

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**MODELAGEM NUMÉRICA E MEDIÇÕES ACÚSTICAS
DE PROTETORES AUDITIVOS PARA RUÍDOS IMPULSIVOS**

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

ERASMO FELIPE VERGARA MIRANDA

FLORIANÓPOLIS, AGOSTO 1999

VERGARA M., Erasmo Felipe. Modelagem numérica e medições acústicas de protetores auditivos para ruídos impulsivos. Florianópolis, 1999. 148p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Samir Nagi Yousri Gerges, Ph.D.

Defesa: 30/08/99

Ensaio experimentais de protetores auditivos tipo tampão, para ruídos impulsivos, numa câmara semi-anecóica. Predição da atenuação sonora produzida por um protetor tipo tampão, através de simulações numéricas com o método de elementos finitos. Apresentação das divergências entre o método de simulação e os dados experimentais, tendências, limitações e comparação entre as vantagens da técnica de predição empregada e os ensaios realizados.

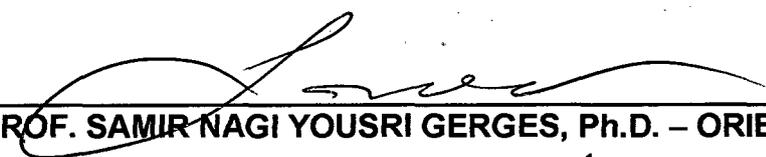
Palavras-chave: ruído impulsivo; protetores auditivos; métodos numéricos; perda de inserção; acústica.

**MODELAGEM NUMÉRICA E MEDIÇÕES ACÚSTICAS
DE PROTETORES AUDITIVOS PARA RUIDOS IMPULSIVOS**

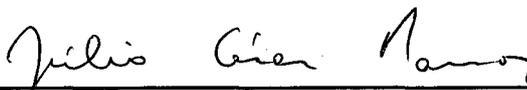
ERASMO FELIPE VERGARA MIRANDA

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA**

**ESPECIALIDADE VIBRAÇÕES E ACÚSTICA E APROVADA EM SUA FORMA
FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**



PROF. SAMIR NAGI YOUSRI GERGES, Ph.D. – ORIENTADOR



PROF. JÚLIO CÉSAR PASSOS, Dr. – COORDENADOR DO PPGEM

BANCA EXAMINADORA



PROF. ROBERTO JORDAN, Dr. Eng. – PRESIDENTE



PROF. ROBERT BIRCH, Ph. D.



PROF. VERA LÚCIA DUARTE DO VALLE PEREIRA, Dra. Eng.



PROF. EDUARDO FANCELLO, D. Sc.

*Aos meus pais
Dina e Erasmo
por todo o amor e apoio*

*Aos meus irmãos
Jacqueline, Sandra, Claudia e Andrés
por sempre estarem ao meu lado*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Samir Gerges, pelo grande apoio e motivação para estudar no Brasil e o incentivo na orientação deste trabalho.

Ao Prof. Robert Birch, pela contribuição e disposição oferecida no desenvolvimento experimental desta dissertação.

Aos professores da banca examinadora: Roberto Jordan, Robert Birch, Eduardo Fancello e Vera Lúcia Duarte por contribuírem com suas análises, críticas e sugestões, para a melhoria deste trabalho

À CAPES, pela concessão financeira, através da bolsa de estudos.

Ao Prof., colega e amigo Jorge Arenas, por apoiar e me ajudar a realizar meus estudos de pós-graduação.

Ao amigo, compadre e colega Enrique Suárez (Kike) pelas suas importantes opiniões antes de minha vinda ao Brasil, pela experiência e crescimento profissional compartilhado.

Aos amigos e colegas Victor Romeo e Christian Gerard pela ajuda e documentação fornecida para conseguir a bolsa de mestrado.

Aos professores do Instituto de Acústica, da Universidad Austral de Chile, pelas facilidades oferecidas para realizar meus estudos de pós-graduação.

Aos colegas do Grupo de Vibrações e Acústica (GVA), pelo companheirismo e amizade, e pelo ensino em resolver o trabalho de mestrado com alegria e otimismo. Em especial a, Elizabete Bavastri, Arlinton Calza, Edilar B. Antonioli, Germano Riffel, Márcio Avelar, Márcio G. Mattos e Mauricy Souza, e a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos colegas Gustavo Melo e Newton Soeiro, de maneira especial, pela amizade e valiosa ajuda na revisão do português e sugestões no texto.

Às professoras Ana Elisa Moellmann e Maria Cristina Alvim que me ensinaram a língua portuguesa e me incentivaram a estudar no Brasil.

Aos meus colegas e amigos do Chile: Manuel Arenas, Pablo Uribe, Javier Chandía, José Espinosa, Alonso Carrillo e Pablo Hernández, que têm me acompanhado a distância, torcendo para que este trabalho fosse concluído com sucesso.

A minha futura esposa Lizandra Garcia Lupi por sua constante e dedicada ajuda no processo final deste trabalho, pelas dicas na edição gráfica da dissertação, pelo carinho, companheirismo e bolachas.

*“ Amor, trabalho e conhecimento
são as fontes da nossa vida.
Deveriam também governá-la.”*
(Wilhelm Reich)

*“ Gracias a la vida,
que me ha dado tanto ...”*
(Violeta Parra)

SUMÁRIO

SUMÁRIO	viii
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS	xix
RESUMO	xx
ABSTRACT	xxi
CAPÍTULO 1:	
INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos da Dissertação.....	2
1.2 Organização da Dissertação.....	3
CAPÍTULO 2:	
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Sistema Auditivo Humano.....	5
2.1.1 Ouvido Humano.....	6
2.1.2 Impedância Acústica do Tímpano Humano.....	8
2.1.3 Mecanismo da Audição.....	9
2.2 Ruído Impulsivo.....	11
2.2.1 Comportamento e Características dos Ruídos Impulsivos.....	17
2.2.2 Impulso Clássico de FRIEDLANDER (Onda com Duração Tipo A).....	20
2.2.3 Impulso do Tipo Reverberante (Onda com Duração Tipo B).....	25
2.2.4 Alguns Parâmetros Relacionados com a Quantificação do Impulso.....	28
2.3 Proteção Auditiva para Ruídos Impulsivos.....	31
2.3.1 Descrição do Protetor Auditivo Tipo Tampão.....	34

2.3.2 Perda de Inserção de Ruído Impulsivo.....	35
2.4 Método de Elementos Finitos em Acústica Transiente.....	36

CAPÍTULO 3:

ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	39
3.1 Descrição dos Procedimentos Utilizados.....	41
3.1.1 Montagem Experimental com Placa de Madeira.....	41
3.1.1.1 Descrição do Canal Auditivo Simulado (Dois Microfones).....	43
3.1.1.2 Descrição da Fonte Sonora Impulsiva do Tipo Descarga de Ar Comprimido..	49
3.1.1.3 Descrição dos Equipamentos com o Uso da Placa de Madeira.....	52
3.2 Medições com Fonte de Ruído Impulsivo e o Uso da Placa de Madeira.....	54
3.3 Medições com Fonte de Ruído Impulsivo e o Uso da Caixa de Madeira.....	62
3.4 Medições com Fonte de Ruído Impulsivo e o Uso do Tubo de Choque.....	71

CAPÍTULO 4:

SIMULAÇÃO NUMÉRICA PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	82
4.1 Método de Elementos Finitos.....	83
4.1.1 Formulação Matemática e Implementação Numérica.....	83
4.1.2 Procedimento de Integração Direta no Tempo.....	85
4.1.3 Análise da Estabilidade e da Precisão do Procedimento de Integração Direta....	88
4.2 Simulação Numérica com o Método de Elementos Finitos.....	90
4.2.1 Descrição dos Programas Computacionais Usados.....	90
4.2.2 Análise de Acústica Numérica Transiente com SYSNOISE.....	91
4.3 Simulações Numéricas do Canal Auditivo Humano.....	97
4.3.1 Descrição do Canal Auditivo Humano Simulado.....	97
4.3.2 Resultados das Simulações Numéricas com o Uso do Sistema Placa de Madeira.....	106

CAPÍTULO 5:

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	113
5.1 Análise Conjunta dos Resultados Numéricos e Experimentais.....	113

CAPÍTULO 6:

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	122
6.1 Conclusões do Trabalho Realizado.....	122
6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	123
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Ouvido humano.....	6
FIGURA 2.2 – Esquema das dimensões do ouvido humano externo.....	8
FIGURA 2.3 – Resistência e reatância do tímpano humano.....	9
FIGURA 2.4 – Curva que mostra o desenvolvimento de saturação da resposta de amplitude de um tom puro.....	18
FIGURA 2.5 – Esquema dos sinais recebidos a uma distância fixa da fonte, para níveis de pressão sonora distintos.....	20
FIGURA 2.6 – Impulso ideal ou onda de FRIEDLANDER com tempo de subida zero.....	21
FIGURA 2.7 – Espectro da amplitude para um tempo de subida zero, de um impulso ideal, que mostra o efeito de uma mudança no parâmetro b.....	22
FIGURA 2.8 – Fase do espectro de um impulso ideal, com tempo de subida zero.....	23
FIGURA 2.9 – Impulso ideal com tempo de subida finito c.....	24
FIGURA 2.10 – Amplitude do espectro de um impulso ideal, com tempo de subida finito, mostrando o efeito de variar os parâmetros b e c.....	25
FIGURA 2.11 – Forma de onda de um único impulso do tipo reverberante (Duração B).....	26
FIGURA 2.12 - Definição da Duração B para múltiplos impulsos.....	27
FIGURA 2.13 – Definição da Duração C.....	27
FIGURA 2.14 – Desenhos das formas de onda de impulsos simples, que ilustram os diferentes pontos temporais de um impulso, usados para determinar: a) Duração A, b) Duração B, c) Duração C e d) Duração D.....	28
FIGURA 3.1 – Diagrama que descreve o procedimento de medição e os equipamentos utilizados, com ruído impulsivo, usando a placa de madeira.....	42
FIGURA 3.2 – Descrição do canal auditivo simulado em laboratório, utilizado nas medições do ruído impulsivo com a placa de madeira.....	44
FIGURA 3.3 – Vista Lateral da Montagem dos Microfones sobre a Placa de Madeira, no Interior da Câmara Semi-Anecóica.....	45
FIGURA 3.4 – Impedância acústica do sistema-diafragma do microfone.....	47
FIGURA 3.5 – Comparação da resistência entre o sistema-diafragma do microfone e o tímpano humano.....	47

FIGURA 3.6 – Comparação da reatância entre o sistema diafragma do microfone e o tímpano humano.....	48
FIGURA 3.7 – Comparação do módulo da impedância acústica, entre o sistema-diafragma do microfone e o tímpano humano.	48
FIGURA 3.8 – Descrição das dimensões da fonte impulsiva do tipo descarga do ar comprimido.	50
FIGURA 3.9 – Fonte sonora impulsiva, do tipo descarga do ar comprimido, utilizada ao interior da câmara semi-anecóica.....	52
FIGURA 3.10 – Equipamentos utilizados durante os ensaios experimentais.....	53
FIGURA 3.11 – Comparação entre a pressão sonora, no domínio do tempo, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, <i>sem</i> e <i>com</i> o uso do tampão, da fonte impulsiva 1.....	58
FIGURA 3.12 – Comparação entre os níveis de pressão sonora, no domínio da freqüência, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, <i>sem</i> e <i>com</i> o uso do tampão, da fonte impulsiva 1.....	58
FIGURA 3.13 – Comparação entre a pressão sonora, no domínio do tempo, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, <i>sem</i> e <i>com</i> o uso do tampão, da fonte impulsiva 2.....	59
FIGURA 3.14 – Comparação entre os níveis de pressão sonora, no domínio da freqüência, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, <i>sem</i> e <i>com</i> o uso do tampão, da fonte impulsiva 2.....	59
FIGURA 3.15 – Comparação entre a pressão sonora, no domínio do tempo, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, <i>sem</i> e <i>com</i> o uso do tampão, da fonte impulsiva 3.....	60
FIGURA 3.16 – Comparação entre os níveis de pressão sonora, no domínio da freqüência, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, <i>sem</i> e <i>com</i> o uso do tampão, da fonte impulsiva 3.....	60
FIGURA 3.17 – Diagrama que descreve o procedimento de medição e os equipamentos utilizados, com ruído impulsivo, usando a caixa de madeira.....	63
FIGURA 3.18 – Sistema de recepção do ruído impulsivo que usa a caixa de madeira.....	63
FIGURA 3.19 – Disposição esquemática dos canais auditivos simulados, utilizados nas medições do ruído impulsivo com a caixa de madeira.....	64

FIGURA 3.20 – Comparação entre a pressão sonora, no domínio do tempo, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, <i>sem</i> e <i>com</i> o uso do tampão, da fonte impulsiva 1.....	67
FIGURA 3.21 – Comparação entre os níveis de pressão sonora, no domínio da frequência, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, <i>sem</i> e <i>com</i> o uso do tampão, da fonte impulsiva 1.....	67
FIGURA 3.22 – Comparação entre a pressão sonora, no domínio do tempo, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, <i>sem</i> e <i>com</i> o uso do tampão, da fonte impulsiva 2.....	68
FIGURA 3.23 – Comparação entre os níveis de pressão sonora, no domínio da frequência, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, <i>sem</i> e <i>com</i> o uso do tampão, da fonte impulsiva 2.....	68
FIGURA 3.24 – Comparação entre a pressão sonora, no domínio do tempo, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, <i>sem</i> e <i>com</i> o uso do tampão, da fonte impulsiva 3.....	69
FIGURA 3.25 – Comparação entre os níveis de pressão sonora, no domínio da frequência, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, <i>sem</i> e <i>com</i> o uso do tampão, da fonte impulsiva 3.....	69
FIGURA 3.26 – Diagrama que descreve o procedimento de medição e os equipamentos utilizados, com ruído impulsivo, usando o tubo de choque.....	71
FIGURA 3.27 – Visão geral do tubo de choque e o sistema dos três microfones.....	73
FIGURA 3.28 – Fonte impulsiva do tipo descarga de ar comprimido , denominado tubo de choque, de 0,75 m de comprimento.....	73
FIGURA 3.29 – Fonte impulsiva do tipo descarga de ar comprimido , denominado tubo de choque, de 0,05 m de comprimento.....	74
FIGURA 3.30 – Sistema de medição do tubo de choque, apresentando os canais auditivos simulados.....	74
FIGURA 3.31 – Sistema de medição do tubo de choque, apresentando o acoplamento dos canais auditivos simulados.....	75
FIGURA 3.32 – Sistema de medição do tubo de choque, em detalhe, apresentando o canal auditivo simulado (<i>sem</i> tampão), o microfone de ¼” e os tubos que isolam o sistema.....	75

FIGURA 3.33 – Diagrama descritivo do sistema de medição do tubo de choque, (vista do corte transversal).....	76
FIGURA 3.34 – Comparação entre a pressão sonora, no domínio do tempo, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, <i>sem</i> e <i>com</i> o uso do tampão, da fonte impulsiva 1.....	78
FIGURA 3.35 – Comparação entre os níveis de pressão sonora, no domínio da frequência, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, <i>sem</i> e <i>com</i> o uso do tampão, da fonte impulsiva 1.....	78
FIGURA 3.36 – Comparação entre a pressão sonora, no domínio do tempo, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, <i>sem</i> e <i>com</i> o uso do tampão, da fonte impulsiva 2.....	79
FIGURA 3.37 – Comparação entre os níveis de pressão sonora, no domínio da frequência, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, <i>sem</i> e <i>com</i> o uso do tampão, da fonte impulsiva 2.....	79
FIGURA 3.38 – Comparação entre a pressão sonora, no domínio do tempo, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, <i>sem</i> e <i>com</i> o uso do tampão, da fonte impulsiva 3.....	80
FIGURA 3.39 – Comparação entre os níveis de pressão sonora, no domínio da frequência, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, <i>sem</i> e <i>com</i> o uso do tampão, da fonte impulsiva 3.....	80
FIGURA 4.1 – Esquema de aceleração média constante de NEWMARK.....	87
FIGURA 4.2 – Canal auditivo humano simulado na modelagem numérica, <i>sem</i> o uso do protetor auditivo tipo tampão.....	98
FIGURA 4.3 – Canal auditivo humano simulado na modelagem numérica, <i>com</i> o uso do protetor auditivo tipo tampão.....	99
FIGURA 4.4 – Sinal senoidal na entrada do canal auditivo.....	102
FIGURA 4.5 – Sinal senoidal na posição do tímpano do canal auditivo, <i>sem</i> o uso do protetor tipo tampão e <i>sem</i> impedância acústica.....	102
FIGURA 4.6 – Sinal senoidal na entrada e na posição do tímpano do canal auditivo, <i>sem</i> o uso do protetor tipo tampão e <i>sem</i> impedância acústica.....	103
FIGURA 4.7 – Espectros do sinal senoidal na entrada e na posição do tímpano, <i>sem</i> o uso do protetor tipo tampão e <i>sem</i> impedância acústica.....	103

FIGURA 4.8 – Sinal senoidal na entrada e na posição do tímpano do canal auditivo, <i>sem</i> o uso do protetor tipo tampão e <i>com</i> impedância acústica.....	104
FIGURA 4.9 – Espectros do sinal senoidal na entrada e na posição do tímpano, <i>sem</i> o uso do protetor tipo tampão e <i>com</i> impedância acústica.....	104
FIGURA 4.10 – Sinal senoidal na posição do tímpano do canal auditivo, <i>sem</i> e <i>com</i> o uso do protetor tipo tampão e <i>com</i> impedância acústica.....	105
FIGURA 4.11 – Espectro do sinal senoidal na posição do tímpano do canal auditivo, <i>sem</i> e <i>com</i> o uso do protetor tipo tampão e <i>com</i> impedância acústica.....	105
FIGURA 4.12 – Espectro do sinal senoidal na entrada e na posição do tímpano, <i>sem</i> e <i>com</i> o uso do protetor tipo tampão e <i>com</i> e <i>sem</i> impedância acústica.....	106
FIGURA 4.13 – Comparação da simulação numérica entre a pressão sonora, no domínio do tempo, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, <i>sem</i> e <i>com</i> o uso do tampão, para a fonte impulsiva 1.....	108
FIGURA 4.14 – Comparação da simulação numérica entre a pressão sonora, no domínio da frequência, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, <i>sem</i> e <i>com</i> o uso do tampão, para a fonte impulsiva 1.....	108
FIGURA 4.15 – Comparação da simulação numérica entre a pressão sonora, no domínio do tempo, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, <i>sem</i> e <i>com</i> o uso do tampão, para a fonte impulsiva 2.....	109
FIGURA 4.16 – Comparação da simulação numérica entre a pressão sonora, no domínio da frequência, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, <i>sem</i> e <i>com</i> o uso do tampão, para a fonte impulsiva 2.....	109
FIGURA 4.17 – Comparação da simulação numérica entre a pressão sonora, no domínio do tempo, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, <i>sem</i> e <i>com</i> o uso do tampão, para a fonte impulsiva 3.....	110
FIGURA 4.18 – Comparação da simulação numérica entre a pressão sonora, no domínio da frequência, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, <i>sem</i> e <i>com</i> o uso do tampão, para a fonte impulsiva 3.....	110
FIGURA 5.1 – Comparação entre medição experimental e simulação numérica, no domínio do tempo, <i>com</i> o uso do tampão, para a fonte impulsiva 1.....	115
FIGURA 5.2 – Comparação entre medição experimental e simulação numérica, no domínio da frequência, <i>com</i> o uso do tampão, para a fonte impulsiva 1.....	116

- FIGURA 5.3** – Comparação entre medição experimental e simulação numérica, no domínio do tempo, *com* o uso do tampão, para a fonte impulsiva 2.....116
- FIGURA 5.4** – Comparação entre medição experimental e simulação numérica, no domínio da frequência, *com* o uso do tampão, para a fonte impulsiva 2.....117
- FIGURA 5.5** – Comparação entre medição experimental e simulação numérica, no domínio do tempo, *com* o uso do tampão, para a fonte impulsiva 3.....117
- FIGURA 5.6** – Comparação entre medição experimental e simulação numérica, no domínio da frequência, *com* o uso do tampão, para a fonte impulsiva 3.....118

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - Média dos valores das dimensões do ouvido humano externo.....	7
TABELA 2.2 - Resistência R_d e reatância X_d do tímpano humano, para várias frequências.....	9
TABELA 2.3 - Níveis de pressão sonora (pico) e duração A e B, de fontes impulsivas de ambientes militares.....	15
TABELA 2.4 - Níveis de pressão sonora (pico) e duração B, de fontes de impacto industriais.....	16
TABELA 2.5 - Tipos de fontes impulsivas segundo o nível de pressão sonora (pico), duração e faixa de frequência da energia acústica.....	16
TABELA 2.6 - Resumo dos diferentes tipos de durações, para ruído impulsivo, que determinam as formas de onda.....	26
TABELA 3.1 - Valores dos elementos da impedância acústica do diafragma do microfone.....	46
TABELA 3.2 - Identificação dos instrumentos usados nos ensaios experimentais da etapa 1 (placa de madeira).....	54
TABELA 3.3 - Configurações de medição para a fonte sonora impulsiva do tipo descarga de ar comprimido, com o sistema da placa de madeira.....	55
TABELA 3.4 - Comparação entre os parâmetros que caracterizam um ruído impulsivo, no domínio do tempo, com o uso da placa de madeira, <i>sem</i> e <i>com</i> o protetor auditivo tipo tampão.....	61
TABELA 3.5 - Níveis de Pressão Sonora (NPS) e Perda de Inserção (PI), em algumas frequências, para as fontes impulsivas 1, 2 e 3, usando a placa de madeira.....	61
TABELA 3.6 - Identificação dos instrumentos usados nos ensaios experimentais da etapa 2 (caixa de madeira).....	65
TABELA 3.7 - Condições de medição para a fonte sonora impulsiva, do tipo descarga de ar comprimido, com o uso do sistema da caixa de madeira.....	65
Tabela 3.8 - Comparação entre os parâmetros que caracterizam um ruído impulsivo, no domínio do tempo, com o uso da caixa de madeira, <i>sem</i> e <i>com</i> o protetor auditivo tipo tampão.....	70
TABELA 3.9 - Níveis de Pressão Sonora (NPS) e Perda de Inserção (PI), em algumas frequências, para as fontes impulsivas 1, 2 e 3, usando a caixa de madeira.....	70

TABELA 3.10 - Configurações de medição para a fonte sonora impulsiva com o uso do tubo de choque.....	76
TABELA 3.11 - Comparação entre os parâmetros que caracterizam um ruído impulsivo, no domínio do tempo, com o uso do tubo de choque, <i>sem</i> e <i>com</i> o protetor auditivo tipo tampão.....	81
TABELA 3.12 - Níveis de Pressão Sonora (NPS) e Perda de Inserção (PI), em algumas frequências, para as fontes impulsivas 1, 2 e 3, usando o tubo de choque....	81
TABELA 4.1 - Dados requeridos para configura o método de simulação (comando <i>Option</i>).....	93
TABELA 4.2 - Dados requeridos para reconhecer a malha de elementos finitos (comando <i>Mesh</i>).....	93
TABELA 4.3 - Dados requeridos para definir as propriedades dos materiais (comando <i>Material</i>).....	94
TABELA 4.4 - Dados requeridos para estabelecer as condições iniciais (comando <i>Initial Conditions</i>).....	94
TABELA 4.5 - Dados requeridos para estabelecer as condições de contorno (comando <i>Boundary Conditions</i>).....	95
TABELA 4.6 - Comparação entre os parâmetros que caracterizam um ruído impulsivo, no domínio do tempo, com o uso da Placa de Madeira, <i>sem</i> e <i>com</i> o protetor auditivo tipo tampão.....	111
TABELA 4.7 - Níveis de Pressão Sonora (NPS) e Perda de Inserção (PI), em algumas frequências, para as fontes impulsivas 1, 2 e 3.....	111
TABELA 5.1 - Comparação entre os resultados experimentais e simulação, no domínio do tempo, com o uso da placa de madeira, <i>sem</i> e <i>com</i> o tampão, para a fonte impulsiva 1,2 3.....	118
TABELA 5.2 - Comparação entre os resultados experimentais e simulação, em algumas frequências, com o uso da placa de madeira, <i>sem</i> e <i>com</i> o tampão, para as fontes impulsivas 1, 2 e 3.....	119
TABELA 5.3 – Comparação entre os resultados experimentais e simulação, no domínio do tempo, com o uso da placa de madeira, <i>sem</i> e <i>com</i> o tampão, para três casos de batida de palmas.....	120

LISTA DE SÍMBOLOS

NPS_{pico} : Nível de pressão sonora (pico) [dB]

P_{max} : Pressão sonora máxima [Pa]

P_{ref} : Pressão sonora de referência [Pa]

U : Velocidade de frente de choque [m/s]

γ : Razão entre os calores específicos a pressão e volume constante

C_p : Calor específico a pressão constante

C_v : Calor específico a volume constante

C_o : Velocidade do som num meio não perturbado [m/s]

P : força de choque [Pa]

$p_F(t)$: Onda de pressão de Friedlander

$P_F(\omega)$: Transformada de Fourier da onda de pressão de Friedlander

f : freqüência [Hz]

C_d : Compliância do sistema-diafragma [m^5/N]

L_d : Massa do sistema-diafragma [kg/m^4]

R_d : Resistência do sistema-diafragma [Ns/m^5]

c : Velocidade do som no ar [m/s]

$\frac{\partial}{\partial n_x}$: Derivada aplicada em relação à normal, na direção x

α : Fator de Reflexão

A : Admitância da superfície S

S : Superfície do domínio V (meio acústico homogêneo)

S_1, S_2, S_3 : Sub-domínios da superfície S

$N(x)$: matriz das funções de interpolação

$P(t)$: vetor de pressões nodais no tempo t

$\{F_A\}$: Vetor de forças acústicas nodais, imposta como condição de contorno nas faces da malha de elementos finitos

$[M]$: Matriz de massa, independente do incremento no tempo

$[C]$: Matriz de amortecimento, independente do incremento no tempo

$[K]$: Matriz rigidez, independente do incremento no tempo

RESUMO

O método REAT (Real Ear Attenuation at Threshold) usado pelas normas ISO e ANSI para a medição de protetores auditivos, não estabelece como determinar a atenuação dos protetores auditivos para ruídos impulsivos, já que mede subjetivamente a atenuação de baixos níveis de ruído em estado estacionário. A carência de técnicas de teste com ruídos impulsivos mostra a necessidade de métodos mais seguros, rápidos e de baixo custo para estimar a atenuação de protetores auditivos na presença de campos sonoros impulsivos.

Este trabalho apresenta um estudo do comportamento e das características do ruído impulsivo, no domínio do tempo, tais como: o nível de pressão sonora (pico), o tempo de subida e a duração do pulso. Também, é desenvolvido um modelo numérico baseado no Método de Elementos Finitos (FEM), o qual simula o canal auditivo humano como um tubo reto bidimensional, com a impedância acústica do tímpano e o protetor tipo tampão, e permite estimar a Perda de Inserção. Os ensaios em laboratório foram efetuados na sala semi-aneecóica do Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA) da UFSC, onde são medidos os níveis de pressão sonora no interior do canal auditivo simulado, *sem* e *com* o uso de protetor auditivo, produzidos por uma fonte sonora impulsiva do tipo descarga de ar comprimido.

Foram obtidos os resultados, no domínio do tempo e da frequência, das simulações numéricas e ensaios experimentais de um modelo do canal auditivo simulado. A comparação dos resultados de Perda de Inserção, obtidos através dos ensaios experimentais com os dados da simulação numérica, mostra que estes últimos tendem a prever maiores reduções sonoras, com picos de atenuação mais acentuados em relação aos levantados experimentalmente.

São apresentadas e discutidas as divergências entre os resultados numéricos e experimentais. A validade, as limitações e vantagens do método de predição são comentadas e, por fim, são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

ABSTRACT

REAT (Real Ear Attenuation at Threshold) method, in accordance with ISO and ANSI for the measurement of hearing protector attenuation, is not suited for the assessment of the attenuation of peak sound pressure levels of a noise impulse. As a subjective measurement using human subjects, it is suited to determine the attenuation of low noise levels under steady state conditions. Current techniques for testing and modelling impulse noise cases highlight the need for more reliable, fast and low cost methods for assessing the effectiveness of hearing protectors in the presence of an impulsive sound field.

This work presents a study of the behaviour and characteristics of impulsive noise, in the time domain, considering parameters such as: the peak level of sound pressure, rise time and the duration of the pulse. Also, a numerical model is developed based on the Finite Element Method (FEM), which attempts to simulate the human auditory canal as a simple two dimensional straight tube with the acoustic impedance of the eardrum and an earplug hearing protector and allows the calculation of Insertion Loss. The laboratory tests were made in the semi-anechoic room of Laboratory of Vibrations and Acoustics of UFSC where measurements were made of the sound pressure inside a simulated auditory canal, *without* and *with* hearing protector, when subjected to an impulsive pulse produced by a rapid discharge of compressed air.

Results of the experiments and FEM model of the auditory canal were compared in the time and frequency domain. The comparison of the results of insertion loss, obtained by the experimental tests with the numeric simulation data, shows that these tend to predict larger sound reductions, with attenuation picks more accentuated in relation to the measurements.

Divergences of the numerical prediction from experimental results are presented and discussed in this report. Also, the validity, the limitations and advantages of the FEM prediction method are commented on and, finally, the conclusions and suggestions are given for future research work.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A presença do ruído impulsivo nas diferentes atividades de processos industriais e militares é um contínuo e grave problema que afeta a saúde das pessoas envolvidas. Os trabalhadores que realizam atividades nestes ambientes regularmente estão sofrendo significativos danos de perda auditiva permanente.

Apesar dos esforços realizados para reduzir os níveis de ruído impulsivo, usando diferentes técnicas, como por exemplo, controle do ruído na fonte, atenuação da propagação do ruído, seja usando materiais absorventes ou algum tipo de enclausuramento, não se tem conseguido eliminar totalmente a transmissão destes ruídos ao sistema auditivo humano, devido principalmente à complexidade dos mecanismos de geração do ruído e o alto custo de execução dos projetos de controle de ruído. Uma boa alternativa para proteger as pessoas expostas é o uso de algum dispositivo de proteção auditiva individual, tal como um protetor tipo tampão ou concha, o qual tem como principal função reduzir a pressão sonora no sistema auditivo humano.

Os métodos de avaliação dos protetores auditivos existentes são divididos em métodos subjetivos e objetivos. Os métodos subjetivos utilizam pessoas nos ensaios dos protetores e os métodos objetivos principalmente usam um protótipo de cabeça artificial. Dentro da técnica subjetiva destaca-se o método REAT (Real Ear Attenuation at Threshold), como um procedimento amplamente usado pelas normas ISO 4869 e ANSI S12.6. Contudo, este método não estabelece como determinar a atenuação de níveis de pressão sonora (pico) de ruídos impulsivos, já que mede subjetivamente a atenuação de baixos níveis de ruído em estado estacionário, na proximidade do limiar da audição. Os dados obtidos com esta metodologia são de baixa resolução, pois algumas bandas de frequências são omitidas. Além disso, a quantificação da atenuação do ruído de protetores auditivos possui um alto custo associado, um grande consumo de tempo e um considerável número de protótipos e testes no desenvolvimento dos protetores auditivos.

A carência de técnicas de teste adequadas mostra a necessidade de métodos mais rápidos e de baixo custo para estimar a atenuação de protetores auditivos para ruídos impulsivos. Este trabalho apresenta um modelo numérico baseado no Método de Elementos Finitos (Finite Element Method, FEM), o qual simula o canal auditivo humano como um tubo reto bidimensional, com impedância acústica do tímpano, e estima a Perda de Inserção dos ruídos impulsivos, *sem* e *com* o uso de um protetor auditivo tipo tampão. Os ensaios de laboratório são efetuados na sala semi-anecóica do Laboratório de Vibrações e Acústica, da Universidade Federal de Santa Catarina, onde são medidos os níveis de pressão sonora no ouvido humano simulado, produzidos por uma fonte sonora impulsiva do tipo câmara de compressão e expansão de ar comprimido. Finalmente, são calculados e comparados alguns dos parâmetros que caracterizam os sinais impulsivos, no domínio do tempo, como também a Perda de Inserção (pico).

1.1 Objetivos da Dissertação

Neste trabalho foram desenvolvidos alguns ensaios experimentais controlados, em laboratório, e um método numérico para a avaliação da atenuação sonora, no domínio do tempo, do protetor auditivo tipo tampão inserido num canal auditivo humano simulado. Na implementação do método numérico FEM foram utilizados os pacotes comerciais ANSYS 5.1 e SYSNOISE 5.3A, respectivamente, na construção da malha de elementos finitos e na predição do campo acústico introduzido pelo protetor auditivo inserido na cavidade auditiva, quando existe um campo sonoro impulsivo como excitação.

Os objetivos deste trabalho são divididos basicamente nas seguintes etapas:

1. Revisar as características que identificam um ruído impulsivo, no domínio do tempo, e sua influência no sistema auditivo humano.
2. Investigar o uso do método numérico FEM aplicado a problemas de acústica transiente.
3. Selecionar um modelo físico que simule o canal auditivo externo e satisfaça requisitos de aplicabilidade em ensaios de laboratório e de modelagem numérica.

4. Desenvolver um mecanismo para gerar ruídos impulsivos de altos níveis.
5. Realizar ensaios experimentais com um sistema de canal auditivo externo simulado na câmara semi-anecóica do LVA.
6. Modelar com o método de elementos finitos o sistema auditivo externo usando os programas computacionais ANSYS e SYSNOISE.
7. Avaliar os parâmetros que caracterizam um ruído impulsivo, no domínio do tempo, que permitem calcular a perda de inserção dos níveis de pressão sonora (pico) no modelo de canal auditivo proposto.
8. Comparar e discutir os resultados dos ensaios em laboratório com aqueles das simulações numéricas.
9. Propor sugestões para a continuação desta Dissertação de Mestrado.

1.2 Organização da Dissertação

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

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura sobre o ruído impulsivo e uma visão cronológica da evolução deste tema, com um resumo dos principais trabalhos publicados. São expostos antecedentes do sistema auditivo humano, os parâmetros relacionados com ruído impulsivo e proteção auditiva, como também uma abordagem dos aspectos teóricos do método numérico de elementos finitos.

O Capítulo 3 expõe o desenvolvimento experimental de três etapas. São apresentadas as características dos modelos de medição, bem como detalhes dos sistemas de geração e recepção de campos sonoros impulsivos. São conhecidos e discutidos os resultados experimentais.

No Capítulo 4, é apresentada uma revisão da simulação numérica pelo método de elementos finitos, no domínio do tempo, que inclui uma formulação matemática, a implementação numérica e análise do procedimento de integração. É dada uma breve descrição dos programas utilizados e, a seguir, são apresentados os resultados de simulações numéricas preliminares. Por fim, é descrito o modelo do canal auditivo

humano simulado, as considerações explicativas sobre o modelo e os resultados da simulação numérica.

A comparação entre os resultados dos ensaios experimentais e da simulação é realizada no Capítulo 5. É discutida a validade do método de predição e o comportamento seguido pelas curvas de pressão sonora, no domínio do tempo e da frequência, *sem* e *com* o uso do protetor auditivo tipo tampão.

No Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões e são feitas sugestões para o prosseguimento deste trabalho introdutório na área de ruído impulsivo, simulação numérica no domínio do tempo e proteção auditiva.

Finalmente, são listados os trabalhos e obras consultadas no desenvolvimento desta dissertação.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão da literatura que considera os principais conceitos e métodos abordados neste trabalho de dissertação. Inicialmente, é feita uma breve revisão do sistema auditivo humano e sua interação com o ruído impulsivo. No ponto seguinte é exposto um resumo de alguns trabalhos que definem e caracterizam os parâmetros que quantificam o ruído impulsivo. Posteriormente, são comentadas as pesquisas que têm utilizado métodos de simulação numérica em problemas de acústica transiente. Na última parte deste capítulo é incluída uma revisão de assuntos a respeito do dano auditivo e proteção auditiva.

2.1 Sistema Auditivo Humano

O sistema auditivo humano permite criar uma imagem acústica do mundo externo, onde o que se ouve é amplamente determinado pelas restrições impostas pela anatomia e complexos processos fisiológicos da trajetória auditiva, a qual se vê influenciada pelas características ambientais, o ruído de fundo e as diversas fontes sonoras que formam parte das condições reais.

Um elemento chave de um processo acústico é o seu caráter de tempo-real. Neste sentido, os instantes iniciais denotam a ocorrência de um evento sonoro, tal como o começo da fala vocal, batida de uma porta ou a partida de motor de um carro. Estes transientes raramente levam mais que uns poucos milissegundos, possuem espectros largos e picos altamente efetivos, sendo que os 10 (dez) ms iniciais de um som são percentualmente mais importantes que os restantes, mesmo para ruídos de longa duração. Assim, o sistema auditivo focaliza a atenção na porção inicial de um som, realizando uma análise fina-discretizada dos primeiros 50 (cinquenta) ms, para depois relaxar. A periferia auditiva pode ser considerada como aquela que atua na realização de uma análise fina-discretizada numa escala graduada ciclo a ciclo, entretanto as partes posteriores estão mais relacionadas com a codificação de eventos,

cujos instantes de tempos são maiores como ressaltam KRYTER (1970) e CROCKER (1997).

Para conhecer e compreender a descrição acústica do ouvido externo humano foi necessário usar a informação de pesquisas que consideram: medições de pressão sonora em ouvidos reais, experimentos com réplicas e modelos físicos de ouvidos, medições de impedância acústica, modelos matemáticos, pesquisa de tecnologia instrumental e ouvidos artificiais.

2.1.1 Ouvido Humano

O ouvido humano é um sistema sensível, delicado e discriminativo que permite perceber e interpretar o som. O ouvido pode ser dividido em três partes: o ouvido externo, o ouvido médio e o ouvido interno, como é apresentado na **FIGURA 2.1**.

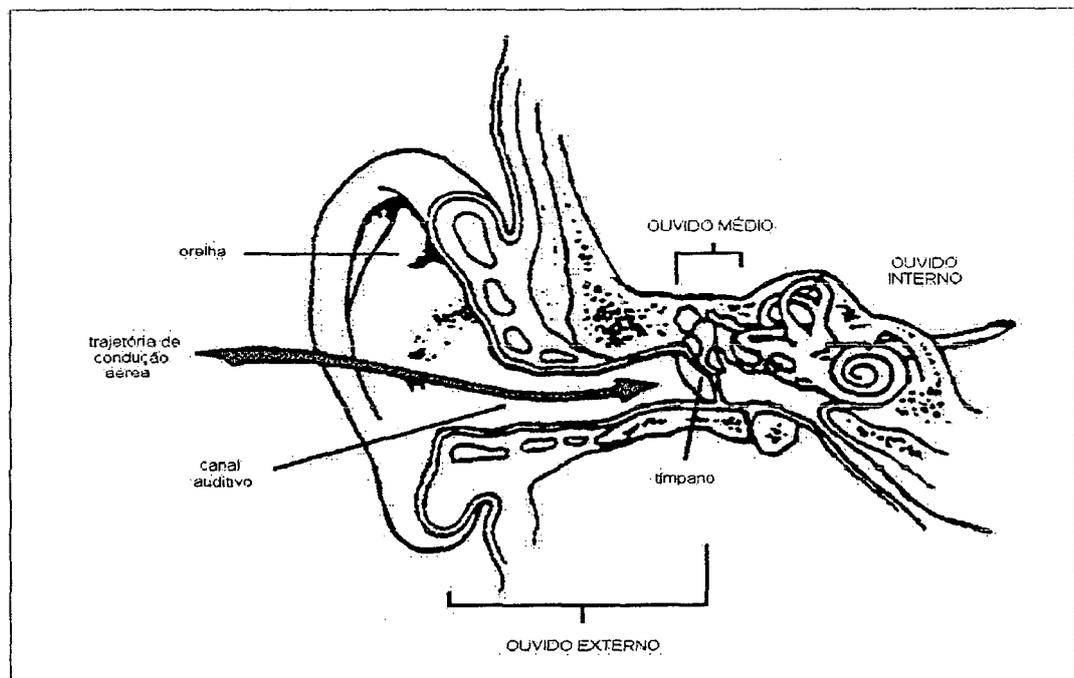


FIGURA 2.1 - Ouvido humano.

O ouvido externo é constituído por três elementos, a saber: pavilhão da orelha, canal auditivo e o tímpano. O ouvido externo e a cabeça são componentes de um complexo sistema acústico, que se acopla ao campo sonoro externo. O ouvido externo protege o tímpano da ocorrência de dano mecânico, também atua como acoplamento

entre o tímpano e o campo sonoro e contribui à direcionalidade do sistema, especialmente em altas frequências onde os modos normais estão no interior da orelha, segundo é detalhado por KRYTER (1970).

O pavilhão da orelha é uma estrutura cartilaginosa flexível que tem forma afunilada para coletar e transmitir as ondas sonoras através do canal auditivo. O pavilhão tem um volume aproximado de 4 cm^3 e é uma cavidade larga, pouco profunda, que está acoplada ao canal auditivo. O canal auditivo é uma estrutura tubular irregular com um eixo central sinuoso com área de seção transversal que vai diminuindo até chegar ao tímpano, que é uma delgada membrana tipo pistão e define a forma do canal auditivo no extremo interior. Por esta razão, e como não existe um contorno definido entre o pavilhão e o canal, é difícil estabelecer um valor preciso ao comprimento do canal. No entanto, para frequências abaixo de 8 kHz, as primeiras características acústicas do canal auditivo, obtidas através de médias, são bem representadas por uma cavidade cilíndrica simples de 0,75 cm de diâmetro e 2,25 cm de comprimento, terminada por um tímpano tipo pistão perpendicular ao eixo. São indicadas na **TABELA 2.1** algumas das dimensões médias do ouvido humano externo, descritas por CROCKER (1997) e na **FIGURA 2.2**, são mostradas esquematicamente estas dimensões.

TABELA 2.1 - Média dos valores das dimensões do ouvido humano externo.

Comprimento do canal [cm]	Volume do canal [cm³]	Profundidade do pavilhão [cm]	Comprimento do pavilhão [cm]	Distância Inter-aural [cm]
2,25	1,0	1,0	6,7	17,5

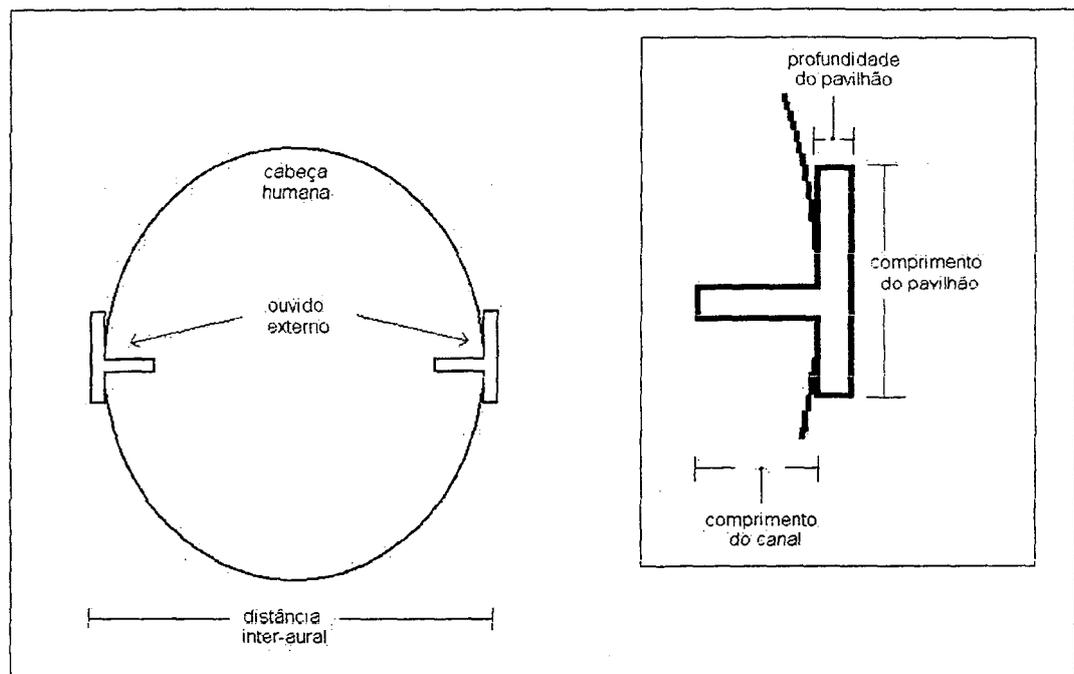


FIGURA 2.2 - Esquema das dimensões do ouvido humano externo.

2.1.2 Impedância Acústica do Tímpano Humano

A resposta de campo livre do ouvido, perto da ressonância, é afetada pela impedância do tímpano sobre o canal auditivo e a presença de algum protetor (fone, tampão, concha) no sistema auditivo. A impedância acústica do tímpano humano é constituída de uma parte imaginária e de outra real. A parte real denomina-se resistência acústica, R_d , e está associada com a dissipação de energia. A reatância acústica, X_d , é a componente imaginária da impedância complexa que resulta da massa e da rigidez efetiva do tímpano, associada com a energia armazenada, segundo detalha MOURAD (1990). Os valores de R_d e X_d da impedância do tímpano foram calculados supondo o canal auditivo como um cilindro uniforme de 0,75 cm de diâmetro e para uma onda estacionária.

Na TABELA 2.2 e FIGURA 2.3 são apresentados os valores e respectivas curvas da resistência R_d e reatância X_d do tímpano humano, para várias frequências, obtidos dos resultados médios baseados em dados de mais de vinte estudos, considerando ouvidos humanos normais, apresentados por CROCKER (1997).

TABELA 2. 2 - Resistência R_d e reatância X_d do tímpano humano, para várias frequências.

Frequência [kHz]	Resistência 10^5 [Ns/m ⁵]	Reatância 10^5 [Ns/m ⁵]
0,1	490	-2800
0,2	430	-1400
0,3	390	-950
0,5	350	-550
0,7	330	-360
1	320	-170
2	390	-80
3	420	-30
5	400	-200
7	400	410
10	400	510

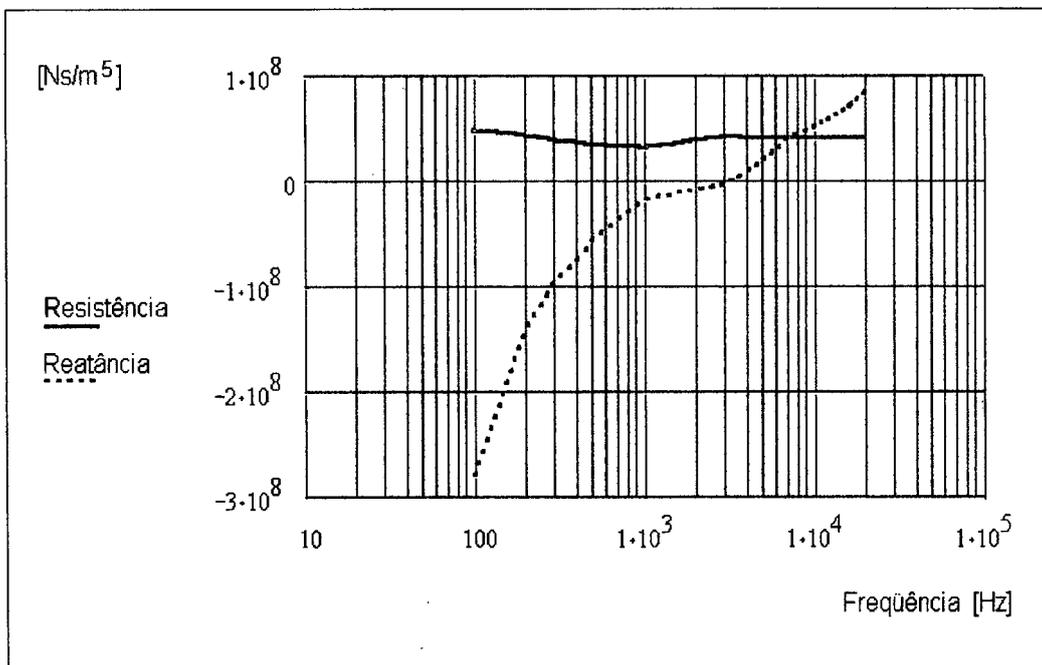


FIGURA 2.3 - Resistência e reatância do tímpano humano.

2.1.3 Mecanismo da Audição

O mecanismo da audição considera as ondas que percorrem o ouvido externo até atingir o tímpano, o qual provoca vibrações que são transferidas para a cadeia de ossos do ouvido médio (martelo, bigorna e estribo), que amplificam o sinal. As vibrações da janela oval conectada com esta cadeia geram ondas de pressão que se propagam até a cóclea. Posteriormente as ondas passam para o tubo inferior, a fim de

chegar na janela redonda. As vibrações das membranas basal e tectória, em sentidos opostos, estimulam as células que produzirão os sinais elétricos, os quais serão interpretados pelo cérebro como som.

O Limiar da Audição para um dado sinal é a pressão sonora mínima eficaz para perceber uma sensação auditiva (sem presença de ruído), na frequência de 1 kHz. Este parâmetro é expresso em dB, cuja referência é 20 μ Pa. O Limiar da Tolerância (ou Limiar da Dor) corresponde ao extremo superior da faixa da audibilidade, onde estão os níveis sonoros máximos que o ouvido pode suportar sem a sensação de dor. Como define BERANEK (1987), estes valores começam a partir de 110 dB com incômodo, 130 dB provoca coceira, 140 dB provoca dor e para níveis superiores a 150 dB tem-se dano imediato e irreversível.

O fator que faz com que ruídos impulsivo e de impacto sejam perigosos é a incapacidade do sistema auditivo humano de perceber com precisão o seu verdadeiro nível de pico, em relação aos níveis de ruído de estado estacionário. O tempo de integração do sistema auditivo central, ou seja, aquele associado às trajetórias do nervo auditivo e o cérebro, é de 20 (vinte) a 100 (cem) ms, o que leva o sistema auditivo a menosprezar o nível de pressão sonora dos sons impulsivos que têm tempos de subida e durações muito curtos. Por outro lado, a ativação das características de proteção de transmissão do ouvido médio tem um retardo de 300 (trezentos) a 500 (quinhentos) ms, que é muito lento para proteger o ouvido interno (HAMERNIK e HSUEH, 1991). Portanto, estes impulsos de curta duração passam ao interior do ouvido interno levando sua total amplitude e potencial de dano auditivo. Assim, estes autores chamam a atenção que o potencial de dano para ruído impulsivo e de impacto são altamente perigosos, dada a incapacidade do sistema auditivo em perceber seu verdadeiro nível.

Perdas auditivas devidas a ruído de impacto foram reportadas já em 1713 por RAMAZINI, em mineradores de cobre, e em 1831 por FOSBROKE em ferreiros, mas pouca pesquisa quantitativa tem sido desenvolvida até recentemente. Tentativas para definir e normalizar a exposição ao ruído impulsivo e de impacto têm sido dificultadas, porque o ruído produzido por diversas fontes varia significativamente em nível de

pressão sonora pico, padrão temporal e no espectro de frequência (HAMERNIK e HSUEH, 1991).

Uma metodologia mais refinada para avaliar a perda auditiva, induzida por ruído impulsivo, precisa de estudos adicionais que considerem os efeitos do nível de pressão sonora pico, tempo de subida, duração, espectro de frequência, número total dos impulsos, taxa de repetição de impulsos discretos, mistura dos impulsos com ruído contínuo e os efeitos do reflexo auditivo.

2.2 Ruído Impulsivo

Ruído impulsivo é um ruído transiente que é produzido por diferentes fenômenos e surge como o resultado de uma rápida descarga de energia sonora na atmosfera. O lugar no qual o impulso é desenvolvido determina as características de história de tempo do impulso. Por exemplo, o impulso produzido por uma explosão ao ar livre produz um único pico com sobrepressão, enquanto que o impulso de uma máquina que corta metais tem características de história de tempo que apresenta complexos efeitos de ressonância. Pesquisas de laboratório com animais e a revisão de estudos em trabalhadores indicam que o ruído impulsivo é mais danoso para a audição que o ruído contínuo do mesmo espectro e intensidade, segundo estabelece o National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH, 1998).

O ruído impulsivo aparece no contexto da indústria para fontes tais como: tesoura mecânica ou motorizada, máquina pneumática de pregos, repetidora, martelo, e em algumas funções laborais como: solda de impacto, trituração de concreto ou pedras com ferramentas potentes e ruidosas. O ruído impulsivo também é produzido por explosões, fogos de artifício, bombas, armas de fogo, artilharia, segundo informa CASALI (1996). Muitas destas fontes de ruído, às quais os operários podem estar expostos nos locais de trabalho, são classificadas como impulsivas na sua origem, e na maioria dos casos a pressão sonora pico é menor que 200 Pa (140 dB). Porém, existem diversas fontes de ruído impulsivo que ultrapassam este limite.

Do ponto de vista ambiental, um dos efeitos de um ruído impulsivo de alta intensidade é o susto que ele provoca; isto está relacionado com a imediata resposta involuntária de uma pessoa para ser, de repente, distraída pelo ruído, tendo como reações de alarme ou desgosto. Esta é uma reação instintiva e as pessoas não se adaptam com este tipo de exposição. Os efeitos podem induzir mudanças no comportamento que se relacionaria com problemas na saúde da pessoa exposta. Ruídos comunitários com características impulsivas de alta intensidade, que provocam a reação de susto e efeitos nos humanos são, por exemplo, as batidas de portas, explosões, ruído dos escapamentos dos motores de veículos, estrondos sônicos (*sonic boom*) e vôos sobre terra de aeronaves supersônicas (RICE, 1996).

Os termos “ruído impulsivo” e “ruído de impacto” têm sido usados de forma que são trocados entre si, quando um adjetivo é requerido para descrever o nível de pressão sonora (pico) de ruídos transientes. Considerando que o uso desta terminologia tem, às vezes, gerando ambigüidade, apresentam-se então as seguintes definições:

a) *Ruído Impulsivo*: é um ruído transiente que surge como o resultado de uma rápida descarga de energia (na maioria das vezes elétrica ou química) na atmosfera. Fontes típicas destes transientes são descargas explosivas como uma arma de fogo, e circuitos britadores. As características físicas destes impulsos são amplamente dependentes da geometria e escala da fonte, ou seja, da forma da carga explosiva e do tamanho da descarga. Adicionalmente, a forma da onda recebida é dependente do ambiente onde ela se propaga. Como destaca BURNS (1968), o ruído impulsivo é um sinal temporal de curta duração, que apresenta picos de energia acústica de duração inferior a 1 segundo, a intervalos superiores a 1 segundo, e níveis de pressão sonora pico bastante grandes, acima dos 110 dB.

b) *Ruído de Impacto*: é um ruído transiente que surge como o resultado do impacto entre dois objetos, por exemplo, um martelo batendo numa placa metálica ou uma prensa que perfura. Os impactos são essencialmente o resultado de uma rápida descarga de energia através de mecanismos principalmente mecânicos. As características físicas dos impactos são amplamente dependentes tanto das propriedades mecânicas dos objetos que se chocam, como da trajetória de

transmissão. AKAY (1978) descreve cinco mecanismos fundamentais de geração de ruído, associados com o impacto de dois corpos; a saber:

- i) *Ejeção de Ar* : Quando duas superfícies se aproximam uma da outra o ar contido é expulso do espaço entre elas. Antes de entrar em contato as superfícies o fluxo é comprimido e um gradiente de pressão sonora é produzido na cavidade entre as superfícies. O fluxo também fixa o ar na cavidade entre as superfícies em ressonância, causando oscilações no campo acústico.
- ii) *Radiação Sonora de Corpo Rígido*: Deve-se às rápidas mudanças de velocidade dos dois corpos em contato. A radiação de corpo rígido é a fonte de som predominante quando um objeto (corpo rígido) bate numa placa maciça.
- iii) *Radiação Sonora devido às rápidas deformações da superfície*: Pulso de pressão sonora pico que resulta da deformação de uma superfície, antes que apareça o modo natural de radiação da placa.
- iv) *Radiação Sonora de estado pseudo-estacionário*: Radiação que se produz, nos processos de impacto, quando uma vasta quantidade de energia é aplicada numa estrutura mecânica e num período de tempo demasiado curto. O excesso de energia absorvida pela estrutura mecânica é a radiação harmônica amortecida resultante que está relacionada com o som (*ringing*).
- v) *Radiação Sonora de fratura de material*: O ruído resultante da fratura de materiais ocasionada por prensas de perfurar e algumas máquinas que produzem impactos.

Estas duas classes de transientes geralmente têm origens diferentes, mas são basicamente o mesmo tipo de evento acústico (do ponto de vista macroscópico), cujo entendimento físico pode ser derivado de um conjunto comum de princípios, sendo a magnitude da sobrepressão que determina as equações que governam o comportamento destes transientes. As sobrepressões de pico determinarão, se a equação da onda linearizada ou alguma forma de equação não linear pode melhor descrever a propagação de ondas transientes. Também, para entender os efeitos que estes transientes provocam na audição, a sobrepressão de pico é o parâmetro que indica se o sistema auditivo pode estar trabalhando na sua faixa não linear ou se o mecanismo do dano coclear é principalmente mecânico ou ainda metabólico em origem.

Os fatores físicos de primeira importância, como destacam HAMERNIK e HSUEH (1991), para um sinal do tipo impulsivo são:

- i) *Nível de Pressão Sonora Pico*, que é o valor máximo de pressão (p_{\max}) sonora para um tempo t , expresso em dB, tendo como referência (p_{ref}) uma pressão de 20 μPa . Este nível é determinado pela seguinte expressão:

$$\text{NPS}_{\text{pico}} = 20 \log \frac{p_{\max}}{p_{\text{ref}}} \quad (2.1)$$

- ii) *Tempo de Subida* do sinal até o pico, que é o tempo decorrido para a pressão sonora ir do valor zero até o máximo.
- iii) *Duração A*, que é a duração da principal onda de pressão no caso de formas de ondas simples, devido a impulsos altamente amortecidos no campo sonoro não reverberante.
- iv) *Duração B*, que é a duração do envelope da pressão no caso de formas de ondas complexas, como são as oscilações amortecidas com a influência do campo sonoro reverberante, ou seja, com caimento prolongado do som no tempo.

Em geral, o ruído impulsivo produzido por armas e explosivos é caracterizado por níveis picos muito altos, duração muito curta e taxa de repetição mais baixa que o ruído de impacto dos ambientes industriais. As características temporal e espectral dos impulsos produzidos por armas podem ser categorizados em duas classes: armas leves e armamento de artilharia pesada, quem exibem formas de onda do tipo FRIEDLANDER.

SMEATHER e WHEELER (1998), mencionam que as armas leves, tais como pistolas e rifles, têm tempos de subida muito curtos (30 μs) e curtas durações (300 μs). Estas pronunciadas histórias temporais produzem um espectro que tem uma largura de banda muito extensa. Os impulsos sonoros de armas médias e pesadas têm tempos de subida e duração mais longa, portanto produzem espectros com componentes em baixa frequência mais extensos e menos energia na faixa das frequências superiores. Os impulsos produzidos por explosão de dinamite, extração de pedras de minas e testes explosivos, também são caracterizados da mesma maneira. As características impulsivas de algumas armas estão descritas na **TABELA 2.3**.

TABELA 2.3 - Níveis de pressão sonora (pico) e duração A e B, de fontes impulsivas de ambientes militares.

Arma	NPS (pico) [dB]	Duração [ms]	
		A	B
Obuseiro	181	2,5	--
105 mm	167 - 183 (posição do corpo) 175 - 187 (posição do corpo) 158 - 165 (5,5 m)	2,2 - 3,5 2,4 - 5,6 2,5	8,9 - 13,3
Rifle automático	159 (posição do atirador)	--	--
RK 7,62	154 - 158 (4 m)	0,4	--
M16	155 (4,5 m)	--	--
7.62	155 (posição do atirador)	0,3	--
M14	155 (posição do atirador)	0,3	--
Bazuca, leve	165 - 180 (posição do atirador)	--	--
Pesada	172 - 175	--	--
Morteiro	166 - 176 (posição do atirador)	--	--
Antitanque Panzerfaust	182 (posição do atirador)	2	10
Pistola 0,38	172	--	2,7
M/08 9 mm	150 (2 m)	--	--
P6 9 mm	152 (posição do atirador)	0,3	--
9 mm	159 (posição do atirador)	--	--
Canhão (130 mm)	176 (2 m atrás)	--	--
Metralhadora (7,65 mm)	164 (posição do atirador)	--	--
M60	149-161 (1 m)	--	4

SMEATHEM e WHEELER (1998) reportam a medição de ruídos de impacto e impulsivos habitualmente encontrados na indústria, listada na **TABELA 2.4**. Nesta tabela se apresenta a informação que relaciona os níveis de pressão sonora (pico) e a duração, medidos em típicas posições do operador.

SMOORENBURG (1996), como também SMEATHEM e WHEELER (1998) descrevem os impulsos encontrados nos locais de trabalho, de uma maneira mais simplificada, mediante a classificação dos ruídos impulsivos em quatro tipos que são apresentados na **TABELA 2.5**.

TABELA 2.4 - Níveis de pressão sonora (pico) e duração B, de fontes de impacto industriais.

Tipos de Fonte Sonora Impulsiva	NPS (pico)	Duração B
	[dB]	[ms]
Parafusadeira	140	--
Martelo sobre placa de metal	125	25
Martelo de carpinteiro (0,45 kg)	147	--
Bate-estacas	130	--
Prensa de estampagem de plástico	128	--
Martelo de tábua (29000 N)	145	--
Martelo mecânico de forjar	133,4	60
Martelo mecânico de forjar	160	50-100
Martelo mecânico de forjar (12 ton.)	143	80
Martelo mecânico (Martinete) (11000 N)	138	--
Martelo pneumático	140	--
Marreta (2 kg na bigorna)	130	--
Prensa de perfurar, tampar ou vaziar	130	40
Prensa de perfurar, tampar ou vaziar	135	--
Atirador de pregos	140	15
Grampeador	130	35
Soldador de impacto	155	10
Pistola de grampo	127	--
Tesoura mecânica ou motorizada	117	--
Máquina pneumática de pregos	148	--

TABELA 2.5 - Tipos de fontes impulsivas segundo o nível de pressão sonora (pico), duração e faixa de frequência da energia acústica.

Tipo	NPS (pico) [dB]	Duração [ms]		Faixa de Frequência [Hz]	Fonte Impulsiva
		A	B		
1	125 - 160		> 30	< 2 k (baixas)	martelo mecânico de forjar, prensa de perfurar e tampar
2	125 - 150		2,5 - 30	> 2 k (altas)	martelo, atirador de pregos, soldador de impacto e grampeadores
3	190	2 - 6		< 2 k (baixas)	Tipo FRIEDLANDER: armas de grosso calibre: grandes obuseiros, canhões e explosivos
4	150 - 172	0,2 - 2		> 2 k (muito altas)	Tipo FRIEDLANDER: armas de baixo calibre: pistolas e rifles

2.2.1 Comportamento e Características dos Ruídos Impulsivos

WEBSTER e BLACKSTOCK (1977) têm mostrado que na proximidade do nível de 140 dB para tons puros de frequências médias, o comportamento não linear da onda começa significativamente a afetar o perfil da onda.

As pressões transientes (impulsos) que produzem as sensações sonoras e trauma no sistema auditivo não são ondas acústicas, dentro do domínio da acústica linear; esses impulsos se situam no domínio da macroacústica e da física das ondas de choque. As relações analíticas que predizem o comportamento das ondas acústicas são obtidas da linearização das equações de movimento dos fluidos. Esta linearização está baseada na suposição de amplitudes e gradientes infinitesimais dos parâmetros termodinâmicos (densidade, pressão, velocidade, temperatura, entropia) e na suposição de um processo isoentrópico (ou seja, quando a entropia é uniforme através do fluido) (TEMKIM, 1981). Assim, termos de ordem superior nos parâmetros termodinâmicos e os efeitos dissipativos são desprezados, na obtenção da equação diferencial parcial, linear, de segunda ordem da onda acústica, a qual prediz uma onda de perturbação, que se propaga sem distorção. Os efeitos convectivos (quando a velocidade da onda muda de um ponto a outro) não lineares em contraste com os efeitos dissipativos (viscosidade, condutividade térmica) podem ser medidos para níveis de pressão sonora ao redor de 140 dB, para um tom de 1000 Hz. Para um tom puro, tais efeitos convectivos não lineares podem facilmente ser medidos seguindo o experimento realizado por WEBSTER E BLACKSTOCK (1977), no qual eles consideraram uma determinada fonte sonora e um receptor. Gradualmente incrementou-se o NPS da fonte e mediu-se o sinal transmitido ao receptor. Na faixa de baixos NPS existe uma relação linear entre a fonte e o NPS recebido, como se observa na **FIGURA 2.4**.

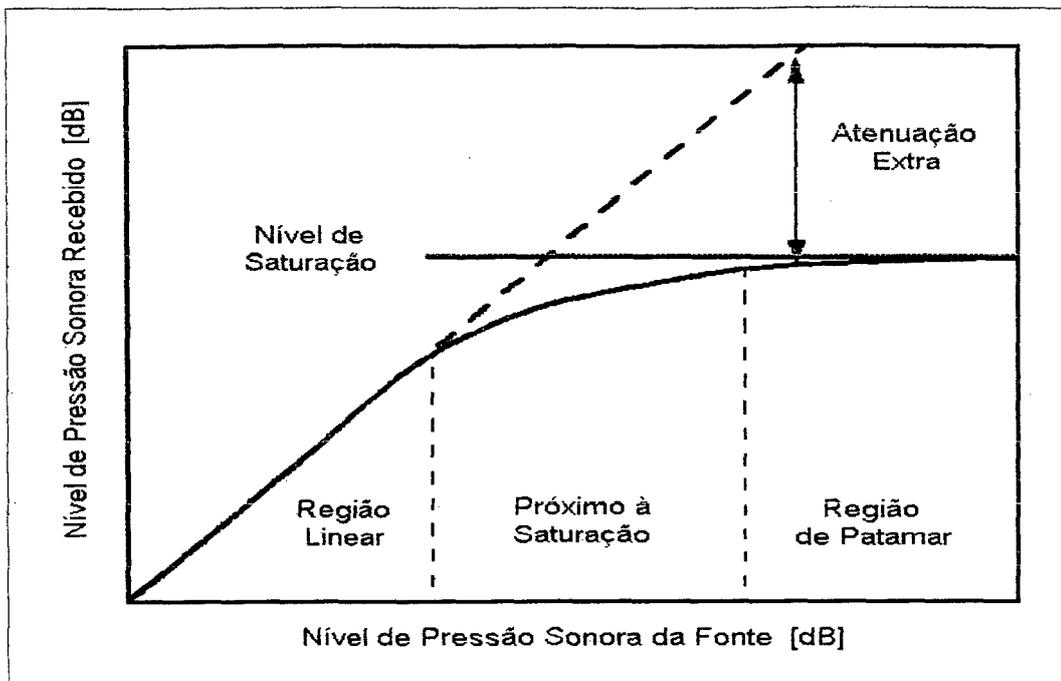


FIGURA 2.4 - Curva que mostra o desenvolvimento de saturação da resposta de amplitude, de um tom puro.

Quando o nível de pressão sonora do tom puro é incrementado, a função fonte-receptor desvia-se da linearidade e gradualmente se aplaina, de modo que o nível de pressão sonora recebido do tom não se incrementa excessivamente quando o nível da fonte aumenta. A onda se distorce e a energia adicional da fonte aparece nos harmônicos superiores da frequência fundamental. Na ausência de viscosidade e de condução de calor, a distorção da onda é o resultado de uma velocidade da onda que muda de um ponto a outro (efeito convectivo), isto significa que porções diferentes da onda, que viajam a diferentes velocidades, causam distorções.

A função seno original de alto nível, paulatinamente se distorce como uma onda “dente de serra” (ver **FIGURA 2.5**), referente a uma onda sonora de choque, ou uma série repetida de ondas de choque. Através de uma frente de ondas de choque, as propriedades do sistema (isto é, densidade, pressão, velocidade, entropia, etc.) mudam descontinuamente, quando são consideradas as relações de Rankine-Hugeniot e a correspondente equação de estado.

Por exemplo, pode se mostrar que a velocidade da frente de choque, desenvolvida por TEMKIM (1981), é dada por:

$$U = C_o \{1 + [(\gamma + 1) / 2 \gamma] P\}^{1/2} \quad (2.2)$$

Observando que $\gamma = C_p/C_v$ é a razão entre os calores específicos a pressão e volume constante, respectivamente; C_o é a velocidade do som num meio não perturbado e $P = (p - p_o)/p_o$ é a força de choque, ou seja, a mudança na pressão através da frente de choque em relação à pressão no meio não perturbado, p_o , sendo $(p - p_o)$ a variação de pressão. Para uma onda de choque que viaja no ar, em condições normais, tem-se $\gamma = 1,4$. No limite, a força de choque P chega a ser muito pequena (uma onda de choque muito fraca), mostrando que a velocidade de choque U se aproxima da velocidade do som C_o , como pode ser visto na equação (2.2). Assim, a quantidade para a qual a velocidade de choque é maior que a velocidade local do som é uma medida da extensão da divergência entre a onda de choque e uma onda sonora.

A espessura da frente de choque está relacionada com o tempo de subida até o pico de pressão sonora. Através de uma frente de choque, existem mudanças muito altas nas propriedades das pressões, as tensões viscosas chegam a ser grandes e os efeitos não adiabáticos também devem ser levados em conta. Os efeitos dissipativos tendem a acentuar as discontinuidades na velocidade e temperatura, limitando a velocidade com que as trocas podem acontecer através da frente de onda. Por exemplo, HAMERNIK e HSUEH (1991) realizaram alguns cálculos para frentes de choque, que têm sobrepressões da ordem de 2 kPa, 160 dB de NPS (pico), a espessura da onda de choque, no ar, é da ordem de 10^{-5} m, que corresponde a um tempo de subida de aproximadamente $0,01 \mu s$. Em 190 dB de NPS (pico), isto é 63 kPa de pressão sonora, estes valores são da ordem de 10^{-6} m e $0,001 \mu s$, respectivamente.

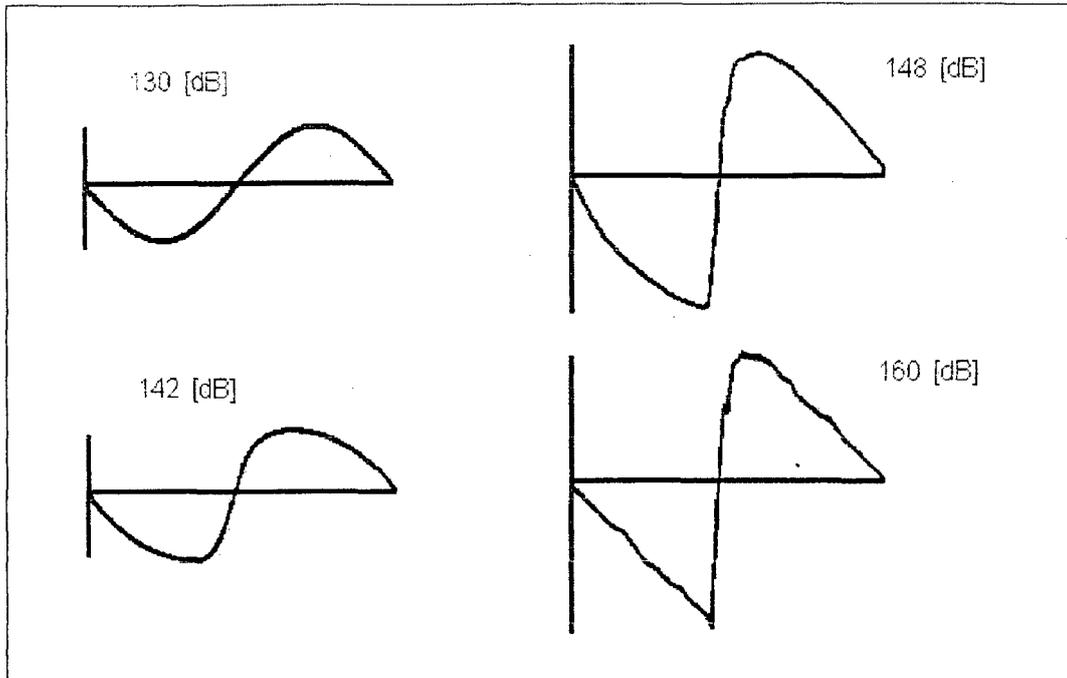


FIGURA 2.5 - Esquema dos sinais recebidos a uma distância fixa da fonte, para níveis de pressão sonora distintos.

2.2.2 Impulso Clássico de FRIEDLANDER (Onda com Duração Tipo A)

O impulso instantâneo de energia de uma fonte pontual num campo livre, isto é, num campo sem superfícies refletoras, produz uma pressão no tempo $p(t)$. Um impulso com características deste tipo é regularmente referenciada como uma onda de FRIEDLANDER, chamada assim por causa do matemático britânico FREDERCK G. FRIEDLANDER, quem usou tais formas de ondas no estudo de difração, em 1946 (HAMERNIK e HSUEH, 1991). Pode ser observado na **FIGURA 2.6**, que a diferença entre os tempos t_1 e t_0 é definida como o tempo de subida, alcançando o nível de pressão sonora (pico) no tempo t_1 . O tempo que leva a pressão ao primeiro retorno a zero, em t_2 , é chamado de Duração A. A parte final do impulso estende-se por aproximadamente seis vezes a Duração A antes que a pressão retorne novamente a zero, na prática menos que 1% do nível pico, em t_3 . SMEATHEM e WHEELER (1998), destacam que o nível de pressão sonora (pico), o tempo de subida e a duração dependem do tipo de fonte (tamanho, características geométricas e materiais usados).

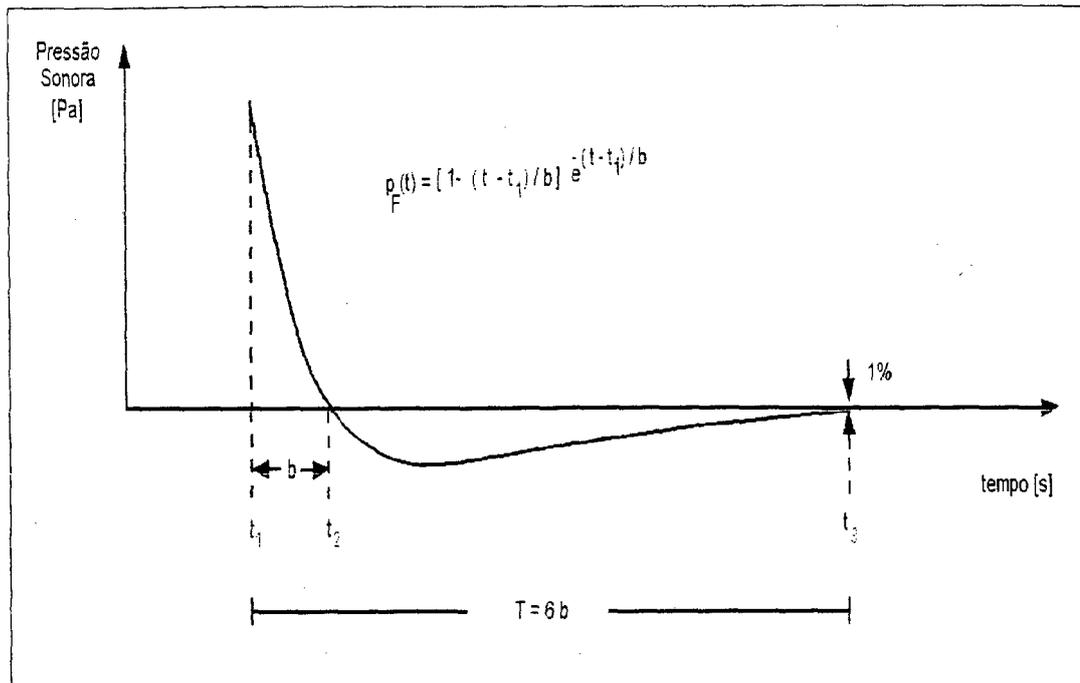


FIGURA 2.6 - Impulso ideal ou onda de FRIEDLANDER com tempo de subida zero.

O impulso é ideal no sentido de que o perfil de $p_F(t)$ pode ser modelado pela equação (2.3). Esta relação descreve uma onda cujo tempo de subida é zero e não tem reflexões.

$$p_F(t) = \begin{cases} 0, & -\infty < t < 0 \\ \left[1 - \frac{(t - t_1)}{b} \right] e^{-\frac{(t - t_1)}{b}}, & 0 \leq t < \infty \end{cases} \quad (2.3)$$

Esta onda de FRIEDLANDER tem uma representação alternativa no domínio da frequência, obtida a partir da transformada de Fourier $P_F(\omega)$, que tem uma forma particularmente conveniente.

$$P_F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} p_F(t) e^{-j\omega t} dt = \frac{j\omega b^2}{(1 + j\omega b)^2} \quad (2.4)$$

Onde $\omega = 2\pi f$

Da equação (2.4), a amplitude e a fase do espectro são:

$$|P_F(\omega)| = \frac{\omega b^2}{(1 + \omega^2 b^2)} \tag{2.5}$$

e

$$\phi = \text{arc tg} \left(\frac{(1 - \omega^2 b^2)}{2\omega b} \right) \tag{2.6}$$

Estes parâmetros estão mostrados nas **FIGURA 2.7** e **2.8**. Da equação (2.5), pode ser mostrado que o pico da amplitude do espectro aparece em $f_p = 1/2\pi b$ e tem um máximo valor de $|P_F(\omega)|_{\text{max}} = b/2$. Avaliando $|P_F(\omega)|$ numa faixa de frequência larga o incremento do espectro da amplitude, em dB/oitava, pode ser obtido como se apresenta na Figura 2.6. Abaixo do máximo (o pico do espectro) o incremento varia de +6 a 0 dB/oitava, enquanto, acima do máximo, o incremento varia de 0 a -6dB/oitava. Dado um pico de amplitude do impulso, reduzindo a duração da fase de condensação (isto é, o parâmetro b) do impulso, troca-se o pico do espectro para frequências mais altas e se reduz a energia total no estímulo. Contudo, deve-se notar que, para um dado nível de pressão sonora pico, uma série de impulsos cujo parâmetro b é diminuído, terão a mesma energia total, em frequências acima do pico de espectro, onde o incremento será -6 dB/oitava.

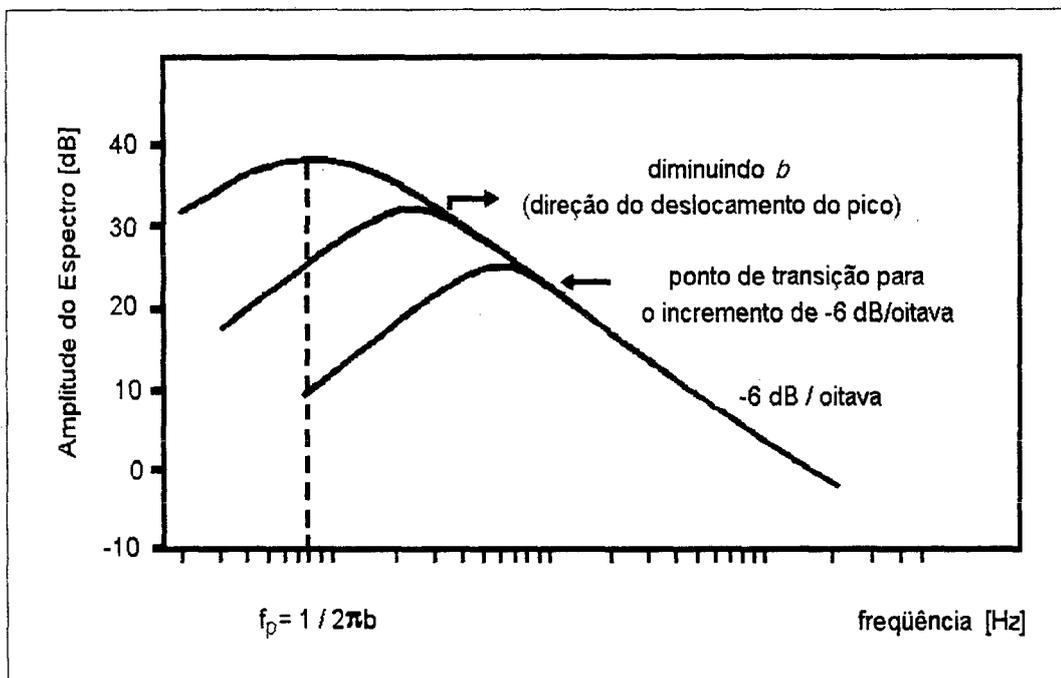


FIGURA 2.7 - Espectro da amplitude para um tempo de subida zero, de um impulso ideal que mostra o efeito de uma mudança no parâmetro b .

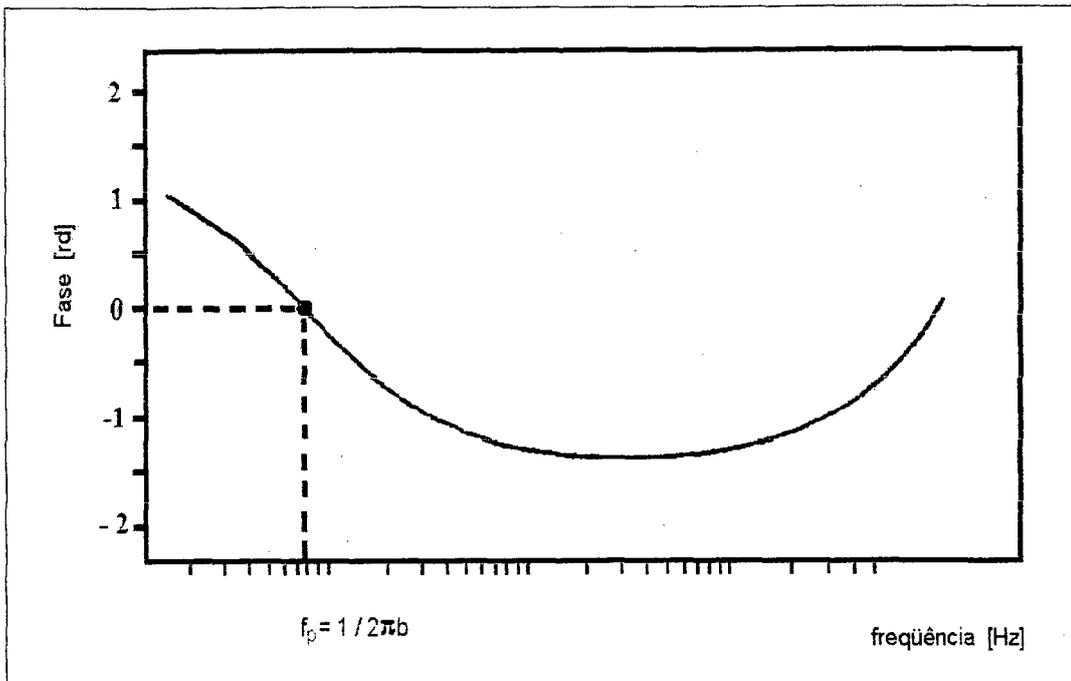


FIGURA 2.8 - Fase do espectro de um impulso ideal, com tempo de subida zero.

Se a equação (2.3) é alterada para levar em conta um tempo de subida finito c , é obtida um conjunto de relações modificadas e mais complexas para o espectro da amplitude e da fase. A adição de um tempo de subida finito pode ser modelada com a equação (2.7) e sua forma pode ser observada na **FIGURA 2.9**.

$$p(t) = p_s(t) + p_F(t) \tag{2.7}$$

onde,

$$p_s(t) = t/t_1, \quad 0 \leq t \leq t_1 \tag{2.8}$$

$$p_F(t) = \left[1 - \frac{(t-t_1)}{b}\right] e^{-\frac{(t-t_1)}{b}}, \quad t \geq t_1 \tag{2.9}$$

com,

$$t_1 = c \tag{2.10}$$

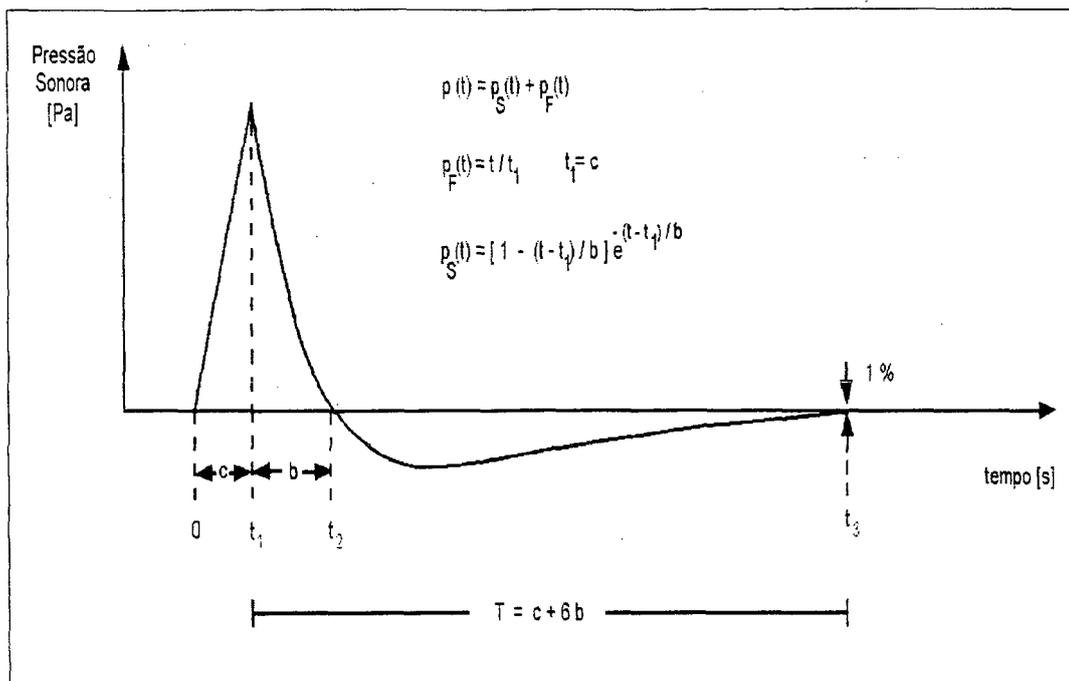


FIGURA 2.9 - Impulso ideal com tempo de subida finito c.

A linearidade da transformada de Fourier permite que $P(\omega) = P_S(\omega) + P_F(\omega)$. Logo, aplicando esta transformada na equação (2.7), obtém-se:

$$P(\omega) = -\frac{1}{c\omega^2} + e^{-j\omega c} \frac{(1 - \omega^2 b^2 - 2c\omega^2 b) + j(2\omega b + c\omega)}{c\omega^2 [(1 - \omega^2 b^2) + j2\omega b]} \tag{2.11}$$

Para $c \ll b$ e para frequências tais que $\omega b \gg 1$, uma expressão aproximada para a amplitude do espectro pode ser escrita como:

$$|P(\omega)| = (\sqrt{2}/\omega^2 c) [1 - \cos(\omega c)]^{1/2} \tag{2.12}$$

Da equação (2.12) pode ser mostrado que para frequências $f \gg 1/2\pi b$ (ou $\omega b \gg 1$), o envelope da amplitude do espectro declina -12 dB/oitava. Isto é verdadeiro para todas as frequências acima de $f = 1/3c$. Para frequências abaixo de $f = 1/3c$, o envelope do espectro é similar ao de um impulso ideal com tempo de subida zero. O ponto de transição, entre os incrementos de -6 e -12 dB/oitava, se movimenta para as frequências baixas na medida que incrementa c . Estas relações são mostradas esquematicamente na FIGURA 2.10.

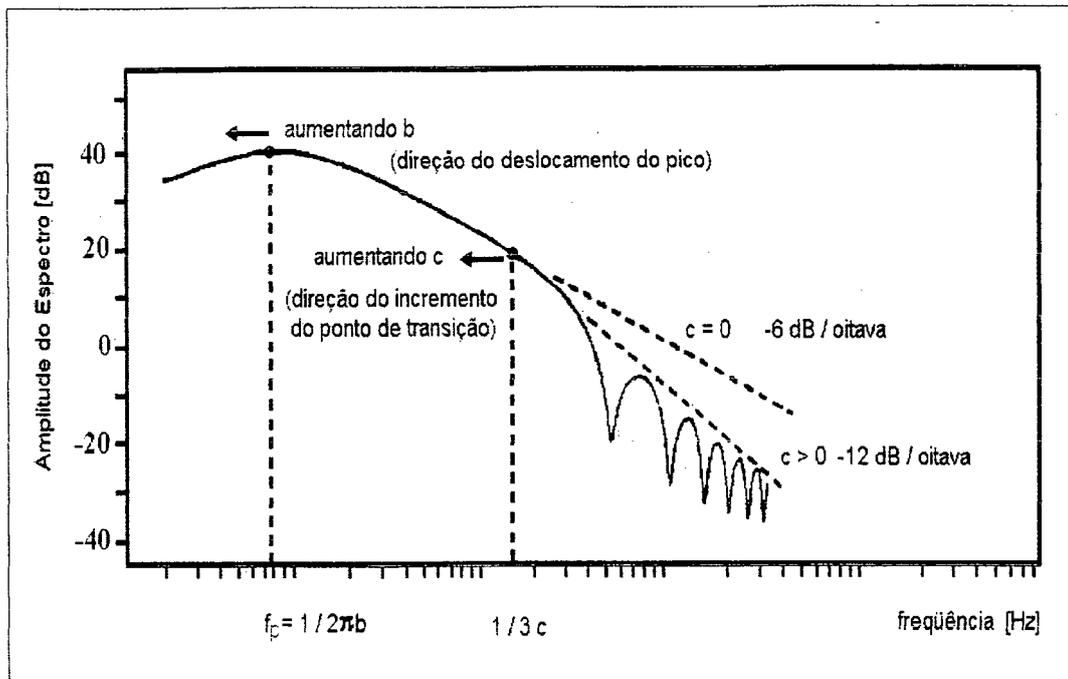


FIGURA 2.10 - Amplitude do espectro de um impulso ideal, com tempo de subida finito, mostrando o efeito de variar os parâmetros b e c .

2.2.3 Impulso do Tipo Reverberante (Onda com Duração Tipo B)

O impulso produzido por dois objetos de metais que chocam é a forma mais complexa de decaimento transiente de energia, que é distribuído através de vários modos de vibração mecânica possíveis, dos objetos em questão.

É possível observar na **FIGURA 2.11**, na forma mais simples, a Duração B definida por BURNS (1968). Esta duração detalha que o tempo a ser usado é o intervalo $t_1 - t_0$. O ponto t_1 é aquele no qual o envelope da forma de onda decai em amplitude a 10% do valor de pico (-20 dB), ou seja, 20 dB abaixo do nível do pico da pressão sonora. Se aparecem pulsos secundários, a duração é determinada usando o mesmo valor de 10% do pulso principal, somado à duração final (esta duração corresponderia a uma Duração B de impulsos múltiplos).

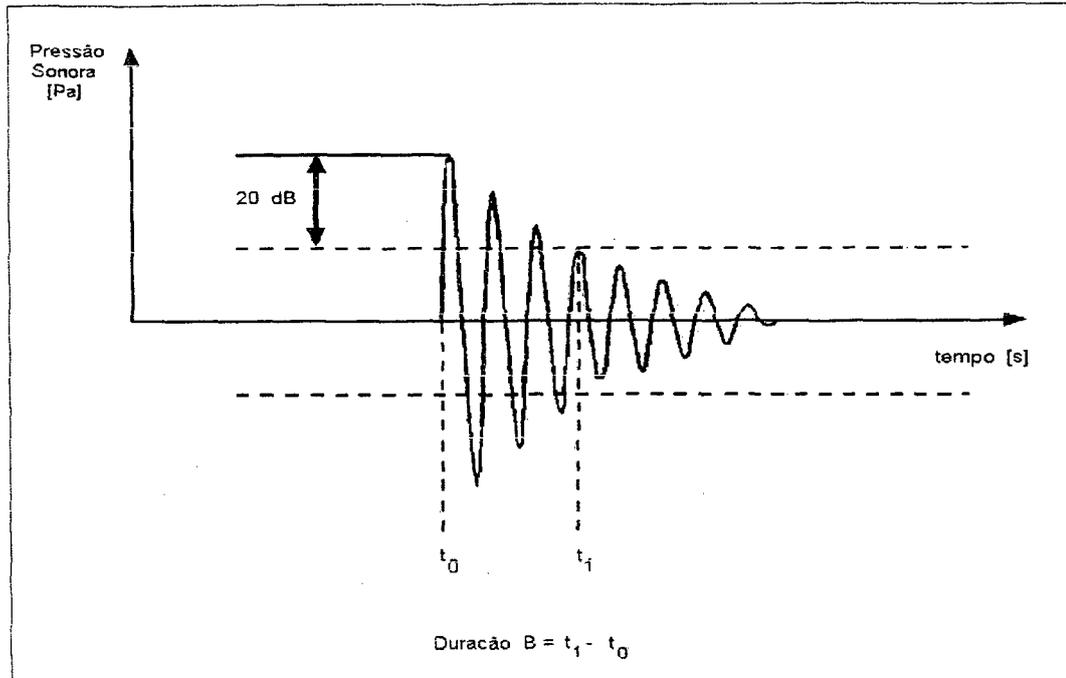


FIGURA 2.11 - Forma de onda de um único impulso do tipo reverberante (Duração B).

Dentro dos espaços reverberantes, como uma fábrica por exemplo, o ruído de impacto das máquinas pode incluir uma série de pulsos, possibilitando uma superposição de impulsos. Em tais casos, a Duração B relaciona o tempo total para o qual o nível excede o critério de 20 dB (pico). Este fenômeno pode ser observado na **FIGURA 2.12**.

Na presença de qualquer superfície refletora, como o chão, existem componentes adicionais no impulso produzido pelas reflexões. Se os comprimentos das trajetórias envolvidas são suficientemente curtos, as reflexões podem interferir com o pulso original, produzindo um padrão temporal complexo. O termo Duração C é usado para descrever o tempo total para o qual o nível do pulso excede o critério de nível de pressão sonora pico de 10 dB (ver **FIGURA 2.13**). A expressão correspondente a uma Duração do tipo D considera o critério de nível de pressão sonora pico de 10 dB, como no caso da Duração C, quando o impulso se produz em ambientes pouco amortecidos. A forma de onda desta Duração D é uma mistura entre as formas de onda das Duração B e C.

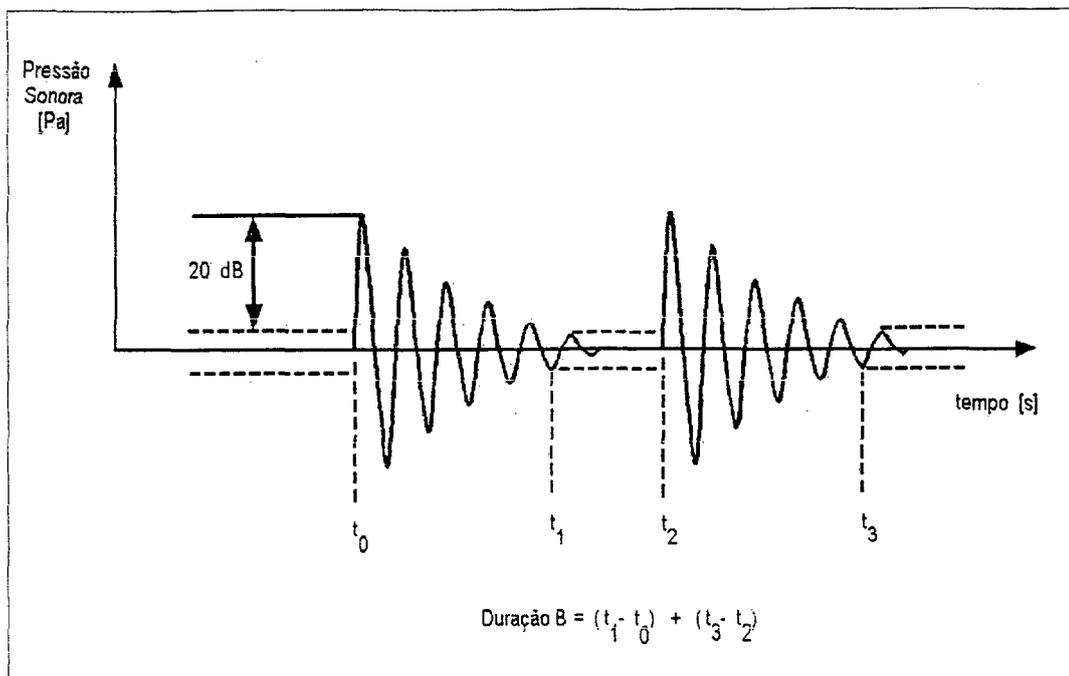


FIGURA 2.12 - Definição da Duração B para impulsos múltiplos.

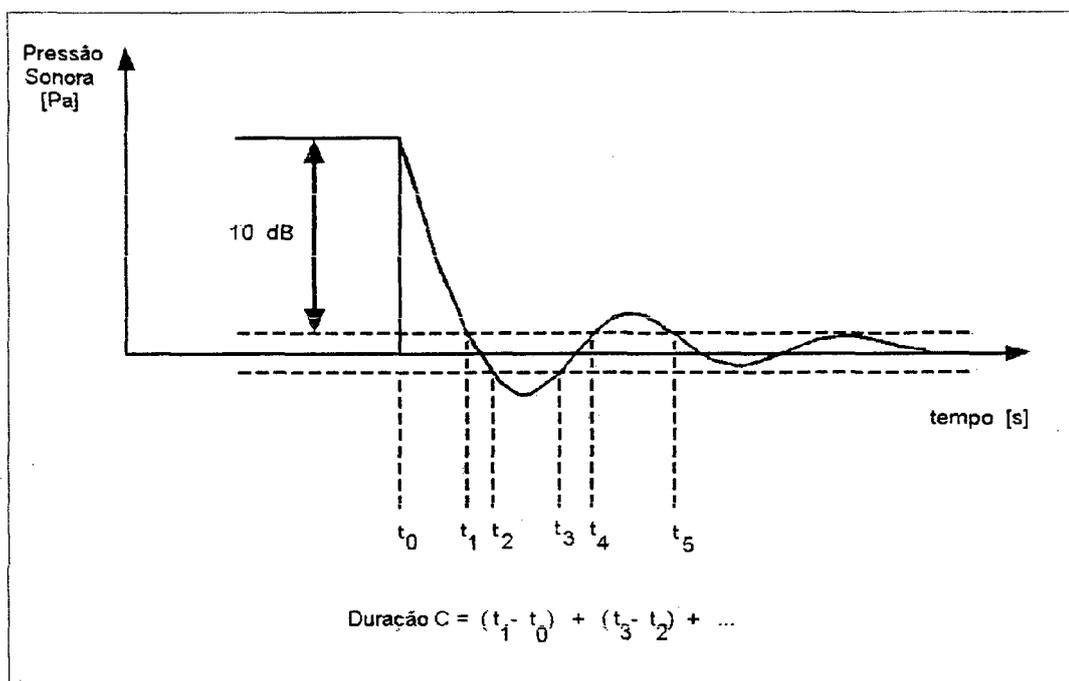


FIGURA 2.13 - Definição da Duração C.

De modo a quantificar a duração efetiva de um impulso, de uma maneira o mais real possível, no domínio do tempo, foram apresentadas diferentes definições, conforme apresentado na **TABELA 2.6** e mostrado na **FIGURA 2.14**.

TABELA 2.6 - Resumo dos diferentes tipos de durações, para ruído impulsivo, que determinam as formas de onda (SMOORENBURG, 1996).

Duração	Autor	Ano
$A = (t_1 - t_0)$	Coles et. al	1968
$B = (t_1 - t_0)$ (impulso único)	Coles et. al	1968
$B = (t_1 - t_0) + (t_3 - t_2)$ (impulsos múltiplos)		
$C = (t_1 - t_0) + (t_3 - t_2) + (t_5 - t_4) + \dots$	Pfander et. al	1980
$D = (t_1 - t_0)$	Smoorenburg	1982

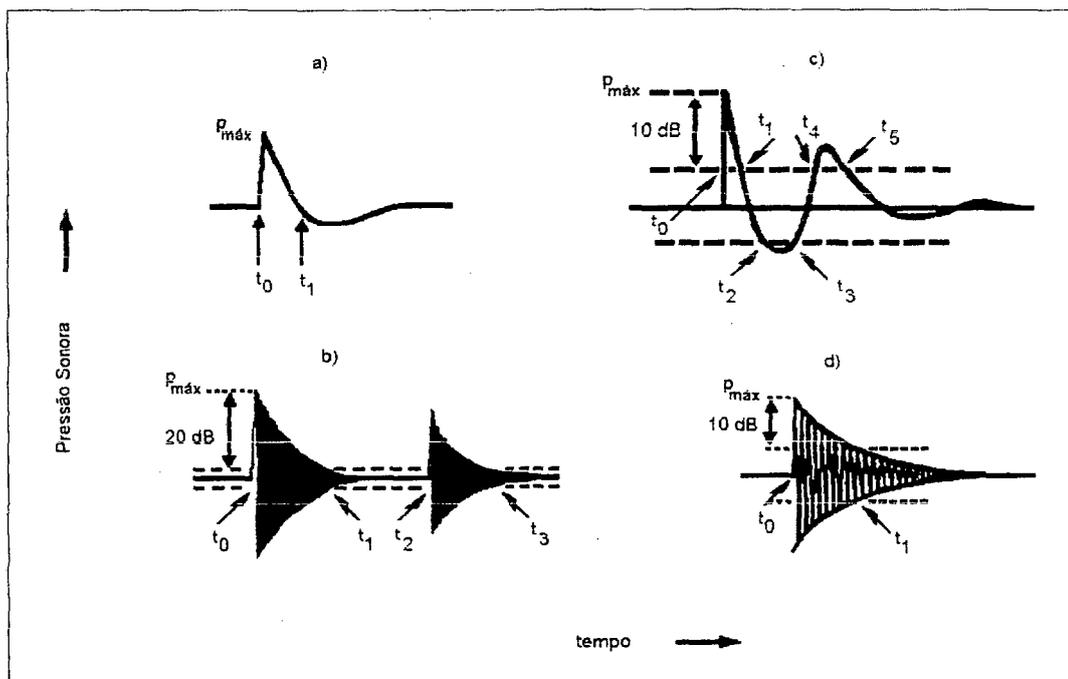


FIGURA 2.14 - Desenhos das formas de onda de impulsos simples, que ilustram os diferentes pontos temporais de um impulso, usados para determinar: a) Duração A, b) Duração B, c) Duração C e d) Duração D.

2.2.4. Alguns Parâmetros Relacionados com a Quantificação do Impulso

A maioria das medições do ruído impulsivo são realizadas com microfones e a quantidade medida é a variação de pressão no tempo, sendo limitada a possibilidade de se obterem valores reais de energia. Como apontam HAMERNIK e HSUEH (1991), as características do campo sonoro geralmente são desconhecidas e a energia real carregada pelo impulso dificilmente pode ser determinada. Além dos parâmetros de nível de pressão sonora (pico), tempo de subida e duração, as seguintes relações servem para estimar e quantificar a energia no domínio do tempo:

a) Impulso por unidade de área de $p(t)$:

$$\int_0^T p(t) dt \quad (2.13)$$

O impulso da pressão sonora $p(t)$ é uma quantidade que pode ser usada no sistema auditivo periférico, considerado como um sistema mecânico, quando as cargas do impulso precisarem ser levadas em conta e aplicadas a problemas associados com trauma do ruído.

b) Pressão sonora quadrada integrada no tempo (Young, 1970) (HAMERNIK e HSUEH, 1991):

$$\int_0^T p^2(t) dt \quad (2.14)$$

Quando $p(t)$ é relativamente bem comportada, a maioria dos parâmetros anteriores podem ser facilmente obtidos. No domínio da frequência, um número de diferentes termos tem sido regularmente usado para identificar o espectro de pressão de Fourier. Para impulsos onde o espectro de pressão de Fourier, $|P(\omega)|$, é uma função contínua da frequência, a ordenada é uma quantidade que representa a densidade espectral, i. e., pressão por unidade de frequência. Da aplicação da transformada de Fourier de $p(t)$ obtém-se:

a) espectro de pressão de Fourier:

$$|P(\omega)| \quad (2.15)$$

b) espectro quadrado de pressão de Fourier (Espectro de Exposição Sonora):

$$|P(\omega)|^2 \quad (2.16)$$

Por causa da sensibilidade espectral do ouvido, é comum se aplicar funções de ponderação ao espectro de exposição sonora. Comumente, é usada a ponderação A na literatura relacionada com o trauma de ruído.

Fazendo uma análise e resumo geral, na prática os impulsos reais diferem em vários fatores quando são comparados com o impulso ideal do tipo FRIEDLANDER. Os efeitos de superfícies refletoras, presentes em muitos ambientes, produzem ondas secundárias (refletidas) que alcançam o receptor. O intervalo de tempo, entre as ondas primária e secundária, depende da distância relativa entre as superfícies refletoras e do local de medição. Além disso, os picos sonoros e espectros, relacionados com estas componentes refletoras, são alterados pelo comportamento da impedância característica das superfícies refletoras. Em consequência, as complexas características das durações apresentadas na **FIGURA 2.14** não podem ser sempre estabelecidas sem ambigüidade, já que eventualmente apareceriam mais de um pico de pressão sonora. Adicionalmente, dentro de recintos fechados existe, às vezes, uma lenta construção da pressão sonora, em baixa freqüência, nas quais as componentes da onda refletida são superpostas antes de decair para as condições ambientais. Em tais casos, a definição dos parâmetros do ruído impulsivo, no domínio do tempo, é de questionável utilidade. No domínio da freqüência os impulsos podem chegar a ser mais fáceis de quantificar.

Entretanto, das várias classes de impulsos sonoros discutidos anteriormente, existem situações comuns nas quais estes impulsos estão presentes como uma componente freqüente de ambientes ruidosos mais complexos e de altos níveis. Em tais ambientes, o nível de pressão sonora (pico) e as medições rms (*root mean square*) ou até mesmo medições convencionais no domínio da freqüência, podem não ser adequadas para estimar os perigos à audição. Uma opção, além das técnicas analíticas apresentadas, seria o uso de tecnologia digital de alta velocidade e sua aplicação nesses ambientes ruidosos, que permitam quantificar a origem impulsiva do sinal temporal e/ou identificar componentes de freqüência particulares do sinal que estão submetidas a rápidas flutuações de alto nível.

2.3 Proteção Auditiva Para Ruídos Impulsivos

Um dos estudos sobre dano auditivo, de MURRAY e RICE, em 1947, pesquisou o efeito de ruído de armas de fogo e o conseqüente risco de dano à audição, devido ao ruído impulsivo (RICE, 1996). Em 1964, a aparente falta de informação a respeito dos efeitos de ruído impulsivo de alta intensidade sobre a audição levou o Institute of Sound and Vibration Research (ISVR) à formulação do Critério de Risco de Dano (DRC, Damage Risk Criterion). Este DRC, obtido para casos de ruído em estado estacionário, refere-se de forma superficial ao problema, estabelecendo um limite superior de 135 dB para exposição a ruídos de qualquer duração, sem proteção auditiva. Porém, este limite foi considerado muito conservador, particularmente para as exposições a ruídos de armas de fogo. Sob estas condições um programa de ruído foi desenvolvido por Coles e Rice, cujos métodos de medição especificaram as características físicas do ruído impulsivo, que foram comparados com as Mudanças Temporária do Limiar (TTS, Temporary Threshold Shift), aplicadas a pessoas voluntárias. Os resultados destas pesquisas foram inicialmente apresentados ao “Medical Research Council’s Royal Naval Personnel Research Committee”, em 1965, e posteriormente estes resultados foram estendidos, passando a incluir limites de segurança para certos tipos de exposições ao ruído impulsivo, sendo publicados no Fifth International Congress of Acoustics, em Liège. No mesmo congresso, dados apresentados por Kryter e Garinther (1965), que tinham sido obtidos simultaneamente e de forma independente, mostraram conclusões similares (que em condições acústicas de diferentes ambientes industriais e militares, os níveis de ruído que mascaram o limiar da audição para a fala, está acima de 80 dB). Estes dados complementaram outras pesquisas que conduziram à fundação, em 1968, por Coles, Garinther, Hodge e Rice, do primeiro DRC autorizado para exposição de ruído de armas de fogo. Este critério estabeleceu os limites de TTS aceitáveis para proteger 75% da população exposta, recomendada pelo Committee on Hearing, Bioacoustics and Biomechanics (CHABA), especificando que “no final do dia” o TTS deveria não exceder 10 dB em ou abaixo dos 1000 Hz, 15 dB em 2000 Hz e 20 dB em ou acima dos 3000 Hz, em 75% das pessoas expostas com audição normal (RICE, 1996). Nos seguintes anos a CHABA tentou avançar mais nestas matérias e propôs um critério de risco de dano para ruído de armas de fogo, baseado no trabalho de COLES et. al (RICE, 1996), mas poucas modificações foram feitas.

Em 1981, um seminário de especialistas internacionais em ruído impulsivo e risco auditivo foi organizado por Rice no ISVR, para discutir assuntos relativos ao fato de que nenhum método, dentre os existentes até aquela época, havia sido totalmente aceito, para a medição e avaliação de danos auditivos provocados por ruído impulsivo ou de impacto. Os regulamentos no Reino Unido e na Diretiva da Comunidade Econômica Européia (EEC), em 1982, incluíram o ruído impulsivo dentro dos seus objetivos, ampliando a Hipótese de Igual Energia (Equal Energy Hypothesis) para considerar tal ruído. Também foi estabelecido o limite superior para a pressão sonora instantânea de 200 Pa (140 dB, ref. 20 μ Pa). Contudo, algumas controvérsias persistiram, a respeito da forma de avaliação do dano causado por ruído impulsivo: “Não existe ainda alguma evidência clara para distinguir entre ruído impulsivo e não-impulsivo, ou seus efeitos. Portanto, os ruídos impulsivo e não-impulsivo não deveriam ser considerados independentes, acima de um nível de pressão sonora pico instantâneo não ponderado, de aproximadamente 145 dB. Estas recomendações são válidas para todas as situações industriais e militares, notando que com o uso de protetores auditivos de boa qualidade, a maioria dos ruídos cai dentro da faixa de aplicabilidade recomendada” (WEBSTER e BLACKSTOCK, 1977).

A EEC, em 1989, menciona que o comportamento dos protetores auditivos para níveis de pressão sonora (pico) dos ruídos impulsivos, não deveria exceder os 200 Pa (140 dB). Porém, não existem mecanismos de avaliação da atenuação sonora pico dos protetores auditivos. O método normalizado de avaliação de protetores auditivos, estabelecido pela norma ISO 4869-1, está baseado em baixos níveis e não é adequado para medições da atenuação do ruído impulsivo de alto nível. Para níveis altos de ruído estas atenuações somente podem ser usadas quando o protetor auditivo é linear, isto é, quando a atenuação não muda com o nível sonoro incidente.

Os métodos que permitem avaliar um protetor auditivo, são divididos em métodos subjetivos e objetivos. Os métodos subjetivos consideram o uso de pessoas e são classificados em: o método Real Ear Attenuation at Threshold (REAT), o método REAT com fones de cabeça e a técnica de Microphone In Real Ear (MIRE). Estes dois métodos estão descritos abaixo. Os métodos objetivos utilizam: Simuladores de Cabeça Artificial com um ou dois microfones. O método Real Ear Attenuation at

Threshold (REAT) é um método usado pela norma americana (ANSI S3.19-1974), a qual descreve o método de avaliação da atenuação sonora do protetor auditivo (WEBSTER e BLACKSTOCK, 1977). No Auditory Research Laboratories of the Division of Hearing and Speech Sciences, da Universidade de Vanderbilt, também foram estudados três métodos subjetivos de avaliação de protetores auditivos. Cada um deles descreve um procedimento que considera ouvidos reais que permitem avaliar a atenuação sonora do protetor auditivo para altos e baixos níveis de ruído. Os três métodos foram: Cross-Modality Matching (1975) que consiste em quantificar as sensações auditivas subjetivas mediante uma magnitude; o método Masked Bone-Conduction Threshold (1977), que considera as medições de limiar de condução óssea para tons puros mascarados por ruído de banda larga e a técnica Real-Ear Probe Microphone Measurement (1978), a qual utiliza dois microfones pequenos, um dentro e outro fora do canal auditivo (ALBERTI, 1982).

O método REAT utiliza dois microfones pequenos, onde um deles é localizado no interior do canal auditivo de um indivíduo, para monitorar os níveis de som nessa posição, enquanto que o segundo microfone serve como microfone de controle instalado no exterior do canal auditivo. Assim, pode-se obter a resposta em frequência do ouvido *com* e *sem* protetor. Esta técnica é atrativa, mas é adequada para alguns níveis de som que podem ser medidos no canal auditivo, já que existem dificuldades na medição de atenuação sonora de protetores auditivos para altos níveis de ruído e o perigo de danificar o sistema auditivo dos voluntários que participam dos testes (GERGES, 1997).

O método Microphone In Real Ear (MIRE), consiste em obter medições de pressão sonora no interior do canal auditivo, com o uso do dispositivo de proteção auditiva. O microfone é localizado na superfície do protetor (tampão) que está de frente para o tímpano. O método MIRE aplicado nos tampões fornece pouca precisão e afeta a integridade do tampão, sendo um mecanismo pouco adequado para a avaliação da atenuação sonora de ruídos impulsivos (WEBSTER e BLACKSTOCK, 1977).

Recentemente, o National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) chamou a atenção para a necessidade de um maior número de pesquisas, para definir

o dano auditivo provocado por ruído impulsivo e os parâmetros que o caracterizam. Estes parâmetros deveriam incluir a amplitude, duração, tempo de subida, número de impulsos, taxa de repetição e fator de crista. Porém, não se dispõe de dados suficientes para se desenvolver um critério de risco de dano para ruídos impulsivos (NIOSH, 1998). Portanto, é necessário um método que utilize ouvidos reais que avalie os protetores auditivos, para altos níveis de ruído. Tal método requer assumir a não-linearidade da atenuação sonora e o fato de usar seres humanos nos ensaios, o que representa um enorme risco de dano auditivo irreversível, no caso de altos níveis de ruído.

Dentro da revisão bibliográfica efetuada, cabe destacar a norma britânica BS EN 458 (1994), como uma das poucas referências que estabelece algum procedimento de avaliação da atenuação sonora de protetores auditivos para nível de pressão sonora (pico). Mas, depois de revisar e discutir esta norma, é possível concluir que as recomendações e procedimentos estabelecidos estão incompletos, faltam expressões que permitem obter valores de atenuação sonora, dos protetores auditivos.

2.3.1 Descrição do Protetor Auditivo Tipo Tampão

Um protetor auditivo é uma barreira acústica que deve proteger parte do ouvido e reduzir o ruído transmitido via aérea que chega ao tímpano. O principal objetivo dos protetores auditivos é reduzir, a um nível aceitável, os níveis excessivos de ruído. O funcionamento de um protetor auditivo depende de suas características físicas e geométricas, além das características fisiológicas e anatômicas do usuário. Um dispositivo de proteção auditiva para armas de fogo deve fornecer a máxima proteção possível contra níveis intensos de ruído que se encontram nas proximidades das armas, quando estas são acionadas. Ao mesmo tempo, o dispositivo deve ser confortável, relativamente fácil de instalar e tirar da orelha e suficientemente robusto para resistir às condições de uso em campo, não devendo apresentar problemas de higiene no usuário.

Para definir o comportamento acústico de um protetor auditivo quando é submetido a um impulso sonoro específico, requer-se um detalhado conhecimento da

dependência de qualquer não-linearidade na sua resposta do nível de pressão sonora (pico), tempo de subida e duração do impulso. Em outras palavras, é necessária uma análise completa do comportamento da atenuação do protetor, em função das variáveis mencionadas. É de muita importância conhecer a forma com que os diferentes tipos de protetores auditivos podem responder ao ruído impulsivo. Se um protetor auditivo comporta-se linearmente, o nível de pressão sonora pico que incide sobre o ouvido pode ser calculado a partir da resposta impulsiva do protetor. Porém, os protetores auditivos passivos convencionais exibem comportamento não-linear, quando são submetidos a ruído impulsivo de alto nível. Um clássico exemplo deste fenômeno surge quando o protetor auditivo não é bem instalado e sai parcialmente do canal auditivo do usuário (SMOORENBURG, 1996).

Os protetores auditivos tipo tampão (earplug) são inseridos e usados no canal auditivo para selar a entrada do canal auditivo externo. Estes protetores são divididos em duas categorias: descartáveis e reutilizáveis. Além disso, dependendo de suas características físicas, são classificados em tampões pré-moldados, maleáveis e moldados personalizados (BS EM 458, 1994).

Dependendo da sua construção, o tampão convencional pode ser modelado como um simples elemento de resistência acústica localizado no canal auditivo, e ser considerado como um sistema massa-mola que inclui a massa do próprio tampão. Mas, devem ser levadas em conta as propriedades físicas que permitem caracterizar um protetor auditivo do tipo tampão, tais como: densidade, velocidade do som, porosidade, resistividade ao fluxo do ar e fator estrutural, as quais representam um papel muito importante e influente nos ensaios experimentais e na simulação numérica.

2.3.2 Perda de Inserção de Ruído Impulsivo

Pode-se avaliar quantitativamente um protetor auditivo com um método de índice de número único, o qual consiste em estimar a atenuação média e o desvio padrão das medições com protetores auditivos. Este método fornece ao usuário a opção de selecionar, mediante um valor ou número, o comportamento da proteção auditiva, baseado na forma como o nível de ruído é reduzido pelo protetor. Mas não existem

normas ou procedimentos normalizados que garantam uma avaliação da correta redução sonora, no que se refere a ruídos impulsivos.

A atenuação ou redução de ruído poderá ser determinada calculando-se a diferença entre os níveis de pressão sonora obtidos antes e após a colocação do protetor auditivo tipo tampão. A expressão que permite obter a atenuação sonora é descrita pela seguinte equação:

$$IL = NPS_{sem} - NPS_{com} \quad (2.17)$$

O que se calcula é uma Perda de Inserção, PI, (Insertion Loss, IL), para um mesmo ponto (na posição do tímpano), antes e após instalação do protetor. Esta grandeza depende da frequência e é expressa em dB, mas também é possível estimar o valor de atenuação para o nível de pressão sonora (pico), *com* e *sem* o tampão, no domínio do tempo.

2.4 Método de Elementos Finitos em Acústica Transiente

Com os recentes avanços em técnicas numéricas, diversos métodos de discretização numérica, para obter soluções aproximadas, estão disponíveis para resolver problemas complexos do tipo: estrutura-cavidade acústica. Várias técnicas numéricas têm sido desenvolvidas para avaliar a radiação de ruído de estruturas vibrantes ou o efeito de espalhamento devido a algum campo sonoro incidente. Tanto o Método de Elementos Finitos (FEM) como o Método de Elementos de Contornos (Boundary Element Method, BEM) podem ser usados para resolver problemas de propagação de onda acústica. No domínio do tempo, a diferença finita e o FEM têm sido aplicados há muito tempo.

Entre 1960 e 1970 o método de elementos finitos foi estabelecido como técnica preferida para a análise de problemas estruturais. Mas, aplicada em problemas de acústica, a técnica não serviu para regiões sem contorno (infinitas) que às vezes surgem. Durante os anos 70, o FEM permitiu a modelagem conveniente de geometrias complexas, sendo adotado pela primeira vez em problemas veiculares nas análises

acústica e estrutural (Wolf, J. A. & Nefske, D. J. NASTRAN, 1975). Durante o mesmo período a aplicação de FEM para sistemas estrutura-cavidade acústica foi pesquisado pelos diferentes autores: Shuku, T & Ishihara, K (1973); Petyt, M., Lea, J. & Koopmann, G.H. (1976); Nefske, D. J., Wolf, J.A., Jr. & Howell (1982) e Xie, Ke-Jun (1990) [LEE et. Al, 1995).

Existem estudos de simulações e modelagem numérica em trabalhos de pesquisa do sistema protetor-pavilhão-canal-tímpano que consideram as respostas estacionárias e transientes e formulações de sistemas com estrutura e cavidade acústica. Mais recentemente alguns trabalhos de Xie, K. (1990), Ciskowski, R. D. (1988) e Mourand, K. M. (1990) modelaram o canal auditivo externo com o BEM, considerando como protetores auditivos aqueles do tipo tampão elástico e viscoelástico. Lee, Ch. (1992) tem desenvolvido o estudo das respostas de pressões acústicas de estado estacionário e transiente, usando um acoplamento direto entre as técnicas numéricas de elementos finitos e de contorno.

Neste trabalho será usada a modelagem de elementos finitos e a simulação numérica no domínio do tempo, para problemas transientes, que considera uma formulação matemática da pressão sonora desenvolvida por COYETTE (1995), que considera problemas acústicos transientes usando FEM e o esquema de integração implícita para resolver um sistema diferencial de segunda ordem.

A equação da onda linear que governa a propagação de ondas acústicas de pequena amplitude, num meio acústico homogêneo, tem a seguinte forma usual:

$$\frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad x \in V, t \geq 0 \quad (2.18)$$

onde,

$p(x,t)$: pressão acústica num ponto x do domínio V , no tempo t .

c : velocidade do som.

Uma formulação matemática e implementação numérica, com mais detalhes, são apresentadas no capítulo 3, no qual é desenvolvida a equação da onda linear, equação (2.18), para problemas transientes de pressão sonora.

CAPÍTULO 3

ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Em geral, é impraticável medir a atenuação sonora de ruídos impulsivos, pelos protetores auditivos, nos locais de trabalho. Portanto, é necessário utilizar fontes sonoras de laboratório, cujas características sejam similares às encontradas nos ambientes industriais e laborais, de modo a facilitar as medições de atenuação sonora de protetores auditivos devido ao ruído impulsivo, em condições de laboratório.

As fontes sonoras impulsivas utilizam uma ou mais das seguintes técnicas, para produzir ruídos com características impulsivas: métodos mecânicos, electromecânicos ou eletro-mecano-acústicos. Alguns tipos de fontes de laboratório usadas e recomendadas, são por exemplo:

- i) *Descarga de Ar Comprimido*: tipo de fonte que gera uma onda sonora impulsiva mediante a ruptura de um diafragma (membrana) localizado entre uma câmara de compressão e outra de expansão. HAMERNIK e HSUEH (1991) usaram dois métodos diferentes de geração de impulsos utilizando ar comprimido. No primeiro método, usaram um diafragma que explode e no outro uma válvula de ação rápida para produzir uma onda de choque, alcançando níveis picos de 160 dB. Este tipo de fonte impulsiva de laboratório corresponde à classificação do Tipo 3 e 4 (NPS pico entre 150 a 190, Duração A entre 0,2 e 6 ms, energia acústica concentrada tanto em baixas como altas frequências, tipo de onda FRIEDLANDER para armas de grosso e baixo calibre), descrita na **TABELA 2.5** do item 2.2.3, no Capítulo 2. Como relatam SMEATHEM e WHEELER (1998), foi desenvolvida uma lâmina que explode para gerar ruído impulsivo. Este dispositivo consta de um tubo cilíndrico preenchido com ar comprimido e terminado por uma lâmina delgada. Para formar o pulso, outro tubo com um extremo aberto é montado na frente do tubo inflado com ar. A lâmina explode depois de ter sido furada por uma agulha fina. A uma pressão de 2,05 bar, foram alcançados níveis de pressão sonora pico de 170 dB a uma distância de 0,5 m, para uma Duração do tipo A, de 1 ms.

- ii) *Clicador (Cricker)*: peça de mola de aço côncava fixada num extremo a um suporte. Quando o clicador é comprimido o aço volta abruptamente a sua posição estável gerando um golpe.
- iii) *Martelo e placa*: impacto que é produzido por um martelo caindo sobre uma placa, gerando assim um impulso cujo nível de pressão sonora (pico) e duração podem ser variados.
- iv) *Alto-falante*: tipo de fonte impulsiva que regularmente é muito utilizada, já que oferece boa repetibilidade. Esta técnica é limitada na resposta de frequência, direcionalidade, potência e na faixa dinâmica requerida para alcançar altos níveis de ruído impulsivo.
- v) *Descarga de faíscas*: impulso produzido pelo arco formado entre dois eletrodos. O pulso de pressão resultante é dependente da voltagem e do espaçamento entre os eletrodos.
- vi) *Pistola*: método para produzir impulsos que simulam o ruído de ambientes militares. As variações do nível de pressão sonora (pico) são obtidas deslocando o receptor (atirador) da fonte.
- vii) *Canhão de Propano*: o gás propano no interior do canhão é comprimido mecanicamente, logo um acendedor piezoelétrico ativa o gás, causando assim uma explosão. Os níveis de pressão sonora (pico) são aproximadamente de 147 dB.
- viii) *Dispositivos Pirotécnicos*: explosivos controlados por fogo que são capazes de produzir impulsos FRIEDLANDER de curta duração. A segurança requerida nos ensaios, em condições de laboratório, faz com que esses dispositivos não sejam aceitos como fontes padronizadas.

Neste capítulo são apresentados os ensaios experimentais, referentes às medições de ruído impulsivo, com o uso de protetores auditivos tipo tampão, efetuadas no Laboratório de Vibrações e Acústica da UFSC. Estes ensaios foram implementados em três etapas, as quais são detalhadas e explicadas a seguir.

3.1 Descrição dos Procedimentos Utilizados

3.1.1 Montagem Experimental com Placa de Madeira

O procedimento de medição consistiu em utilizar uma fonte sonora impulsiva, do tipo descarga de ar comprimido, num ambiente semi-anecóico. A escolha de um ambiente semi-anecóico leva em consideração diversos fatores como: controle do ambiente, isolamento acústico da fonte impulsiva de alto nível, para assim evitar os perigos e transtornos que este tipo de ruído provoca, como também o controle remoto da fonte e da explosão.

A aquisição dos dados, no domínio do tempo, para a determinação dos parâmetros que identificam um sinal impulsivo, e os seus respectivos espectros de frequência, também como a perda de inserção produzida pelo protetor auditivo tipo tampão, pode ser resumida, de uma maneira geral, pelos seguintes incrementos:

a) Planejamento e montagem:

- i) Escolha da fonte impulsiva de excitação e dos transdutores de recepção dos sinais.
- ii) Seleção da resolução no tempo para os sinais adquiridos.
- iii) Caracterização física da fonte impulsiva e sua montagem dentro da câmara semi-anecóica.
- iv) Determinação da localização da fonte sonora impulsiva e dos pontos de recepção.
- v) Montagem da cadeia de medição.

b) Procedimento experimental

- i) Aquisição e armazenamento dos dados experimentais.
- ii) Transferência dos dados para o computador e sua conversão para formato de planilhas de cálculo, através de programas computacionais específicos.
- iii) Construção e visualização gráfica das curvas de pressão sonora, no domínio do tempo e da frequência.

Para cada medição o campo sonoro impulsivo é medido simultaneamente com dois microfones que estão posicionados em dois tubos cilíndricos de plástico, que simulam o canal auditivo humano, e que estão localizados numa placa de madeira,

como pode ser observado na **FIGURA 3.1**. Um dos canais aditivos simulados (mic 1) permanece aberto, sendo caracterizado como *sem* tampão, e no outro canal (mic 2) é instalado o protetor auditivo que é denominado *com* tampão.

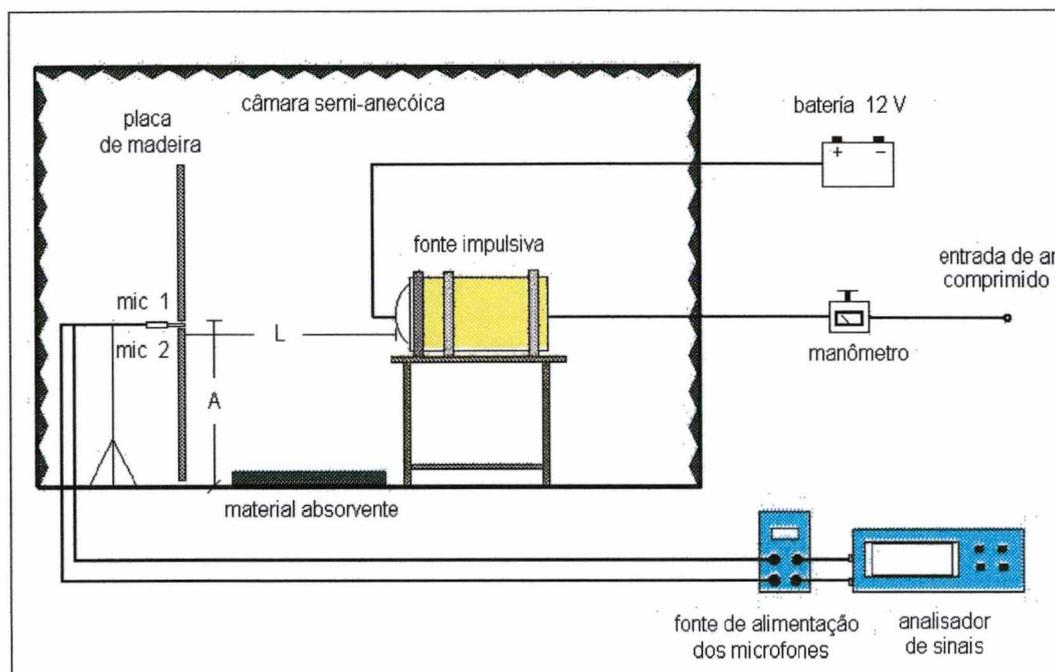


FIGURA 3.1 - Diagrama que descreve o procedimento de medição e os equipamentos utilizados, com ruído impulsivo, usando a placa de madeira.

O desenvolvimento experimental foi possível graças à experiência e participação do Dr. Robert Birch, da Universidade de Liverpool, Inglaterra, durante sua presença como professor visitante no LVA da UFSC (abril 1999 – abril 2000). O Dr. Birch tem desenvolvido pesquisas na área de ruído de impacto, usando diferentes tipos de fontes sonoras de impulsos que trabalham com o sistema de descarga de ar comprimido. A fonte sonora impulsiva desenvolvida pelo professor Birch consiste num cilindro oco de plástico, fechado num extremo e aberto no outro, onde é instalada uma membrana de poliéster. O cilindro é alimentado externamente com ar comprimido, mediante uma abertura na parte posterior. A pressão do ar dentro do cilindro provoca uma ação sobre a membrana de poliéster que fica totalmente sob pressão e expandida, podendo explodir com algum contato do tipo eletromecânico. Isto se realiza utilizando um fio elétrico, aderido na superfície da lâmina de poliéster, pelo qual circula uma corrente alimentada por uma bateria de 12 V que provoca a incandescência e a imediata fissura da membrana de poliéster, provocando assim a rápida descompressão da carga de ar

no interior do tubo. Considerando o perigo de incêndio ou a queima de materiais no interior da câmara semi-anecóica, por causa da explosão da membrana plástica e também do fio incandescente, foi usada uma micro-câmera de vídeo para monitorar as medições impulsivas e o momento exato da explosão.

Como se observa no esquema da **FIGURA 3.1**, a configuração experimental no interior da câmara semi-anecóica consistiu de uma placa de madeira de 2,5 m x 2,5 m x 0,010 m, que está situada a uma distância **L** da fonte impulsiva. Na região central desta placa são feitos dois furos, onde se instalam as duas mangueiras cilíndricas de plástico (tubo pvc) separadas entre si por uma distância aproximada de 0,15 m, tentando simular a distância de separação dos dois ouvidos na cabeça, e que estão localizadas a uma altura **A** do chão, a qual foi fixada em 1 m. Esta placa de madeira cumpre a função de simular um contorno rígido e infinito, ao redor dos furos, a modo de evitar a transmissão de pressão sonora pelas trajetórias laterais.

No momento que é produzida a explosão, o campo sonoro impulsivo é medido pelos microfones instalados na placa de madeira e estes dados são armazenados no analisador digital de sinais portátil Hewlett Packard-HP 3560A. Posteriormente, estes dados são transmitidos e decodificados para a memória do computador usando um programa computacional da Hewlett Packard-HP.

3.1.1.1 Descrição do Canal Auditivo Simulado (Dois Microfones)

O canal auditivo humano é simulado por uma mangueira plástica cilíndrica rígida, cuja densidade é de 1200 Kg/m^3 , velocidade do som de 1500 m/s , obtendo como impedância característica o valor de $1,8 \times 10^6 \text{ Rayls}$ (GERGES, 1998). Este cilindro de pvc, de comprimento igual a 50 mm, tem uma espessura de 4 mm e diâmetro interno de 8 mm. Do comprimento total, 30 mm correspondem ao comprimento do canal auditivo simulado, dos quais 20 mm estão destinados a instalação do protetor de ouvido tipo tampão de espuma. Os 10 mm restantes desta cavidade de 30mm representam um espaço de ar entre a face do tampão e o diafragma do microfone.

A **FIGURA 3.2** mostra a disposição do microfone de $\frac{1}{4}$ ", o tubo de pvc (mangueira) que simula o canal auditivo, o protetor de ouvido tipo tampão e a placa de madeira que atua como uma parede rígida e infinita. Nesta figura, é possível observar que o microfone de $\frac{1}{4}$ " não se encaixa de forma completa no diâmetro do tubo rígido. Para evitar que o microfone ficasse solto e diminuir o vazamento de som entre as suas laterais e as paredes do tubo, tal microfone foi envolvido, lateralmente, por fita adesiva. Também foi aderida massa de calafetar na união entre o tubo e a placa de madeira, para aumentar o isolamento acústico e diminuir a transmissão sonora lateral devida à reflexão no chão.

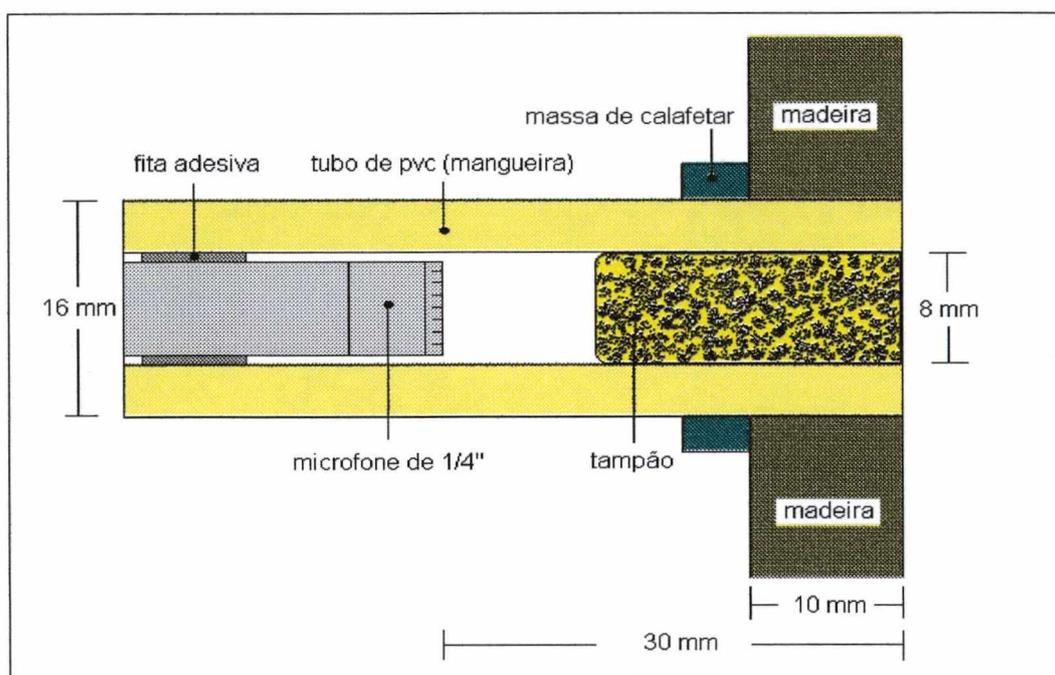


FIGURA 3.2 - Descrição do canal auditivo simulado em laboratório, utilizado nas medições do ruído impulsivo com a placa de madeira.

Os dois microfones posicionados na placa de madeira foram utilizados para medir simultaneamente o ruído impulsivo incidente nos transdutores. Assim quer-se garantir que o campo sonoro na entrada de cada tubo de plástico, com o seu microfone localizado no extremo da cavidade, é similar. Este aspecto é de muita importância no momento de conferir e comparar os resultados experimentais com os resultados numéricos, já que na simulação numérica o sinal de excitação, na entrada do canal auditivo simulado, é sempre o mesmo, *com* e *sem* o protetor.

A **FIGURA 3.3** mostra uma vista lateral da disposição dos microfones, instalados perpendicularmente sobre a placa de madeira, dentro da câmara semi-aneecóica, e que foram usados nas medições do campo sonoro impulsivo gerado pela fonte do tipo descarga de ar comprimido.

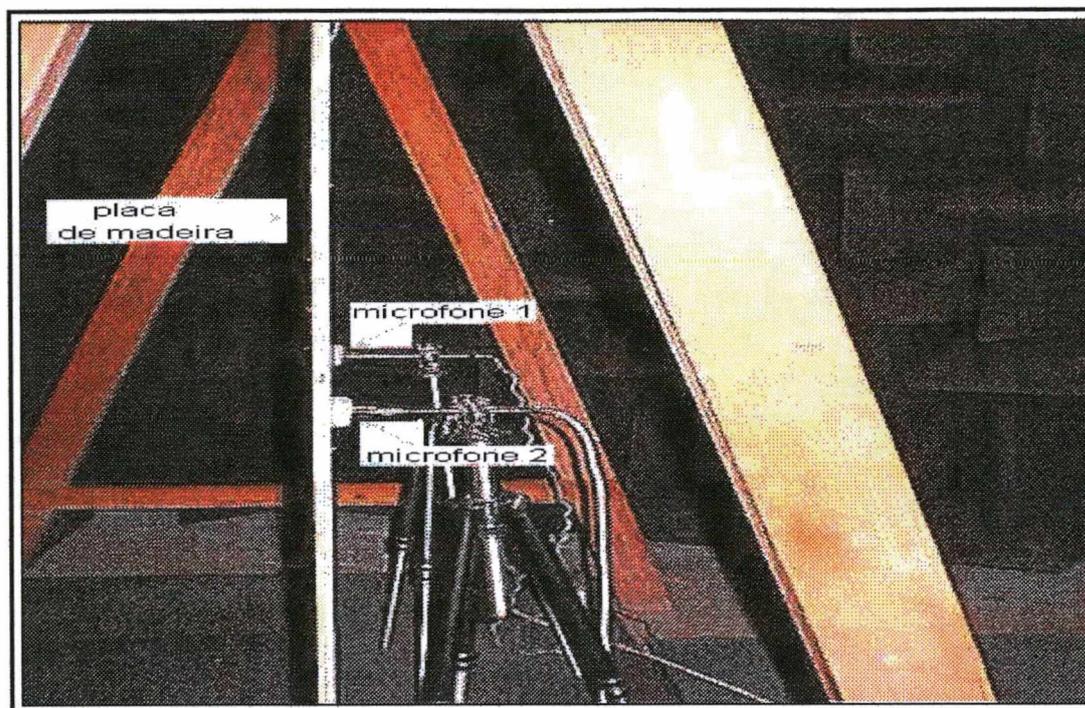


FIGURA 3.3 - Vista lateral da montagem dos microfones sobre a placa de madeira, no interior da câmara semi-aneecóica.

Em cada extremo do cilindro plástico é instalado um microfone capacitivo, de $\frac{1}{4}$ " de diâmetro, Tipo 4181 da Brüel & Kjær. Este microfone permite medir níveis de pressão sonora de até 160 dB com 3% de distorção, e de até 174 dB com 10 % de distorção PÄÄKKÖNEN et. al (1991). A pressão sonora é medida a uma distância de 30 mm da entrada, no interior do cilindro plástico, simulando a posição do tímpano humano na cavidade auditiva. O diafragma deste microfone trabalha como se fosse a membrana timpânica do ouvido.

Em casos nos quais os microfones são usados em pequenas cavidades e canais estreitos é necessário avaliar e corrigir a influência do microfone no sistema acústico, como é o caso do canal auditivo simulado. A impedância do sistema-diafragma para o microfone de condensador, Z_d , em Ns/m^5 , pode ser calculada usando a seguinte expressão (BRÜEL & KJÆR, 1996):

$$Z_d = \frac{1}{j\omega C_d} + j\omega L_d + R_d \quad (3.1)$$

com

$$\omega = 2 \pi f$$

onde,

f : freqüência

C_d: Compliância do sistema-diafragma

L_d: Massa do sistema-diafragma

R_d: Resistência do sistema-diafragma

A **TABELA 3.1** mostra os valores de cada elemento do sistema-diafragma do microfone para obter a sua impedância acústica, e considerando uma faixa de freqüências entre 100 e 20k Hz, obtém-se uma variação da impedância acústica do sistema diafragma entre $0,8 \times 10^8$ a $1,3 \times 10^8$ Ns/m⁵, que pode ser observada na **FIGURA 3.3**. Estes valores concordam (em ordem de grandeza) com os valores da impedância acústica do tímpano humano. Nas **FIGURA 3.5**, **3.6** e **3.7** é apresentada a comparação entre as curvas de resistência, reatância e o módulo de impedância, respectivamente, para o sistema-diafragma do microfone e para o tímpano humano.

TABELA 3.1 - Valores dos elementos da impedância acústica do diafragma do microfone.

Símbolo	Elemento	Valor	Unidade
C _d	Compliância do sistema-diafragma	$2,83 \times 10^{-13}$	m ⁵ /N
L _d	Massa do sistema-diafragma	896	kg/m ⁴
R _d	Resistência do sistema-diafragma	$56,2 \times 10^6$	Ns/m ⁵

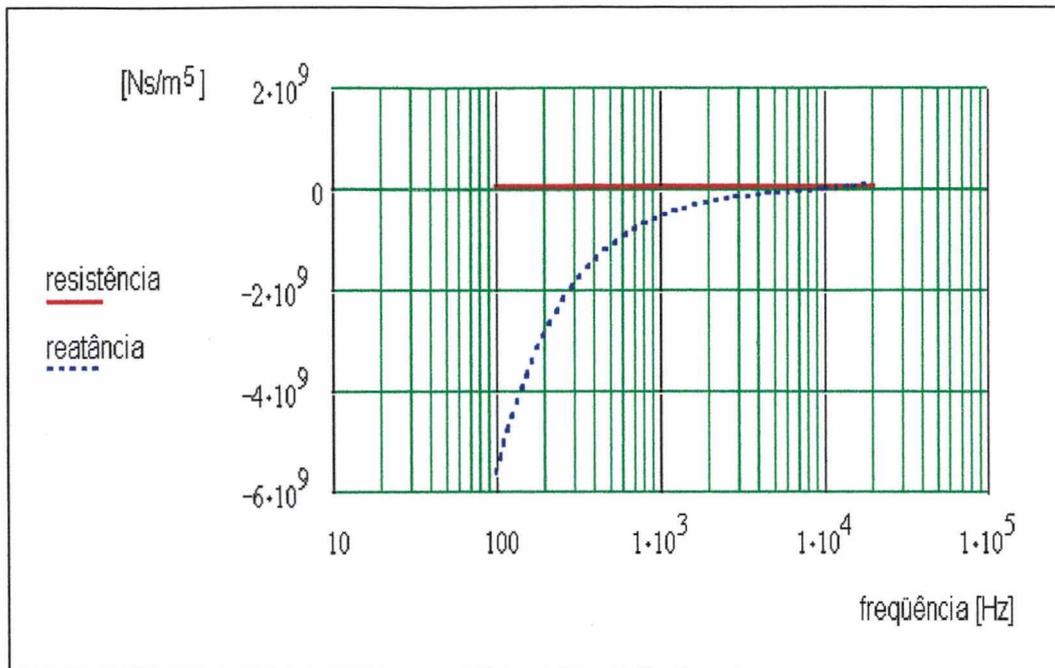


FIGURA 3.4 - Impedância acústica do sistema-diafragma do microfone.

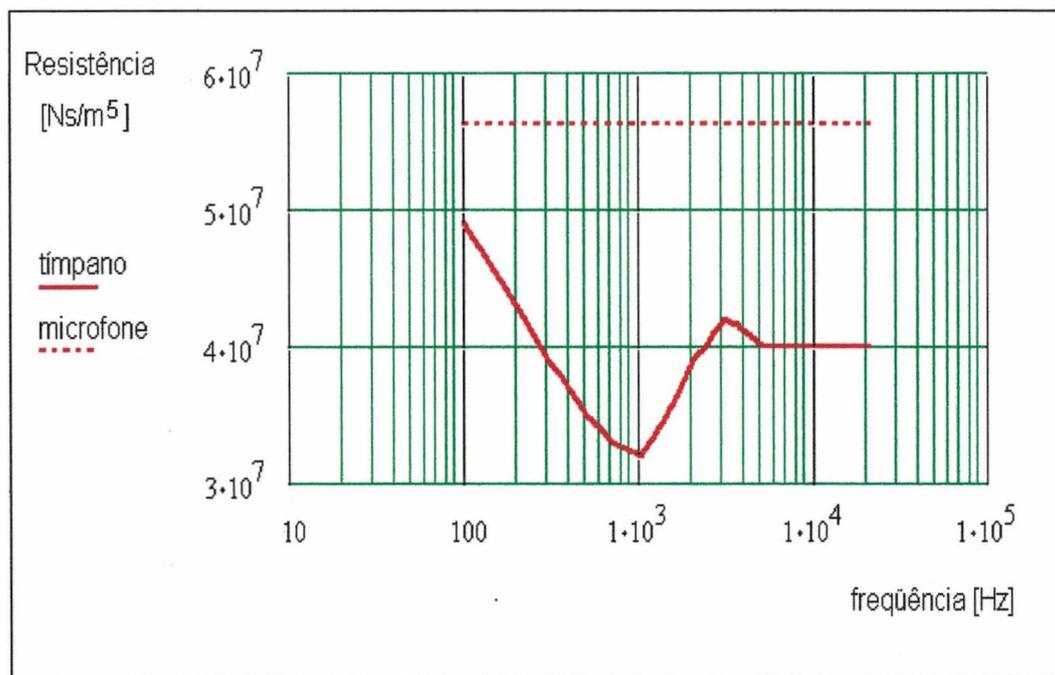


FIGURA 3.5 - Comparação da resistência entre o sistema-diafragma do microfone e o tímpano humano.

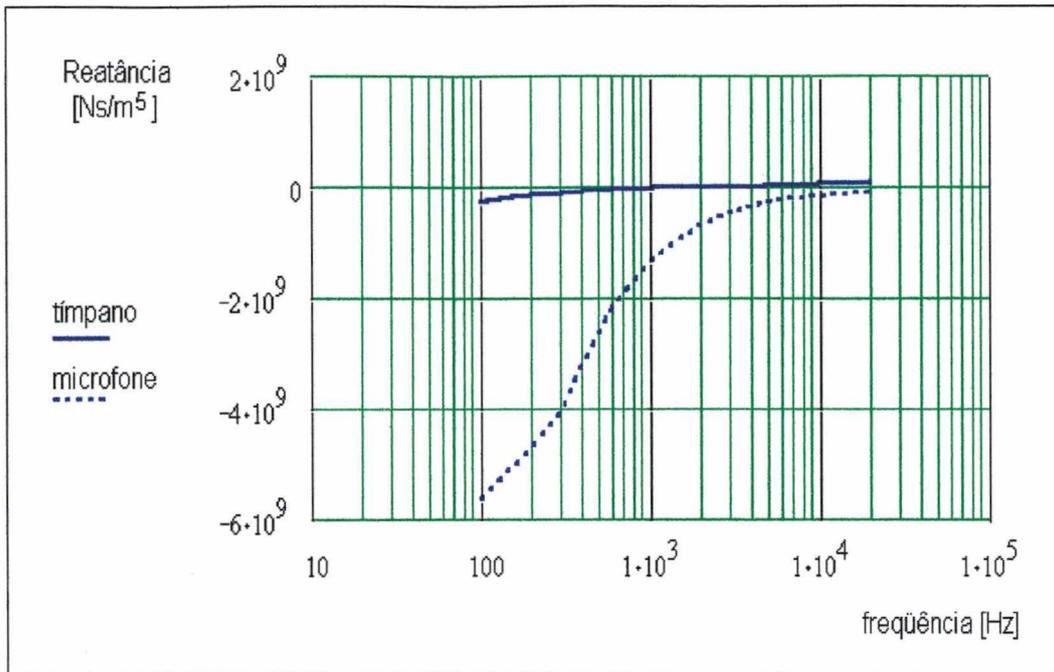


FIGURA 3.6 - Comparação da reatância entre o sistema diafragma do microfone e o tímpano humano.

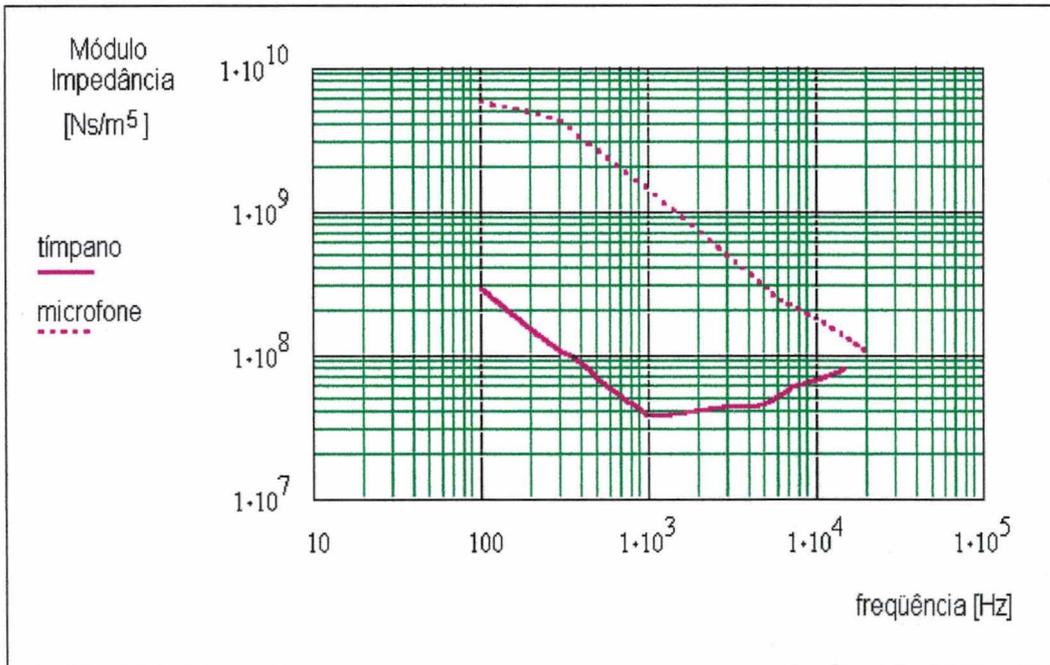


FIGURA 3.7 - Comparação do módulo da impedância acústica, entre o sistema-diafragma do microfone e o tímpano humano.

Na **FIGURA 3.7** se observa que ambos os eixos da frequência e da impedância estão em escala logarítmica. Estas curvas mantêm uma forma parecida e estão dentro de uma faixa que varia entre 10^8 e 10^{10} Ns/m⁵. Este fato permite estabelecer que esses valores da impedância acústica do microfone e do tímpano podem ser usados como

valores fixos na simulação numérica e ser aplicados como condição de contorno na posição do tímpano.

3.1.1.2 Descrição da Fonte Sonora Impulsiva do Tipo Descarga de Ar Comprimido

A fonte sonora impulsiva é um cilindro oco de plástico rígido de 0,33 m de comprimento, de 0,02 m de espessura, e diâmetro interior igual a 0,28 m. O cilindro está dividido em duas partes (CILINDRO 1 e CILINDRO 2, ver **FIGURA 3.8**), que se acoplam manualmente mediante um sistema de anéis e seis posições de parafusos que estão localizados na parte inferior, na região que divide os dois cilindros e no extremo superior. O CILINDRO 1 pode ser trocado por cilindros de diferentes comprimentos: 0,25 m, 0,75m e 1,0 m; O CILINDRO 2, que se mantém instalado sem ser trocado, possui um comprimento de 0,05 m.

Na posição de separação dos dois cilindros é instalado o filme de poliéster, que é uma lâmina de plástico de 75 μm de espessura e será a membrana que explodirá devido à pressão do ar comprimido no interior do cilindro, cujo valor foi fixado em 0,5 bar para evitar níveis de pressão sonora (pico) muito superiores a 140 dB. Esta pressão é controlada no exterior da câmara semi-aneecóica por um manômetro e uma válvula que regula o valor de pressão do ar que provém do compressor até ingressar pela parte posterior do tubo cilíndrico. A **FIGURA 3.8**. detalha as dimensões da fonte sonora que gera o ruído impulsivo, utilizada nos ensaios experimentais.

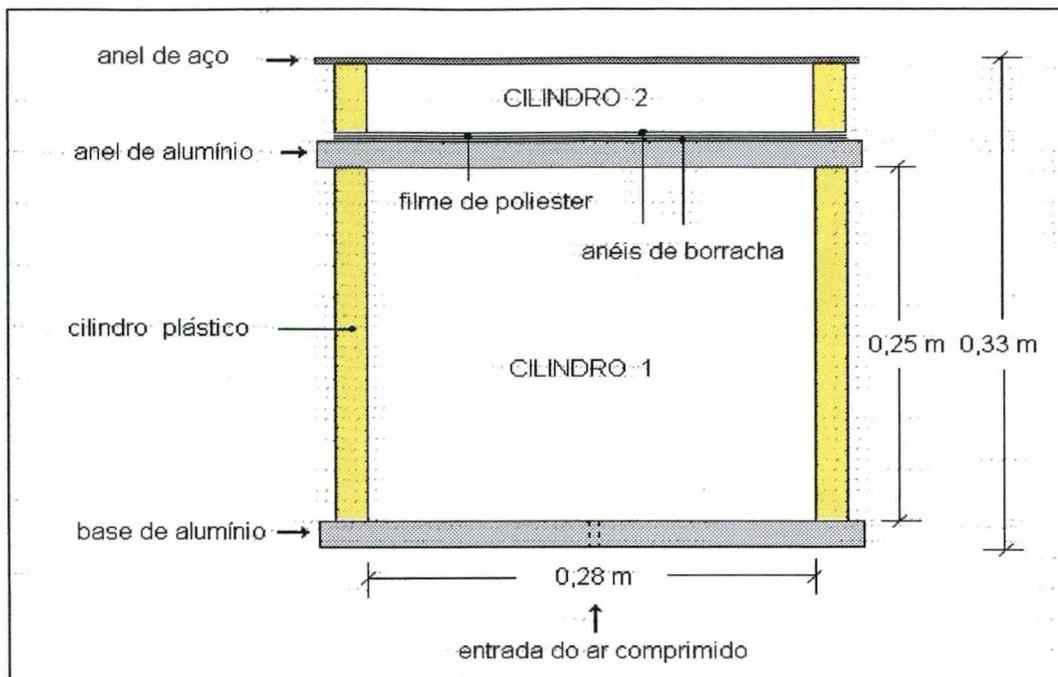


FIGURA 3.8 - Descrição das dimensões da fonte impulsiva do tipo descarga do ar comprimido.

O cilindro tem uma base de alumínio de 0,02 m de espessura, onde existe uma abertura para a entrada de ar comprimido no interior do tubo cilíndrico. A membrana (filme de poliéster) que se faz explodir situa-se entre os cilindros 1 e 2, segundo o esquema da **FIGURA 3.8**. A membrana é disposta entre dois anéis de borracha de 2 mm de espessura para evitar danos e rasgar o filme. Logo, a membrana é fixada entre os dois tubos cilíndricos usando parafusos e porcas em seis posições dos anéis de aço, no extremo superior e inferior.

A explosão do filme de poliéster se realiza utilizando um fio elétrico aderido à superfície da lâmina, pelo qual circula uma corrente alimentada com uma bateria de 12 V. A corrente provoca a incandescência do fio, o qual queima o poliéster e provoca a posterior explosão da membrana, conseguindo produzir a descarga do ar comprimido no interior do tubo e o conseqüente ruído impulsivo.

Considerando que esta fonte impulsiva (tubo de descarga de ar comprimido) atua como um tubo de área $S = \pi r^2$ e comprimento l , com r sendo o raio, é possível estimar as freqüências de ressonância no duto supondo que este é excitado num extremo e que contém uma alta impedância no outro lado. A freqüência de ressonância

de um tubo fechado com uma tampa rígida (impedância infinita) e aberto no extremo oposto pode ser calculada da seguinte expressão (GERGES, 1998):

$$f = \frac{(2n-1)c}{4l} \quad (3.2)$$

onde,

f : frequência

c : velocidade do som, 343 m/s

l : comprimento do tubo

n : 1,2,3,...

As frequências de ressonância obtidas com a equação (3.2) são equivalentes aos harmônicos ímpares ($2n-1 = 1,3,5,\dots$). Portanto, são achadas as mais baixas frequências de ressonância em 343 Hz, 114 Hz e 86 Hz para comprimentos do tubo de 0,25 m, 0,75 m e 1,0 m respectivamente.

Esta fonte impulsiva é localizada num ambiente semi-anecóico para conhecer somente o comportamento acústico da fonte e evitar as possíveis reflexões e interferências do ambiente que alterem as características do ruído impulsivo de interesse. A fonte do tipo descarga do ar comprimido utilizada na medição pode ser observada na **FIGURA 3.9**, onde se encontram a membrana de poliéster já instalada, os dois cilindros acoplados mediante o sistema de anéis de aço e as seis posições de parafusos e porcas.

Esta fonte sonora impulsiva do tipo descarga do ar comprimido permite variar tanto a superfície de explosão como também o comprimento do cilindro (CILINDRO 2, como se destaca na **FIGURA 3.8**). Estas opções permitem que as características transientes do ruído impulsivo, gerado por esta fonte, possam ser modificadas. Assim, o tempo de subida, o nível de pressão sonora (pico) e a duração variam, de modo a estabelecer características temporais e espectrais bem particulares para cada caso.

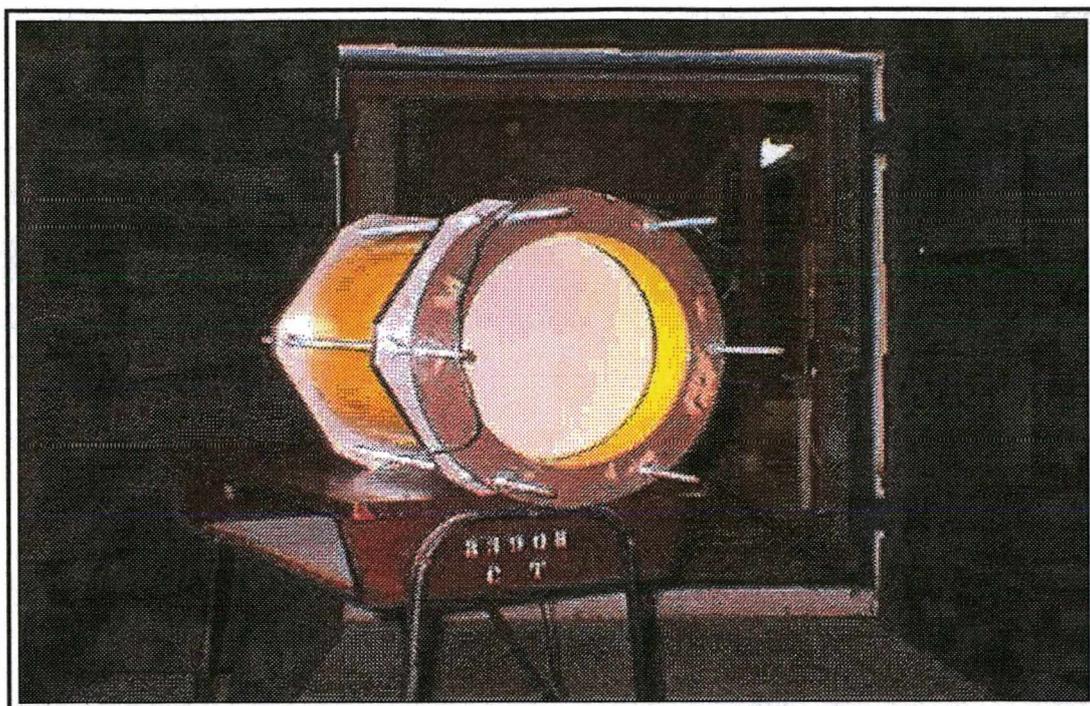


FIGURA 3.9 - Fonte sonora impulsiva, do tipo descarga do ar comprimido, utilizada ao interior da câmara semi-aneecóica.

3.1.1.3 Descrição dos Equipamentos com o Uso da Placa de Madeira

A distribuição dos equipamentos utilizados, dentro da câmara semi-aneecóica do LVA, para efetuar as medições impulsivas é descrita segundo a **FIGURA 3.1**. Pode-se observar que o ar comprimido entra na fonte impulsiva através de uma mangueira que conecta o compressor à entrada na parte posterior do tubo. A pressão de ar é controlada por uma válvula e um manômetro que permite estimar a quantidade de pressão que é fornecida ao tubo. Neste caso foi usado um valor fixo de pressão de 0,5 bar, para ter controle do sinal e evitar produzir níveis de pressão sonora pico que excedam os 140 dB. Também é colado um fio elétrico fino sobre a superfície da membrana de poliéster, que está conectada a uma bateria de 12 V. Esta bateria é controlada e ligada externamente para produzir a passagem da corrente pelo fio para queimar o plástico e produzir a explosão. A fonte impulsiva é localizada dentro da câmara anecóica situada sobre uma mesa a uma altura de 1 m em relação ao chão e em duas posições, 2 m e 3 m, de separação da placa de madeira onde estão instalados os dois tubos cilíndricos com seus respectivos microfones.

Na **FIGURA 3.10** se observam os seguintes sistemas da cadeia de medição utilizados durante os ensaios experimentais de alimentação de pressão de ar (mangueira de pressão, manômetro e válvula), de ativação da explosão (bateria, fios elétricos), de aquisição de dados (fonte de alimentação dos microfones e analisador digital de sinais) e o de monitoramento (micro-câmera de vídeo e televisor).

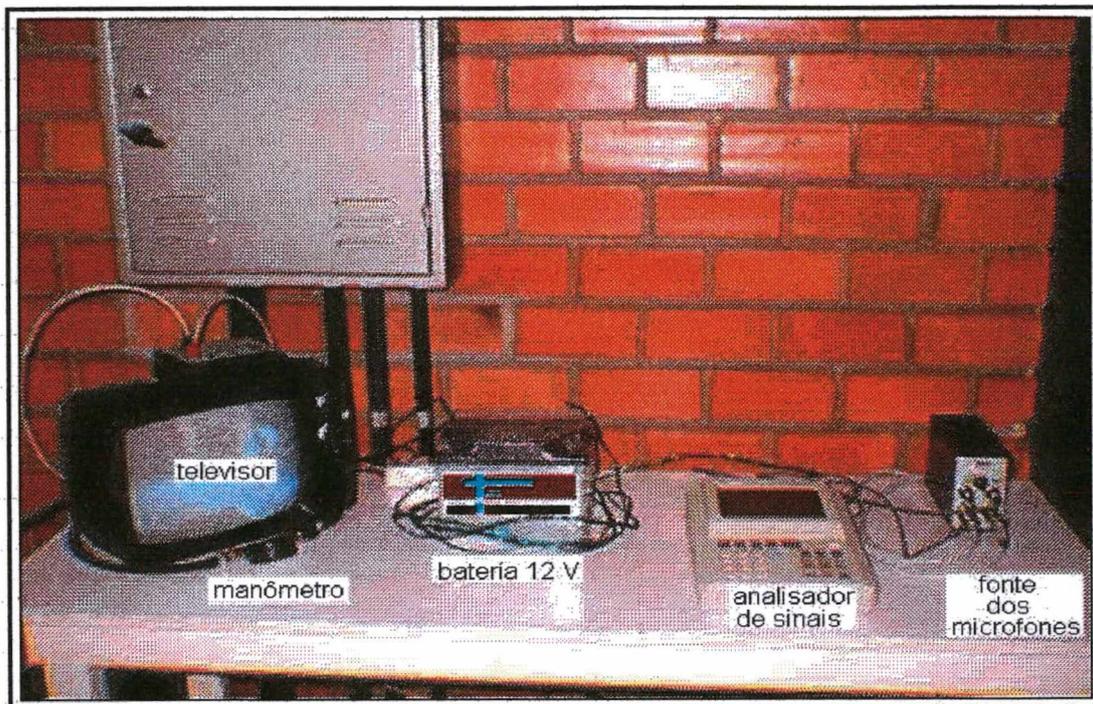


FIGURA 3.10 - Equipamentos utilizados durante os ensaios experimentais.

O ruído impulsivo é medido pelos microfones capacitivos de $\frac{1}{4}$ " de diâmetro, Tipo 4181 da Brüel & Kjær. A informação recebida é enviada ao analisador digital de sinais portátil Hewlett Packard HP3560A, no qual os sinais do canal 1 (*sem* tampão) e canal 2 (*com* tampão) são armazenados na memória, tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência. Uma vez concluídas as medições, os dados na memória do HP3560A são transferidos para a memória do computador usando o programa da Hewlett Packard.

A calibração para cada microfone foi feita usando o calibrador de nível sonoro Tipo 4230 da Brüel & Kjær, que fornece um nível de pressão sonora de 94 dB (1 Pa, ref. 20 μ Pa) na frequência de 1000 Hz. Deste modo, é possível ajustar a sensibilidade de cada canal de medição do analisador digital de sinais, para assim garantir a

conversão dos valores do sinal de tensão vindos do pré-amplificador, em valores corretos de pressão sonora, os quais flutuaram entre $94 \pm 0,3$ dB para o tom de 1 kHz.

Um resumo dos equipamentos, e algumas das suas características, utilizados nesta primeira etapa experimental são apresentados na **TABELA 3.2**.

TABELA 3.2 - Identificação dos instrumentos usados nos ensaios experimentais da etapa 1 (placa de madeira).

Instrumento	Fabricante	Modelo
Tubo com Descarga de Ar Comprimido	R. Birch	1998
Pré-amplificador	Brüel & Kjær	2639
Microfone Capacitivo ¼"	Brüel & Kjær	4135
Fonte de alimentação dos microfones	Brüel & Kjær	2804
Calibrador do Microfone (1 kHz – 94 dB)	Brüel & Kjær	4230
Analisador de sinais	Hewlett Packard	3560A

3.2 Medições com Fonte de Ruído Impulsivo e o Uso da Placa de Madeira

Esta primeira parte experimental foi realizada através de medições de pressão sonora, com a montagem de uma placa de madeira na qual foram instalados dois canais auditivos simulados e dois microfones de ¼" localizados em cada posição do tímpano, respectivamente.

Inicialmente, foi realizada uma série de medições de pressão sonora com os dois canais abertos (*sem* tampão) para comprovar que o campo sonoro incidente em cada microfone é similar. Os ruídos impulsivos usados como testes prévios, foram batidas de palmas produzidas a diferentes distâncias. Outros ensaios experimentais de ajuste foram realizados considerando os dois canais protegidos *com* o protetor auditivo, também foram efetuados testes *sem* e *com* o protetor, para o canal 1 e o canal 2 respectivamente. A outra condição foi instalar o tampão no canal 1 e considerar o canal 2 aberto. Desta forma comprovou-se que não existiam maiores variações e diferenças de pressão sonora para cada canal e o seu microfone correspondente.

Finalmente, são efetuadas as medições de pressão sonora, de forma simultânea, para cada canal, *sem* e *com* protetor auditivo, e assim obtidas as respostas de pressão sonora no domínio do tempo. Esta configuração final de medição considerou a inserção do protetor auditivo tipo tampão de espuma de um dos canais simulados, cobrindo aproximadamente 20 mm de comprimento, de um total de 30 mm do tubo de plástico. Um quadro resumo, na **TABELA 3.3**, descreve três configurações de medição, nas quais permanecem inalteradas a pressão do ar comprimido e o comprimento do tubo, mas são variadas a distância entre a fonte e o microfone e também a área da membrana de poliéster.

TABELA 3.3 - Configurações de medição para a fonte sonora impulsiva do tipo descarga de ar comprimido, com o sistema da placa de madeira.

Fonte Impulsiva	Pressão de Ar Comprimido [bar]	Distância L Fonte-Microfone [m]	Comprimento do Tubo [m]	Área de Superfície da Membrana	
				[m ²]	[%]
1	0,5	2,0	0,25	0,015	50
2	0,5	2,0	0,25	0,062	100
3	0,5	3,0	0,25	0,062	100

Com o sistema montado, incrementou-se à fase de aquisição dos dados experimentais. As medições foram realizadas no domínio do tempo, considerando um tempo total do impulso de 40 ms e um incremento no tempo de 19,53 μ s, gerando assim um total de 2048 incrementos. Este número de incrementos é calculado internamente pelo algoritmo do HP para conseguir estimar a transformada discreta de Fourier (Discret Fourier Transform, DFT). Estes valores de incremento foram muito úteis na utilização do programa computacional MATHCAD, já que este programa permite aplicar a transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform, FFT) a valores discretos no tempo que sejam múltiplos de 2^n . Desta forma, no domínio da frequência obtém-se um incremento de 25 Hz (valor que corresponde ao inverso do tempo total de amostragem, isto é, 40 ms). Com a ajuda do programa MATHCAD facilita-se o processo de trabalho gráfico e manipulação dos dados, em termos de

aplicar conversões logarítmicas e obter curvas de níveis de pressão sonora. Deste modo, é possível apresentar diferentes casos e curvas de forma simultânea.

Os resultados das medições são apresentados em forma de curvas de pressão sonora no tempo, sendo também incluídos os correspondentes espectros de frequência para cada ensaio realizado. Em cada uma destas curvas estão presentes as medições *sem* e *com* o protetor auditivo tipo tampão, de forma que é possível observar a diferença do comportamento nos domínios do tempo e da frequência.

Cabe destacar que nesta primeira parte dos ensaios experimentais, somente foram utilizados dois microfones. Isto se deve ao fato de que, no momento em que se efetuaram as medições, contava-se com dois microfones que tivessem características adequadas (máximos níveis de pressão sonora, baixa distorção da sensibilidade e ampla faixa da resposta em frequência) para medir pressão sonora de ruídos impulsivos e se ajustar às dimensões do canal auditivo simulado.

As **FIGURA 3.11** até a **3.12**, mostram gráficos comparativos das curvas de resposta de pressão sonora, no domínio do tempo, na faixa de 100 Hz a 10 kHz, para cada uma das configurações da fonte sonora impulsiva descritas na **TABELA 3.3**. Apesar de ter realizado as medições de pressão para uma faixa de 25 a 20 kHz, foi estimado considerar a faixa de frequências entre 100 Hz e 10 kHz por ser um intervalo onde aparecem as principais ressonâncias do sistema de emissão e recepção sonora, e também porque o ouvido humano é mais sensível às variações de pressão nessa faixa. Como foi mencionado anteriormente, as medições foram efetuadas para um tempo total do pulso de 40 ms, portanto, a frequência correspondente é de 25 Hz que é mais baixa que as frequências fundamentais associadas com o sistema de medição, mas em alguns destes gráficos usam-se diferentes escalas no tempo para ilustrar, em forma mais detalhada, cada caso.

Pode-se observar que as curvas de pressão sonora, no tempo, *sem* o uso do tampão, apresentam altos picos de pressão sonora, com tempos de subida e duração muito curtos. Observa-se, ainda, que estas curvas ajustam-se às formas de onda do tipo FRIEDLANDER, assim é possível associá-las com as ondas de duração do tipo A.

Por outro lado, quanto à forma, estas curvas apresentam várias irregularidades, contendo vários picos após o pulso principal, os quais podem ser devido às reflexões do impulso no piso, transmissões laterais ou por causa da vibração da placa de madeira. As curvas associadas *com* o uso do protetor auditivo mostram formas diferentes, quando são comparadas com as curvas *sem* tampão. Mas, também mostram propriedades de ondas do tipo FRIEDLANDER e com Duração A. As curvas *com* tampão são mais suaves e atenuadas; os tempos de subida e duração são mais longos, o nível de pressão sonora pico é reduzido e deslocado no tempo. Por outro lado, as curvas dos espectros de frequência exibem alguns picos bem definidos que estão relacionados principalmente com:

- i) a ressonância do tubo da fonte impulsiva, que para um comprimento de 0,25 m está na proximidade dos 340 Hz.
- ii) duas ressonâncias relacionadas ao tubo que simula o canal auditivo, que para um comprimento de 30 mm, assumem os seguintes valores 3 e 9 kHz aproximadamente (associadas com os primeiros dois modos longitudinais para um tubo reto aberto-fechado) (GERGES, 1997).
- iii) a ressonância do modelo de um grau de liberdade (sistema massa-mola), usada para representar a cavidade do canal auditivo e tampão, a qual assume o valor aproximado de 400 Hz (GERGES, 1997).
- iv) a propagação da onda no comprimento do tampão, igual a um comprimento de onda ($f = 98 / (4 \cdot 0,02) = 1225 \text{ Hz}$) (GERGES, 1997).

Um resumo das diferentes características que identificam um ruído impulsivo, no tempo, é exposto na **TABELA 3.4**, para as fontes impulsivas 1, 2 e 3. Nesta tabela destacam-se os valores de tempo de subida, Duração A, nível de pressão sonora (pico) e perda de inserção (pico), *sem* e *com* o uso do protetor auditivo tipo tampão. Adicionalmente, na **TABELA 3.5** são apresentadas algumas frequências associadas aos valores mais altos de pressão sonora, nas condições de *sem* e *com* o tampão na cavidade do tubo que simula o canal auditivo.

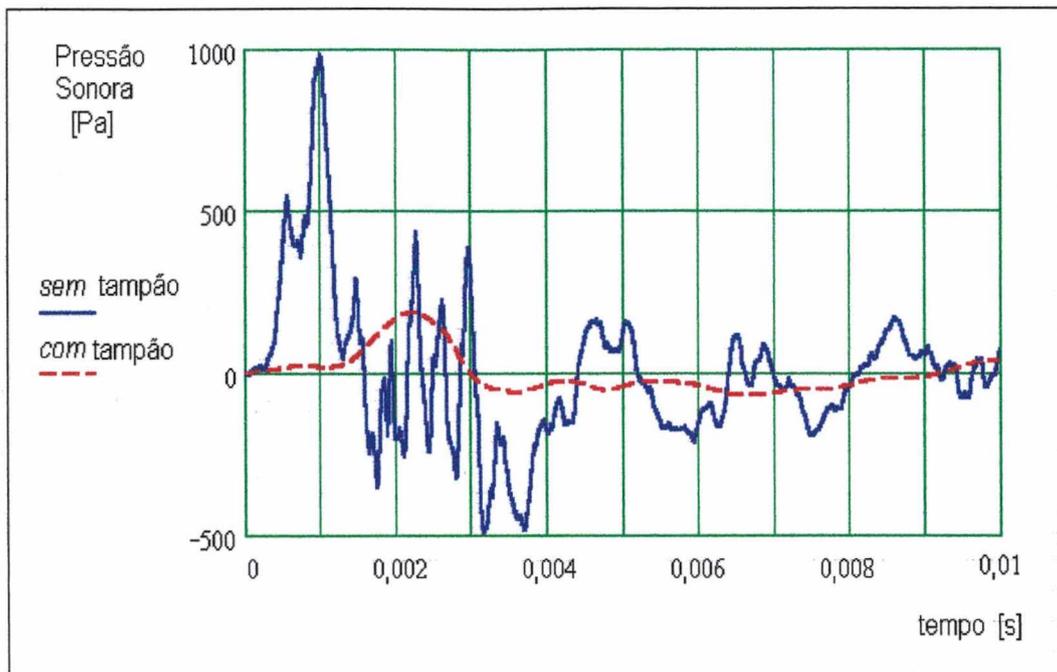


FIGURA 3.11 - Comparação entre a pressão sonora, no domínio do tempo, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, *sem* e *com* o uso do tampão, da fonte impulsiva 1.

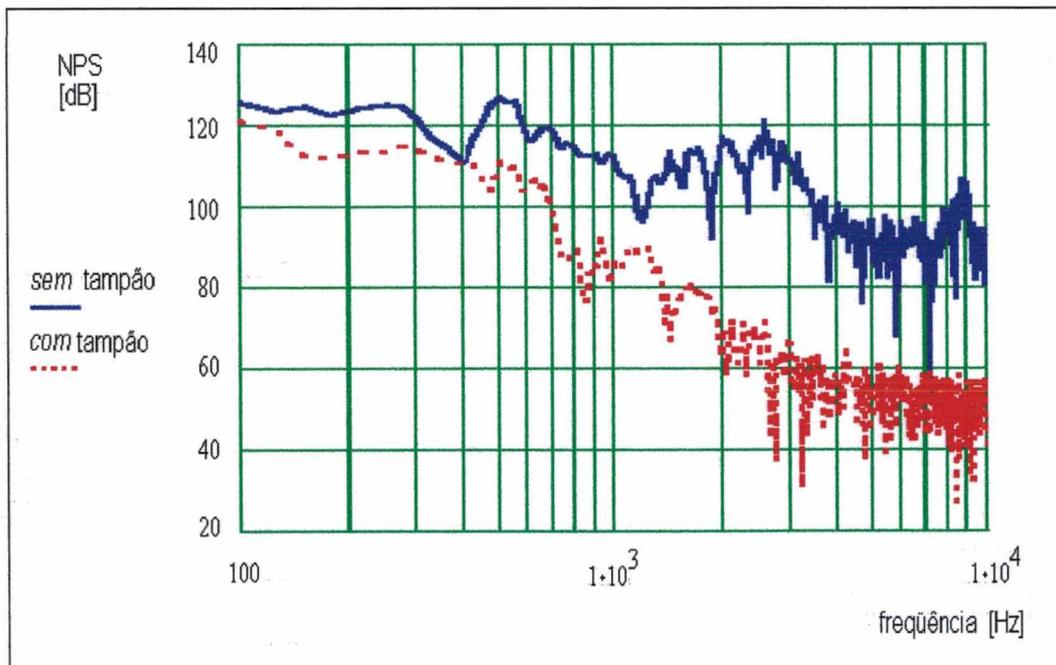


FIGURA 3.12 - Comparação entre os níveis de pressão sonora, no domínio da frequência, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, *sem* e *com* o uso do tampão, da fonte impulsiva 1.

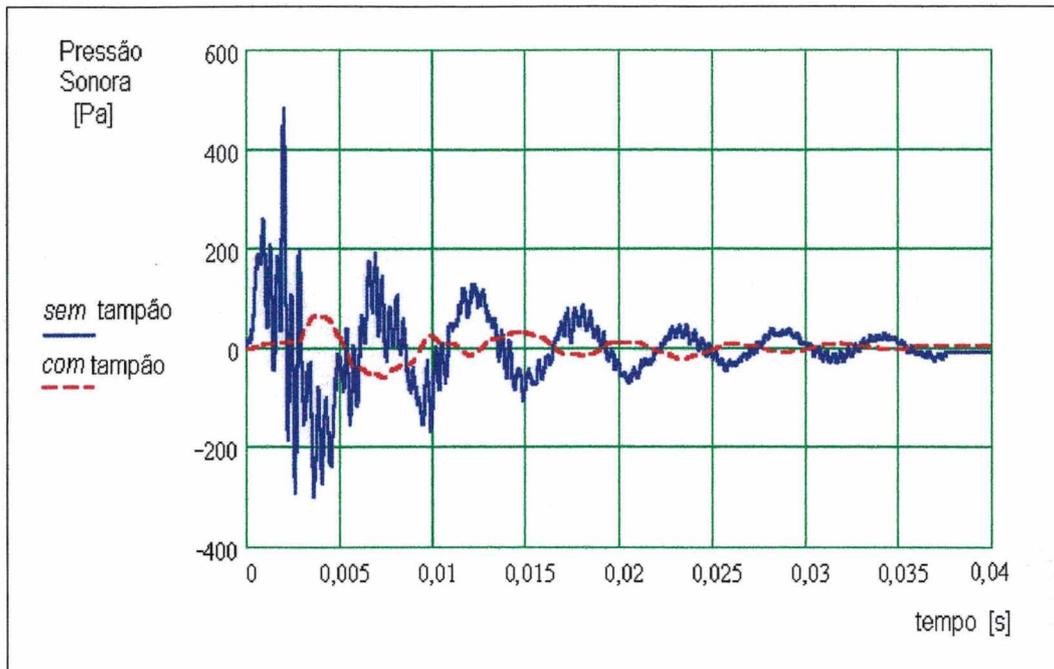


FIGURA 3.13 - Comparação entre a pressão sonora, no domínio do tempo, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, *sem* e *com* o uso do tampão, da fonte impulsiva 2.

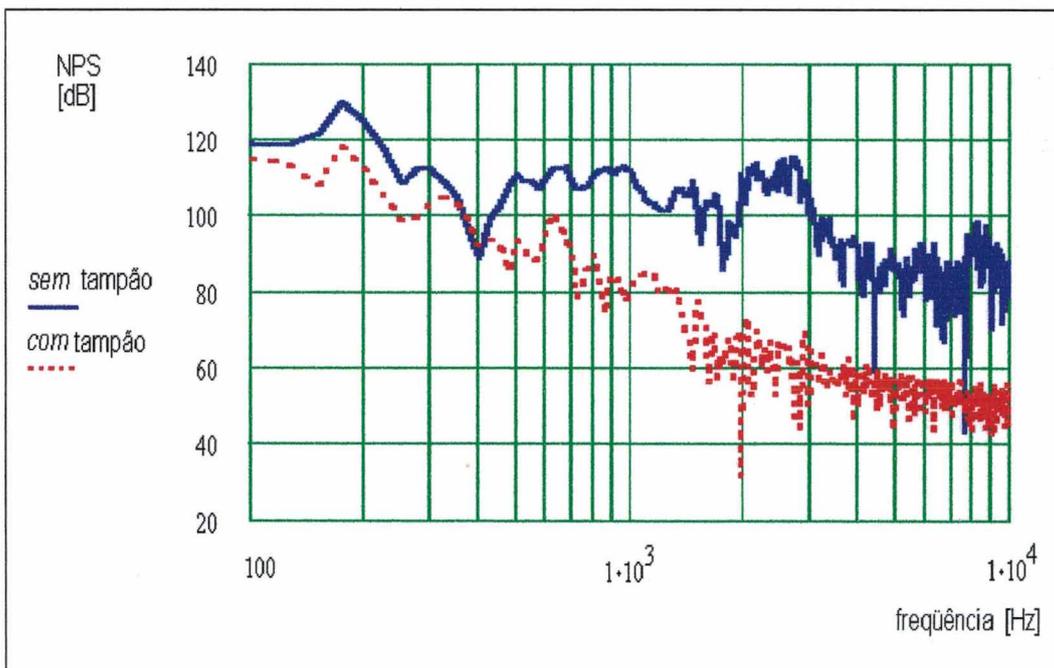


FIGURA 3.14 - Comparação entre os níveis de pressão sonora, no domínio da frequência, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, *sem* e *com* o uso do tampão, da fonte impulsiva 2.

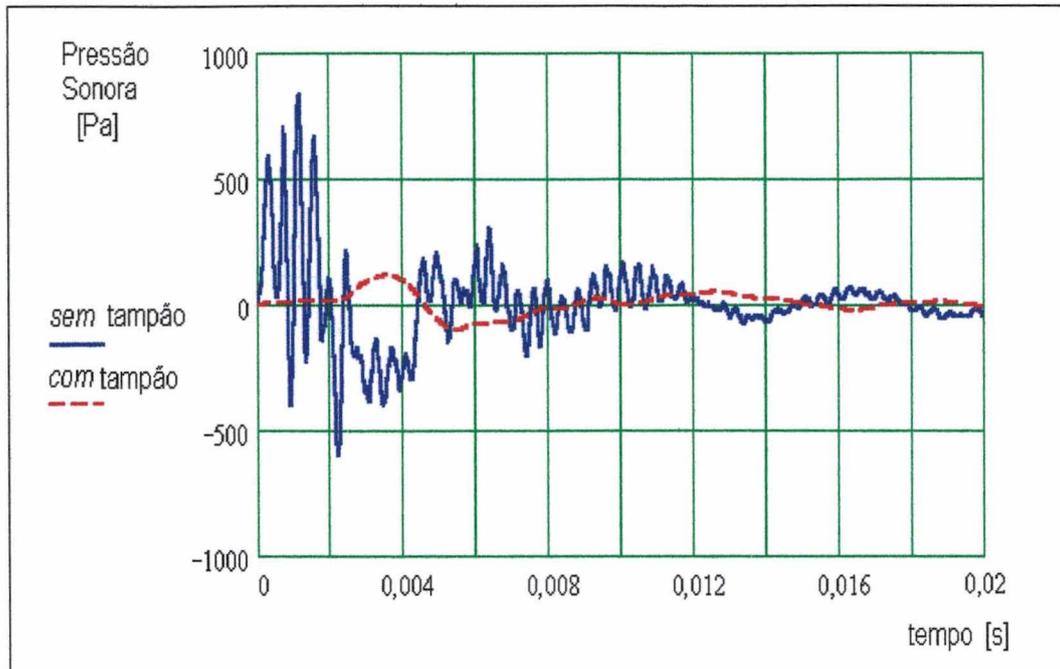


FIGURA 3.15 - Comparação entre a pressão sonora, no domínio do tempo, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, *sem* e *com* o uso do tampão, da fonte impulsiva 3.

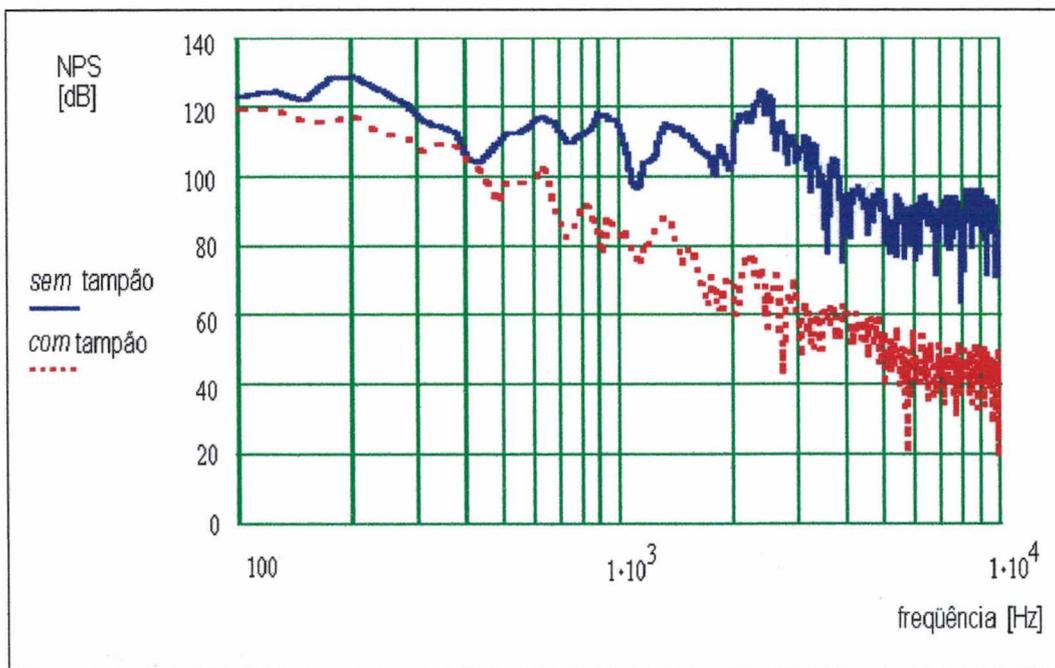


FIGURA 3.16 - Comparação entre os níveis de pressão sonora, no domínio da frequência, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, *sem* e *com* o uso do tampão, da fonte impulsiva 3.

TABELA 3.4 - Comparação entre os parâmetros que caracterizam um ruído impulsivo, no domínio do tempo, com o uso da placa de madeira, *sem* e *com* o protetor auditivo tipo tampão.

Fonte Impulsiva	Tempo de Subida [ms]		Duração Tipo A [ms]		NPS Pico [dB]		Perda De Inserção [dB]
	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	
1	1,02	2,23	1,59	3,01	153,7	139,5	14,2
2	2,03	3,78	2,19	5,34	147,6	130,3	17,3
3	1,17	3,59	1,29	4,62	152,4	135,7	16,7

TABELA 3.5 - Níveis de Pressão Sonora (NPS) e Perda de Inserção (PI), em algumas freqüências, para as fontes impulsivas 1, 2 e 3, usando a placa de madeira.

Fonte Impulsiva	Freqüência [Hz]	NPS [dB]		PI [dB]
		Sem	Com	
1	90	126,4	121,5	4,9
	495	127,1	111,1	16,0
	2530	121,5	69,4	52,1
	8675	106,3	52,8	53,5
2	200	128,7	118,0	10,7
	925	118,0	88,3	29,7
	2350	124,5	73,8	50,7
	8775	96,2	43,5	52,7
3	175	129,7	118,6	11,1
	625	112,3	101,0	11,3
	2675	115,5	57,3	58,2
	8125	96,2	43,5	52,7

3.3 Medições com Fonte de Ruído Impulsivo e o Uso da Caixa de Madeira

Nesta segunda etapa dos ensaios experimentais foi utilizada a câmara semi-anecóica, a fonte impulsiva do tipo descarga de ar comprimido, cujas propriedades e procedimento foram descritos anteriormente na etapa em que se usou a placa de madeira e um sistema modificado de recepção do ruído impulsivo, que tem como finalidade tentar atenuar e eliminar algumas ressonâncias, transmissões laterais e obter um sinal sonoro com características de ruído impulsivo similares às do tipo FRIEDLANDER com Duração A. Este novo sistema consistiu em um dispositivo com três canais auditivos simulados com três microfones, todos eles localizados dentro de uma caixa de madeira e dispostos de frente para o campo sonoro incidente, sendo que desta vez a fonte impulsiva foi instalada de forma vertical. Também, se contou com um moderno e eficiente sistema de aquisição e análise de dados, em tempo real, para armazenar a informação obtida das medições de ruído impulsivo para estas novas configurações experimentais. Na **FIGURA 3.17**, é apresentado um esquema que identifica a distribuição dos diferentes equipamentos e o procedimento de medição usando a caixa de madeira como sistema de recepção do ruído impulsivo.

Este sistema permite medir de forma simultânea o campo sonoro incidente na posição do tímpano (no extremo final do tubo que simula o canal auditivo), *sem* e *com* o protetor tipo tampão, para os canais de medição 1 e 2. O canal de medição 3 corresponde ao canal auditivo simulado, no qual é instalado o microfone de $\frac{1}{8}$ " na entrada deste canal simulado *sem* o uso do tampão. Este microfone de $\frac{1}{8}$ " é um transdutor de pressão piezoresistivo de alta sensibilidade, com resposta plana até 125 kHz, com capacidade para responder a altas pressões sonoras (até 0,7 MPa ou 210 dB). As **FIGURA 3.18** e **3.19** mostram esquematicamente a disposição destes microfones numa caixa fechada de madeira, com a qual pretende-se simular o tamanho da cabeça humana. As dimensões desta caixa são 0,4 m de altura, 0,3 m de largura e 0,2 m de profundidade. Para diminuir a influência de reflexões, em altas frequências, foi aderido material absorvente no exterior e interior desta caixa de madeira, e também no piso da câmara semi-anecóica.

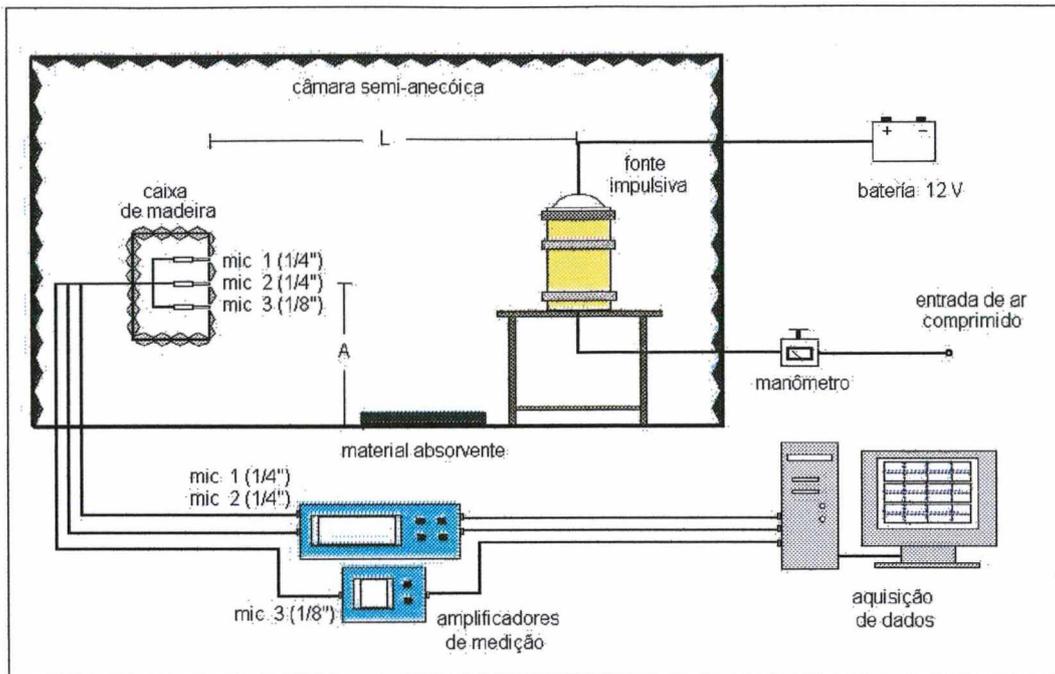


FIGURA 3.17 - Diagrama que descreve o procedimento de medição e os equipamentos utilizados, com ruído impulsivo, usando a caixa de madeira.

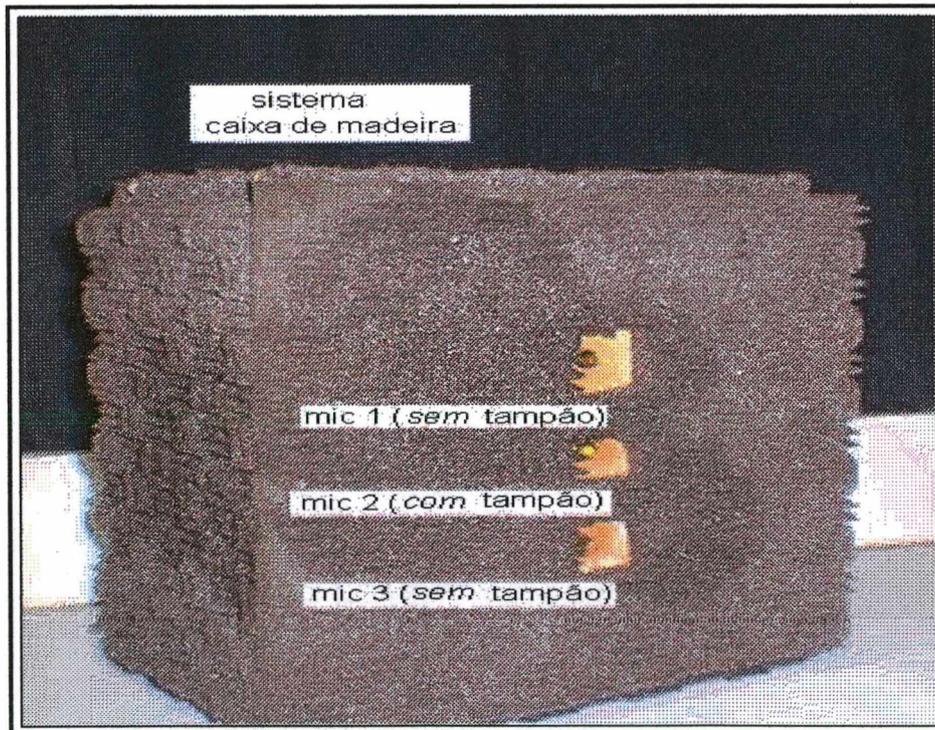


FIGURA 3.18 - Sistema de recepção do ruído impulsivo que usa a caixa de madeira.

A fase de aquisição dos dados foi efetuada mediante a placa de aquisição de dados tipo T114-4, de quatro canais de entradas analógicas, onde cada canal tem um conversor A/D de baixo ruído e resolução de 14 bit, com uma taxa de amostragem de

0,8 MHz (IMTEC GMBH, 1998). Esta placa trabalha interligada com o programa computacional INSIGHT, versão 3.0, que é um programa que funciona como um analisador digital de sinais, em tempo real (IMTEC GMBH, 1998).

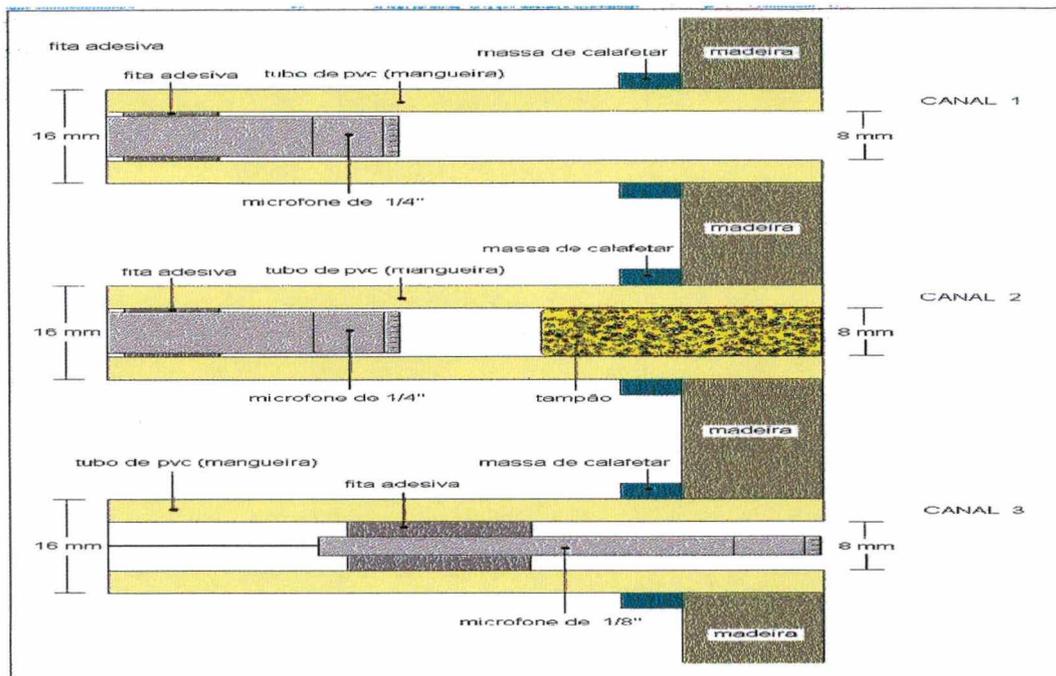


FIGURA 3.19 - Disposição esquemática dos canais auditivos simulados, utilizados nas medições do ruído impulsivo com a caixa de madeira.

Cabe mencionar que desta vez são utilizados três microfones, um deles como foi mencionado anteriormente é instalado na entrada do canal simulado, de modo que é possível medir o campo sonoro do ruído impulsivo, que está incidindo exatamente na entrada do canal auditivo. Este fato é de muita importância já que permite conhecer de maneira mais exata o campo sonoro que ingressa no sistema do tubo reto e então aplicar esta excitação na posição da entrada do canal auditivo que é usado na simulação numérica. Deve ser lembrado que na primeira etapa dos ensaios em laboratório foram utilizados unicamente dois microfones, o que significou que a excitação na entrada do canal auditivo, na modelagem numérica, fosse os valores da medição feita na posição do tímpano do canal auditivo simulado. Desta forma são levados em conta erros de medição, como por exemplo, a influência das ressonâncias da cavidade acústica dos canais auditivos simulados e da caixa de madeira, além das transmissões laterais que ingressam no tubo reto, simulado experimentalmente.

Na **TABELA 3.6** é mostrado um quadro resumo dos equipamentos usados nesta segunda etapa de medição de ruído impulsivo com o sistema de recepção de três microfones numa caixa de madeira.

TABELA 3.6 - Identificação dos instrumentos usados nos ensaios experimentais da etapa 2 (caixa de madeira).

Instrumento	Fabricante	Modelo
Tubo com Descarga de Ar Comprimido	R. Birch	1998
Pré-amplificador	Brüel & Kjær	2639
Microfone Capacitivo ¼"	Brüel & Kjær	4135
Amplificador de Medição (Microfone ¼")	Brüel & Kjær	2636
Calibrador do Microfone (1 kHz, 94 dB)	Brüel & Kjær	4230
Microfone de Pressão Piezoresistivo ⅛"	Endevco	8510B-100
Calibrador do Microfone (250 Hz, 124 dB)	Brüel & Kjær	3541
Amplificador de Medição (Microfone ⅛")	Fylde	351
Placa de Aquisição de Dados	Imtec	T114-4
Programa Computacional de Análise	Imtec	Insight V 3.0

Na **TABELA 3.7** são apresentadas condições de medição de fonte impulsiva em que se manteve constante a pressão de ar comprimido, a distância entre a fonte e os microfones e a área da superfície da membrana de poliéster que explode. O parâmetro que foi modificado para cada medição corresponde ao comprimento do tubo, que foi de 0,25 m, 0,75 m e 1,0 m.

TABELA 3.7 - Condições de medição para a fonte sonora impulsiva, do tipo descarga de ar comprimido, com o uso do sistema da caixa de madeira.

Fonte Impulsiva	Pressão Ar Comprimido [bar]	Distância L Fonte-Microfone [m]	Comprimento do Tubo [m]	Área Superfície Membrana	
				[m²]	[%]
1	0,7	4	0,25	0,062	100
2	0,7	4	0,75	0,062	100
3	0,7	4	1,00	0,062	100

As **FIGURA 3.20** até a **3.25**, mostram a comparação entre as curvas de resposta de pressão sonora, no domínio do tempo e da frequência, para cada uma das condições da fonte sonora impulsiva descritas na **TABELA 3.7**.

Pode-se observar que as curvas de pressão sonora, no tempo, *sem* o uso do tampão ainda apresentam altos picos de pressão sonora, com tempos de subida e duração muito curtos. Estas curvas mantêm uma forma relativamente similar à onda do tipo FRIEDLANDER, tornando possível associá-las com as ondas de Duração A. Apesar das modificações efetuadas nesta segunda etapa experimental, aparecem nas curvas várias irregularidades em sua forma e tais curvas contêm vários picos após o pulso principal. Isto significa que as reflexões do campo sonoro no piso e as transmissões laterais no interior da caixa de madeira continuam presentes. As curvas *com* o uso do protetor auditivo mostram propriedades de ondas do tipo FRIEDLANDER, com Duração A, sendo estas mais suaves e atenuadas; com tempos de subida e duração mais longos, o nível de pressão sonora (pico) é reduzido e deslocado no tempo. Por outro lado, as curvas dos espectros de frequência exibem alguns picos bem definidos; alguns deles são similares aos máximos de pressão observados nas curvas da primeira etapa experimental. As frequências que aparecem para esta fase de ensaios estão relacionadas principalmente com a ressonância do tubo da fonte impulsiva (340 Hz para um comprimento de 0,25 m, 110 Hz para 0,75 m e 85 Hz para 1 m, sendo que esta última não aparece no gráfico).

Um resumo das diferentes características que identificam um ruído impulsivo, no tempo, é exposto na **TABELA 3.8**, para as fontes impulsivas 1, 2 e 3, usando o sistema de recepção do tipo caixa de madeira. Nesta tabela destacam-se os valores de tempo de subida, Duração A, nível de pressão sonora (pico) e perda de inserção (pico), *sem* e *com* o uso do protetor auditivo tipo tampão. A **TABELA 3.9** apresenta algumas frequências associadas aos valores mais altos de pressão sonora, nas condições *sem* e *com* o tampão na cavidade do tubo que simula o canal auditivo.

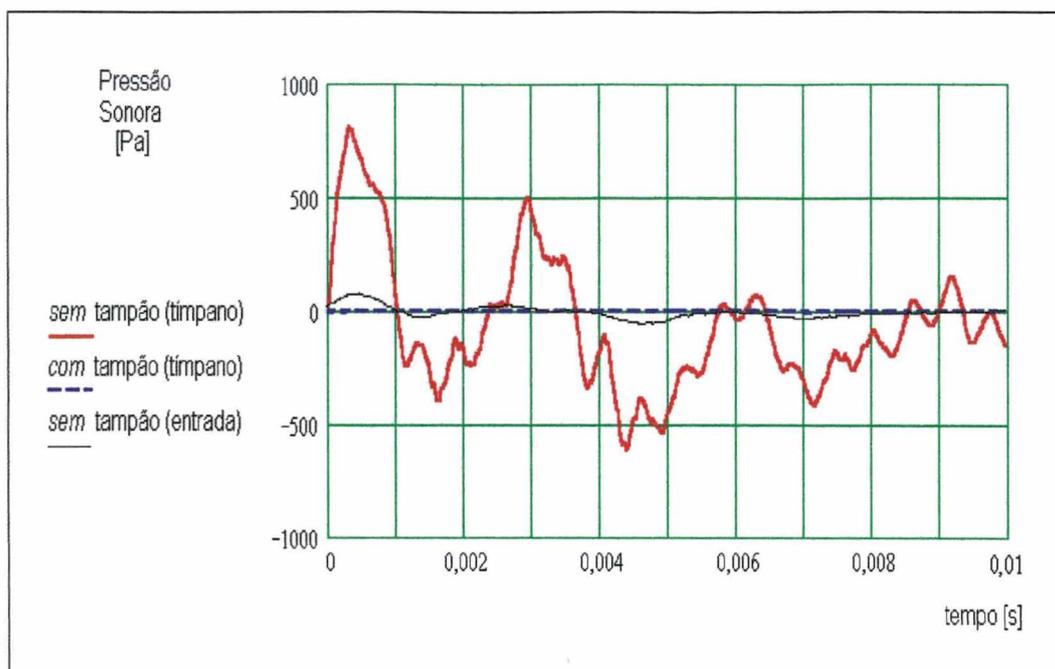


FIGURA 3.20 - Comparação entre a pressão sonora, no domínio do tempo, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, *sem* e *com* o uso do tampão, da fonte impulsiva 1.

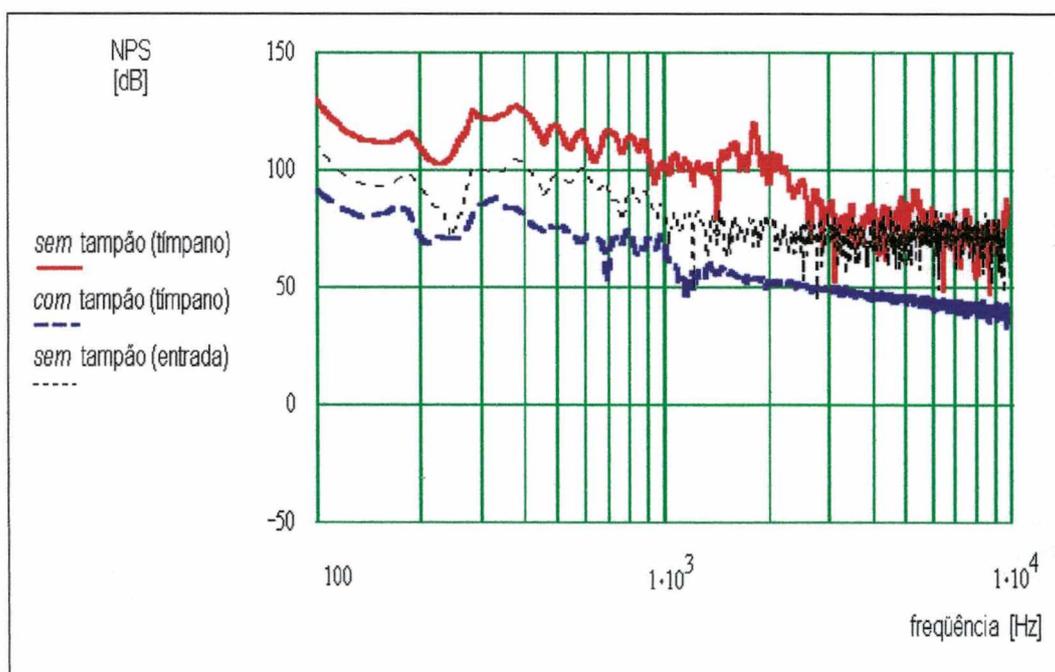


FIGURA 3.21 - Comparação entre os níveis de pressão sonora, no domínio da frequência, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, *sem* e *com* o uso do tampão, da fonte impulsiva 1.

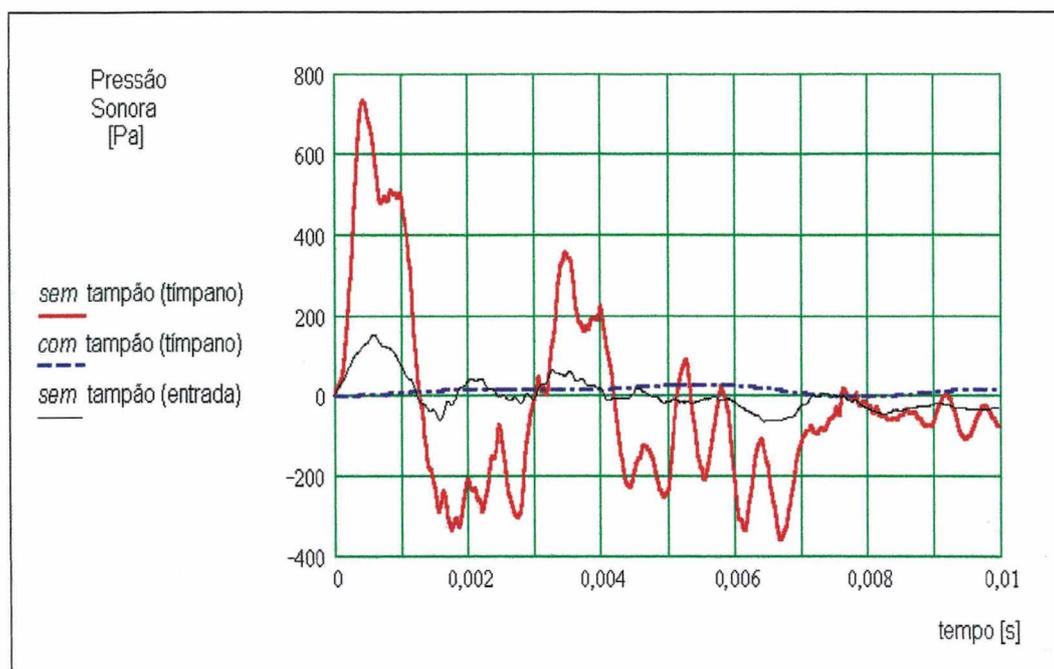


FIGURA 3.22 - Comparação entre a pressão sonora, no domínio do tempo, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, *sem* e *com* o uso do tampão, da fonte impulsiva 2.

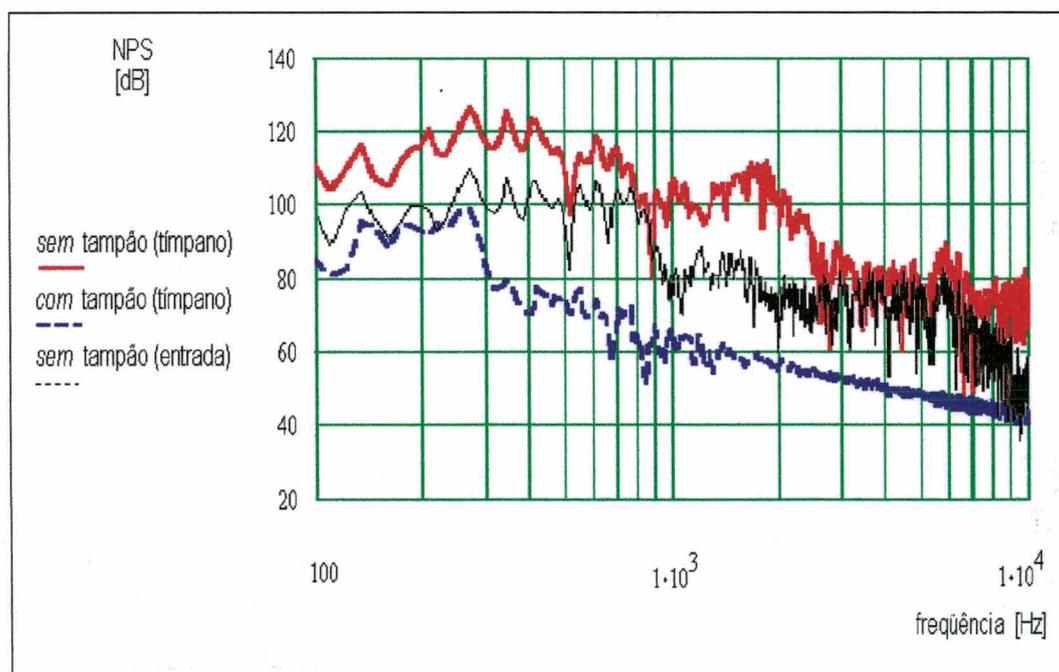


FIGURA 3.23 - Comparação entre os níveis de pressão sonora, no domínio da frequência, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, *sem* e *com* o uso do tampão, da fonte impulsiva 2.

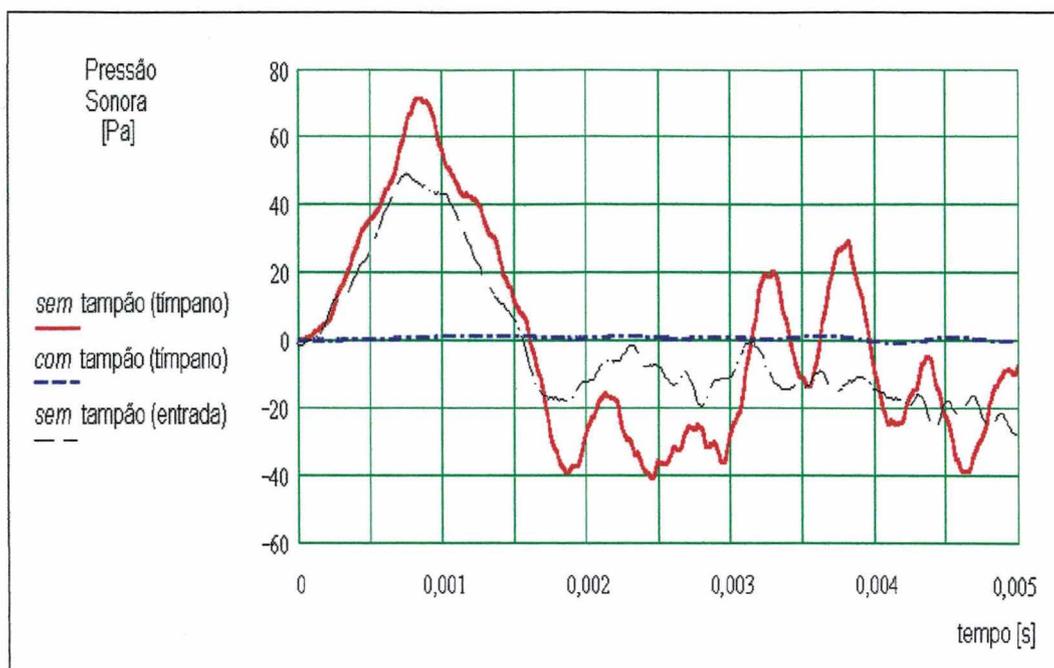


FIGURA 3.24 - Comparação entre a pressão sonora, no domínio do tempo, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, *sem* e *com* o uso do tampão, da fonte impulsiva 3.

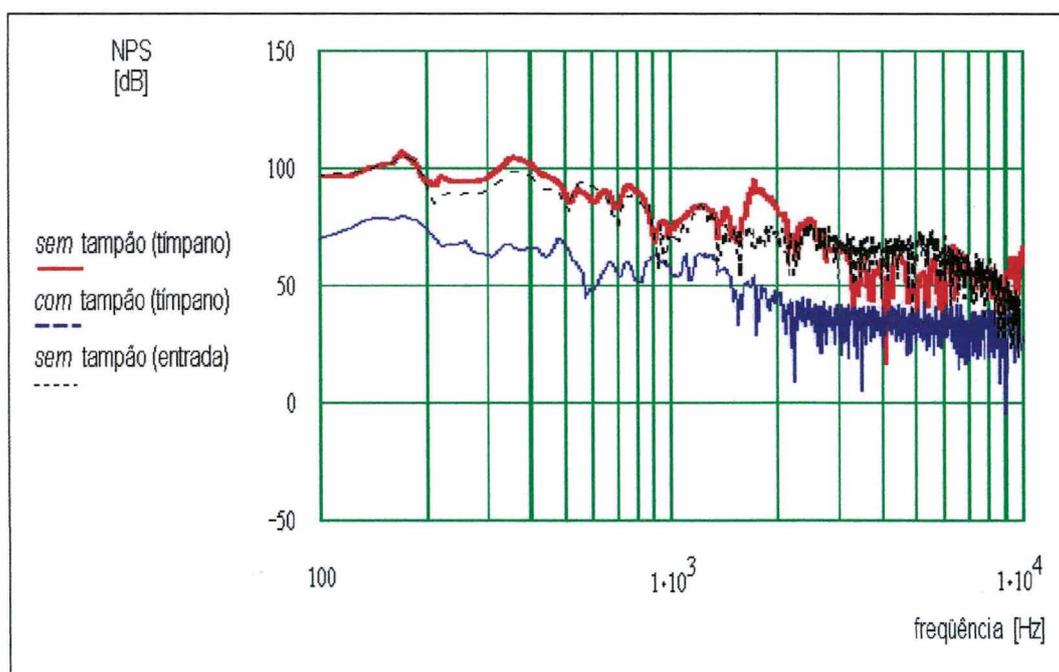


FIGURA 3.25 - Comparação entre os níveis de pressão sonora, no domínio da frequência, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, *sem* e *com* o uso do tampão, da fonte impulsiva 3.

TABELA 3.8 - Comparação entre os parâmetros que caracterizam um ruído impulsivo, no domínio do tempo, com o uso da caixa de madeira, *sem* e *com* o protetor auditivo tipo tampão.

Fonte Impulsiva	Tempo de Subida [ms]		Duração Tipo A [ms]		NPS (pico) [dB]		Perda de Inserção [dB]
	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	
1	0,83	1,25	1,61	3,94	131,1	96,7	34,4
2	0,72	3,61	1,39	7,01	154,5	123,4	31,1
3	0,44	5,44	1,28	7,38	151,3	122,9	28,8

TABELA 3.9 - Níveis de Pressão Sonora (NPS) e Perda de Inserção (PI), em algumas frequências, para as fontes impulsivas 1, 2 e 3, usando a caixa de madeira.

Fonte Impulsiva	Frequência [Hz]	NPS [dB]		Perda de Inserção [dB]
		Sem	Com	
1	170,9	106,6	79,9	26,7
	366,3	104,0	65,3	38,7
	757,0	92,6	58,2	34,4
	1697	94,8	48,8	46,0
2	97,7	130,7	92,6	38,1
	378,5	127,3	83,2	44,1
	683,7	116,8	51,7	65,1
	1795	119,9	52,9	67,0
3	134,3	116,2	95,4	20,8
	268,6	126,4	99,1	27,1
	610,4	118,9	73,9	45,0
	1807	112,2	57,9	54,3

3.4 Medições com Fonte de Ruído Impulsivo e o Uso do Tubo de Choque

Nesta terceira etapa dos ensaios experimentais utilizou-se uma fonte impulsiva do tipo descarga de ar comprimido de menor tamanho, denominada tubo de choque. Este dispositivo consistiu em utilizar dois tubos de plástico de 60 mm de diâmetro cada um. Estes tubos são acoplados manualmente, tendo comprimentos de 6 m e 0,1 m. O tubo de 0,1 m é a fonte impulsiva do tipo descarga de ar comprimido, no qual é instalado uma membrana (papel celofane) que se rompe por causa da pressão de ar ao interior da câmara de compressão. Em termos gerais, o funcionamento do tubo de choque é similar ao procedimento descrito, para a fonte sonora impulsiva, nas etapas dos ensaios experimentais 1 (placa de madeira) e 2 (caixa de madeira). O tubo de 6 m atua como uma câmara de expansão e propagação do impulso sonoro provocado na interface dos dois tubos. Uma descrição do sistema de medição e a disposição dos equipamentos utilizados, são apresentados na **FIGURA 3.26**.

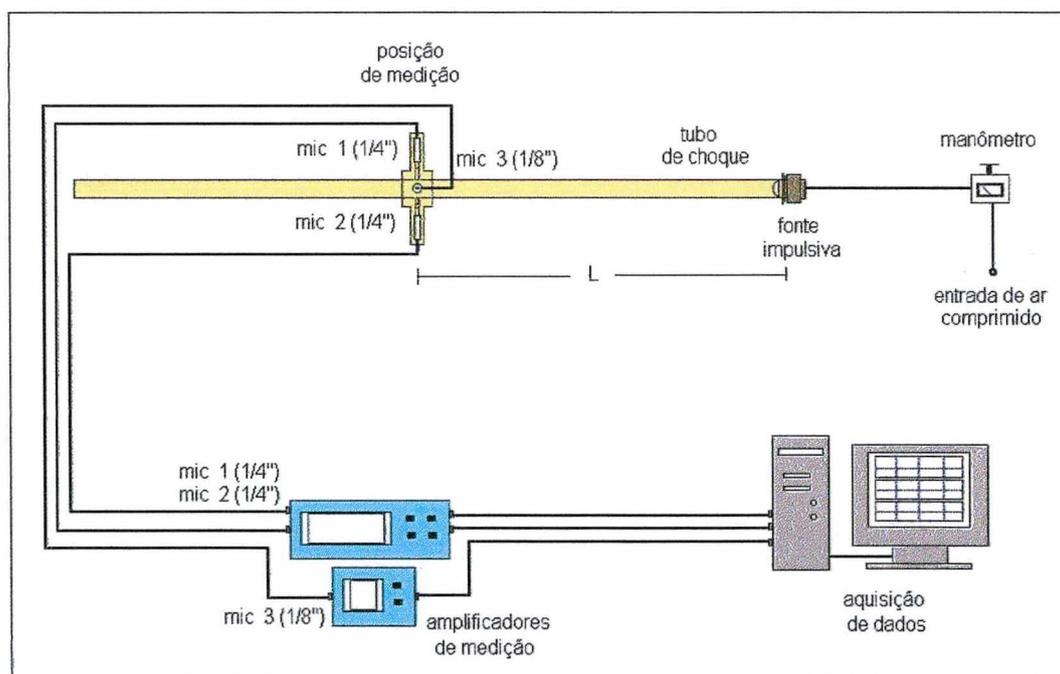


FIGURA 3.26 - Diagrama que descreve o procedimento de medição e os equipamentos utilizados, com ruído impulsivo, usando o tubo de choque.

Com este novo sistema de medição são eliminadas algumas ressonâncias e transmissões laterais, além de se obter um sinal sonoro com características de ruído impulsivo muito similares às do tipo FRIEDLANDER com Duração A. Inicialmente, foram testadas algumas condições de ensaios experimentais que consideraram um tubo de choque de 0,75 m de comprimento, que gera o ruído impulsivo (ver **FIGURA**

3.28). Nestes testes foram obtidos sinais com características de onda FRIEDLANDER, mas os altos picos de pressão sonora foram excessivamente elevados, acima de 170 dB (pico). Em função destes acontecimentos procurou-se usar outra fonte impulsiva do tipo tubo de choque, cujo comprimento da câmara de compressão fosse 0,05 m, além de usar como membrana de explosão um papel celofane. Com estas características de medição obteve-se um maior controle do impulso sonoro, principalmente em termos da pressão sonora (pico). Assim, foi possível obter formas de ondas de características bastante similares às do tipo FRIEDLANDER, sem a presença de pulsos secundários e ressonâncias que interferissem no sinal medido.

Este sistema de tubo de choque também considerou um dispositivo com três canais auditivos simulados com três microfones (referenciado como posição de medição na **FIGURA 3.27**). Cada um destes canais e microfones estão instalados dentro de um sistema de tubos (canal 1 e 2) que permitem isolar acusticamente o sistema canal-microfone, do ruído externo do ambiente. O canal 3, de $\frac{1}{8}$ " de diâmetro, é inserido num furo feito sobre a superfície do tubo de propagação, possibilitando a medição do campo sonoro que incide na entrada dos canais auditivos simulados. Os três microfones são dispostos perpendicularmente à direção da propagação do pulso, no interior do tubo, de modo que a onda de choque passa tangencialmente aos mesmos.

As medições do ruído impulsivo foram realizadas com a placa aquisição de dados tipo T114-4 e o programa computacional INSIGHT, versão 3.0, já descritos anteriormente na segunda etapa dos ensaios experimentais de laboratório desenvolvida neste trabalho.

As fotografias apresentadas nas **FIGURA 3.28** e **3.29**, mostram diferentes descrições do sistema de geração de ruído impulsivo, mediante o uso do tubo de descarga de ar comprimido, o qual foi denominado tubo de choque. Nas **FIGURA 3.30**, **3.31** e **3.32** detalham-se diferentes vistas e os acessórios que compõem o sistema de recepção (microfones, canais auditivos simulados e tubos de isolamento acústico). Também, é incluído na **FIGURA 3.33** um desenho explicativo do sistema de recepção

no tubo de choque, do campo sonoro impulsivo provocado pela descarga de ar comprimido neste mesmo tubo.

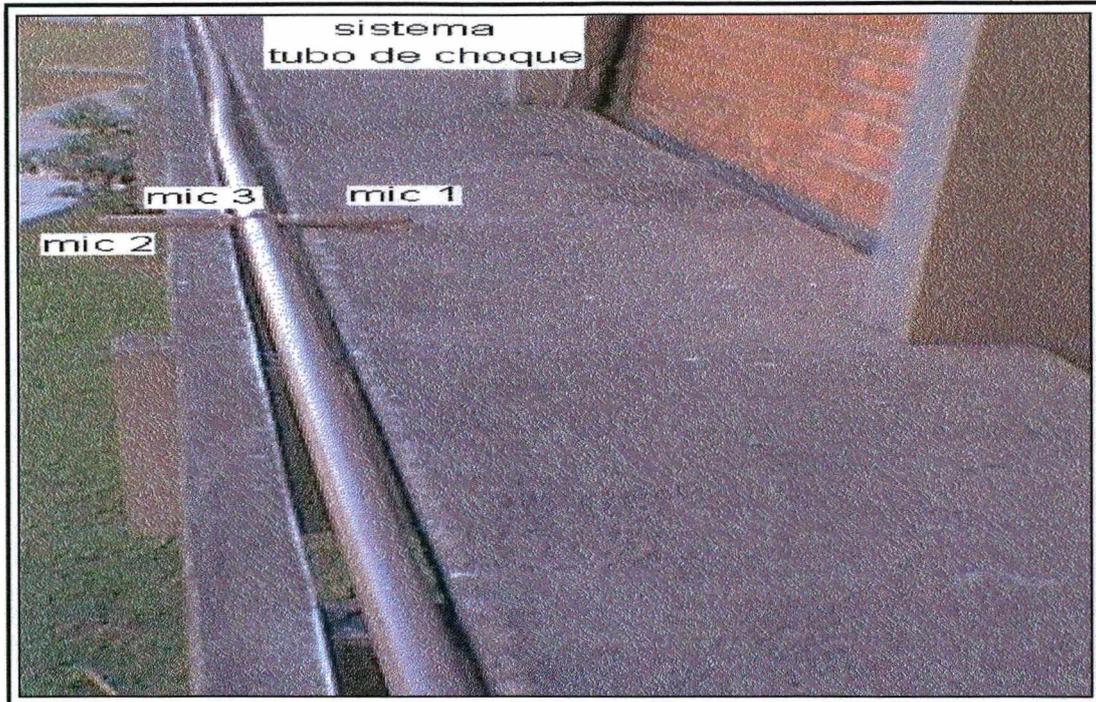


FIGURA 3.27 - Visão geral do tubo de choque e o sistema dos três microfones.

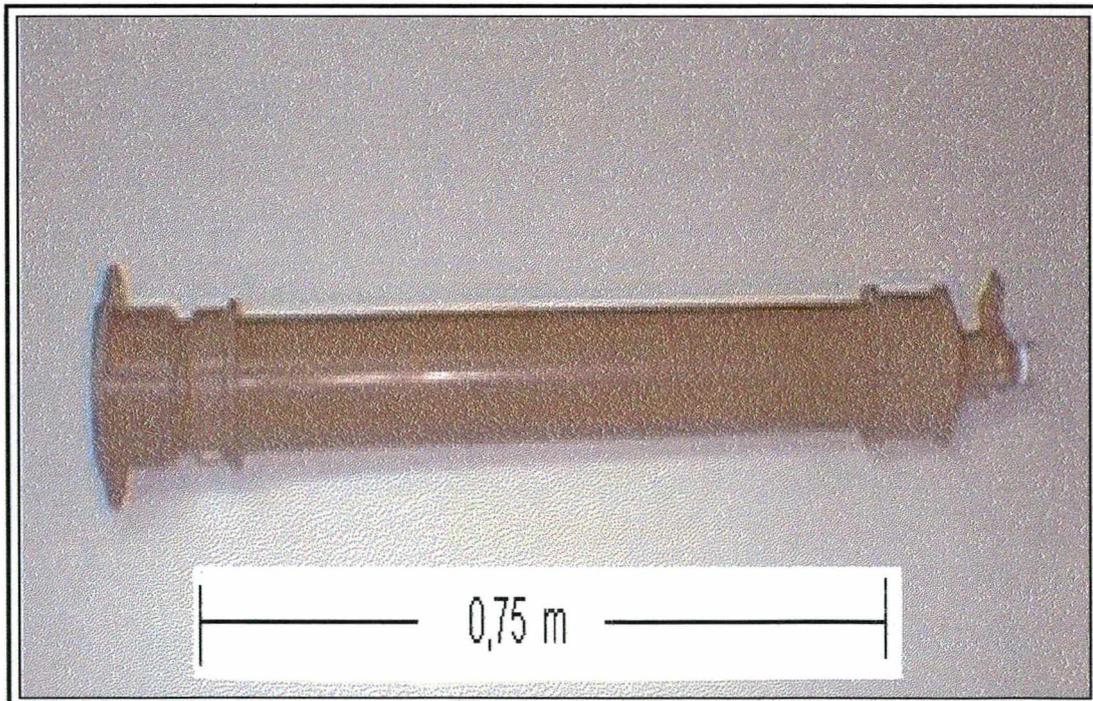


FIGURA 3.28 - Fonte impulsiva do tipo descarga de ar comprimido, denominado tubo de choque, de 0,75 m de comprimento.

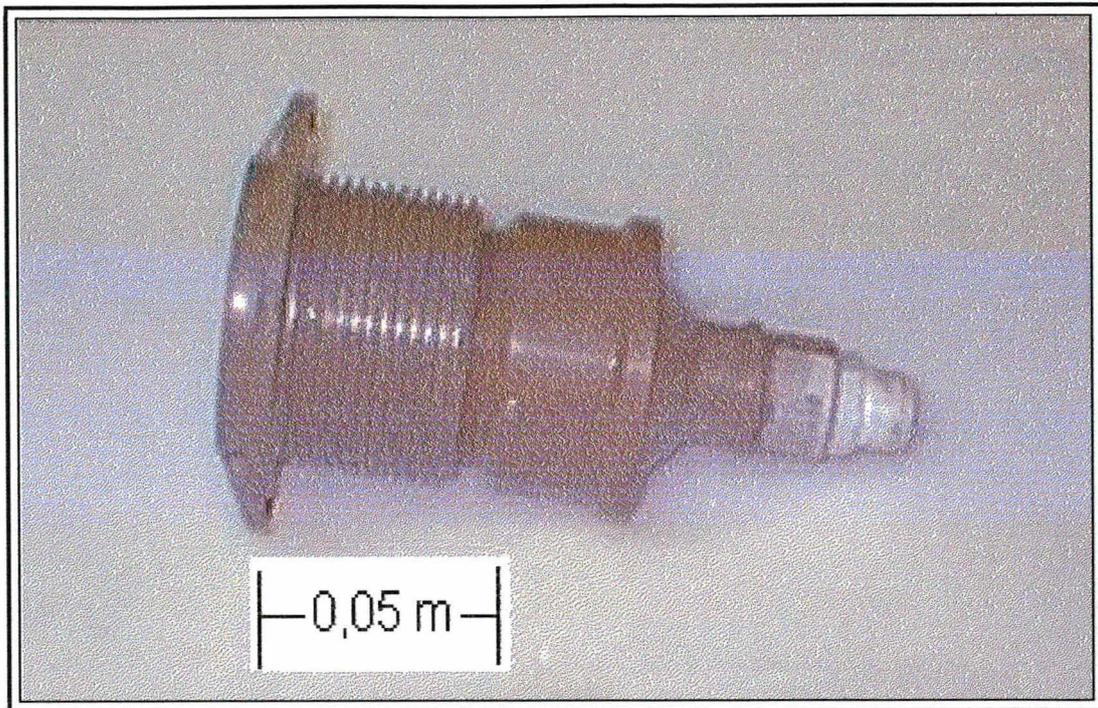


FIGURA 3.29 - Fonte impulsiva do tipo descarga de ar comprimido , denominado tubo de choque, de 0,05 m de comprimento.

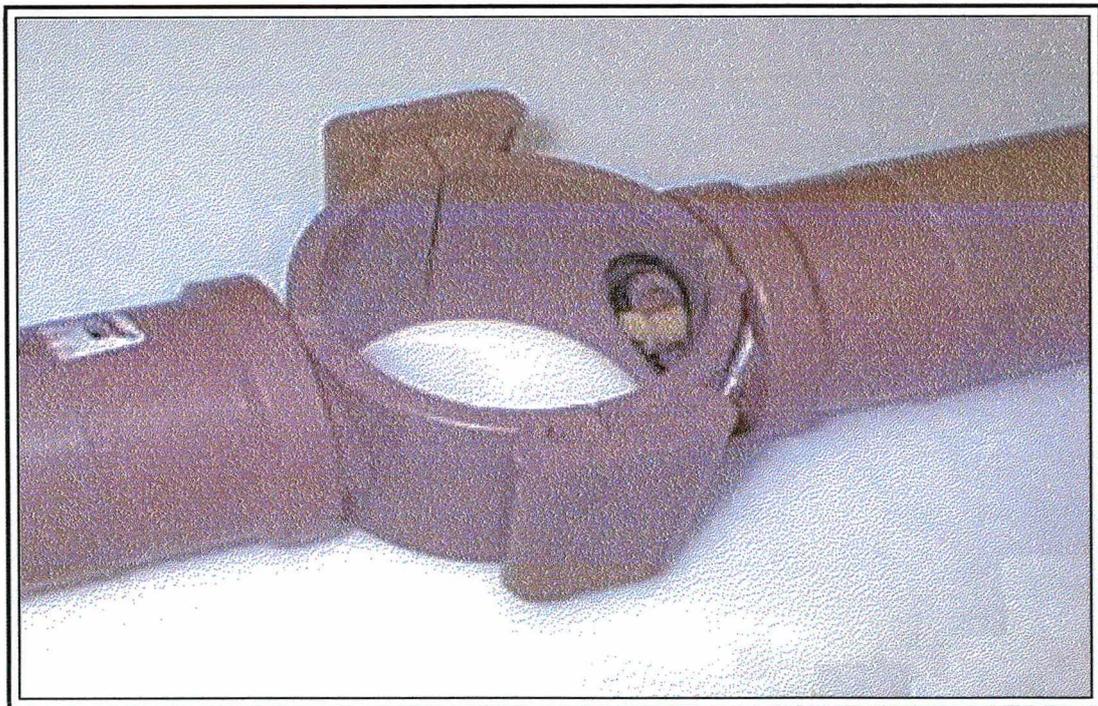


FIGURA 3.30 - Sistema de medição do tubo de choque, apresentando os canais auditivos simulados.

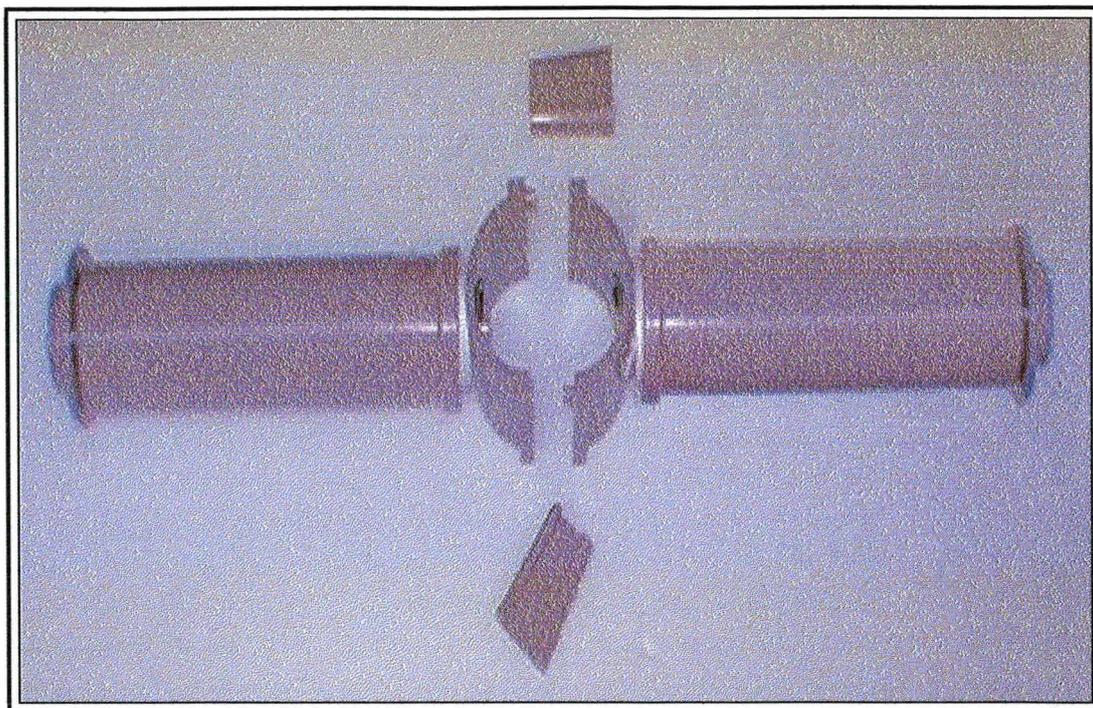


FIGURA 3.31 - Sistema de medição do tubo de choque, apresentando o acoplamento dos canais auditivos simulados.

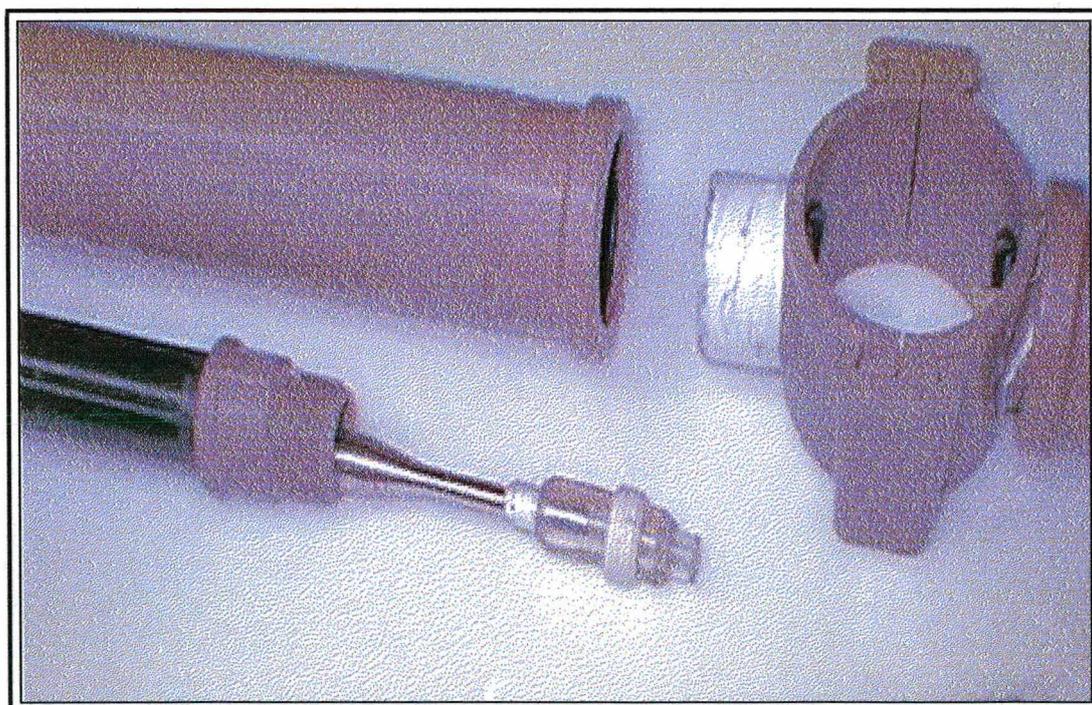


FIGURA 3.32 - Sistema de medição do tubo de choque, em detalhe, apresentando o canal auditivo simulado (*sem tampão*), o microfone de ¼" e os tubos que isolam o sistema.

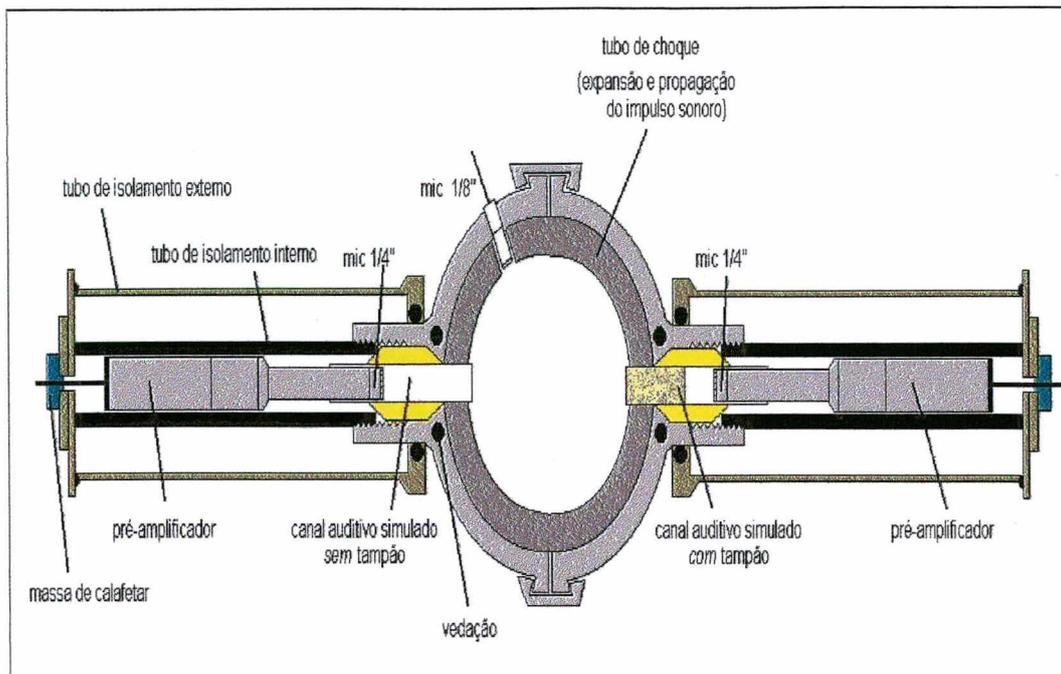


FIGURA 3.33 - Diagrama descritivo do sistema de medição do tubo de choque, (vista do corte transversal).

As **FIGURA 3.34 a 3.39**, mostram gráficos comparativos das curvas de resposta de pressão sonora, no domínio do tempo e no domínio da freqüência, para cada uma das configurações da fonte sonora impulsiva descritas na **TABELA 3.10**, que utiliza a geração e propagação do ruído impulsivo com o tubo de choque.

TABELA 3.10 – Configurações de medição para a fonte sonora impulsiva: com o uso do tubo de choque.

Fonte Impulsiva	Pressão Ar Comprimido [bar]	Distância L Fonte-Microfone [m]	Comprimento do Tubo de Choque [m]	Área Superfície Membrana [m ²]
1	0,2 – 0,3	3,0	0,05	0,0022
2	0,2 – 0,3	3,0	0,05	0,0022
3	0,2 – 0,3	3,0	0,05	0,0022

Observa-se que as curvas de pressão sonora, no tempo, *sem* o uso do tampão apresentam altos picos de pressão sonora, com tempos de subida e duração muito curtos. Estas curvas mantêm uma forma bastante similar à onda do tipo FRIEDLANDER, sendo possível associá-las às ondas de Duração A. Com as

modificações feitas nesta terceira etapa experimental, foram eliminadas várias das irregularidades e pulsos secundários contidos nos casos anteriores (ensaio experimental das etapas 1 e 2). As curvas *com* o uso do protetor auditivo tampão mostram propriedades de ondas do tipo FRIEDLANDER, com Duração A, bem definidas. Estas curvas ao serem comparadas às similares do caso *sem* tampão, são mais suaves e atenuadas, com tempos de subida e duração mais longos, além do nível de pressão sonora (pico) reduzido em amplitude e deslocado no tempo.

As curvas dos espectros de frequência mostram alguns máximos de pressão bem definidos. As frequências que aparecem para esta fase de ensaios, *sem* o uso do protetor auditivo tipo tampão, estão relacionadas principalmente com a ressonância do tubo da fonte impulsiva (tubo de choque): para um comprimento de 3,0 m obtém-se uma ressonância em 30 Hz, aproximadamente, e em múltiplos ímpares desta frequência, de modo que se têm máximos perto de 100, 150, 200 e 300 Hz. A ressonância relacionada com a cavidade do tubo reto, do canal auditivo simulado, *sem* tampão, mostra notoriamente um máximo de pressão sonora nas proximidades dos 2,4 kHz e para o múltiplo ímpar em 8 kHz. Nas curvas *com* o protetor tipo tampão se observa que os picos de pressão destacados para o caso da medição *sem* protetor, são atenuados, especialmente em alta frequência (entre 1 k e 10 kHz) obtendo-se valores de perda de inserção de 40 a 50 dB. Perto dos 300 Hz destaca-se um máximo de pressão relacionado à vibração de corpo rígido do tampão, na cavidade do tubo reto de plástico que simula o canal auditivo, como também foi apontado nos testes experimentais das etapas 1 e 2. Deve-se notar que para este protetor auditivo tipo tampão, a atenuação sonora tende a diminuir abaixo dos 300 Hz, mas este é um comportamento observado na prática para protetores tipo tampão, expostos a campos sonoros estacionários.

Um resumo das diferentes características que identificam um ruído impulsivo, no tempo, é exposto na **TABELA 3.11**, para as fontes impulsivas 1, 2 e 3, usando o sistema de recepção do tipo tubo de choque. Nesta tabela destacam-se os valores de tempo de subida, Duração A, nível de pressão sonora (pico) e perda de inserção (pico), *sem* e *com* o uso do protetor auditivo tipo tampão. A **TABELA 3.12** apresenta algumas

freqüências que destacam os valores mais altos de pressão sonora, nas condições *sem* e *com* o tampão na cavidade do tubo que simula o canal auditivo.

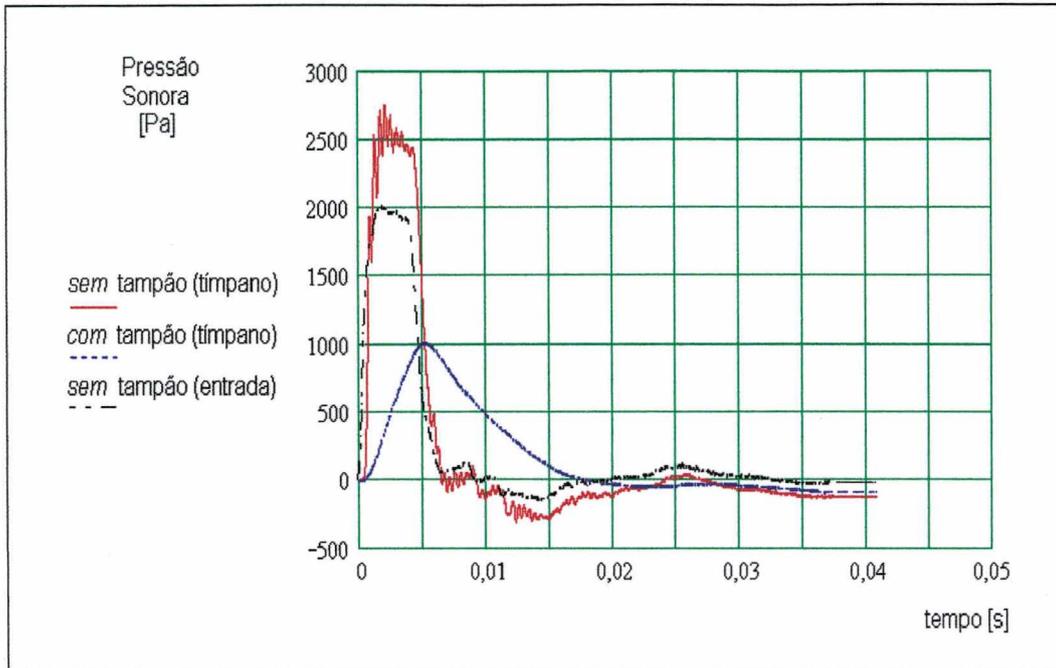


FIGURA 3.34 - Comparação entre a pressão sonora, no domínio do tempo, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, *sem* e *com* o uso do tampão, da fonte impulsiva 1.

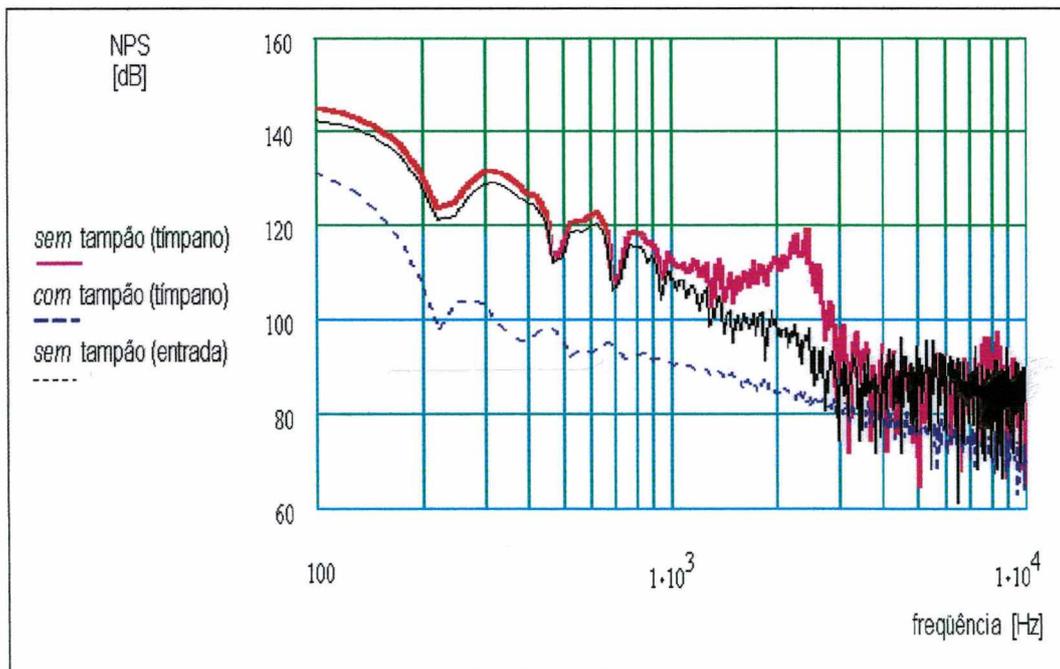


FIGURA 3.35 - Comparação entre os níveis de pressão sonora, no domínio da freqüência, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, *sem* e *com* o uso do tampão, da fonte impulsiva 1.

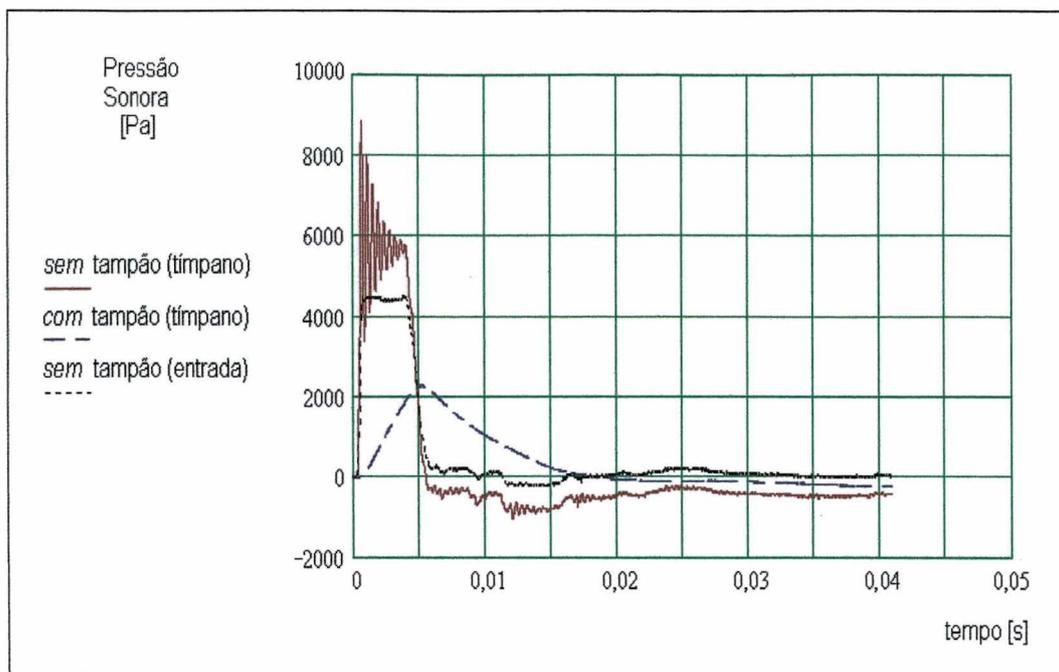


FIGURA 3.36 - Comparação entre a pressão sonora, no domínio do tempo, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, *sem* e *com* o uso do tampão, da fonte impulsiva 2.

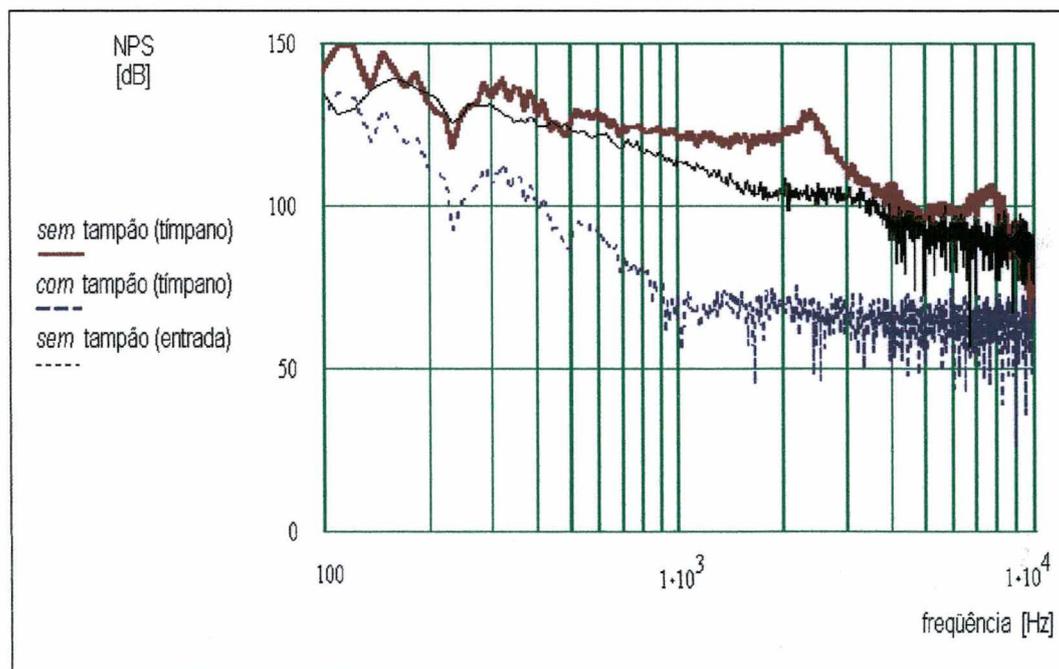


FIGURA 3.37 - Comparação entre os níveis de pressão sonora, no domínio da frequência, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, *sem* e *com* o uso do tampão, da fonte impulsiva 2.

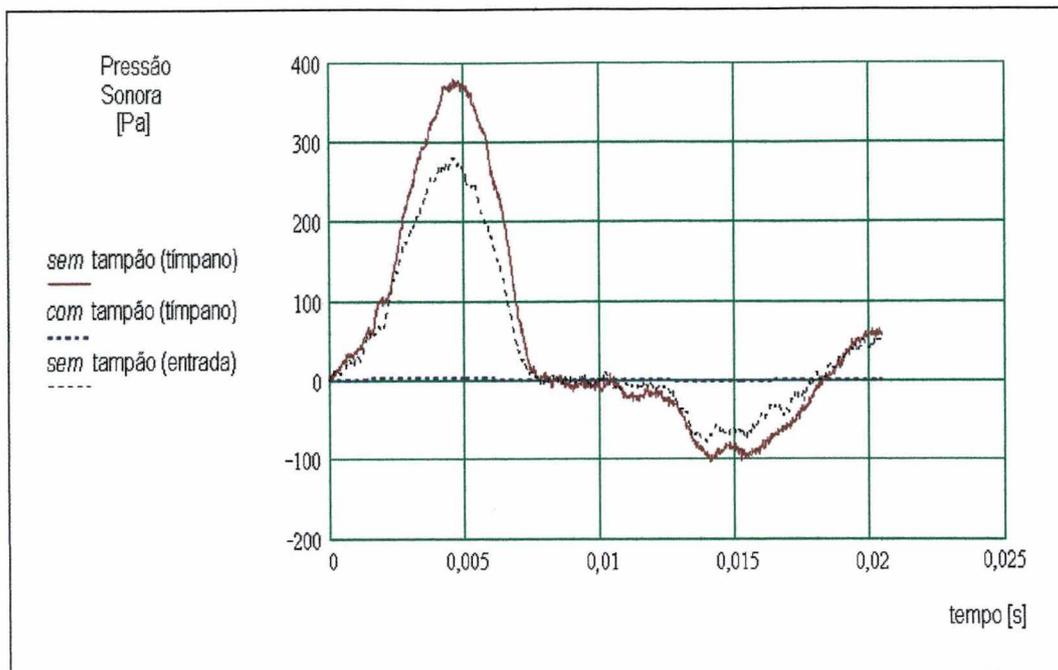


FIGURA 3.38 - Comparação entre a pressão sonora, no domínio do tempo, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, *sem* e *com* o uso do tampão, da fonte impulsiva 3.

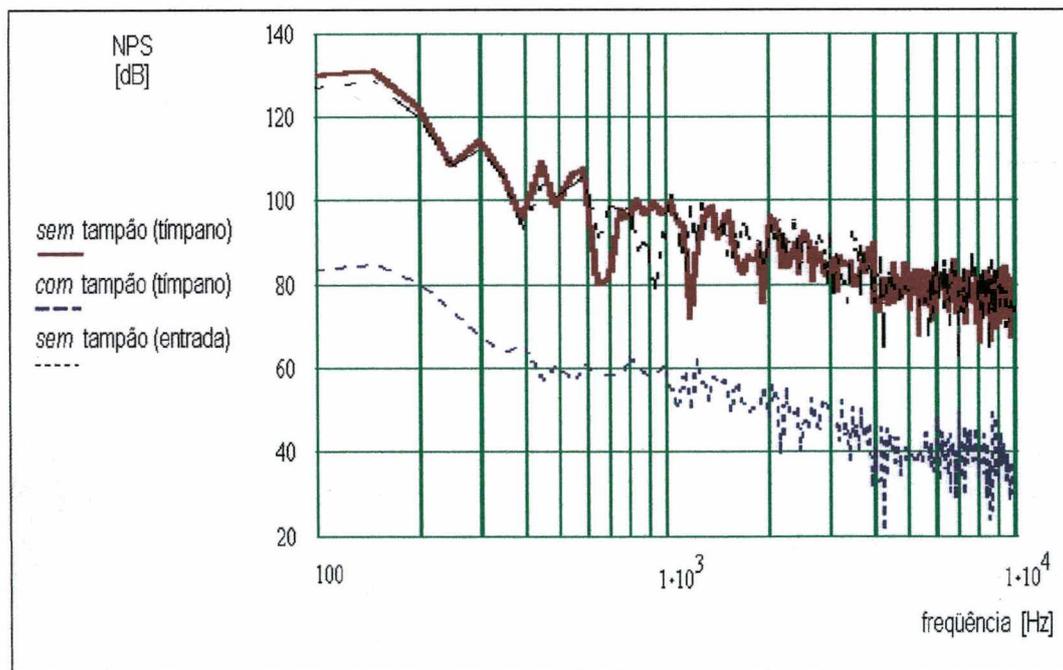


FIGURA 3.39 - Comparação entre os níveis de pressão sonora, no domínio da frequência, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, *sem* e *com* o uso do tampão, da fonte impulsiva 3.

TABELA 3.11 - Comparação entre os parâmetros que caracterizam um ruído impulsivo, no domínio do tempo, com o uso do tubo de choque, *sem* e *com* o protetor auditivo tipo tampão.

Fonte Impulsiva	Tempo de Subida [ms]		Duração A [ms]		NPS Pico [dB]		Perda De Inserção [dB]
	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	
1	2,12	5,22	6,49	18,02	162,8	154,1	8,7
2	0,69	5,38	5,56	19,13	172,9	159,3	13,6
3	4,64	3,26	7,78	11,68	145,6	103,7	41,9

TABELA 3.12 - Níveis de Pressão Sonora (NPS) e Perda de Inserção (PI), em algumas frequências, para as fontes impulsivas 1, 2 e 3, usando o tubo de choque.

Fonte Impulsiva	Frequência [Hz]	NPS [dB]		PI [dB]
		Sem	Com	
1	97,7	145,1	131,7	13,4
	317,5	131,6	99,4	32,2
	610,5	122,9	94,3	28,6
	2369	118,9	82,8	36,1
2	109,9	149,1	134,7	14,4
	317,5	139,1	113	26,1
	586,1	129,4	93,6	35,8
	2308	128,9	72,1	56,8
3	146,6	130,9	85	45,9
	439,9	109,1	57,2	51,9
	1369	98,8	58,3	40,5
	2004	96,2	56,4	39,8

CAPÍTULO 4

SIMULAÇÃO NUMÉRICA PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

A aplicação de técnicas numéricas, como uma ferramenta poderosa na modelagem de problemas físicos, permite que possam ser implementados esquemas numéricos para verificar e comparar os resultados da modelagem com aqueles obtidos dos ensaios experimentais do problema físico associado.

O Método de Elementos de Finitos, mais conhecido por FEM (Finite Element Method), é uma técnica numérica que pode ser usada para simular diversos problemas reais. Em problemas onde o domínio acústico é limitado, o problema é dito interior, como por exemplo, a predição do campo acústico dentro de uma cavidade, como é o caso no interior do canal auditivo humano. A geometria do problema é particionada mediante uma malha de elementos finitos. Sobre esta malha é definida uma base de funções de interpolação que será usada para construir a aproximação da solução do problema. A precisão da aproximação depende da capacidade destas funções de interpolação aproximar a solução exata. Sendo estas funções geralmente dadas por polinômios. A precisão aumenta quando é aumentado o número destas funções na malha mediante a diminuição do tamanho dos elementos (aumentado o número destes) ou aumentando o grau polinomial das mesmas funções de interpolação.

Neste trabalho apresenta-se uma revisão do método de elementos finitos empregado nas simulações. São discutidas as suas principais características e a técnica de solução em problemas de acústica transiente. Também é dada uma breve descrição dos programas computacionais utilizados. Simulações preliminares são implementadas, a fim de se testar a validade do método para o problema em questão em presença de ruído impulsivo. Finalmente, é exposta a montagem do problema completo de simulação numérica bidimensional de um tubo reto, que simula o canal auditivo humano, *sem* e *com* a inserção de um protetor auditivo tipo tampão, incluindo também os resultados dos parâmetros que caracterizam o ruído impulsivo, no domínio do tempo e da frequência.

4.1 Método de Elementos Finitos

4.1.1 Formulação Matemática e Implementação Numérica

A seguir é apresentada uma formulação matemática para a determinação da pressão sonora, desenvolvida por COYETTE (1995), que considera problemas acústicos transientes usando FEM e o esquema de integração implícita, para resolver um sistema diferencial de segunda ordem.

A equação linear da onda governa a propagação de ondas acústicas de pequena amplitude, dentro de um meio acústico homogêneo. Selecionando as variações de pressão acústica, $p(x,t)$, como a principal variável, tem-se como forma usual, para uma dimensão, a seguinte equação:

$$\frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad x \in V, t \geq 0 \quad (4.1)$$

onde,

$p(x,t)$: pressão acústica num ponto x do domínio V , no tempo t .

c : velocidade do som.

A equação diferencial (4.1) precisa ser complementada com condições de contorno de pressão sonora e de impedância ao longo do contorno da superfície S , do domínio V . Estas condições de contorno podem ser escritas da seguinte maneira (COYETTE, 1995):

i) pressão sonora

$$p(x,t) = \bar{p}(x,t) \quad x \in S_1, t \geq 0 \quad (4.2)$$

ii) aceleração sonora

$$\frac{\partial p(x,t)}{\partial n_x} = q(x,t) = \bar{q}(x,t) \quad x \in S_2, t \geq 0 \quad (4.3)$$

onde,

$\frac{\partial}{\partial n_x}$: Derivada aplicada em relação à normal, na direção x.

iii) admitância

$$q(x,t) = -\frac{1}{c} \left[\frac{1-\alpha(x)}{1+\alpha(x)} \right] \frac{\partial p(x,t)}{\partial t} \quad x \in S_3, \quad t \geq 0 \quad (4.4)$$

ou

$$q(x,t) = -A(x) \frac{\partial p(x,t)}{\partial t} \quad x \in S_3, \quad t \geq 0 \quad (4.5)$$

com

$$A(x) = \frac{1}{c} \left[\frac{1-\alpha(x)}{1+\alpha(x)} \right] \quad (4.6)$$

onde,

α : Fator de Reflexão.

A: Admitância da superfície S.

S : Superfície do domínio V (meio acústico homogêneo).

S₁, S₂, S₃ : Sub-domínios da superfície S.

Usando a equação da onda diferencial, equação (4.1), e o método de resíduos ponderados, é possível arribar a expressão variacional do problema que, após a incorporação da aproximação por elementos finitos, onde:

$$p(x,t) = N(x) P(t) \quad (4.7)$$

N(x) : matriz das funções de interpolação.

P(t) : vetor de pressões nodais no tempo t.

Resultando, assim, no seguinte sistema de equações

$$[M]\{\ddot{P}\} + [C]\{\dot{P}\} + [K]\{P\} = \{F_A\} \quad (4.8)$$

onde,

$\{F_A\}$: Vetor de forças acústicas nodais, proporcional à aceleração normal, imposta como condição de contorno nas faces da malha de elementos finitos.

$[M]$: Matriz de massa, independente do incremento no tempo.

$[C]$: Matriz de amortecimento, independente do incremento no tempo.

$[K]$: Matriz rigidez, independente do incremento no tempo.

A equação (4.8) representa um sistema de equações diferenciais lineares de segunda ordem, cuja solução pode ser obtida por procedimentos normalizados que resolvem as equações diferenciais com coeficientes constantes e resolvido para cada incremento no tempo, de modo a obter a distribuição de pressão sonora como resposta.

4.1.2 Procedimento de Integração Direta no Tempo

Levando em conta que os procedimentos propostos para a solução geral de sistemas de equações diferenciais, pode se tornar ser muito dispendioso, se a ordem das matrizes $[M]$, $[C]$ e $[K]$ for grande, é de interesse o uso e a aplicação de métodos de análise de elementos finitos mais efetivos. Para tanto, pode-se usar o método de solução de integração direta.

Na integração direta as expressões da equação (4.8) são integradas usando um procedimento numérico incremento a incremento. O termo "direto" significa que antes da integração numérica, nenhuma transformação das equações, numa forma diferente, é realizada. Em essência, a integração numérica direta, como destacam BATHE e WILSON (1976), está baseada em duas idéias:

- 1) Em vez de tentar satisfazer a equação (4.8), em qualquer tempo t , é proposto o método para satisfazer a equação (4.8) só em intervalos de tempos discretos, Δt .
- 2) A variação das pressões (primeiras e as segundas derivadas), é assumida dentro de um intervalo de tempo Δt . A forma destas variações, dentro de um intervalo de tempo, determina a precisão, a estabilidade e o custo do procedimento de solução.

A aplicação do método considera as seguintes suposições:

- i) Assume-se que são conhecidas as pressões, as primeiras e as segundas derivadas das pressões, no tempo zero, denotadas por p_0 , \dot{p}_0 e \ddot{p}_0 , respectivamente, obtendo assim, a solução da equação (4.8) entre o tempo 0 (zero) e o tempo T.
- ii) Na solução, o período do tempo considerado, T, é subdividido em n intervalos de tempo iguais, Δt , ou seja, $\Delta t = T/n$.
- iii) O esquema de integração utilizado estabelece uma solução aproximada nos tempos 0, Δt , $2\Delta t$, $3\Delta t$, ..., t, $t + \Delta t$, ..., T. Usando um algoritmo é possível calcular a solução, no próximo tempo, a partir das soluções nos tempos previamente considerados. Estes algoritmos assumem que as soluções nos tempos 0, Δt , $2\Delta t$, $3\Delta t$, ..., t são conhecidas e que a solução no tempo $t + \Delta t$ é a próxima solução que se requer. Assim, é possível estabelecer um algoritmo geral que permita calcular a solução em todos os valores de tempos discretos.

No domínio do tempo, a solução considera o esquema de integração de NEWMARK, que pode ser entendido como uma extensão do método de aceleração linear, segundo é observado na **FIGURA 4.1**. Este método de integração está baseado nas seguintes expressões da pressão sonora e sua primeira derivada no tempo, ao longo de um intervalo de tempo t até $t+\Delta t$:

$$\dot{P}_{t+\Delta t} = \dot{P}_t + [(1-\delta)\ddot{P}_t + \delta\ddot{P}_{t+\Delta t}] \Delta t \quad (4.9)$$

$$P_{t+\Delta t} = P_t + \dot{P}_t \Delta t + [(1/2-\alpha)\ddot{P}_t + \alpha\ddot{P}_{t+\Delta t}] \Delta t^2 \quad (4.10)$$

Onde, o α e δ são parâmetros que podem ser determinados para obter precisão e estabilidade na integração. NEWMARK originalmente propôs, como um esquema incondicionalmente estável, o método de aceleração média constante, no qual estabelece que:

$$\delta \geq 0,5 \quad (4.11)$$

$$\alpha \geq 0,25(\delta + 0,5)^2 \quad (4.12)$$

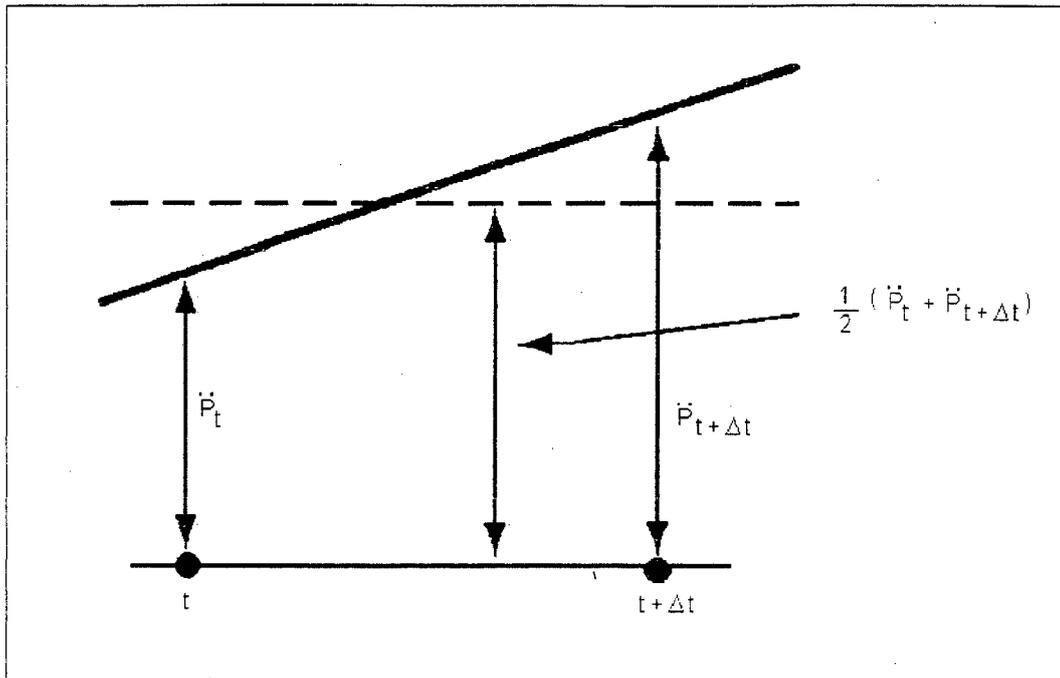


FIGURA 4.1 - Esquema de aceleração média constante de NEWMARK.

Em adição às equações (4.9) e (4.10) para a solução da pressão, e de suas primeira e segunda derivadas, no tempo $t + \Delta t$, as equações de equilíbrio da equação (4.8) no tempo $t + \Delta t$ também são consideradas, obtendo-se:

$$[M]\{\ddot{P}_{t+\Delta t}\} + [C]\{\dot{P}_{t+\Delta t}\} + [K]\{P_{t+\Delta t}\} = \{F_{t+\Delta t}\} \quad (4.13)$$

Resolvendo a equação (4.10) para $\ddot{P}_{t+\Delta t}$, em termos de $P_{t+\Delta t}$, e logo substituindo $\ddot{P}_{t+\Delta t}$ na equação (4.9), obtém-se as equações para $\dot{P}_{t+\Delta t}$ e $P_{t+\Delta t}$, cada um em termos das pressões desconhecidas $P_{t+\Delta t}$. Estas duas relações de $\dot{P}_{t+\Delta t}$ e $P_{t+\Delta t}$ são substituídas na equação (4.13) para resolver $P_{t+\Delta t}$, depois que, usando as equações (4.9) e (4.10), $\dot{P}_{t+\Delta t}$ e $P_{t+\Delta t}$ podem ser calculadas.

$$\ddot{P}_{t+\Delta t} = \left(\frac{1}{\alpha \Delta t^2}\right)(P_{t+\Delta t} - P_t) - \left(\frac{1}{\alpha \Delta t}\right)\dot{P}_t - \left(\frac{1}{2\alpha} - 1\right)\ddot{P}_t \quad (4.14)$$

$$\dot{P}_{t+\Delta t} = \left(1 - \frac{\delta}{\alpha}\right) \dot{P}_t + \frac{1}{2} \left(2 - \frac{\delta}{\alpha}\right) \Delta t \ddot{P}_t - \frac{\delta}{\alpha \Delta t} P_t + \frac{\delta}{\alpha \Delta t} P_{t+\Delta t} \quad (4.15)$$

Substituindo as equações (4.14) e (4.15) na equação (4.13) chega-se em:

$$\begin{aligned} & [M] \left\{ \left(\frac{1}{\alpha \Delta t^2} \right) (\ddot{P}_{t+\Delta t} - P_t) - \left(\frac{1}{\alpha \Delta t} \right) \dot{P}_t - \left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \ddot{P}_t \right\} + \\ & + [C] \left\{ \left(1 - \frac{\delta}{\alpha}\right) \dot{P}_t + \frac{1}{2} \left(2 - \frac{\delta}{\alpha}\right) \Delta t \ddot{P}_t - \left(\frac{\delta}{\alpha \Delta t} \right) P_t + \left(\frac{\delta}{\alpha \Delta t} \right) P_{t+\Delta t} \right\} + \\ & + [K] \{ P_{t+\Delta t} \} = \{ F_{t+\Delta t} \} \end{aligned} \quad (4.16)$$

Desta forma obtém-se uma expressão que resolve a equação (4.8), entre os tempos 0 (zero) e T, para intervalos de tempo Δt , levando em conta os parâmetros de NEWMARK α e δ .

4.1.3 Análise da Estabilidade e da Precisão do Procedimento de Integração Direta

O dispêndio da análise de integração direta, isto é, o número de operações requeridas, é diretamente proporcional ao número de incrementos no tempo necessários na solução. Portanto, a seleção de um apropriado incremento no tempo, Δt , na integração direta é de muita importância. Por outro lado, o incremento no tempo deve ser suficientemente pequeno para obter precisão na solução, mas também não deve ser menor que o necessário, já que isto significaria que a solução seria demasiado dispendiosa. A seleção de um apropriado incremento no tempo, na integração direta, deve levar em consideração os conceitos de estabilidade e precisão no esquema de integração.

Como na integração direta o mesmo incremento no tempo é usado para cada equação, o Δt deveria ser selecionado de maneira a corresponder ao menor período do

sistema. Uma estimativa do Δt deveria ser aproximadamente $T_n / 10$, se o menor período é T_n , como sugerem BATHE e WILSON (1976).

A estabilidade de um método de integração é determinada examinando o comportamento da solução numérica para condições iniciais arbitrárias, o que significa que as condições iniciais para as equações com um valor muito alto de $\Delta t/T$, não devem ser amplificadas. A estabilidade também significa que alguns erros na pressão e nas suas primeira e segunda derivadas, no tempo t , podem ser devido ao erro de arredondamento (round-off error) no computador. A estabilidade é garantida se o incremento no tempo é suficientemente pequeno para integrar com precisão a resposta nas componentes de alta frequência. Em resumo, sob o ponto de vista da estabilidade, um método de integração é incondicionalmente estável se a solução, para quaisquer condições iniciais, não cresce sem rumo para qualquer incremento no tempo Δt , em particular quando $\Delta t/T$ é grande, sendo T o tempo total.

Considerando o método de NEWMARK, os dois parâmetros α e δ podem ser variados para se obter ótimas estabilidade e precisão. O esquema de integração é incondicionalmente estável quando $\delta \geq 0,5$ e $\alpha \geq 0,25 (\delta + 0,5)^2$. Se forem usados os valores $\delta = 0,5$ e $\alpha = 0,25$, o método tem características de precisão mais desejáveis.

Usando um operador incondicionalmente estável, o incremento no tempo tem que ser escolhido para fornecer uma solução precisa e efetiva. O operador de integração a ser usado na análise determinará o número necessário de incrementos no tempo, o qual terá uma grande influência no custo da solução. A solução numérica da equação (4.5) mostra que os erros nas integrações podem ser medidos em termos do alongamento do período e do caimento da amplitude. Em geral, a integração numérica é precisa quando $\Delta t/T$ é menor que aproximadamente 0,01. Para uma dada razão de $\Delta t/T$, o método de aceleração média constante de NEWMARK introduz unicamente alongamento no período e sem caimento na amplitude. Também é possível observar que as equações são integradas com precisão quando a razão entre o incremento no tempo e o período é pequena, mas aquelas respostas nas equações, para as quais $\Delta t/T$ é grande, são obtidas com pouca precisão (BATHE e WILSON, 1976).

Assim, com os antecedentes anteriormente detalhados e expostos, é possível afirmar que o procedimento de integração incremento a incremento configura-se numa boa técnica a ser usada com FEM e pode ser aplicado para obter as respostas de pressão sonora no tempo, considerando que a análise da estabilidade e da precisão mostrada neste capítulo utiliza elementos finitos lineares. Portanto, o FEM pode ser usado com confiança para resolver problemas de acústica transiente.

4.2 Simulação Numérica com o Método de Elementos Finitos

4.2.1 Descrição dos Programas Computacionais Usados

Programas computacionais, comercialmente disponíveis, permitem a construção de malhas de elementos finitos e o pré e pós-processamento de dados para o Método de Elementos Finitos (FEM), como é o caso dos software ANSYS e SYSNOISE.

O programa ANSYS é um software para análise por elementos finitos, de uso geral, que permite a análise de problemas em diversos campos da engenharia como, por exemplo, problemas em áreas estrutural, acústica, térmica e elétrica. Na área de análise acústica, é possível realizar análise estática, dinâmica, modal, de resposta harmônica ou transiente, entre outras (ANSYS, 1994). O software é dividido em pré-processador, processador (solver) e pós-processador. O pré-processador possui amplos recursos para a construção do modelo da estrutura a ser analisada, permitindo a modelagem de geometrias complexas e geração automática da malha de elementos. Depois da construção do modelo, pode-se entrar na fase de solução, onde se deve escolher o tipo de análise a ser realizada, além da aplicação das condições de contorno. Após a obtenção da solução, o programa permite a visualização e pós-processamento dos resultados, com geração de curvas, mapas de resposta e animação gráfica.

O programa computacional SYSNOISE (System for Numerical Noise Analysis), da LMS-NIT (Bélgica), é um pacote de software comercial de análise vibro-acústica, baseado no método de elementos finitos e no método de elementos de contorno, podendo ser utilizado principalmente para problemas de predição de campos sonoros

em volumes fechados, campo sonoro radiado e problemas envolvendo interação entre fluido e estrutura (LMS INTERNATIONAL, 1995). Desta forma, o SYSNOISE implementa rotinas de FEM acústico e estrutural, tanto para o domínio do tempo como para o domínio da frequência. Na sua versão atual (5.3 A), o SYSNOISE não possui gerador de malha, tendo a geometria do meio acústico que ser gerada externamente através do programa ANSYS.

Após a importação da malha de elementos, devem ser definidas as características dos materiais e aplicadas as diferentes condições de contorno acústicas (pressão, impedância) necessárias à análise. É definido, então, o procedimento de análise, neste caso FEM Time, obtida a solução inicialmente na malha de elementos finitos (nós, elementos ou faces) e, em seguida, em qualquer ponto do domínio através da definição de pontos de campo (pontos do domínio acústico selecionados para os quais os resultados serão calculados). Os cálculos na saída do programa especificam que os resultados acústicos de todos os nós da malha são escritos para cada incremento no tempo, obtendo-se os valores de pressões sonora nodais e as funções de resposta neste domínio, considerando que a seleção da faixa no tempo define o intervalo que se requer para calcular a resposta, com um incremento predeterminado. Estes resultados podem ser exportados e visualizados em um pós-processador externo ou no pós-processador do próprio SYSNOISE, na forma de curvas de resposta no tempo ou na frequência para pontos de campo pré-determinados, ou em mapas de cores de uma malha de pontos de campo para um instante em particular.

4.2.2 Análise de Acústica Numérica Transiente com SYSNOISE

Antes de serem iniciadas as simulações referentes a este trabalho, foram feitas simulações preliminares com a finalidade de adquirir proficiência na operação dos programas computacionais já mencionados, adquirir confiança nos resultados; escolher o método de solução mais adequado ao problema e definir os parâmetros adequados à simulação.

O programa SYSNOISE resolve, através do comando Response, o sistema de equações representado na forma matricial, pela equação (4.5), para a faixa de tempo

selecionada. O sistema de equações é configurado e logo é resolvido para cada incremento no tempo fornecendo como resultado a distribuição de pressão unicamente nos nós. O procedimento necessário para obter a resposta transiente, no programa SYSNOISE, requer que sejam definidas preliminarmente diferentes etapas, que configuram o algoritmo de pré-processo. Uma seqüência resumida, deste pré-processo, é descrita na continuação, considerando que este procedimento é aplicado ao problema que modela uma cavidade de seção retangular bidimensional. Para cada um dos itens que se mencionam é anexada sua respectiva tabela que resume o comando a ser usado, a opção ser escolhida para esse comando e uma breve explicação com as características principais.

- i) Para definir o método de integração, usar o comando *Option* (ver **TABELA 4.1**).
- ii) Para acessar e ler a malha de elementos finitos, usar comando *Mesh* (ver **TABELA 4.2**).
- iii) Para especificar as propriedades do ambiente onde as ondas sonoras se propagam, usar o comando *Material* (ver **TABELA 4.3**).
- iv) Para aplicar as condições iniciais de pressão sonora e sua primeira derivada, usar o comando *Initial Conditions* (ver **TABELA 4.4**).
- v) Para aplicar as condições de contorno de pressão, aceleração e impedância, usar o comando *Boundary Conditions* (ver **TABELA 4.4**).

TABELA 4.1 – Dados requeridos para configurar o método de simulação (comando *Option*).

Comando	Opção	Característica
Method	FEM	Define o método de integração numérica a ser usado para modelar o campo acústico. O campo inteiro do domínio acústico precisa ser discretizado
Domain	Time	A análise será realizada no domínio do tempo.
Solution Method	Variational	Seleciona o esquema de solução variacional, que conduz a um sistema simétrico de equações. Método associado automaticamente no FEM.
Region	Interior	É modelado o comportamento acústico no interior de um domínio fechado. O FEM só pode modelar problemas acústicos de interiores.
Hypotheses	Uncoupled	A interação fluido-estrutura é desprezível. A estrutura é rígida ou seu comportamento dinâmico é conhecido e não é modificado pelo fluido.

TABELA 4.2 - Dados requeridos para reconhecer a malha de elementos finitos (comando *Mesh*).

Comando	Opção	Característica
Mesh	Input	Administra a troca de informação entre o programa SYNOISE e uma base de dados externa. Os arquivos transferidos são formatados pelos comandos: Tipo de informação: mesh Formato a ser usado: ANSYS Nome do arquivo: *.cdb

TABELA 4.3 - Dados requeridos para definir as propriedades dos materiais (comando *Material*).

Comando	Opção	Característica
<i>Material</i> (Fluid)	<i>Acoustic</i> <i>Fluid</i>	O meio onde as ondas acústicas se propagam é caracterizado por dois parâmetros reais: ρ : densidade do fluido, [kg/m ³] c : velocidade do som, [m/s]
<i>Material</i> (Absorbent)	<i>Absorbent</i> <i>Porous</i>	Na discretização em elementos finitos do material absorvente, podem ser aplicadas as propriedades: ρ : densidade do fluido, [kg/m ³] c : velocidade do som, [m/s] R : resistividade, [adimensional] Ω : Porosidade, [adimensional] k_s : Fator estrutural, [Rayls/m]

TABELA 4.4 - Dados requeridos para estabelecer as condições iniciais (comando *Initial Conditions*).

Comando	Opção	Característica
<i>Initial Conditions</i>	<i>Initial</i>	Os valores de pressão, p , e a derivada da pressão no tempo, \dot{p} , devem ser definidas. Os valores iniciais por associação automática são zero.

TABELA 4.5 - Dados requeridos para estabelecer as condições de contorno (comando *Boundary Conditions*).

Comando	Opção	Característica
<i>Boundary Conditions</i>	<i>Boundary</i>	As condições de contorno são associadas a ítems da malha, tais como: nós, elementos ou faces dos elementos. É recomendável introduzir as condições de contorno depois de ter definido as características do material (comando <i>Material</i>) e as propriedades da geometria (comando <i>Geometry</i>), que eventualmente definem os graus de liberdade para os quais essas condições de contorno aplicam-se.
<i>Pressure Conditions</i>	<i>Pressure</i>	Condições de pressão úteis para modelar a superfície livre de um extremo aberto de uma cavidade (tubo reto que simula o canal auditivo humano). As condições de contorno de pressão são definidas como valores reais no domínio do tempo.
<i>Acceleration Boundary Conditions</i>	<i>Acceleration</i>	Numa análise transiente, o comportamento dinâmico das paredes de uma estrutura é considerado como aceleração normal. As paredes do canal auditivo são caracterizadas por uma aceleração normal zero (condição automática).
<i>Admittance Conditions</i>	<i>Admittance</i>	A admitância é definida como o valor inverso da impedância. No domínio do tempo são aceitos valores de impedância ou admitância como valores reais constantes.

Para avaliar a influência dos diferentes parâmetros da análise FEM Time foi realizado um estudo por COYETTE e IR (1997), que considerou os parâmetros de NEWMARK, o incremento no tempo e o refinamento de malha (diferentes densidades), no fenômeno de oscilação (distorção ou "overshoot") de um pulso de pressão, quando a excitação acústica era uma aceleração transiente aplicada à seção de entrada de um tubo reto. Os resultados obtidos permitem estabelecer algumas regras, para realizar

um desenho de uma malha de elementos finitos adequada e, conseqüentemente, conseguir uma solução da simulação numérica mais precisa e estável.

i) Influência dos parâmetros de NEWMARK

Com os valores convencionais de $\alpha = 0,25$ e $\delta = 0,50$, a solução transiente não exhibe nenhum erro de amplitude (não se introduz nenhum amortecimento numérico). O esquema de NEWMARK modificado, para $\alpha = 0,25(1+\varepsilon)^2$ e $\delta = 0,50 + \varepsilon$ (onde ε é um valor positivo pequeno, tipicamente de 0,01 a 0,1), introduz amortecimento numérico, que se incrementa excessivamente com a frequência.

ii) Incremento no tempo

A precisão da solução transiente é influenciada pelo incremento no tempo. É recomendado selecionar um incremento no tempo, Δt , menor que $T/4$, onde T é o período da frequência mais alta incluída no modelo. Assim, a precisão é melhor para incrementos no tempo pequenos; um incremento no tempo muito grande conduz a oscilações (“overshoot”) na solução. Por outro lado, deve ser levado em conta que o cálculo no domínio do tempo deve sempre começar no tempo inicial, isto é, no mesmo tempo para o qual as condições de contorno iniciais foram definidas (COYETTE e IR, 1997).

iii) Refinamento da malha

O refinamento da malha pode introduzir dispersão não desejada (oscilação). Este efeito pode ser reduzido refinando a malha (a “regra de seis elemento por comprimento de onda” não provê a precisão necessária usando o método convencional de Galerkin). Esta distorção pode ser eliminada refinando a densidade de malha, mais de 9 (nove) elementos por comprimento de onda, aumentando também o número de elementos por comprimento de onda. Uma malha mais fina provê uma solução superior para o mesmo incremento no tempo; uma malha muito grossa fornece uma solução que contém oscilações (overshoot).

Portanto, cabe notar que para uma análise estável e precisa da solução numérica, no domínio do tempo, usando o módulo FEM Time do SYSNOISE, o refinamento da malha e a seleção do incremento no tempo não são independentes um do outro. Para evitar oscilações ou efeitos de “overshoot”, ambos parâmetros deverão

ser selecionados de tal modo que o *produto da velocidade do som pelo incremento no tempo, $c \times \Delta t$, seja aproximadamente igual ao tamanho do elemento*. Em termos físicos, isto significa que a seleção do incremento no tempo deverá ser tal que a onda acústica viaje aproximadamente um comprimento de elemento por incremento no tempo.

4.3 Simulações Numéricas do Canal Auditivo Humano

4.3.1 Descrição do Canal Auditivo Humano Simulado

Foi usado o módulo FEM Time de análise de acústica transiente com elementos finitos, do software SYSNOISE 5.3A para resolver problemas de propagação de onda no domínio do tempo.

Considerou-se, para realizar os cálculos preliminares no domínio do tempo, uma geometria simples de um tubo fechado de duas dimensões, de 30 mm x 8 mm, com seção de corte retangular, que simula o canal auditivo humano externo. Esta consideração foi estabelecida levando em conta os valores das dimensões do ouvido humano, anteriormente descritas na **TABELA 2.1**, no capítulo 2. Mas, os valores de comprimento e largura do canal auditivo, foram assumidos como sendo 30 mm e 8 mm respectivamente, segundo a experiência e o trabalho em simulação numérica que utiliza estas dimensões especificadas por GERGES et.al (1998).

A malha de elementos finitos que simula o tubo uniforme reto foi gerada no programa ANSYS, como um modelo bidimensional no plano xy, utilizando-se elementos finitos tipo fluido (FLUID29), que são usados para modelar problemas em meios fluidos e nas interações da interface fluido-estrutura. Este elemento tem uma geometria retangular e um nó em cada um dos cantos do elemento, sendo que cada nó apresenta três graus de liberdade, especificamente, translações nas direções x e y, e pressão sonora (ANSYS, 1994). O tamanho do elemento, seguindo as regras que sugerem COYETTE e IR (1997), foi definido como 1 mm x 1 mm. Respeitando a regra de usar mais de 9 (nove) elementos por comprimento de onda (para uma frequência máxima de 20 kHz tem-se um comprimento de onda de 17 mm, que inclui 150 nós).

Desta forma, obtém-se uma malha retangular de 30 mm x 8 mm, contendo 240 elementos e 279 nós.

Uma vez escolhido o método e domínio da simulação numérica, neste caso o FEM Time, a malha de elementos finitos, que simula o canal auditivo humano como um tubo uniforme reto, é importada do programa ANSYS para o SYSNOISE.

O passo seguinte é impor as condições iniciais e de contorno para o sistema, nos elementos, nas superfícies (face superior e inferior) e no extremo final do canal (impedância acústica do tímpano). A excitação externa é o campo sonoro impulsivo obtido dos ensaios experimentais usando a fonte sonora do tipo descarga de ar comprimido. Logo, é possível calcular as respostas de pressão sonora no tempo. Na **FIGURA 4.2** se observa o canal auditivo simulado, em duas dimensões (*sem tampão*), bem como a impedância acústica do tímpano no extremo final, na posição $x = 0$ mm e a pressão sonora impulsiva que excita os nós na entrada do canal, na posição $x = 30$ mm.

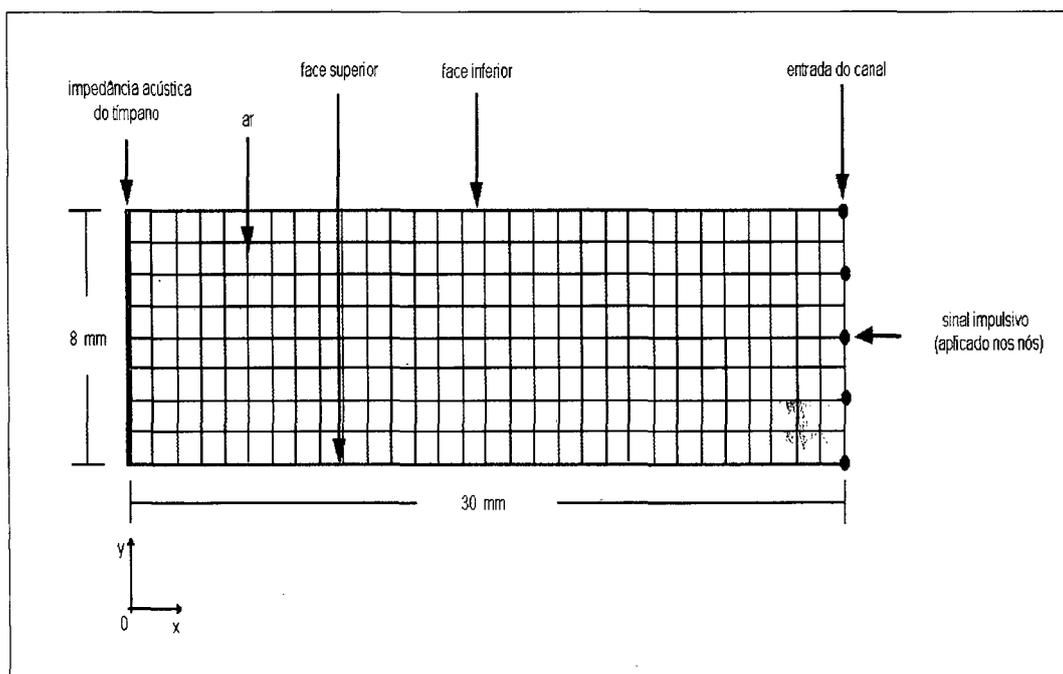


FIGURA 4.2 – Canal auditivo humano simulado na modelagem numérica, *sem* o uso do protetor auditivo tipo tampão.

Os dados requeridos para uma resposta transiente considera as propriedades do material fluido, neste caso o ar (entre 0 e 10 mm), ou seja, a velocidade do som (343 m/s) e a densidade do ar ($1,21 \text{ kg/m}^3$). As propriedades do material absorvente do protetor auditivo tipo tampão são assumidas como sendo: velocidade do som (320 m/s), densidade (98 kg/m^3), fator estrutural (7,9), porosidade (0,9) e resistividade (25.000 Ns/m^3), as quais são aplicadas aos elementos da malha entre 10 e 30 mm. As condições iniciais são impostas para todos os nós com valor 0 (zero) de pressão e derivada da pressão. As condições de contorno de pressão sonora impulsiva são distribuídas nos nós na posição 30 mm. Nas paredes do canal reto é utilizado o valor de impedância de 10^4 Ns/m^5 , sugerido por MOURAD (1990), quem destaca que as paredes do canal auditivo humano não atuam como um contorno totalmente rígido, cujo valor que é imposto nas faces superior e inferior da malha do canal auditivo simulado. Estas condições de contorno são apresentadas no esquema da **FIGURA 4.3**. O valor de impedância acústica para o tímpano humano foi fixado em 10^8 Ns/m^5 , estabelecida na extremidade do tubo reto, na posição 0 mm, como recomenda MOURAD (1990). Adicionalmente, também foram feitas simulações iniciais com valores fixos de impedância, a partir de 10^6 Ns/m^5 , mas não se observarem maiores diferenças, nas respostas de pressão sonora, no interior do canal auditivo simulado.

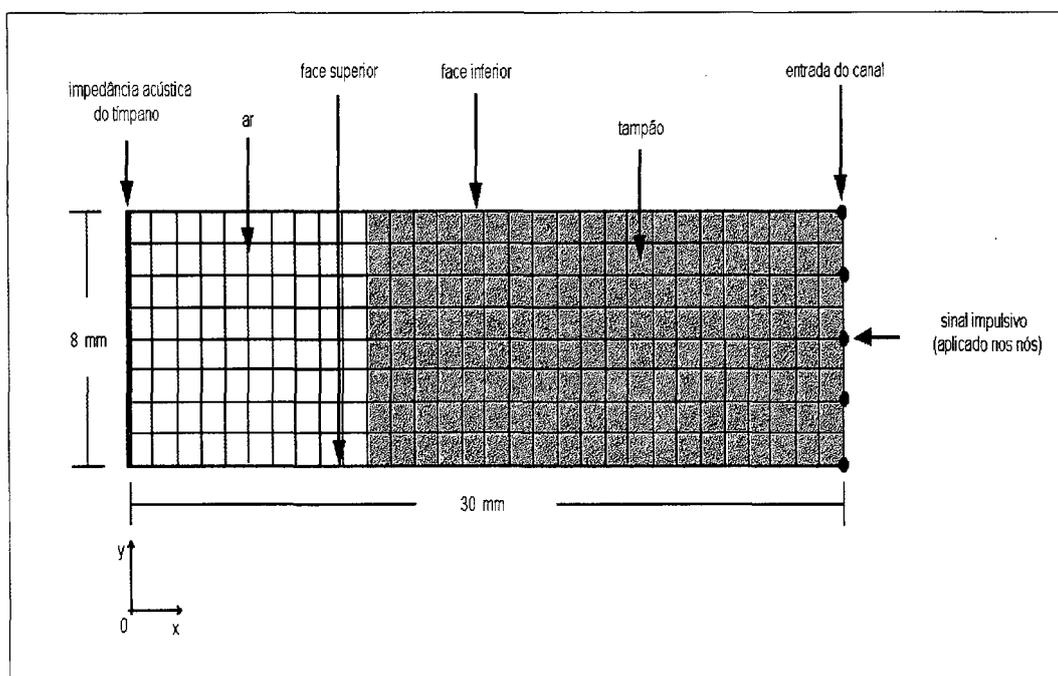


FIGURA 4.3 – Canal auditivo humano simulado na modelagem numérica, com o uso do protetor auditivo tipo tampão.

Obedecendo as regras recomendadas por COYETTE e IR (1997) e considerando o tamanho do elemento de 1 mm pode se obter um incremento no tempo de $2,9 \mu\text{s}$, para uma velocidade do som de 343 m/s, numa faixa de tempo total de 40 ms, o que leva a obter aproximadamente 13.800 iterações e, em consequência, um longo tempo de processamento associado (perto de 7 horas). Foi usado, na simulação, um tempo total de 40 ms porque este foi o valor observado nas medições dos ensaios experimentais, realizadas para a fonte impulsiva do tipo descarga de ar comprimido. Por outro lado, é necessário estimar um número de iterações adequadas, no tempo, para facilitar a estimação do espectro de frequência mediante a transformada rápida de Fourier com o uso do programa MATHCAD, o qual trabalha usando um algoritmo de transformada discreta de Fourier que exige um número de amostras da potência de dois, escrita como 2^N (com $N = 0, 1, 2, \dots$). Com estas duas condições é possível ajustar os parâmetros no tempo para satisfazer as regras propostas por COYETTE e IR (1997) e selecionar uma faixa de 40 ms, um incremento no tempo de $19,53 \mu\text{s}$, obtendo-se um número total de 2.048 iterações (2 horas de processamento aproximadamente) na integração numérica. Além disso, são escolhidos os parâmetros do esquema de integração de NEWMARK, como sendo $\alpha = 0,25$ e $\delta = 0,5$, assim a solução transiente não exibe erro de amplitude nem transtornos de oscilação.

Com todas estas condições já definidas, é implementada uma prova preliminar para efetuar uma simulação numérica, que utiliza um sinal senoidal como excitação na entrada do canal, com amplitude de 1 Pa e frequência de 1 kHz, num intervalo de 40 ms de tempo total e um incremento no tempo de $19,53 \mu\text{s}$. No primeiro caso se apresenta o sinal senoidal como excitação na entrada do canal (ver **FIGURA 4.4**) e na posição do tímpano (ver **FIGURA 4.5**), *sem* o uso do protetor tipo tampão e *sem* impedância acústica na posição do tímpano, além dos seus respectivos espectros mostrados na **FIGURA 4.6**. No segundo caso é feita uma simulação numérica aplicando como condição de contorno a impedância acústica do tímpano no extremo do canal. As correspondentes curvas são apresentadas nas **FIGURA 4.8** e **FIGURA 4.9**, nas quais se observa o sinal senoidal na entrada e na posição do tímpano do canal auditivo, no domínio do tempo e da frequência respectivamente. A terceira parte deste exemplo expõe o caso no qual é inserido o protetor auditivo, tipo tampão, no canal simulado. Então, é possível observar nas **FIGURA 4.10** e **FIGURA 4.11**, no domínio do

tempo e da frequência respectivamente, o sinal senoidal na posição do tímpano, *com* e *sem* o protetor tipo tampão e *com* a impedância acústica do tímpano. Por último, na **FIGURA 4.12** se mostra um resumo comparativo, das diferentes curvas dos espectros observadas, na posição do tímpano, para os casos *sem* e *com* tampão, na posição da entrada e do tímpano.

Apesar dos cuidados tomados na escolha dos parâmetros, e os seus valores, que controlam uma simulação numérica no tempo, aparecem picos característicos no domínio da frequência. Estes picos estão claramente relacionados com o fenômeno de distorção (*overshoot*). Desta forma é possível explicar o aparecimento desses picos pelo fato da onda senoidal, no interior do canal, apresentar distorção assemelhando-se a uma onda retangular, que no domínio da frequência gera harmônicos correspondentes a 3 e 9 kHz e podem estar excitando as ressonâncias do tubo reto aberto-fechado, de 30mm de comprimento, ou seja as frequências de 2858 e 8575 Hz. No exemplo da simulação, em que é inserido o tampão no canal auditivo e incluído o efeito da impedância acústica sobre o canal, observa-se que, no tempo, o sinal é atenuado e sofre um retardo, provocando uma defasagem, isto devido ao efeito do tampão que atua como amortecedor do sinal. Além disso, existe um tempo de subida que é maior do que o observado para o sinal original na entrada do canal. Para este mesmo sinal, no domínio da frequência, tem-se que em 1k Hz o pico é atenuado, e nas frequências superiores se aprecia uma notável redução dos níveis de pressão sonora, mas aparece em 419 Hz um pico de pressão sonora associado à ressonância do tampão na cavidade.

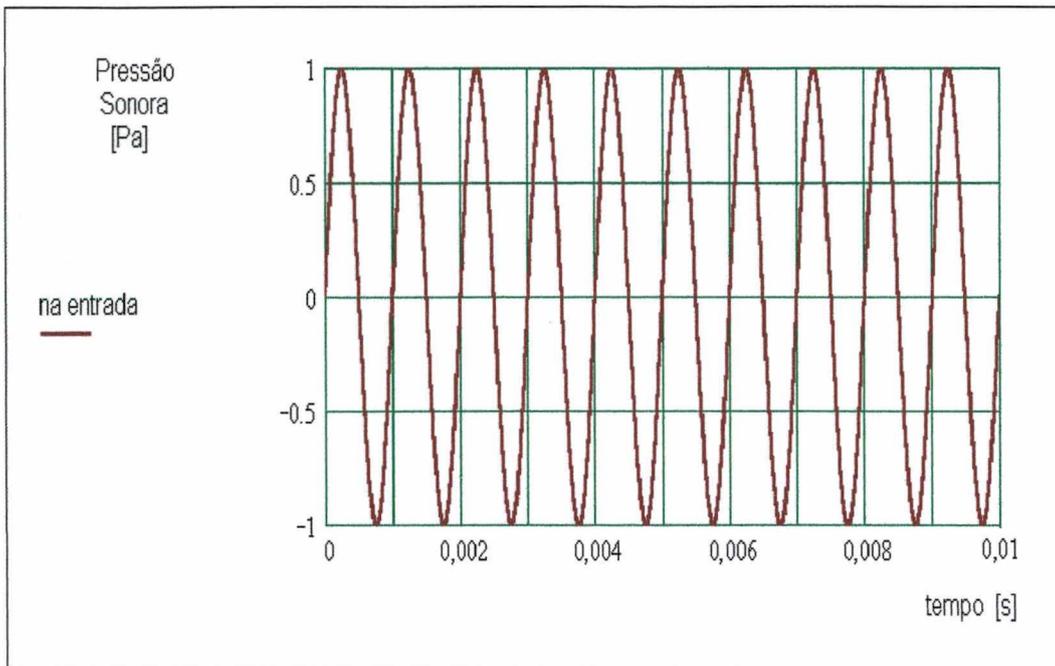


FIGURA 4.4 - Sinal senoidal na entrada do canal auditivo.

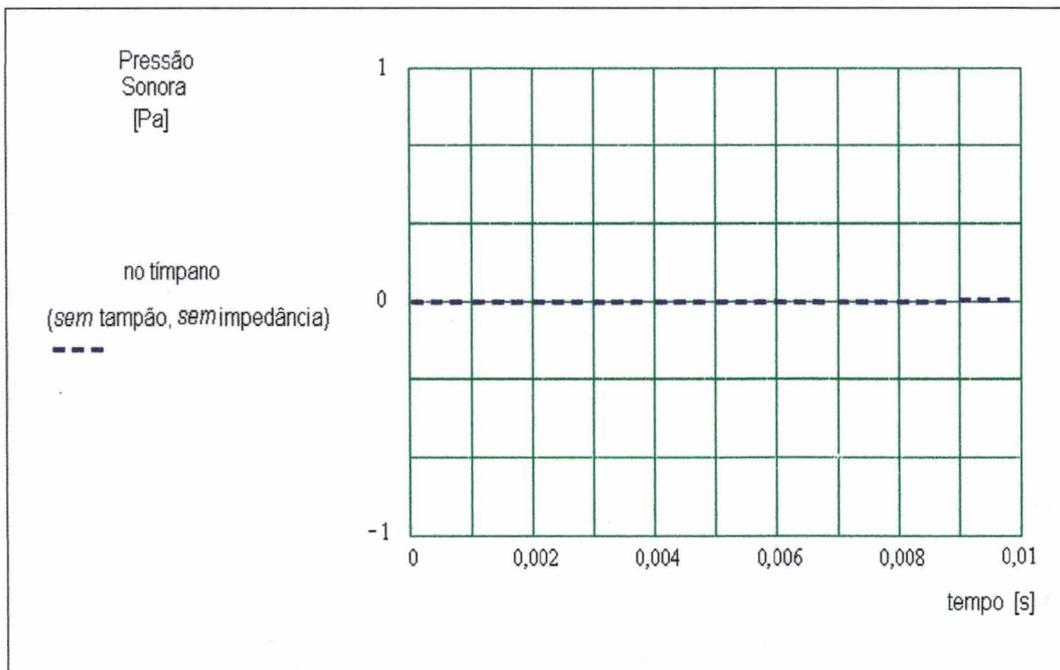


FIGURA 4.5 - Sinal senoidal na posição do tímpano do canal auditivo, sem o uso do protetor tipo tampão e sem impedância acústica.

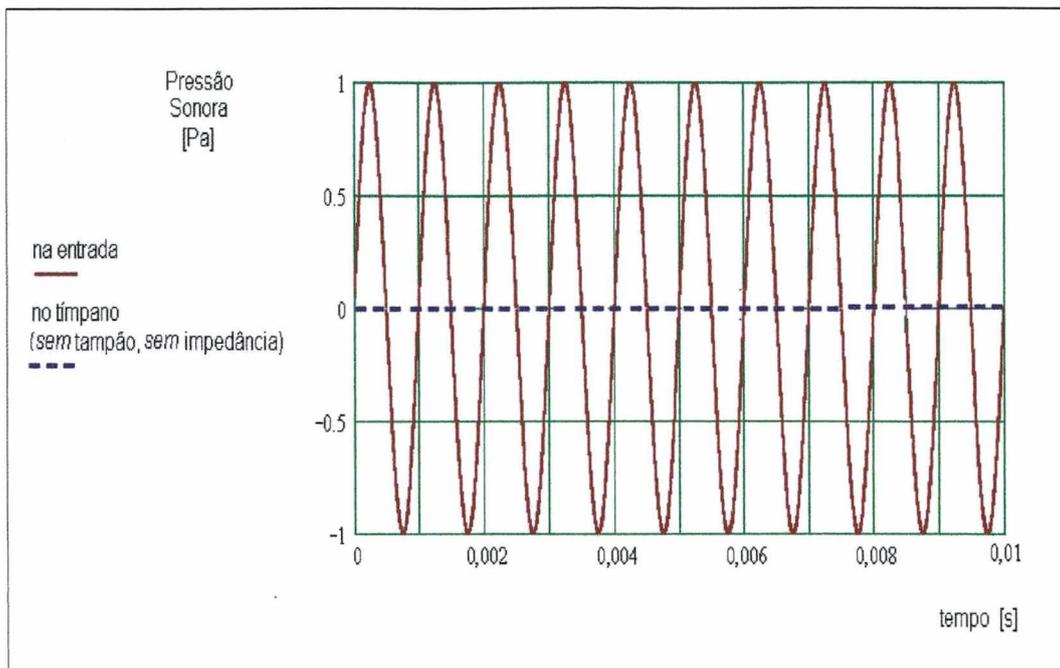


FIGURA 4.6 - Sinal senoidal na entrada e na posição do tímpano do canal auditivo, sem o uso do protetor tipo tampão e sem impedância acústica.

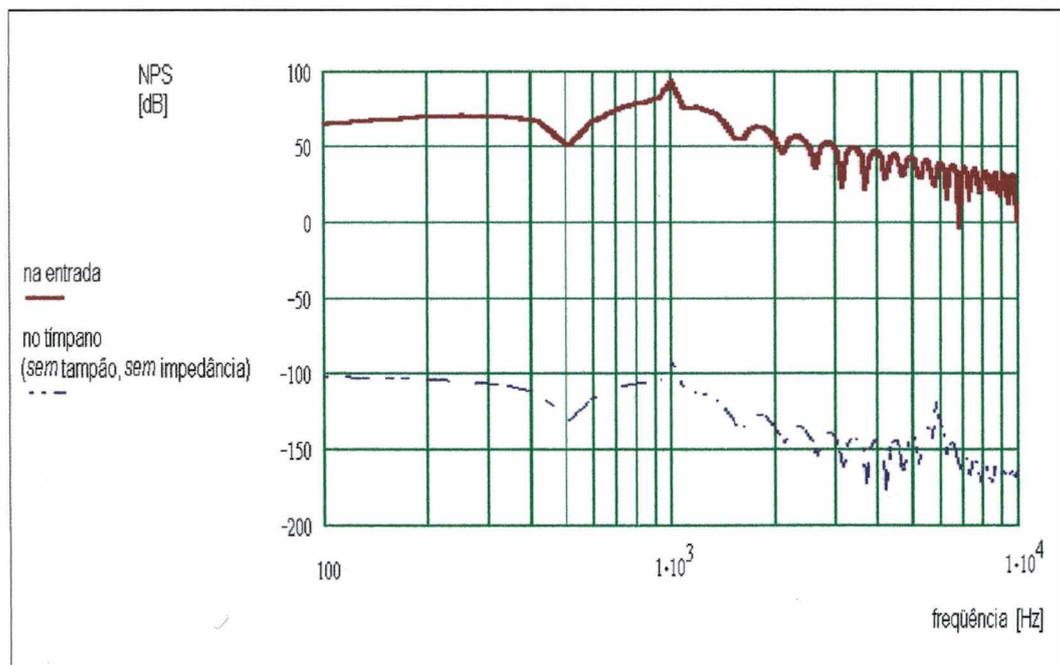


FIGURA 4.7 – Espectros do sinal senoidal na entrada e na posição do tímpano, sem o uso do protetor tipo tampão e sem impedância acústica.

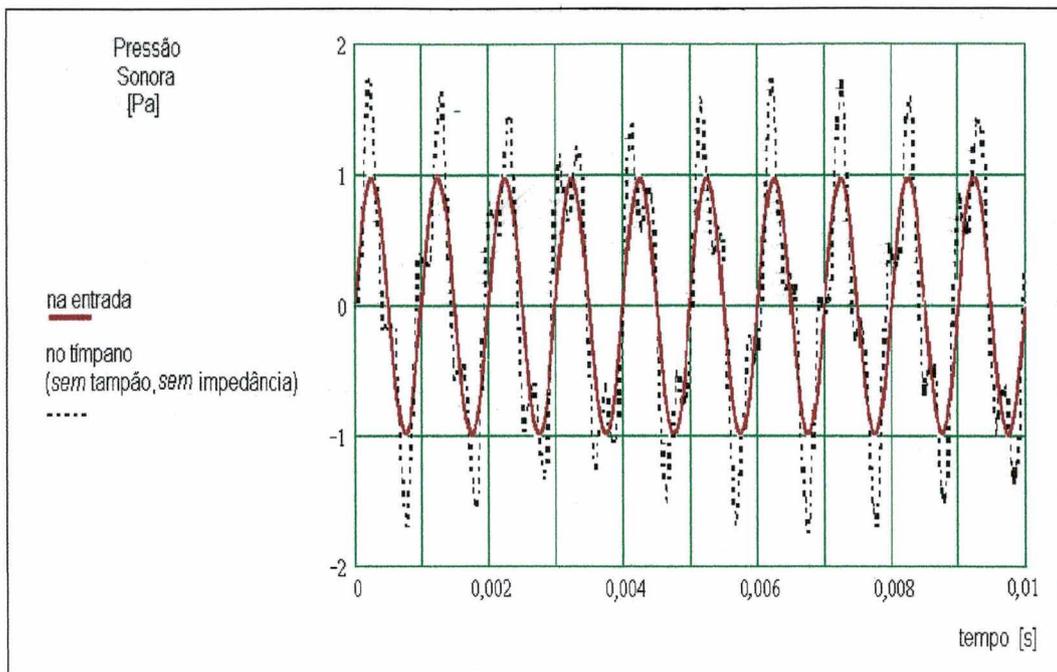


FIGURA 4.8 - Sinal senoidal na entrada e na posição do tímpano do canal auditivo, sem o uso do protetor tipo tampão e com impedância acústica.

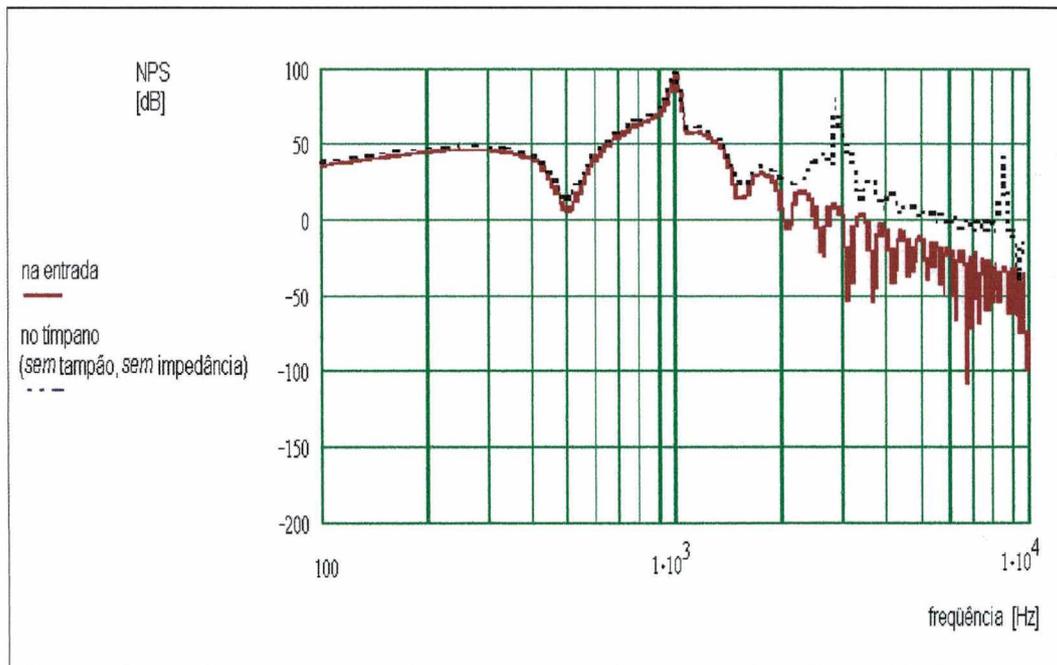


FIGURA 4.9 – Espectros do sinal senoidal na entrada e na posição do tímpano, sem o uso do protetor tipo tampão e com impedância acústica.

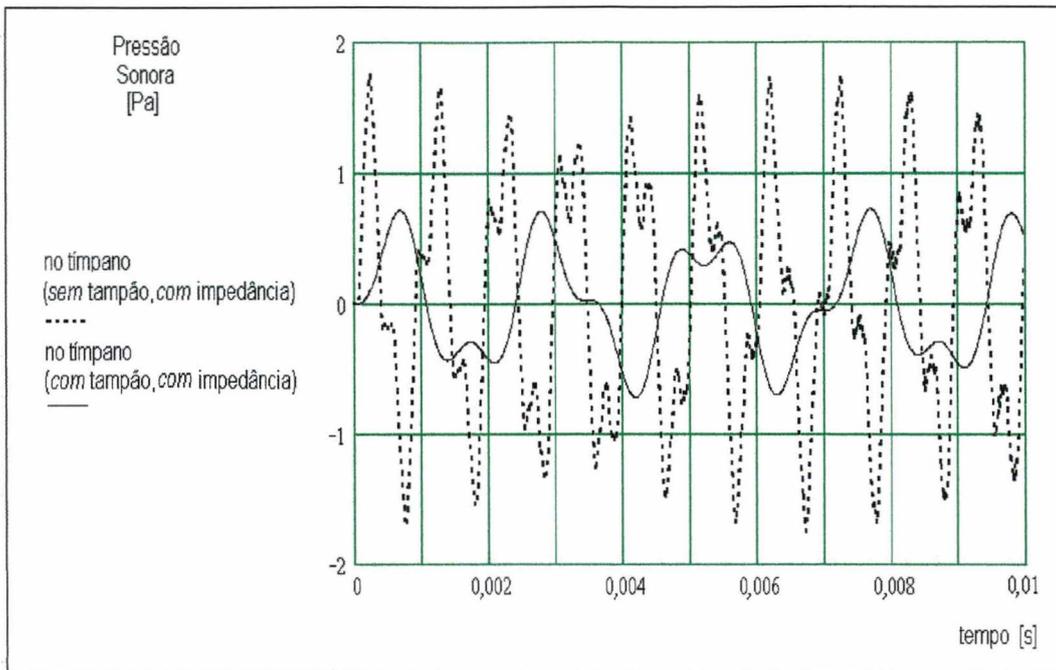


FIGURA 4.10 - Sinal senoidal na posição do tímpano do canal auditivo, sem e com o uso do protetor tipo tampão e com impedância acústica.

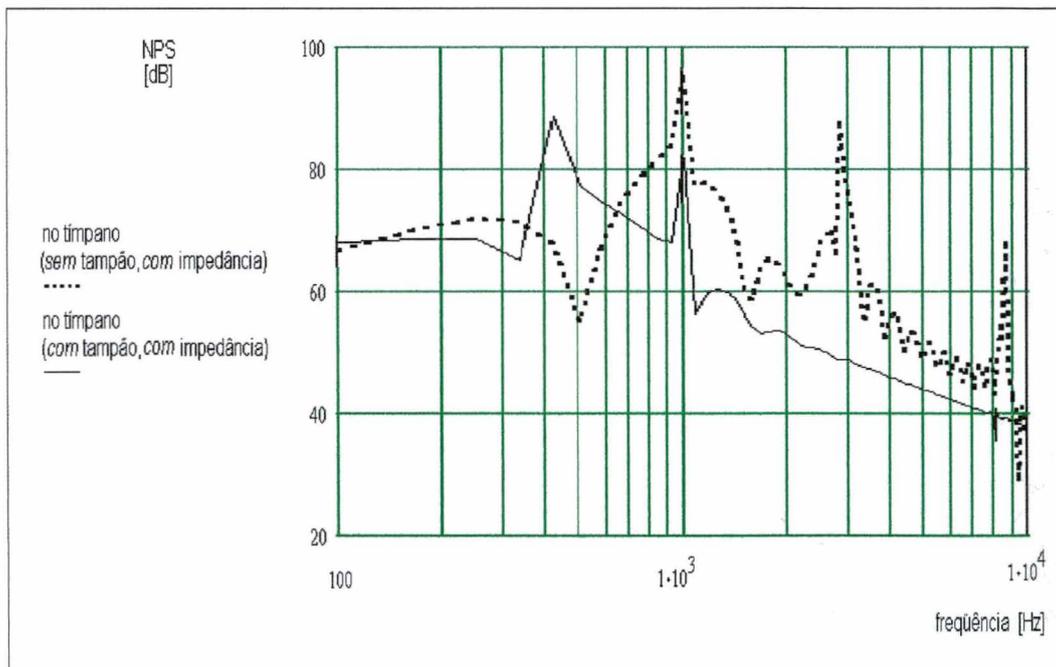


FIGURA 4.11 – Espectro do sinal senoidal na posição do tímpano do canal auditivo, sem e com o uso do protetor tipo tampão e com impedância acústica.

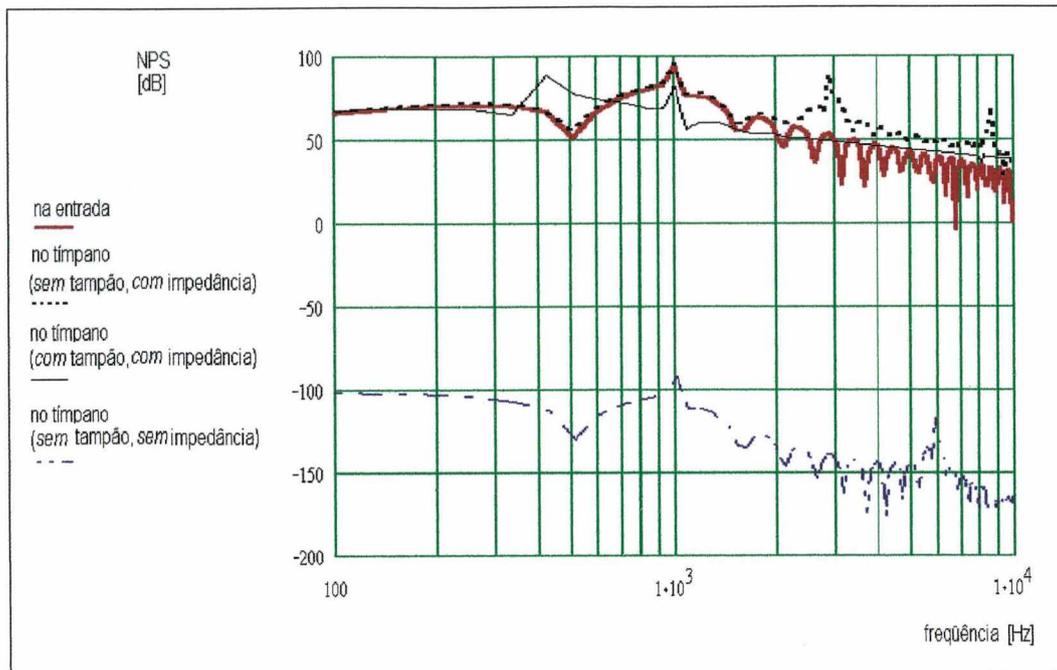


FIGURA 4.12 – Espectro do sinal senoidal na entrada e na posição do tímpano, *sem* e *com* o uso do protetor tipo tampão e *com* e *sem* impedância acústica.

4.3.2 Resultados das Simulações Numéricas com o Uso do Sistema Placa de Madeira

A simulação numérica por elementos finitos, como comentado e detalhado anteriormente, foi feita para uma faixa de tempo total de 40 ms, usando um incremento no tempo 19,53 μ s, para um campo sonoro impulsivo aplicado na entrada do canal simulado, gerado com o uso de uma fonte do tipo descarga de ar comprimido.

Da **FIGURA 4.13** até **4.18** são apresentadas três situações diferentes, nas quais foram consideradas como sinal de excitação as condições da **TABELA 3.4**, detalhada no Capítulo 3. As **FIGURA 4.13**, **4.15** e **4.17** mostram as pressões sonoras no domínio do tempo, e as **FIGURA 4.14**, **4.16** e **4.18** destacam os espectros de cada uma das curvas no tempo, respectivamente.

Pode-se observar que as curvas de pressão sonora, no tempo, *sem* o uso do tampão apresentam altos picos de pressão sonora, com tempos de subida e duração muito curtos. Estas curvas ajustam-se parcialmente com as formas de onda do tipo FRIEDLANDER, mas é possível associá-las a ondas de Duração A. Estas curvas

apresentam várias irregularidades, em sua forma, e elas contêm vários picos após o pulso principal. As curvas de pressão sonora *com* o uso do protetor auditivo tipo tampão mostram formas diferentes, quando são comparadas com às curvas *sem* tampão. Mas, também mostram propriedades de ondas do tipo FRIEDLANDER e com Duração A. As curvas *com* tampão são mais suaves e atenuadas; os tempos de subida e duração são mais longos, o nível de pressão sonora (pico) é reduzido e deslocado no tempo. Por outro lado, as curvas dos espectros exibem alguns picos em frequências bem definidas. Como foi mencionado anteriormente, no capítulo dos ensaios experimentais, estas frequências se relacionam com a ressonância do tubo da fonte impulsiva (para um comprimento de 0,25 m tem-se uma ressonância na proximidade dos 340 Hz), com a ressonância do tubo que simula o canal auditivo, para um comprimento de 0,030 m; a vibração do corpo rígido do tampão no canal auditivo e com a propagação da onda no comprimento deste protetor.

Na **TABELA 4.6** é apresentado um resumo com as diferentes características que identificam um ruído impulsivo, no tempo, para três condições de fontes impulsivas. Nesta tabela destacam-se os valores de tempo de subida, Duração A, nível de pressão sonora (pico) e perda de inserção (pico), *sem* e *com* o uso do protetor auditivo tipo tampão. Também são incluídas na **TABELA 4.7** algumas frequências associadas aos os valores mais altos de pressão sonora, nas condições *sem* e *com* o tampão na cavidade do tubo que simula o canal auditivo.

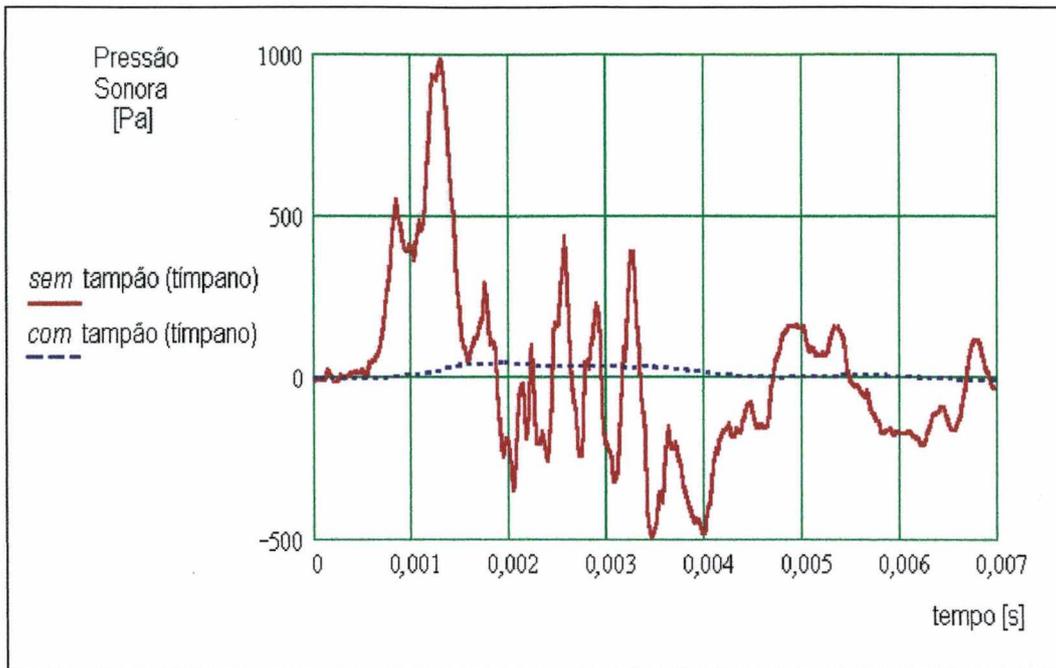


FIGURA 4.13 - Comparação da simulação numérica entre a pressão sonora, no domínio do tempo, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, *sem* e *com* o uso do tampão, para a fonte impulsiva 1.

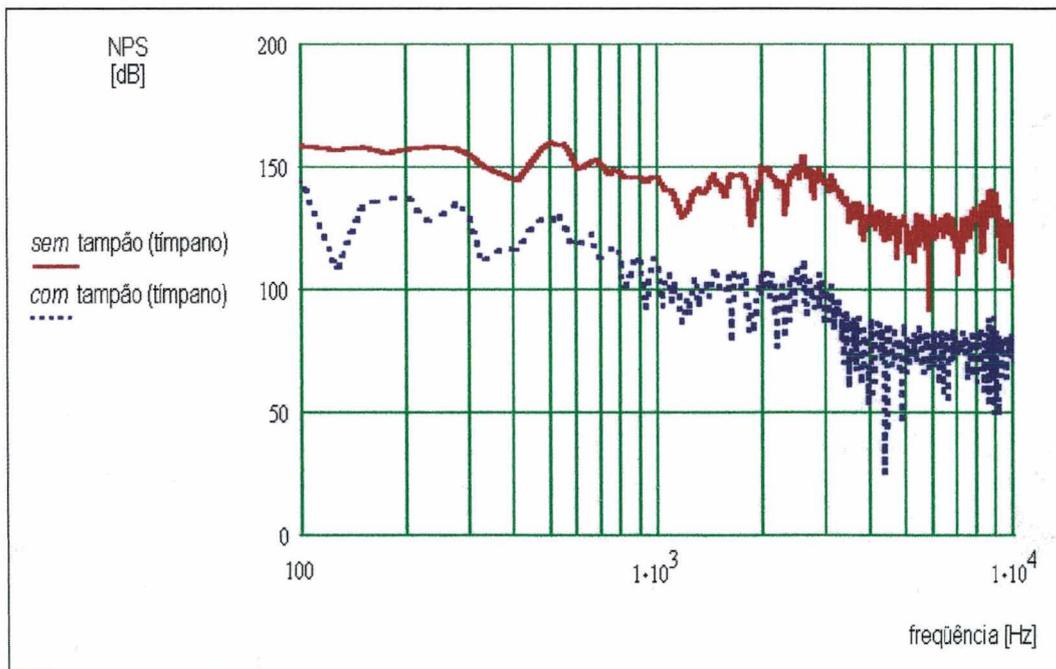


FIGURA 4.14 - Comparação da simulação numérica entre a pressão sonora, no domínio da frequência, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, *sem* e *com* o uso do tampão, para a fonte impulsiva 1.

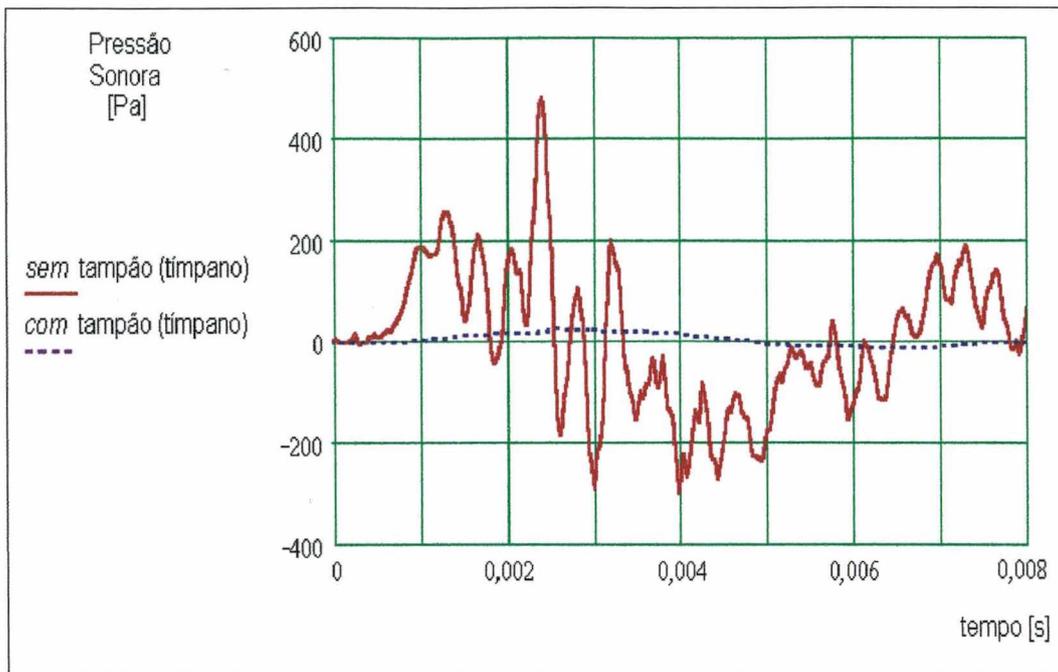


FIGURA 4.15 - Comparação da simulação numérica entre a pressão sonora, no domínio do tempo, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, *sem* e *com* o uso do tampão, para a fonte impulsiva 2.

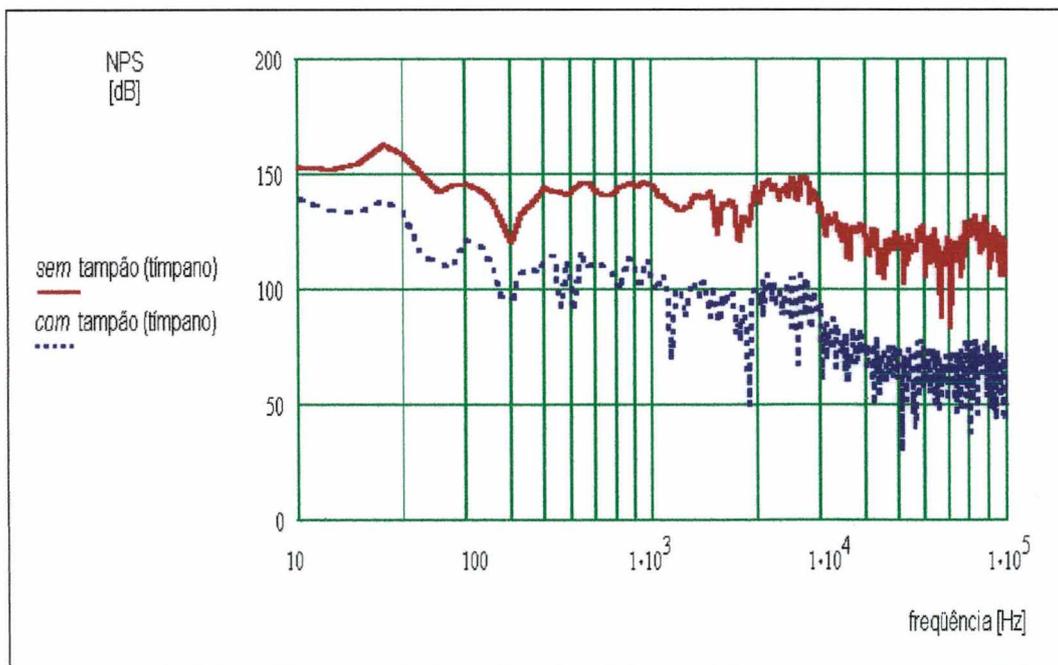


FIGURA 4.16 - Comparação da simulação numérica entre a pressão sonora, no domínio da frequência, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, *sem* e *com* o uso do tampão, para a fonte impulsiva 2.

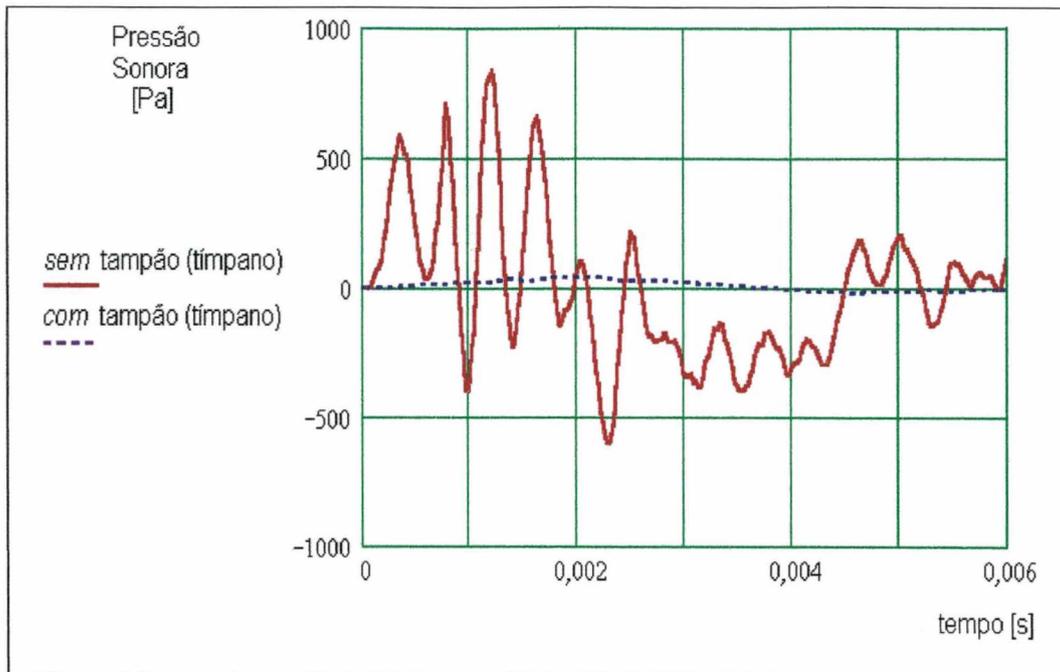


FIGURA 4.17 - Comparação da simulação numérica entre a pressão sonora, no domínio do tempo, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, *sem* e *com* o uso do tampão, para a fonte impulsiva 3.

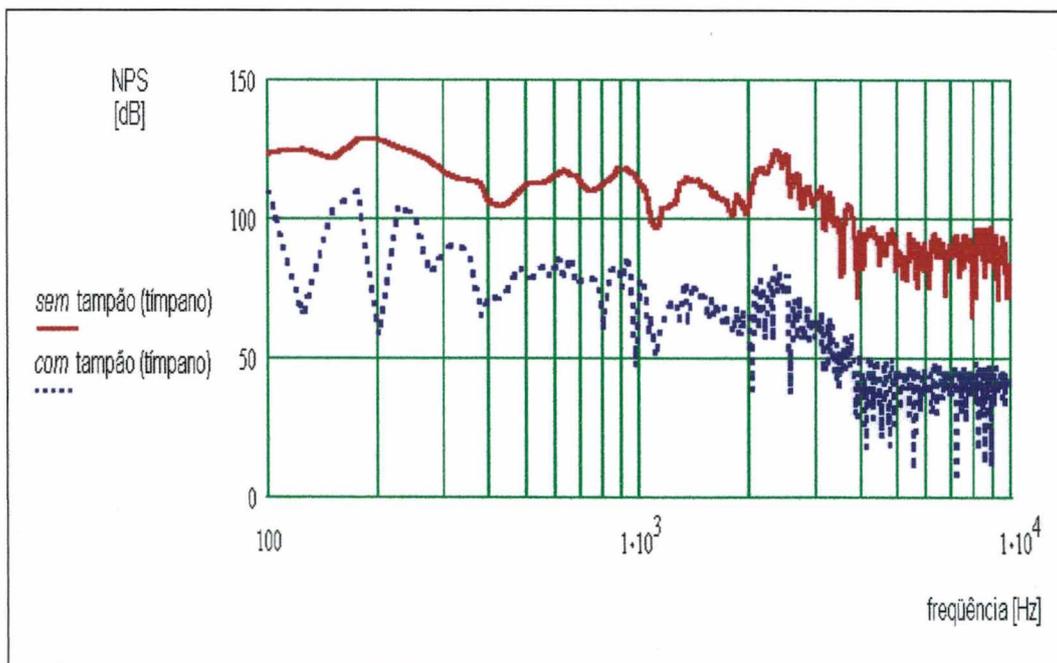


FIGURA 4.18 - Comparação da simulação numérica entre a pressão sonora, no domínio da frequência, na posição do tímpano do canal auditivo simulado, *sem* e *com* o uso do tampão, para a fonte impulsiva 3.

TABELA 4.6 - Comparação entre os parâmetros que caracterizam um ruído impulsivo, no domínio do tempo, com o uso da Placa de Madeira, *sem* e *com* o protetor auditivo tipo tampão.

Fonte Impulsiva	Tempo de Subida [ms]		Duração Tipo A [ms]		NPS (pico) [dB]		PI [dB]
	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	
1	1,04	1,31	1,61	4,10	153,9	127,0	26,9
2	2,07	2,09	2,39	4,36	147,6	122,2	25,4
3	1,19	1,70	1,29	3,53	152,4	126,0	26,4

TABELA 4.7 - Níveis de Pressão Sonora (NPS) e Perda de Inserção (PI), em algumas freqüências, para as fontes impulsivas 1, 2 e 3.

Fonte Impulsiva	Freqüência [Hz]	NPS [dB]		PI [dB]
		Sem	Com	
1	90	126,4	109,7	16,7
	495	127,1	97,2	29,9
	2530	121,5	75,7	45,8
	8675	106,3	54,0	52,3
2	200	128,7	106,1	22,6
	925	118,0	82,7	35,3
	2350	124,5	80,6	43,9
	8775	96,2	45,2	51,0
3	175	129,7	102,3	27,4
	625	112,3	79,6	32,7
	2675	115,5	70,3	45,2
	8125	98,4	43,2	55,2

Desta forma foi apresentado o método de simulação numérica que usa elementos finitos, no domínio do tempo, para problemas acústicos transientes com ruídos impulsivos. Assim, foi possível conhecer os parâmetros que controlam a simulação no tempo, tais como: densidade da malha (tamanho do elemento), tamanho

do incremento no tempo e os parâmetros de NEWMARK. Uma vez realizadas algumas simulações prévias foi possível modelar o caso das medições da fonte impulsiva 1 relativas aos ensaios experimentais apresentados no Capítulo 3.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são feitas as comparações entre os resultados dos ensaios experimentais em laboratório e as simulações numéricas pelo FEM, do canal auditivo humano simulado, em presença de campos sonoros impulsivos, *sem* e *com* o uso de um protetor auditivo tipo tampão. São discutidas as diferenças entre as comparações dos resultados e as limitações observadas na análise. As principais dificuldades encontradas e as restrições dos métodos utilizados são apresentadas.

5.1 Análise Conjunta dos Resultados Experimentais e Numéricos

A análise das curvas das medições e simulações numéricas foi realizada para o ensaio experimental que utilizou a placa de madeira como sistema de recepção do ruído impulsivo, com as três configurações de medição destacadas na **TABELA 3.3**, sendo variadas a distância entre os microfones e a fonte impulsiva, e a área da superfície da membrana. Também, é considerada a posição de medição do ruído impulsivo no interior do canal auditivo simulado experimental e numericamente, a qual correspondeu à posição do tímpano. Outro parâmetro de muita importância é a avaliação do efeito do tampão na cavidade auditiva, tendo-se assim resultados *sem* e *com* o tampão auditivo. Nestas condições é realizada uma comparação, no domínio do tempo, destacando os parâmetros que qualificam e quantificam o ruído impulsivo; também é feita uma análise no domínio da frequência para ressaltar a perda de inserção de algumas componentes do espectro.

As **FIGURA 5.1**, **5.3** e **5.5** apresentam as curvas de pressão sonora dos ensaios experimentais e das simulações numéricas, no domínio do tempo, para as fontes impulsivas 1, 2 e 3 respectivamente, *com* o protetor auditivo tipo tampão instalado na cavidade auditiva simulada. Nestas figuras se observa que os valores dos experimentos e das simulações apresentam diferenças em suas atenuações, mas mantêm uma forma similar. As curvas de pressão sonora da simulação numérica estão mais atenuadas que as mesmas dos ensaios Isto deve-se provavelmente ao fato de que na simulação são controladas as dimensões e as propriedades do material do

tampão (densidade, velocidade do som, resistividade, porosidade e resistência ao fluxo do ar) Ressalta-se que os valores aplicados a estas propriedades na simulação poderiam ter sido exageradas, e também ter-se sobredimensionado o comprimento do tampão no interior do canal auditivo. Mas, cabe destacar que o objetivo deste trabalho não consistiu em realizar um estudo paramétrico das propriedades acústicas do tampão, mas sim um estudo comparativo entre o comportamento, no tempo, do ruído impulsivo usado (descarga de ar comprimido), na cavidade timpânica *sem e com* o uso do protetor.

Vale a pena mencionar, também, a grande influência da atenuação sonora (pico) sobre os resultados, na presença de pressões sonoras muito altas (acima de 140 dB), o que leva o fenômeno a situar-se na faixa da acústica não-linear. As diferenças observadas nos experimentos e simulações, na **TABELA 5.1**, para o tempo de subida e para a Duração A são da ordem de 1 ms aproximadamente e para o nível de pressão sonora (pico) flutuam ao redor dos 12 dB, para o caso das fontes impulsivas 1, 2 e 3, *com* o uso do tampão.

Os valores de Perda de Inserção PI (pico) para os ensaios variam de 14 a 17 dB e no caso da simulação numérica permanece relativamente constante, entre 25 e 26 dB. Estes resultados estão compatíveis com os de MOURAD (1990), o qual obteve valores de perda de inserção (pico) de 24,8 e 23,5 dB, usando um modelo com elementos de contorno, para pulsos de longa e curta duração respectivamente, com um tampão elástico inserido 14 mm no interior do canal auditivo. Também SHENODA e ISING (1988) reportam dos seus experimentos com o ruído impulsivo, uma atenuação sonora de 20 dB para protetores tipo tampão.

Nas **FIGURA 5.2, 5.3 e 5.4** podem ser observados os espectros das curvas de pressão sonora no domínio da frequência, das fontes impulsiva 1, 2 e 3, *com* o uso do protetor auditivo tanto para os ensaios experimentais como para a simulação numérica. Nestas curvas é possível apreciar alguns picos para determinadas frequências que estão localizadas em torno de 100-200 Hz, 500-600 Hz, 2,5-3 kHz e em 8-9 kHz. É possível observar uma clara semelhança entre as curvas experimentais e da simulação, principalmente em alta frequência (a partir dos 2k Hz). Um resumo, com os

valores destas frequências, é mostrado na **TABELA 5.2**, na qual destaca-se a perda de inserção por causa do uso do tampão de proteção auditiva, notando-se que existe um aumento de perda de inserção na medida em que se avança em frequência e pouca diferença absoluta entre os valores dos ensaios experimentais e numéricos. Com este fato se constata que o protetor do tipo tampão é mais eficiente e efetivo em altas frequências para o tipo de ruído impulsivo utilizado.

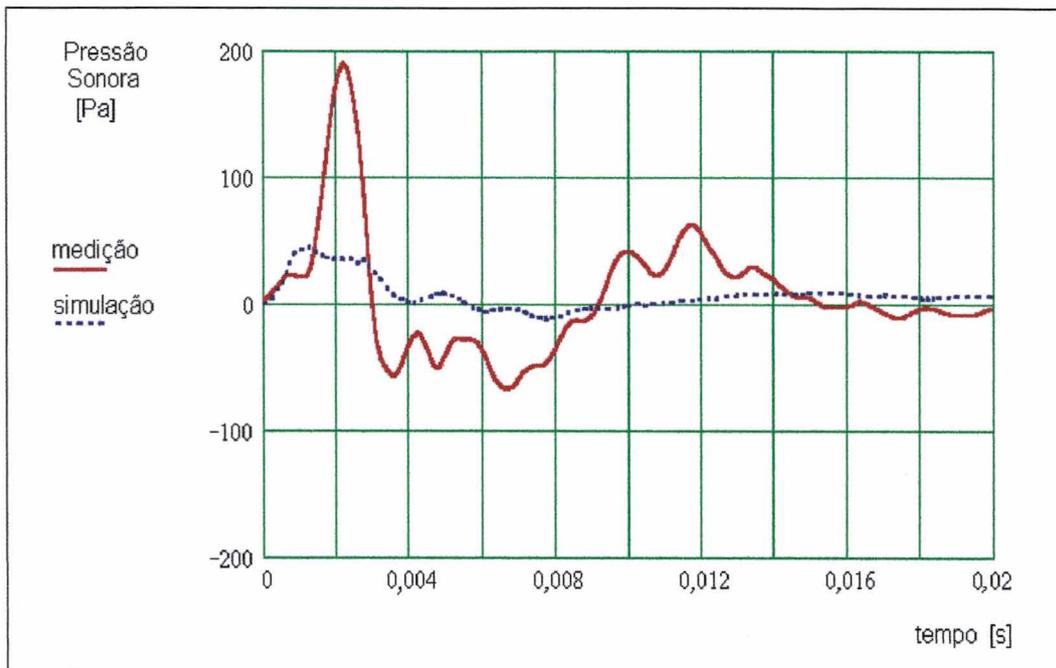


FIGURA 5.1 – Comparação entre medição experimental e simulação numérica, no domínio do tempo, com o uso do tampão, para a fonte impulsiva 1.

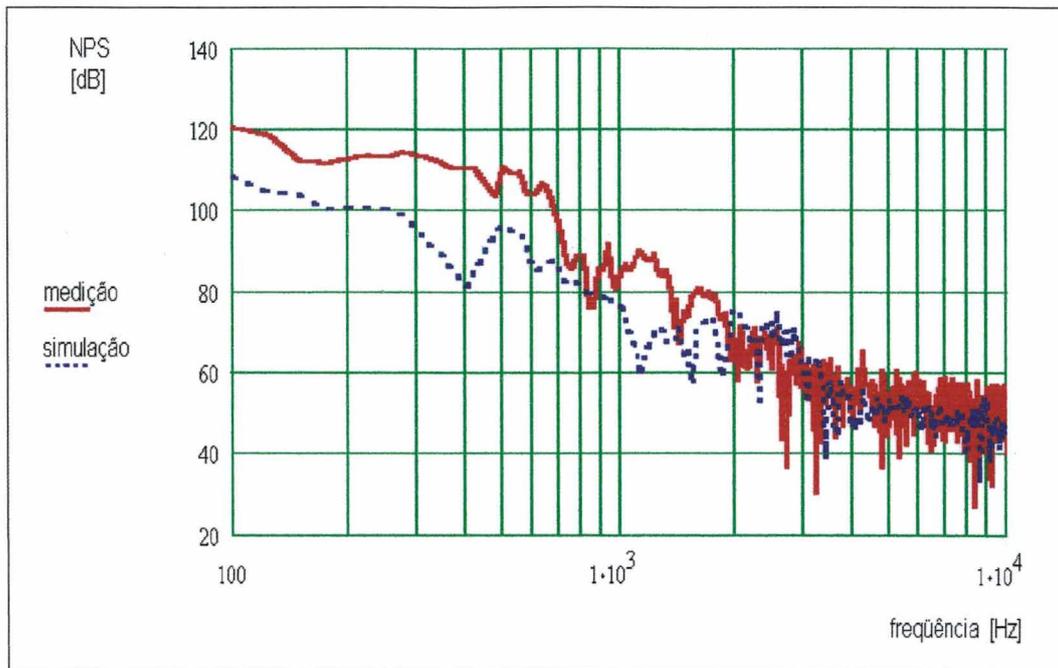


FIGURA 5.2 – Comparação entre medição experimental e simulação numérica, no domínio da frequência, com o uso do tampão, para a fonte impulsiva 1.

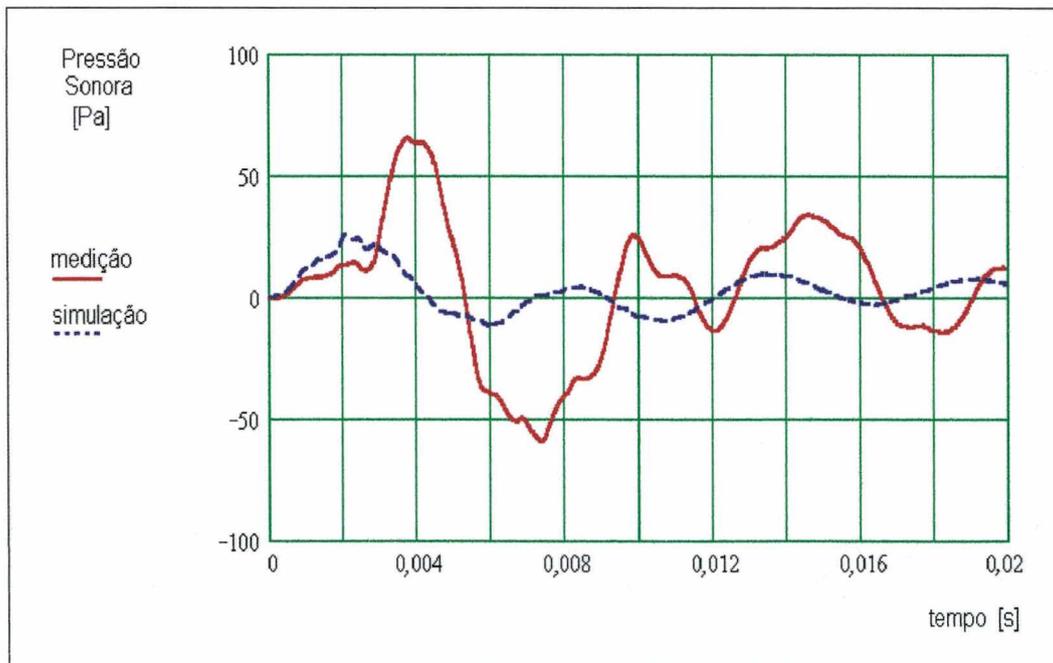


FIGURA 5.3 – Comparação entre medição e simulação numérica, no domínio do tempo, com o uso do tampão, para a fonte impulsiva 2.

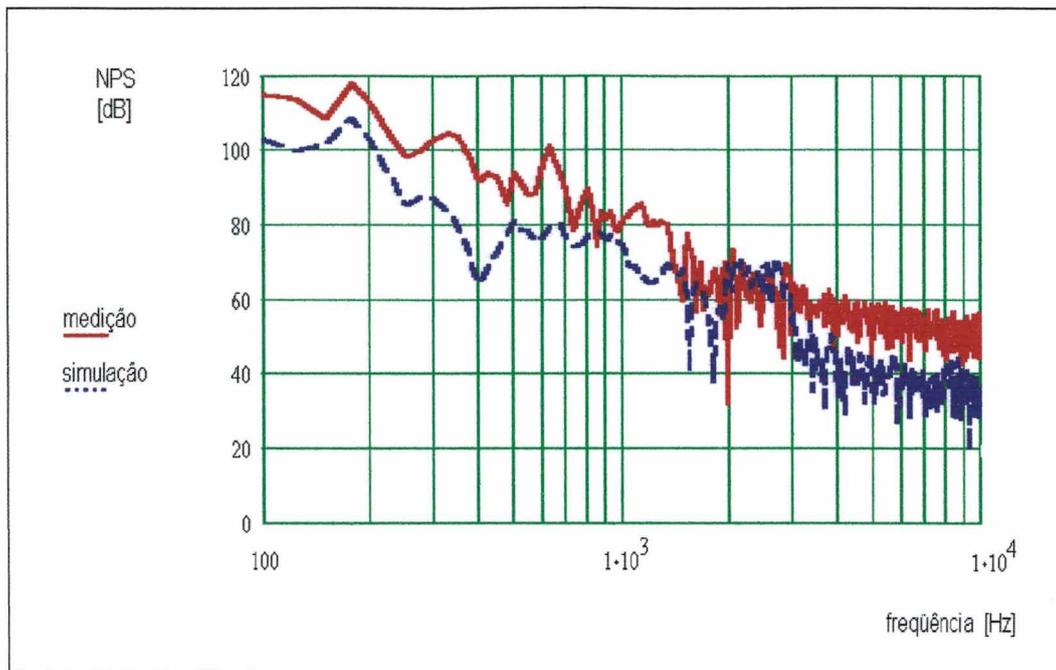


FIGURA 5.4 – Comparação entre medição experimental e simulação numérica, no domínio da frequência, com o uso do tampão, para a fonte impulsiva 2.

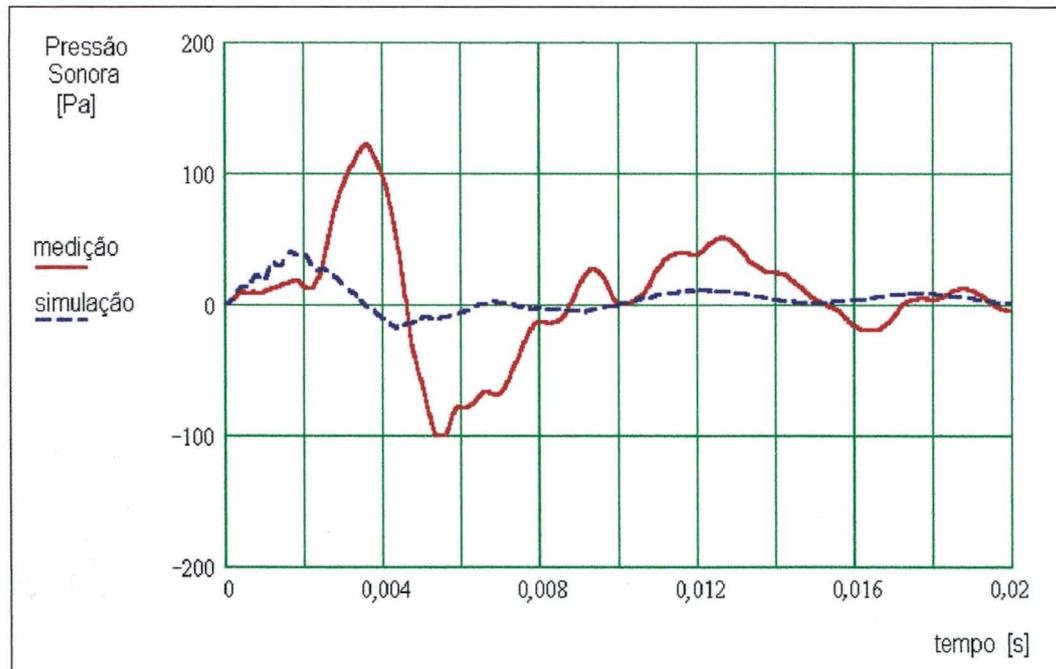


FIGURA 5.5 – Comparação entre medição experimental e simulação numérica, no domínio do tempo, com o uso do tampão, para a fonte impulsiva 3.

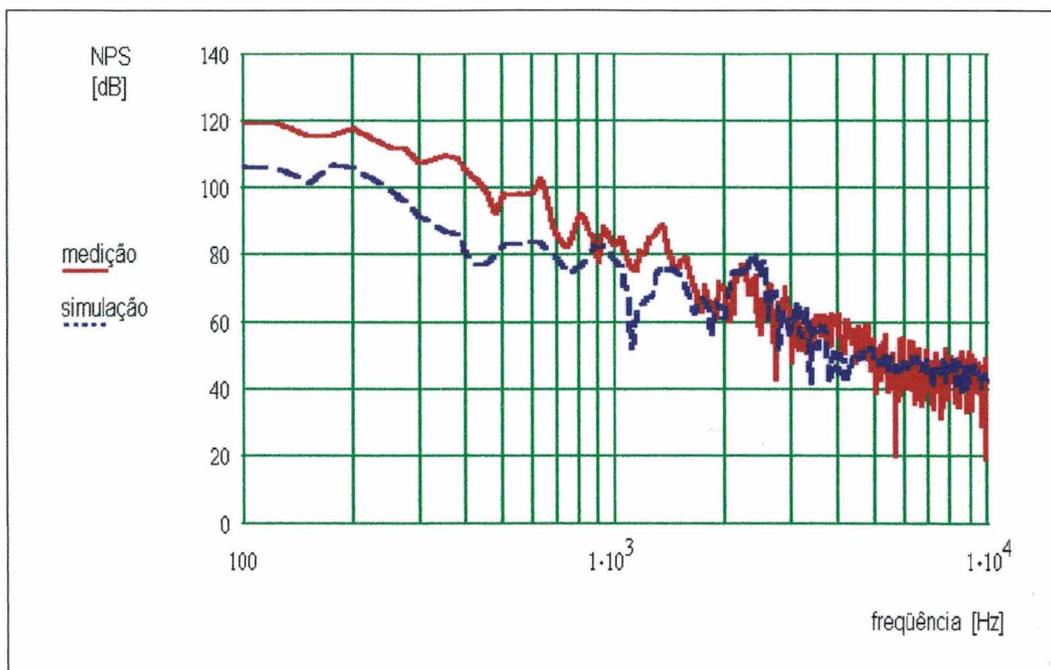


FIGURA 5.6 – Comparação entre medição experimental e simulação numérica, no domínio da frequência, com o uso do tampão, para a fonte impulsiva 3.

TABELA 5.1 - Comparação entre os resultados experimentais e simulação, no domínio do tempo, com o uso da placa de madeira, sem e com o tampão, para a fonte impulsiva 1,2 3.

Fonte Impulsiva		Tempo de Subida [ms]		Duração A [ms]		NPS (pico) [dB]		PI (pico) [dB]	Diferença [dB]
		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com		
1	Medição	1,02	2,23	1,59	3,01	153,7	139,5	14,2	12,7
	Simulação	1,04	1,31	1,61	4,10	153,9	127,0		
2	Medição	2,03	3,78	2,19	5,34	147,6	130,3	17,3	8,1
	Simulação	2,07	2,09	2,39	4,35	147,6	122,2		
3	Medição	1,17	3,59	1,29	4,62	152,4	135,7	16,7	9,7
	Simulação	1,19	1,69	1,30	3,52	152,4	126,0		

TABELA 5.2 - Comparação entre os resultados experimentais e simulação, em algumas frequências, com o uso da placa de madeira, *sem* e *com* o tampão, para as fontes impulsivas 1, 2 e 3.

Fonte Impulsiva	Frequência [Hz]	NPS [dB]		PI [dB]	Diferença [dB]	
		Sem	Com			
1	medição	88,8	126,4	121,5	4,9	11,8
	simulação		126,4	109,7	16,7	
	medição	495,8	127,1	111,1	16,0	13,9
	simulação		127,1	97,2	29,9	
	medição	2531,8	121,5	69,4	52,1	6,3
	simulação		121,5	75,7	45,8	
	medição	8675,5	106,3	52,8	53,5	1,2
	simulação		106,3	54,0	52,3	
2	medição	200	128,7	118,0	10,7	11,9
	simulação		128,7	106,1	22,6	
	medição	925	118,0	88,3	29,7	5,6
	simulação		118,0	82,7	35,3	
	medição	2350	124,5	73,8	50,7	6,8
	simulação		124,5	80,6	43,9	
	medição	8775	96,2	43,5	52,7	1,7
	simulação		96,2	45,2	51,0	
3	medição	175	129,7	118,6	11,1	16,3
	simulação		129,7	102,3	27,4	
	medição	625	112,3	101,0	11,3	21,4
	simulação		112,3	79,6	32,7	
	medição	2675	115,5	57,3	58,2	13,0
	simulação		115,5	70,3	45,2	
	medição	8125	96,2	43,5	52,7	2,5
	simulação		98,4	43,2	55,2	

Desta forma foram obtidos os parâmetros no domínio do tempo, podendo observar que os valores de tempo de subida e Duração A ajustam-se aos valores que caracterizam os ruídos impulsivos descritos neste trabalho. Comparativamente os valores das medições dos ensaios com os da simulação são próximos, apreciando-se maior diferença para os valores de pico e sua respectiva perda de inserção, possivelmente pela ocorrência de vazamento de som através das trajetórias laterais e a transmissão através do próprio tampão.

No caso dos ensaios experimentais e simulações numéricas efetuadas com a fonte impulsiva do tipo descarga de ar comprimido e o sistema de recepção da placa de

madeira, os níveis de pressão sonora estiveram acima dos 140 dB, isso é na faixa de acústica não linear e a diferença dos resultados de Perda de Inserção, no tempo, entre ensaios experimentais e simulação, vão de 8,1 a 12,7 dB. Mas, VERGARA e GERGES (1999) informam que nos ensaios realizados que consideraram a batida de palmas como fonte sonora impulsiva, para uma análise na faixa de acústica linear, a diferença entre os resultados numéricos e experimentais dos valores de Perda de Inserção (pico), no domínio do tempo, é menor que 2 dB para impulsos sonoros abaixo de 129,5 dB. Além, os autores concluem que a atenuação pico decresce quando se incrementam os níveis da excitação impulsiva. Na **TABELA 5.3** são apresentados os resultados de Perda de Inserção, no domínio do tempo, obtidos para três experimentos que usaram a fonte impulsiva do tipo bater de palmas.

TABELA 5.3 - Comparação entre os resultados experimentais e simulação, no domínio do tempo, com o uso da placa de madeira, sem e com o tampão, para três casos de batida de palmas.

	Fonte Impulsiva	NPS (pico) [dB]		PI (pico) [dB]	Diferença [dB]
		Sem	Com		
1	Medição	119,2	8,7	30,5	1,5
	Simulação	119,2	90,2	29,0	
2	Medição	126,1	98,0	28,1	1,7
	Simulação	125,7	99,3	26,4	
3	Medição	129,5	104,7	24,8	2,3
	Simulação	129,5	107,0	22,5	

É importante ressaltar que na comparação entre dados de um trabalho experimental e dados teóricos, inevitavelmente haverá diferenças, muitas vezes decorrentes de aproximações nos modelos teóricos (numéricos).

Deve-se mencionar a incerteza das medições causadas tanto por limitações internas da cadeia de medição como por agentes externos. Isto significa que são assumidos erros na análise dos resultados devido, principalmente, as diferentes calibrações efetuadas para os microfones de $\frac{1}{8}$ " e $\frac{1}{4}$ ", e à transmissão dos sinais na etapa de amplificação até a fase de registro e discretização do sinal. Estes fatores afetam a resolução na amplitude e na duração do sinal, de forma que a quantificação do sinal leva consigo um erro.

Outros erros que são levados em conta nos ensaios experimentais e que influenciam a análise dos resultados, estão relacionados com os efeitos externos à cadeia de medição, tais como: a transmissão lateral no sistema de recepção do sinal (placa de madeira, caixa de madeira e tubo de choque), transmissão de vibração ao sistema de transdutores utilizado e fenômenos de ressonâncias das estruturas presentes nos ensaios (paredes, pisos e cavidades).

Contudo, as diferenças observadas entre os dados experimentais e as simulações numéricas não comprometem a validade dos métodos usados para prever a atenuação sonora de protetores auditivos tipo tampão para ruídos impulsivos.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões do Trabalho Realizado

Neste trabalho, foram revisadas as principais características que identificam um ruído impulsivo, no domínio do tempo, tais como o tempo de subida, nível de pressão sonora (pico) e o tipo de duração. Foi feita, também, uma revisão do sistema auditivo humano externo e o seu comportamento em campos sonoros impulsivos.

Foi modelado um canal auditivo externo como um tubo reto, com impedância acústica do tímpano, e foram feitos os ensaios experimentais numa câmara semi-anecóica para três configurações de recepção do ruído impulsivo: placa de madeira, caixa de madeira e tubo de choque.

Foi desenvolvida uma fonte impulsiva para gerar ruídos impulsivos, que consistiu num mecanismo de câmaras de compressão e descompressão de ar, conhecido como sistema do tipo descarga de ar comprimido, no qual foram alteradas as suas dimensões (diâmetro e comprimento), controlada a pressão do ar que entra no tubo, além das propriedades físicas e da área da membrana (poliéster), utilizada para produzir as explosões.

Investigou-se o uso do FEM aplicado a problemas de acústica no domínio do tempo, o que permitiu modelar o canal auditivo externo como um tubo reto bidimensional, com impedância do tímpano, *sem* e *com* a inserção do protetor auditivo tipo tampão, com a ajuda dos programas computacionais ANSYS e SYSNOISE. Desta forma avaliaram-se os parâmetros que caracterizam um ruído impulsivo, no domínio do tempo, podendo observar que os valores de tempo de subida e Duração A ajustam-se aos valores que caracterizam os sinais impulsivos ideais do tipo FRIEDLANDER.

Comparativamente os valores dos resultados dos ensaios experimentais com os da simulação numérica, na fase experimental com a placa de madeira, estão relativamente próximos, apreciando-se maior diferença para os valores de níveis de pressão sonora (pico) e sua respectiva Perda de Inserção. Também, foram

apresentados os correspondentes espectros de frequência para ressaltar alguns componentes que têm uma importante participação na faixa audível humana de maior sensibilidade.

A técnica de elementos finitos, que utiliza o SYSNOISE, mostrou ser, de forma geral, uma ferramenta poderosa e rápida para efetuar a predição da resposta acústica, no domínio do tempo do canal auditivo simulado. Mas, deve-se levar sempre em conta as condições (parâmetros de NEWMARK, densidade da malha, tamanho do elemento e do incremento no tempo) que garantem uma simulação numérica mais precisa e estável, e evitar grandes custos computacionais. Com estas considerações é possível usar com confiança o método de elementos finitos para resolver problemas de acústica transiente e quantificar a atenuação de ruído impulsivo de protetores auditivos tipo tampão.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Analisando as diferentes assuntos desenvolvidos neste trabalho, como foram os conceitos abordados no tema do ruído impulsivo, os ensaios experimentais realizados e o método de simulação numérica usado, se sugere que outros trabalhos possam dar continuidade a esta pioneira pesquisa que relacionou os temas de ruído impulsivo, simulação numérica transiente e proteção auditiva. Neste sentido, as seguintes atividades de investigação são recomendadas para serem realizadas no futuro:

1. Desenvolver um sistema de geração do ruído impulsivo mais rápido e com poucas variáveis a serem controladas, ao invés da quantidade de parâmetros utilizados neste trabalho, ou seja, com isto se quer garantir um grau confiável de repetibilidade, que permita contar com uma fonte mais padronizada e gerar os impulsos sonoros, da forma mais adequada possível.
2. Derivar uma relação entre as características físicas da fonte impulsiva, por exemplo diâmetro, comprimento e materiais, e sua influência na modificação das propriedades do impulso no tempo, tais como o tempo de subida, o máximo valor de pressão sonora e a forma da onda.

3. Estabelecer outros parâmetros e critérios de avaliação de um ruído impulsivo, diferentes dos já apresentados neste trabalho. Estes novos parâmetros devem fazer menção, principalmente, à quantidade de energia contida no pulso.
4. Aperfeiçoar o sistema de recepção simultânea do campo sonoro impulsivo, de maneira a avaliar um sistema auditivo o mais real possível, levando em conta diferentes incidências do campo sonoro, como também as dimensões e formas do canal auditivo externo.
5. Formular modelos numéricos para três dimensões, cujas malhas dos elementos estimem configurações de tamanho e forma do pavilhão auditivo, do canal, do tímpano e da cabeça.
6. Analisar o efeito de redução sonora, para ruídos impulsivos, em ensaios experimentais e na modelagem numérica de um protetor tipo concha, e comprovar que este dispositivo de proteção fornece maior Perda de Inserção que um protetor tipo tampão. Além de estudar o comportamento acústico deste protetor considerando diferentes formas, distintos materiais e efeitos de instalação no sistema auditivo externo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKAY, A. A. *Review of Impact Noise*. Journal of the Acoustical Society of America, v. 64, n. 4, p. 977-987, 1978.
- ALBERTI, P.W. *Personal Hearing Protection in Industry*. Ravens Press. New York, 1982.
- ANSYS. *Procedures: User's Manual Ver. 1*. 1994.
- BATHE, K. L., WILSON, E. L. *Numerical Methods in Finite Element Analysis*. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs. New Jersey, 1976.
- BERANEK, L. L. *Acústica*. Edicient S.A.C., 1987.
- BRÜEL & KJÆR. *Microphone Handbook, v. 1: Chapter 2: Microphone Theory*. Dinamarca, 1996.
- BS EN 458: *Hearing Protectors – Recommendations for Selection, Use, Care and Maintenance – Guidance Document*. British Standard. England, 1994.
- BURNS, W. *Noise and Man*. John Wiley and Sons, Inc. New York, 1968.
- CASALI, J. G. *Curso Internacional: Exposição ao Ruído e Proteção da Audição*. São Paulo, Brasil, p. 91-98, 1996.
- COYETTE, J. P. *Application of Finite Element and Boundary Element Models to Transient Acoustic Problems*. IX International Conference on Vehicle Structural Mechanics and CAE. Belgium, 1995.
- COYETTE, J. P., IR, P. S. *Fem Time Domain, Analysis Investigation of Acoustic Wave Propagation in a 2d Rectangular Tube*. Sysnoise Ver 5.3. LMS Numerical Technologies, Belgium, 1997.

- CROCKER, M. *Encyclopedia of Acoustics*. John Wiley and Sons, Inc. New York, 1997.
- GERGES, S. N. Y. *Hearing Protectors*. 5^o International Congress in Sound and Vibration. Australia, 1997.
- GERGES, S. N. Y. *Ruido: Fundamentos y Control*. Brasil, 1998.
- GERGES, S. N. Y., BAVASTRI, E. Y.N., TRICHÉS, M., CALÇADA, M., CORDIOLI, J. *Atenuação de Ruído dos Protetores Auditivos por Modelagem Matemática*. I Congresso Ibero-americano de Acústica, Florianópolis, Brasil, p. 683-686, 1998.
- HAMERNIK, R. P., HSUEH K. D. *Impulse Noise: Some Definitions, Physical Acoustics and other Considerations*, Journal of the Acoustical Society of America, v. 90, n. 1, p. 189-196, 1991.
- IMTEC GmbH. *Data Acquisition Boards Manual*. Germany, 1998.
- IMTEC GmbH. *Insight Ver. 3.0: User Manual*, Germany, 1996.
- KRYTER, K., D. *The Effects of Noise on Man*. Academic Press. UK, 1970.
- LEE, CH-M., ROYSTER, L. H., CISKOWSKI, R. D. *Formulation for an FE and BE Coupled Problem and its Application to the Earmuff-Earcanal System*. Engineering Analysis with Boundary Elements n. 16, p. 305-315, 1995.
- LMS INTERNATIONAL. *Sysnoise Ver. 5.2: User Manual*. Belgium, 1995.
- MOURAD, K. M. *The Application on the Boundary Element Method to Predict the Response of a Differential Operator Model for a Coupled Viscoelastic-Acoustic System*, Thesis Post-Graduated. North Carolina State University. USA, 1990.
- NIOSH. *Criteria for a Recommended Standard Occupational Noise Exposure: Chapter 7: Research Needs*. U. S. Department of Health and Human Services. USA, 1998.

- PÄÄKKÖNEN, R., ANTTONEN, H., NISKANEN, J. *Noise Control on Military Shooting Ranges for Files*. Applied Acoustics n. 32, p. 49-60, 1991.
- RICE, C. G. *Human Response Effects of Impulse Noise*. Journal of Sound and Vibration, v. 190, n. 3, p. 525-543, 1996.
- SHENODA, F., ISING, H. *Sound Attenuation of Ear Protectors under Conditions of Impulsive Noise: Field Measurements*. Applied Acoustics, n. 23, p. 297-307, 1988.
- SMEATHEM, D., WHEELER, P. D. *On the Performance of Hearing Protectors in Impulsive Noise*. Applied Acoustics, v. 54, n. 2, p. 165-181, 1998.
- SMOORENBURG, G. F. *Assessment of Hearing Protector Performance in Impulsive Noise, Final Report*. TNO Human Factors Research Institute. Holanda, 1996.
- TEMKIM, S. *Elements of Acoustics*. John Wiley and Sons, Inc. New York, 1981.
- VERGARA, E. F., GERGES, S. N. Y. *Acoustics Modelling and Measurements of Hearing Protectors for Impulsive Noise*. Journal of the Acoustical Society of America, v. 105, n. 2, p. 1131, 1999.
- WEBSTER, D. A., BLACKSTOCK, D. T. *Finite-amplitude Saturation of Plane Sound Waves in Air*. Journal of the Acoustical Society of America, v. 62, n. 3, p. 518-523, 1977.