 Hz) encontra-se muito distante da resultante do ábaco ( $\eta$  200 Hz), conforme está assinalado na Figura 68, para uma parede com espessura de 10,6 cm.

---

<sup>21</sup> Estes valores para  $\eta$  são aproximados e na maioria dos casos estão baseados e dados muito limitados.

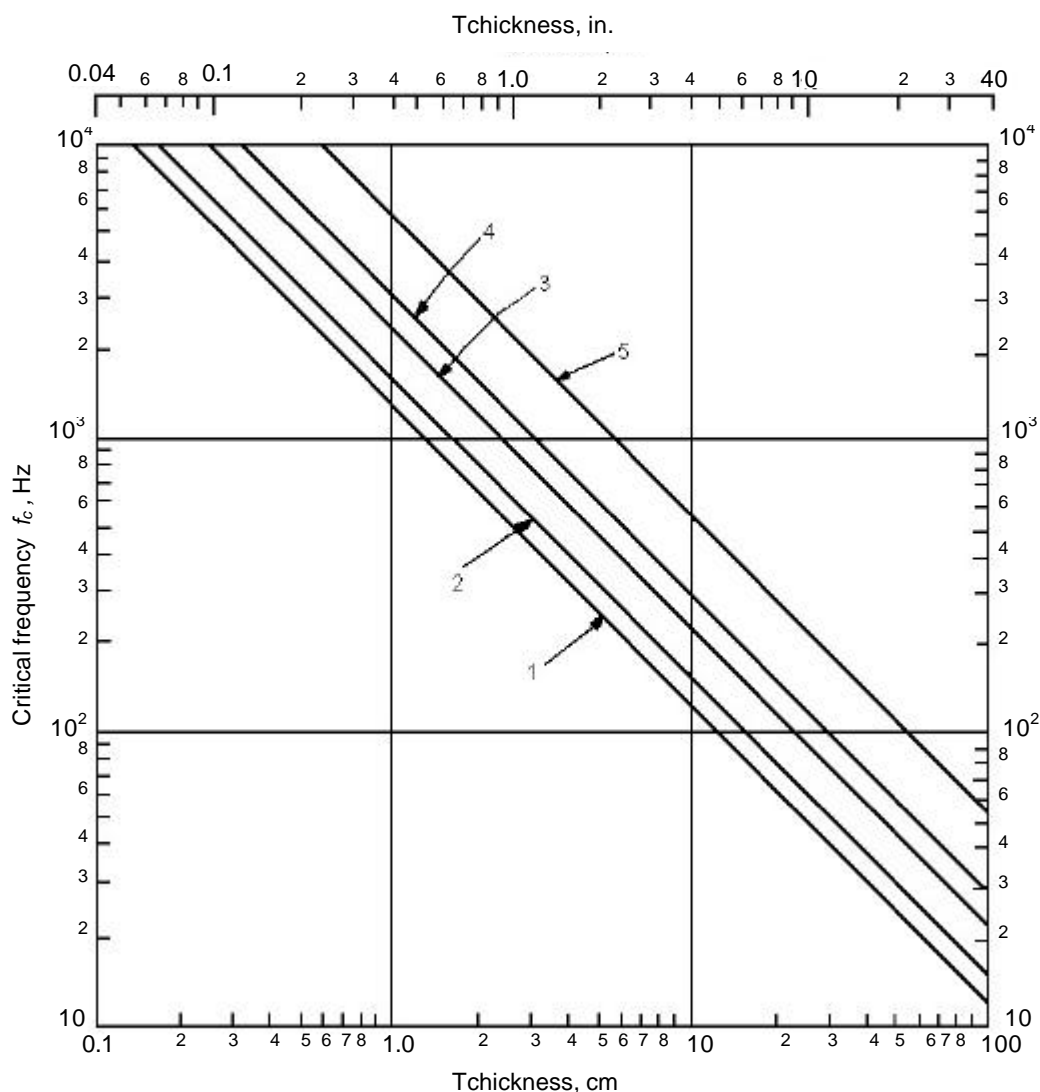


Figura 68 - Ábaco da frequência crítica em função da espessura.

Fonte: BERANEK (1988, p. 323).

Outra interpretação de uso corrente em acústica arquitetônica é a centralização do estudo sobre o isolamento de edificações na Lei da Massa, ou seja, na resposta não-ressonante da parede. A frequência crítica de coincidência para uma parede de alvenaria, no entanto, localiza-se em faixas de baixas frequências, por isso torna-se fundamental a análise da contribuição da resposta ressonante da parede (acima da frequência crítica de coincidência), onde o Índice de Redução Sonora não é determinado pela Lei da Massa, mas pela rigidez e amortecimento. Além disso, a amplitude da resposta não-ressonante da parede é geralmente pequena, tanto que o erro na vibração total da parede é pequeno quando a vibração não-ressonante é negligenciada, segundo afirma Craik (1996, p. 05).

O emprego da Figura 4, mostrada no Capítulo 2, sem a identificação das freqüências de coincidência e ressonâncias leva a conhecidos equívocos como modelar tendências, aplicando a Lei da Massa, em regiões acima da freqüência crítica.

A partir dos resultados obtidos no presente estudo, propõe-se uma adaptação na Figura 4, tornando-a mais específica para as paredes espessas utilizadas nas edificações. Salienta-se que a parede analisada (tijolo maciço cerâmico sem reboco) apresentava 10,6 cm de espessura, ou seja, um valor menor se comparado com paredes rebocadas e blocos. O aumento na espessura leva a um deslocamento da freqüência crítica (mantidas as demais propriedades) para valores inferiores, conforme foi demonstrado no Capítulo 6, aumentando a necessidade de emprego de um modelo diferenciado de análise, como o proposto na Figura 69.

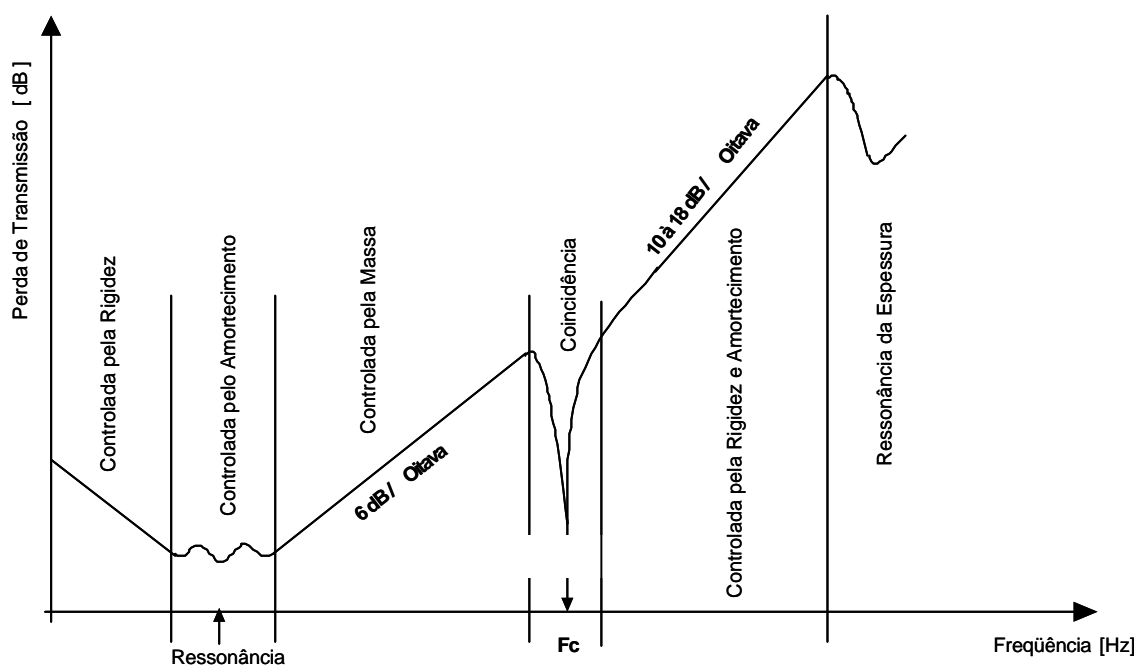


Figura 69 : Perda de transmissão em paredes simples espessas – caso da alvenaria.

A Figura 69 pode ser dividida em seis regiões. A Figura 4, ao contrário, destacava apenas quatro regiões: uma controlada pela rigidez, a segunda localizada nas primeiras ressonâncias mecânicas (controlada pelo amortecimento), a terceira controlada pela Lei da Massa (6 dB/oitava) e a última referente a coincidência.

Observando a Figura 68 identificam-se as seguintes regiões:

1. Há um decréscimo na Perda de Transmissão (PT). É uma região controlada pela rigidez;

2. PT é muito pequena, ocasionando grande transmissão sonora. É onde se localizam as primeiras ressonâncias mecânicas da parede, estando sob grande influência do amortecimento;
3. Há um crescimento da PT da ordem de 6 dB/oitava, constituindo-se na chamada Lei da Massa;
4. Região da coincidência, onde está situada a frequência crítica. No caso das paredes simples e espessas empregadas em edificações é a região mais importante, devido à faixa de frequências que abrange e a acentuada diminuição que provoca na Perda de Transmissão.
5. Há um aumento linear de 08 a 10 dB/oitava na PT, destacando-se novamente a influência da rigidez e do amortecimento;
6. Região onde surge nova diminuição na PT, devida às ressonâncias relativas à espessura da parede.

Em relação à quarta região acima citada (coincidência) destaca-se, ainda, a necessidade de revisão nos valores tabelados para aplicação do Método do Patamar. A tabela de uso corrente apresenta apenas “tijolo”. Acredita-se que um valor maior é mais adequado para a “alvenaria”, conforme foi demonstrado no Capítulo 6, onde se comprovou a melhor concordância do método analítico com o experimental empregando-se 8,0 em lugar de 4,5 para determinação da largura do patamar. Quanto à altura do patamar o valor tabelado (37) apresentou boa identificação com o experimental, podendo ser mantido.

A forma habitual de fixação da parede (com argamassa) leva a existência de um patamar bem definido na região de coincidência, situado da frequência crítica em direção às frequências menores. Quando a conexão elástica (com borracha e silicone) é usada, ele desaparece, como foi mostrado no Capítulo 5.

Outra questão conceitual, diretamente envolvida nos estudos acústicos referentes às paredes simples de alvenaria, é a validade de muitos estudos e fórmulas, que estão restritos a uma determinada faixa de frequências, tendo em vista a utilização da Teoria de Placas Finas, como foi detalhado no Capítulo 6.

A própria terminologia empregada em acústica arquitetônica causa problemas de interpretação. Via de regra, trabalha-se com dois tipos de ruído: aéreo e de impacto. Sabe-se, no entanto, que o “*ruído transportado pela estrutura*” não é, necessariamente, de impacto. Estudos na área de vibrações são pouco enfatizados, mas muito importantes na determinação do isolamento sonoro em edificações.

Uma outra revisão necessária diz respeito à ampliação da faixa de avaliação do ruído em edificações. Equipamentos de medições de acústica arquitetônica (como o analisador 4418, citado no Capítulo 5), bem como os programas específicos dessa área (como o 5305

referido no Capítulo 6), iniciam a avaliação na frequência de 100 Hz. Em normas, como a ISO 140, a faixa de análise especificada é, apenas, de 100 a 5000 Hz.

O ruído encontrado cotidianamente nas edificações apresenta um espectro bem mais amplo. As baixas frequências originárias, por exemplo, da música, exemplificam a importância de que os estudos de isolamento em acústica arquitetônica contemplem tais faixas de frequências.

Ao proceder ensaios de isolamento até 8000 Hz, foi possível identificar a influência das ressonâncias da espessura da parede no comportamento do Índice de Redução Sonora. A presença do vale completo (decaimento e subida) normalmente não aparece na bibliografia, pois a faixa de análise não contempla 8000 Hz.

Assim, o presente trabalho comprovou a importância de estender essa faixa de análise. Pode-se pensar, por exemplo, no estudo de toda a faixa audível: 20 Hz a 20000 Hz.

A determinação dos parâmetros físico-mecânicos da parede de tijolos maciços cerâmicos esteve dentre os objetivos propostos para a presente Tese, tendo em vista a necessidade de informações mais específicas sobre o material em estudo e a existência de grande disparidade entre as referências bibliográficas.

A área de edificações, geralmente, centra seus estudos em estática, enquanto em acústica, os conceitos dinâmicos são uma constante. Com isso, valores referentes ao comportamento dos materiais constituintes e da parede como um todo, não estão disponíveis, para utilização na determinação de respostas a ruídos e vibrações, inclusive nas bibliografias específicas da área de alvenaria.

A dificuldade, na caracterização das propriedades dos materiais utilizados em edificações, não é exclusividade brasileira. Craik (1996, p. 47) afirma que: *“Ultimately this lack of knowledge about the materials used limits the accuracy of any prediction method (including SEA)”*.<sup>22</sup>

Os problemas encontrados, durante a determinação das propriedades físico-mecânicas da alvenaria (detalhadas no Capítulo 5), levaram à identificação de fatores influentes nos resultados desse tipo de ensaio e que precisam ser considerados. A qualidade dos materiais constituintes da alvenaria, como o tijolo e a areia, é um deles. Lembra-se que os primeiros tijolos adquiridos tiveram que ser rejeitados e, nos ensaios de resistência da argamassa, detectaram-se “torrões” de barro.

A inexistência de procedimentos ou normas técnicas específicas para determinação dos diversos Módulos de Elasticidade, bem como a omissão de informações importantes nas

---

<sup>22</sup> Ultimamente, essa carência de conhecimento sobre os materiais usados, limita a precisão de qualquer método de predição (inclusive SEA).

referências relativas aos ensaios de amortecimento da parede (o Anexo E da ISO 140 não contempla, por exemplo, o tipo de acelerômetro recomendado e as distâncias a serem obedecidas nos ensaios).

O presente estudo reforça a viabilidade de aplicação de SEA na área de edificações. Sua faixa de aplicabilidade (mostrada no Capítulo 6) permite utilizar essa abordagem na detecção da frequência crítica da parede, desde que existam dados confiáveis sobre os parâmetros físico-mecânicos.

Além disso, ao trabalhar-se com SEA pode-se incluir a resposta ressonante e a não-ressonante da parede, conforme ressalta Craik (1996, p. 04). Para aplicar essa abordagem não é necessário ser um profundo conhecedor das teorias que a fundamentaram. Craik (1996, p. xvii) afirma:

*Much of the literature on SEA is concerned with studies of the fundamentals of coupled resonators and other purely theoretical matters. Although these studies are important for a detailed understanding of SEA they are not necessary for the its application (...).*<sup>23</sup>

Comprovou-se que o emprego facilitado de SEA, através de um programa computacional, depende da disponibilidade dos dados de entrada necessários, bem como da compreensão de como essas informações são utilizadas durante a simulação.

Concluiu-se, por exemplo, que no caso do programa estudado (AutoSEA versão 2.2.2) o eixo principal **E1** deve ser considerado paralelamente às juntas de argamassa. Nos trabalhos executados na construção civil, essa direção normalmente não é priorizada, pois os carregamentos principais são perpendiculares a ela.

Salienta-se, no entanto, que o ensaio do Módulo de Elasticidade perpendicular às juntas de argamassa, normalmente realizado para edificações, juntamente com a determinação do Coeficiente de Poisson nas duas direções (horizontal e vertical), possibilitaram a perfeita determinação de dados de entrada, capazes de gerar resultados simulados e calculados em concordância com os experimentais.

Com isso, pode-se afirmar que, aos ensaios de Módulo de Elasticidade habitualmente executados nos laboratórios de materiais de construção civil, pode-se acrescentar apenas a identificação das deformações (com simples relógios comparadores), calculando os Coeficientes de Poisson e, assim, obterem-se quase todas as informações necessárias à aplicação de SEA.

---

<sup>23</sup> Muita da literatura em SEA diz respeito aos estudos dos fundamentos de ressonadores acoplados e outras matérias puramente teóricas. Embora esses estudos sejam importantes para um conhecimento detalhado de SEA não há necessidade para sua aplicação.

A questão mais complexa é a determinação do amortecimento da parede. Revisões na norma ISO 140 já estão sendo propostas. Schmitz & Méier (2000, p.130) consideram que o Fator de Perda Total deve acompanhar os relatórios de ensaios de transmissão sonora, devido à importância de tal informação. Discutem, também, o emprego de excitação contínua (por “*shaker*”) em substituição à excitação por impacto (com martelo).

Agrega-se a essas preocupações, a partir da experiência do presente estudo, a recomendação do emprego de uma célula de força, caso seja mantida a recomendação de excitação por impacto, a fim de identificar a intensidade da batida, pois ela influencia a resposta obtida.

A especificação do acelerômetro a ser empregado, evitando que sua sensibilidade capte ruídos espúrios, constitui-se em outra recomendação, que deve constar na norma referente a medições de amortecimento da parede.

Concluiu-se, portanto, que o desenvolvimento de uma metodologia clara e eficaz para a determinação do fator de amortecimento total (bem como de seus constituintes: perda interna e por acoplamento) para as paredes das edificações é um dos trabalhos mais urgentes a ser realizado na área de acústica arquitetônica.

O modelo simulado no programa AutoSEA demonstrou a viabilidade de sua utilização na localização da frequência crítica, desde que os parâmetros físico-mecânicos estejam corretamente definidos. Não se apresentou eficiente, no entanto, para a determinação das ressonâncias relativas à espessura da parede (altas frequências). Observou-se, ainda, que em baixas frequências, o programa refere-se ao comportamento da parede sob conexões elásticas, apresentando uma resposta diferente da habitualmente esperada em edificações, onde as conexões são geralmente rígidas.

A Figura 70 compara as curvas experimentais sob conexões elásticas (CB) e rígidas (SB) com as simuladas para alvenaria isotrópica e ortotrópica. Constata-se que, para o caso de utilização do AutoSEA, deve-se optar pelo emprego do modelo isotrópico, devido as dificuldades inerentes à consideração da alvenaria como material ortotrópico e a pequena diferença obtida nas curvas de resposta.

Ressalta-se, no entanto, que a ortotropia da alvenaria é uma realidade. Precisa ser levada em conta, na análise do isolamento acústico das edificações, como foi demonstrado no Capítulo 06, pois influencia, por exemplo, a diferença detectada na velocidade das ondas que se deslocam em diferentes direções na parede.

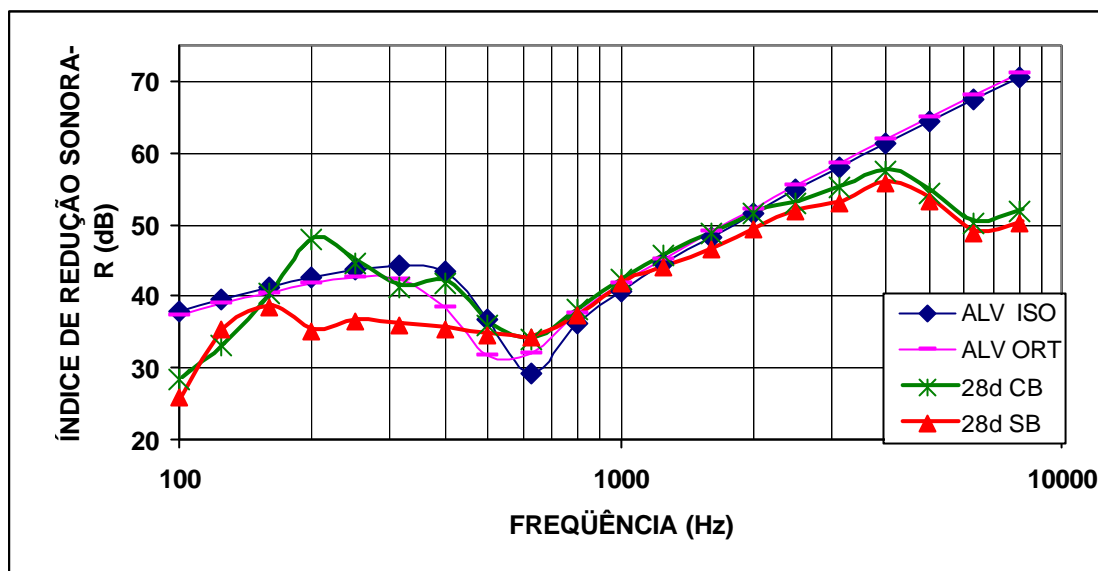


Figura 70 : Comparação da alvenaria simulada como isotrópica e ortotrópica.

Acredita-se que as normas técnicas relativas ao desempenho acústico de edificações (em elaboração, no caso brasileiro) precisam ser cuidadosamente avaliadas, devido à inexistência (ou a presença restrita) de informações específicas referentes aos materiais de isolamento empregados. Pouco se fala dos elementos constituintes desses materiais e suas características de isolamento.

A adoção de um número único para isolamento sonoro em ambientes edificadas pode ser tolerada, como afirma Cook (1990, p. 146). Entretanto, não é possível fazer uso de apenas um tipo de índice, devido à ampla variedade de formas de incidência de ruído e dos usos diferenciados a que a sala de recepção pode estar submetida.

Uma norma deve listar os índices recomendados e, principalmente, mencionar um método claro e simples para sua determinação, bem como as restrições inerentes ao processo.

É preciso lembrar que, assim como os materiais e técnicas construtivas empregadas, os níveis de exigência dos usuários das edificações variam de região para região.

A Ergonomia valoriza a qualidade de vida do trabalhador em seu ambiente de trabalho, sem esquecer que essa mesma pessoa precisa de descanso e lazer. Logo, todos os ambientes devem estar livres de “patologias acústicas”.

Uma das questões normalmente enfocadas para justificar o deficiente desempenho acústico das edificações é o aumento no custo da construção. Estudos específicos sobre custos de implantação do isolamento acústico em edificações, como os apresentados por Kuerer (1997) e Amarilla (1992), embora realizados em outros países (com realidades sócio-econômicas e tecnológicas distintas), servem para repensar essa afirmativa.



A prevenção da patologia, através de um estudo do projeto e detalhada especificação de materiais, equipamentos e formas construtivas pode minimizar custos de reparos e aumentar a satisfação do usuário da edificação.

Acredita-se, por conseguinte, ter contribuído: dirimindo dúvidas conceituais; especificando parâmetros de um sistema construtivo e estabelecendo uma seqüência de procedimentos para determiná-los; comprovando a eficiência e as restrições que devem ser consideradas no emprego de programas computacionais.

Com isso, considera-se que a rapidez e a facilidade do estudo do desempenho acústico das edificações pode, em breve, estar ao alcance dos profissionais da área e, em decorrência contribuindo para a melhoria na qualidade de vida das pessoas.

## 7.1 SÍNTESE DAS CONCLUSÕES

1 – Quanto às questões conceituais, concluiu-se que:

- ? A divergência na terminologia dificulta o entendimento entre as áreas envolvidas;
- ? Alguns conceitos da Acústica e Vibrações não estão adaptados as especificidades das edificações, como por exemplo, o gráfico do Isolamento e o Método do Patamar;

2 – Quanto à determinação de Parâmetros observou-se:

- ? A inexistência de dados confiáveis, referente às características físico-mecânicas e acústicas dos materiais;
- ? A deficiência de informações dificulta a execução de atividades experimentais;
- ? Os dados empregados precisam ser verdadeiramente representativos dos materiais para obter-se respostas coerentes com a realidade;

3 – Quanto ao isolamento da parede contactou-se:

- ? É possível empregar SEA, em especial para definir a freqüência crítica.
- ? Pode-se considerar a alvenaria como Isotrópica nas simulações.
- ? O pacote comercial utilizado não reconhece a ressonância devida à espessura da parede.
- ? A forma de fixação das bordas e o Fator de Perda Total da parede influenciam o “R”, por isso devem ser especificados nesse tipo de ensaio.

## 7.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se para trabalhos futuros:

- ? Estabelecimento de uma metodologia para determinação do amortecimento nos materiais de construção civil, atendendo suas especificidades de espessura, fixação nas bordas e elementos constitutivos, como: concreto (com diversos traços e granulometrias) e alvenaria com distintas argamassas e unidades (tijolos e blocos cerâmicos, sílico-calcáreos, de concreto e outros).
- ? Determinação de propriedades físico-mecânicas dos materiais de construção civil, viabilizando o seu estudo detalhado na área de acústica.
- ? Estabelecimento de um Banco de Dados de propriedades acústicas (como por exemplo: fator de amortecimento, fator de acoplamento e coeficiente de absorção) dos materiais normalmente empregados em edificações.
- ? Estudo para quantificação da influência do reboco (sob diferentes traços e materiais constituintes) no isolamento acústico de edificações.
- ? Determinar o comportamento e as características de outros tipos de materiais (blocos furados com diferentes desenhos), seguindo a metodologia desenvolvida na presente Tese.
- ? Determinação de processos construtivos capazes de alterar características como densidade e rigidez dos elementos da edificação, como: paredes, lajes, vigas e pilares.
- ? Aprofundar os estudos do isolamento acústico na faixa de frequências da coincidência, visando propor novos valores para o Método do Patamar, específicos para cada processo construtivo, tendo em vista que o presente trabalho demonstrou que essa região é de extrema importância, devido à grande faixa de frequências que cobre e à pequena perda de transmissão que gera.
- ? Propor a inclusão do efeito das ressonâncias devido à espessura da parede no AutoSEA e estudar a utilização de outros programas computacionais.
- ? Estudo comparativo de custos referentes à implantação de projeto de isolamento acústico nas edificações.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- ALY, V. L. C. **Determinação da capacidade resistente do elemento parede de alvenaria armada de blocos de concreto submetido à esforços de compressão**. 1992. 247 f. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- AMARILLA, Beatriz Cecília. Influence of compactness on housing sound insulation costs. In: **Applied Acoustics**, 35, p.203-219, 1992.
- \_\_\_\_\_. Aspectos economicos del confort acustico. In: Méndez et all. **Acustica Arquitectónica**. 1ª Ed. Buenos Aires:UMSA. 1994, p 221- 238.
- ARENAS, Jorge P. **Control de Ruido em Edifícios**. Apuntes del Curso. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Instituto de Acústica. Valdivia,1997, 148 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA (ABCI). **Manual técnico de alvenaria**. [Coordenação: Carlos Alberto Tauil] . São Paulo, ABCI/PROJETO, 1990, 280 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10151**: Acústica – Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – Procedimento. Rio de Janeiro, 2000.
- \_\_\_\_\_. **NBR 10152**: Acústica – Níveis de ruído para conforto acústico. Rio de Janeiro, 1986.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13529**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Terminologia. Rio de Janeiro, 1995.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7170**: Tijolo maciço cerâmico para alvenaria. Rio de Janeiro, 1983.
- \_\_\_\_\_. **NBR 8041**: Tijolo maciço cerâmico para alvenaria – forma e dimensões. Rio de Janeiro, 1983.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6460**: Tijolo maciço cerâmico para alvenaria – verificação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1983.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7215**: Cimento Portland - determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1991.
- \_\_\_\_\_. **NBR 8522**: Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.
- \_\_\_\_\_. **TB- 6**: Texto normativo – Acústica - Definições. Rio de Janeiro, 1981.
- BÁRING, João Gualberto de Azevedo. Desenvolvimento tecnológico em acústica das edificações: conceituação (1ª e 2ª Parte). In: **Tecnologia de Edificações /Projeto de Divulgação Tecnológica Lix da Cunha**. São Paulo: Pini/IPT, 1988, p. 415 - 460
- BARROS, Leonardo. Perturbações causadas pelo ruído. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE CONTROLE DE RUÍDO, 4, 1992, Rio de Janeiro. **Anais...**Rio de Janeiro, 1992. p.115-116.
- BENTO COELHO, J. L. Políticas européias sobre ruído ambiente e o espaço ibérico. In: **Revista de Acústica e Vibrações**, 22. Florianópolis: SOBRAC, 1998, p.18-22.
- BERANEK, Leo Leroy. **Noise Reduction**. Huntington, New York: Robert E. Krieger Publishing Company, 1980, 752 p.
- \_\_\_\_\_. **Noise and Vibration Control**. Revised Edition. Washington, DC: Institute of Noise Control Engineering, 1988, 672 p.
- BERISTÁIN, Sérgio. Problemas mas comunmente encontrados en proyectos de control de ruido. IN: I Congresso Brasil/Argentina e 15º Encontro da SOBRAC. **Anais...** Florianópolis: 1994, p.534-537.

\_\_\_\_\_. El ruido es un serio contaminante. In: I Congresso Iberoamericano de Acústica, I Simpósio de Metrologia e Normalização em Acústica e Vibrações do Mercosul e 18º Encontro da SOBRAC. **Anais...** Florianópolis: 1998, p.135-142 .

BIES, David & HANSEN, Colin H. **Engineering noise control: theory and practice**. London: Unwin Hyman, 1988, 411p.

BIRLIK, Gülin. Technical note: the contribution of to the perlite to the sound transmission loss of solid masonry walls. **Building Acoustics**, 8 (3), p. 237-244, 2001.

BREMNER, P. G. Sound transmission loss modelling of real structures using statistical energy analysis. In: *Internoise 1994. Proceedings...*

BROCH, Jeans Trampe. **Mechanical vibration and shock measurements**. Brüel&Kjaer : October 1980 – 2a edição.

CAVALHEIRO, Odilon Pâncaro. Resistência e deformabilidade de pequenas paredes em alvenaria cerâmica tradicional. **Proceedings...** 5<sup>th</sup> International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries. Florianópolis-Brazil, 21-24 August 1994, p.146-155.

CEDATE - CENTRO DE DESENVOLVIMENTO E APOIO TÉCNICO À EDUCAÇÃO. **Espaços educativos: uso e construção**. Brasília, MEC/CEDATE, 1988, 58 p.

CHEN, W. F. & SALEEB, A. F. **Constitutive Equations for Engineering Materials**. John Wiley and Sons, New York, N.Y. Vol. 1, 1992.

CIMERMAN, Benjamin & BHARJ, Tej. Application of statistical energy analysis to a passenger vehicle: combining analytical and test-based prediction in a hybrid model. In: *Inter-noise 96. Proceedings...* Liverpool: 1996

CIMERMAN, Benjamin; BHARJ, Tej & BORELLO, Gerard. **Overview of the Experimental Approach to Statistical Energy Analysis**. ExpSEA\_1: NV169 (1997)

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resoluções do CONAMA; 1984/91**. 4 ed. rev. e aum. Brasília, IBAMA, 1992, 245 p.

COOK, Ken. Sound insulation: the search for a single rating. In: *Inter-noise 90, Gothenburg-Sweden. Proceedings...*, 1990, p. 143-146.

CRAIK, Robert J. M. Damping of building structures. **Applied Acoustics**, 14, p.347-359, 1981.

\_\_\_\_\_. The measurement of the material properties of building structures. **Applied Acoustics**, 15, p.275-282, 1982a.

\_\_\_\_\_. The prediction of sound transmission through buildings using statistical energy analysis. **Journal of sound and vibration**, 82, p. 505-516, 1982b.

\_\_\_\_\_ & STEEL, John A. The effect of workmanship on sound transmission through buildings: Part 1 – airborne sound. **Applied Acoustics**, 27, p.57-63, 1989a.

\_\_\_\_\_ & IAN EVANS, D. The effect of workmanship on sound transmission through buildings: Part 2 – structure-borne sound. **Applied Acoustics**, 27, p.137-145, 1989b.

\_\_\_\_\_ & Thancanamootoo, A. Flanking transmission through buildings. In: *Inter-noise 90, Gothenburg-Sweden. Proceedings...*, 1990, p. 75-77.

\_\_\_\_\_. Sound transmission paths through a Statistical Energy Analysis model. **Applied Acoustics**, 30, p.45-55, 1990.

\_\_\_\_\_ & BARRY, Peter. The internal damping of building materials. **Applied Acoustics**, 35, p.139-148, 1992.

\_\_\_\_\_ & WILSON, R. Sound transmission through masonry cavity walls. **Journal of sound and vibration**, 179 (1), p. 79-96, 1995.

\_\_\_\_\_. *Sound Transmission through Buildings using Statistical Energy Analysis*. Hampshire, Gower, 1996, 261 p.

\_\_\_\_\_. The effect of design changes on sound transmission through a building. **Applied Acoustics**, 1998, p.145-185.

\_\_\_\_\_. The contribution of long flanking paths to sound transmission in buildings. **Applied Acoustics**, 62, p.29-46, 2001.

CREMER, L. ; HECKL, M e UNGAR, E. E. **Structure-borne sound**. Berlin: Springer-verlang, 1973.

CROCKER, M.J. & PRICE, A. J. Sound transmission using Statistical Energy Analysis. **J. Sound and Vibration**, 9 (3), p. 469-486, 1969.

DUL, Jan & WEERDMEEESTER, Bernard. **Ergonomia Prática**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 1995, 174p.

ENCICLOPÉDIA BASE. **Biblioteca de Auxílio ao Sistema Educacional**. São Paulo: Editora Iracema, 2000, 11 vol, 1ª ed, 3391 p.

EN 12354 / 2000 - EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION BUILDING ACOUSTICS – **Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of products**. Part 1: Airborne sound insulation between rooms. 2000.

FAHY, Frank. **Sound and Structural Vibration: Radiation, Transmission and Response**. London: Academic Press Inc., 1985, 309p.

FAZENDA, Ivani. Dificuldades comuns entre os que pesquisam educação. In: **Metodologia da Pesquisa Educacional**. São Paulo: Cortez, 1991, 174p., p.11-20.

FERREIRA, Cristiano Corrêa. **Estudo dos produtos cerâmicos fabricados na cidade de Santa Maria-RS**. 2002. 186 p. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria - UFSM. Santa Maria.

FREIRE, Paulo. **Pedagogia da Autonomia – Saberes necessários à prática educativa**. São Paulo: Editora Paz e Terra S/A, 1998, 8ª ed, 165p.

FUCHS, H. V., ZHA, X. , POMMERER, M. Qualifying freefield and reverberation rooms for frequencies below 100 Hz. In: **Applied Acoustics**, 59, p.303-322, 2000.

GERGES, S. N. Y. **Ruído – Fundamentos e Controle**. Florianópolis: NR Editora, 2a Ed. Revista e Ampliada, 2000, 675p.

GERRETSEN, Eddy. How indifferent is the sound reduction index of a wall to its boundary conditions? In: **Inter-noise 90**, Gothenburg-Sweden. **Proceedings...**, 1990, p. 47-50.

GIBBS, B. M. & GILFORD, C.L.S. The use of power flow methods for the assessment of sound transmission in building structures. In: **Journal of sound and vibration**, 1976, 49(2), p. 267-286.

IIDA, Itiro. **Ergonomia – Projeto e Produção**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 1990, 465 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO S.A. (IPT). Relatório nº 16.277 - **Formulação de critérios para avaliação de desempenho de habitações**. São Paulo, 1981.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - **ISO 140** - Acoustics – Measurements of sound insulation in buildings and of buildings elements, 1995.

\_\_\_\_\_. **ISO 6242** - Building construction – Expression of user's requirements – Part 3: Acoustical requirements, 1992.

JAGT, G. Susanne van der & MARTIN, Heiko J. Desenvolvimento de um método de medição para fator de perda numa canalização de esgoto – Fixação – sistema estrutural da edificação, baseado na Análise Est Energética. In: **Inter-noise**, 1999, p. 841-844.

KANDASWAMY, S. & RAMACHANDRAIAH, A. Performance of sound transmission on hollow block masonry walls using statistical energy analysis. In: 8<sup>th</sup> International Congress on Sound and Vibration. Hong Kong, **Proceedings...**, 2001, p. 2323-2326.

KINSLER, Lawrence E. & FREY, Austin R. **Fundamentals of Acoustics**. Monterey: John Wiley & Sons Inc., 1967, 2ª Eition, 5ª Printing, 524p.

KUERER, Ralf C. Classes of acoustical comfort in housing: improved information about noise control in buildings. In: **Applied Acoustics**, 52, p.197-210, 1997.

KUTRRUFF, Heinrich. **Room Acoustics**. 2ª edition. London: Applied Science Publishers Ltd, 1979, 309 p.

- LANGLEY, R.S. & BREMNER, P. A hybrid method for the vibration analysis of complex structural-acoustic systems. (1999)
- LIINGAARD, Anders & KIRKEGAARD, Poul H. On sound transmission paths in building structures. In: 8<sup>th</sup> International Congress on Sound and Vibration. Hong Kong. **Proceedings...**, 2001, p. 2545-2552.
- LJUNGGREN, Sten. Airborne sound insulation of thin walls. In: **Journal of Acoustical Society of America**, 89 (5), 1991a, p.2314-2337.
- \_\_\_\_\_. Airborne sound insulation of thick walls. In: **Journal of Acoustical Society of America**, 89 (5), 1991b, p.2338-2345.
- LOURENÇO, Paulo José Brandão Barbosa. Computational strategies for masonry structures. Netherlands: Delft University Press, 1996, 211p.
- LYON, Richard H. & MAIDANIK, Gideon. Power flow between linearly coupled oscillators. In: **Journal of Acoustical Society of America**, 34 (5), 1962, p.623-639.
- LYON, R.H. & DeJONG, R.G. **Theory and Application of Statistical Energy Analysis** Newton: Butterworth-Heinemann, 1995, 2<sup>a</sup> Ed., 277p.
- MAIDANIK, G. Extension and reformulation of statistical energy analysis with use of room acoustics concepts. In: **Journal of sound and vibration**, 1981, 78, p. 417-423.
- MAKRINENKO, Leonid I. **Acoustics of auditoriums in public buildings**. New York: Acoustical Society of America, 1994, 172 p.
- MALUSKI, Sophie. **Low frequencies sound insulation in dwellings**. 1999. 267p. Thesis of Doctor in Philosophy. Sheffield Hallam University.
- McNARY W. S. e ABRAMNS, D. P. On the modulus of elasticity for masonry. In: **Structural Engineering Journal**, 1985, n. 4, v.111, p.857-870.
- MENDES, Ricardo José Kuerten. **Resistência à compressão de alvenarias de blocos cerâmicos estruturais**. Dissertação de Mestrado. 1998. 200 p. Universidade Federal de Santa Catarina. Pós-graduação em Engenharia Civil. Florianópolis.
- MÉNDEZ, Antonio Miguel et al. **Acustica Arquitectonica**. Buenos Aires: Universidad del Museo Social Argentino, 1994, 238 p.
- \_\_\_\_\_. & WERNER Antonio. **El hombre y las vibraciones – Aspectos físicos, jurídicos y médicos de la acción de las vibraciones en el ser humano**. Buenos Aires: AD-HOC , 1991, 120 p.
- MITIDIERI FILHO, Cláudio Vicente. **Avaliação de desempenho de componentes e elementos construtivos inovadores destinados a habitações: proposições específicas à avaliação do desempenho estrutural**. 1998. 256 p. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). São Paulo.
- MOHAMAD, Gihad. **Comportamento mecânico na ruptura de prismas e blocos de concreto**. 1998. 178 p. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.
- MONTMOLLIN, Maurice de. **A Ergonomia**. Lisboa: Instituto Piaget, 1990, 160 p.
- NEPOMUCENO, Luíza. **Elementos de acústica física e psicoacústica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1994, 106 p.
- NOCETI FILHO, Sidnei & DALCASTAGNÉ André L. Geração de ruído rosa a partir de ruído branco. In: Seminário de Áudio. **Anais** Belo Horizonte, 2002 - CD
- NESVIJSKI, Edouard & CAVALHEIRO, Odilon. Ultrasonic testing of masonry. In: International Symposium on Nondestructive Testing Contribution to the Infrastructure Safety Systems in the 21<sup>st</sup> century. Torres, RS, **Proceedings...**, 1999, p. 115-119.
- OSIPOV, A., MEES, P., VERMEIR, G. Low-frequency airborne sound transmission through single partitions in buildings. In: **Applied Acoustics**, 52 (3/4), p.273-288, 1997.

- PAIXÃO, D. X. da & GERGES, S.N.Y. Predição de transmissão em edificações usando Análise Estatística de Energia (SEA). IN: XIX Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica. **Anais....** Belo Horizonte: 2000, p.177-182.
- PARKIN, P. H.; HUMPHREYS, H. R. & COWELL, J. R. **Acoustics Noise and Buildings**. London: Faber&Faber, 1979, 297p.
- PEREIRA, José Carlos. **Curso de Projeto Estrutural com Materiais Compostos**. Grupo de Análise e Projeto Mecânico da EMC/UFSC. Disponível em <http://www.ufsc.br>, Acesso em 10 nov 2001.
- POPOV, Egor P. **Introdução à mecânica dos sólidos**. Tradução: Mauro Amorelli. Revisão Técnica: Arno Blass. São Paulo: Edgard Blücher, 1978.
- PRADO, S. H. **Resistência à compressão de tijolos e blocos cerâmicos de diferentes formas e dimensões**. 1995. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- PRUDÊNCIO JR, Luiz Roberto. **Resistência à compressão da alvenaria e correlação entre a resistência de unidades, prismas e paredes**. 1986, 123 p., Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- RECUERO, Manuel & GIL, Constantino. **Acustica Architectonica**. Madrid: Ártica, 1993, 784p.
- REHFELD, Marc. About an unwanted effect of standardization on the development of sound insulation products. In: Inter-noise 90, Gothenburg-Sweden. **Proceedings...**, 1990, p. 147-150.
- REYNOLDS, Douglas D. **Engineering Principles of Acoustics** . Boston: Alliynd and Bacon Inc., 1981, 641p.
- ROMAN, Humberto R. & NANNI, Luis F. **Análise das características físicas e capacidade resistente de tijolos cerâmicos maciços da área da grande Porto Alegre**. CE-04. Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre: UFRGS, 1985.
- SABBATINI, Fernando Henrique. **Argamassas de assentamento para paredes de alvenaria resistente**. Boletim Técnico 02/86 da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 1986, 26 p.
- SANTOS, Flávio Antônio dos. **Efeito do não-preenchimento de juntas verticais no desempenho de edifícios em alvenaria estrutural**. 2001. 153p. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.
- SANTOS, Jorge Luiz Pizzutti dos Santos & MUTTI, Cristine. Qualificação do laboratório de isolamento acústica da UFSM de acordo com a norma ISO 140. **Revista Acústica e Vibrações**. SOBRAC, v.09, p.01-04, jun 1991.
- SCHMITZ, A. & MEIER, A. Total Loss Factor in Building Acoustics – Measurement and Application . In: XIX Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica. **Anais...** Belo Horizonte, 15-19 abril - 2000, p.111-132
- SCHROEDER, M. R. New method of measuring reverberation time. In: **Journal of Acoustical Society of America**, 1965, p.409-412.
- SHARP, B. H. Prediction methods for the sound transmission of building elements. In: **Noise Control Engineering**, september-october 1978, vol. 11, number 2, p. 53-63
- SINHA, B. P. A simplified ultimate load analysis of laterally loaded model orthotropic brickwork panels of low tensile strength. In: **The structural engineer**, december 1978, vol. 56 B, number 4, p. 81 –84.
- SMITH, P. W. Statistical models of coupled dynamical systems and the transition from strong to weak coupling. In: **Journal of Acoustical Society of America**, 65 (3), 1979, p.695-698.
- SOARES, José F., FARIAS, Alfredo A. & CESAR, Cibele C. **Introdução à estatística**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 1991, 378p.
- SOMAYAJI, Shan. **Civil Engineering Materials**. Prentice Hall, 2000. 2ª Ed., 478p.
- STEEL, J. A. Structural vibration transmission in framed buildings using statistical energy analysis, PhD thesis, 1990, Edinburgh, UK: Heriot-Watt University.

\_\_\_\_\_ Sound Transmission between plates in framed structures. In: **Journal of sound and vibration**, 178,1994, 379-394.

SZILARD, Rudolph. Theory and Analysis of Plates – classical and numerical methods. New Jersey: Prentice-Hall, 1974, 724p.

TANGO, Carlos Eduardo Siqueira. Materiais: Tecnologia e Controle. In: **Manual Técnico de Alvenaria**. São Paulo, ABCI/PROJETO, 1990, p. 143 - 176

TOCCI, Gregory C. Room noise criteria – the state-of-the-art in the year 2000. IN: XIX Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica. **Anais...** Belo Horizonte: 2000, p.133-153.

TURNER, J. D. & PRETLOVE, A. J. **Acoustics for engineers**. London: Macmillan Education Ltd, 1991, 192 p.

UNGAR, Eric E. Statistical Energy Analysis. In: **Journal of sound and vibration**, october 1997, 28-32.

VORLÄNDER, Michael. Recent Progress in room acoustical computer simulations. In: I Congresso Iberoamericano de Acústica. **Anais...** Florianópolis: 1998, p. 43-52.

WISNER, Alain. **Por Dentro do Trabalho – Ergonomia: método e técnica**. São Paulo: Ed. FTD/Oboré, 1987, 189 p.

YOKEL, Félix Y. & FATTAL, S. George. Failure Hypothesis for Masonry Shear Walls. In: **Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers**, ST3,1976, 515-532.



## APÊNDICES

---

# Apêndice 1

## Execução da Parede – Capítulo 5



## Apêndice 2

### Propriedades dos tijolos maciços cerâmicos – Capítulo 5



## Apêndice 3

### Propriedades da armagassa – Capítulo 5



## Apêndice 4

### Propriedades das mini-paredes – Capítulo 5



## Apêndice 5

### Ensaio de TD com excitação por impacto – Capítulo 5

